

PHYSIQUE

M .Salima Lassoued
"Doctorat Electronique"

Université Virtuelle de Tunis

2007

Introduction

☛ Ce cours de physique est conçu comme un outil à la disposition des étudiants futurs techniciens supérieurs des Instituts Supérieurs des Etudes Technologiques afin de les aider dans leur travail personnel, en particulier dans la pratique au sein des entreprises.

☛ Les exposés de ce cours sont généralement limités au cadre du programme de premier niveau de tronc commun de la section génie électrique avec un maximum d'explication de phénomènes physiques et un minimum de formules mathématiques et avec des annexes permettant de comprendre certaines démonstrations ou même des compléments de cours que l'étudiant sera ravi, je pense de les connaître afin de mieux saisir le cours.

☛ Le module s'adresse d'abord aux personnes ayant un Bac math, Science ou Technique. Il s'inscrit dans le programme du diplôme des études supérieures technologiques. L'étudiant ou l'étudiante devrait avoir une connaissance de base en français et en mathématique. Il a comme préalable le module de math.

☛ Ce « Guide d'étude » a pour objectif de vous préparer à suivre le cours. Il définit en quelque sorte un mode d'emploi, non seulement pour le matériel didactique du cours, mais aussi pour le cheminement que vous devez adopter et les différentes exigences auxquelles vous devez répondre.

But et objectifs du cours

☛ Aujourd'hui, la physique a pour objet la découverte des lois qui régissent les phénomènes de la nature. Le travail du physicien est fait d'interrogations constantes, toujours mieux formulées à partir des résultats obtenus et des vérifications effectuées au moyen de l'expérience.

☛ Le but de ce module est de se familiariser avec la science de la chaleur (ou science du feu) qui étudiait les manifestations et les sensations du chaud et du froid ainsi qu'avec l'optique ou phénomènes lumineux. Plus spécifiquement, au terme de ce module, l'étudiant ou l'étudiante sera en mesure :

- **d'expliquer** des phénomènes observés dans la vie courante ou dans la nature.
- **de faire** des calculs d'ordres de grandeur.
- **d'analyser** la prédiction de l'influence d'un paramètre sur les phénomènes observés.
- **de donner** un avis professionnel sur l'efficacité d'une méthode de calcul.
- etc...

Approche pédagogique

☛ Ce cours de physique est conçu selon une approche pédagogique propre à la formation à distance. Le matériel didactique et la formule utilisée vous permettent d'adopter une démarche d'apprentissage autonome. Vous pouvez ainsi gérer votre temps d'étude et prendre en charge votre formation.

➤ **Toutefois**, cette prise en charge est soutenue par la personne responsable de l'encadrement (le tuteur ou la tutrice), pendant tout le semestre. Sa tâche est de vous faciliter les conditions d'apprentissage et de vous aider dans votre démarche, de façon à ce que vous atteigniez les objectifs du cours. Il va de soi que le tuteur ou la tutrice ne donne pas de réponses aux activités notées. Vous pouvez communiquer avec votre tuteur ou votre tutrice par le courrier électronique offert sur le site du cours ou en posant vos questions sur le forum. Votre tuteur ou votre tutrice y répondra dans les 48 heures.

Introduction et Préliminaire:

Qui est le thermicien? Qu'est-ce que la thermique?

Souvent décrit comme "celui qui s'occupe des chaudières et des réseaux de vapeur ", le thermicien sera bien plus, pour nous, celui qui s'intéresse à la compréhension et à la description des flux de chaleur et des champs de température dans les équipements industriels ou dans les produits en cours d'utilisation.

Les domaines d'application de la thermique sont très variés : ils s'étendent du plus petit phénomène élémentaire (la solidification d'une goutte de métal, l'échauffement d'un outil, le refroidissement par un jet d'air, etc.), au plus vaste ensemble industriel (une coulée continue verticale, la modélisation d'un four, le bilan énergétique d'une usine, etc...).

I - LA CHALEUR

1) Définition

Nous dirons simplement, ici, que c'est une forme d'énergie dont les manifestations ont la particularité d'être directement ressenties par le corps humain.

En effet, les notions de chaud et de froid résultent de la perception par nos sens de la présence ou l'absence de chaleur, ou plus exactement de l'accroissement ou de la diminution de la chaleur.

Disons aussi que, lorsqu'on introduit une quantité de chaleur dans un corps, **la température** de ce dernier augmente ; dans le cas d'un changement de phase, tout ou partie de cette chaleur est utilisée pour satisfaire les besoins thermiques liés à ce phénomène (fusion, évaporation, etc.).

Donc nous pouvons dire que tous les corps matériels se présentant sous l'un des trois aspects physiques (solide, liquide ou gazeux) contiennent en eux même une certaine quantité de chaleur

définie comme étant aussi une énergie calorifique.

Comme la chaleur est une forme spéciale de l'énergie :

♣ Elle est exprimée (Annexe -1-) donc en Joule [J],
en Calories [Cal] ou en kilocalories [kcal].

♣ A l'échelle microscopique, c'est une énergie
échangée sous forme désordonnée par agitation
moléculaire (c'est à dire par chocs entre les molécules en mouvement).

♣ Elle s'écoule toujours d'une source chaude vers
une source froide (Figure 1).

♣ La chaleur n'est pas une fonction d'état,
(Voir annexe 2).

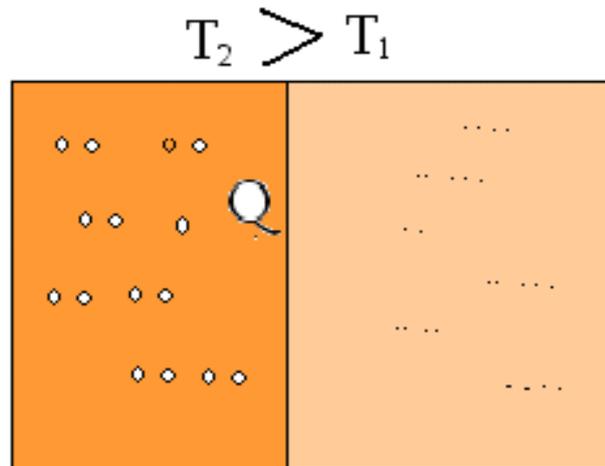


Figure 1: Transfert et mouvement de la chaleur Q par l'agitation moléculaire

II - LES DIFFÉRENTES FORMES DE L'ÉNERGIE :

"chaleur"

A

A - La chaleur sensible

La chaleur sensible représente la quantité qu'il faut retirer ou fournir à un corps (solide, liquide, vapeur) pour modifier sa température sans modifier son état physique (Schéma 1).

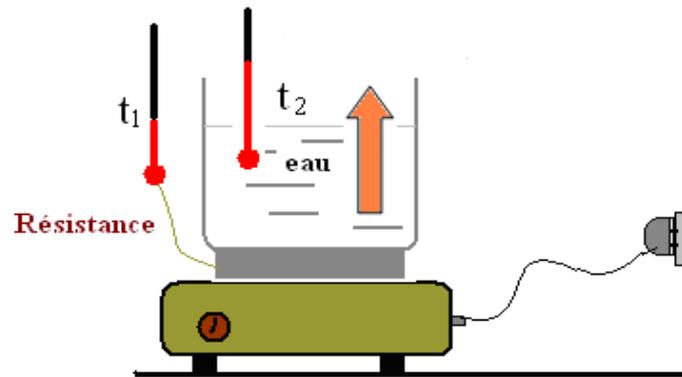


Schéma 1- Echauffement de l'eau contenu dans un récipient en contact avec une résistance électrique

La chaleur sensible est :

- liée à une **variation de température ΔT** du système par suite d'un réchauffement ou d'un refroidissement.
- proportionnelle à la masse de matière et à la différence de température ΔT .

D'ou :

Pour une transformation infinitésimale :

$$dQ = m C dT \quad (1)$$

m désigne la masse du matériau.

dT étant la variation infinitésimale de la température.

C désigne la chaleur massique du matériau.

L'équation de dimension de C est $[C] =$

Et : $J.kg^{-1}.K^{-1}$.

Pour une transformation

finie :

La chaleur Q échangée lors d'une transformation finie entre l'état 1 et l'état 2 s'obtient en intégrant la relation (1) précédente valable pour une transformation infinitésimale ;

$$Q = \int m C dT \quad (2)$$

On distingue alors plusieurs cas selon la valeur de la chaleur massique C.

*** Lorsque la chaleur massique C reste constante .

$$Q_{12} = \int_{12} m C dT = m C \int_{12} dT$$

Soit alors :

$$Q_{12} = m C \Delta T = m C (T_2 - T_1) = m C (t_2 - t_1)$$

(3)

*** Lorsque la chaleur massique C est une fonction de la température T , soit :

$$C = f(T) = a_0 + a T + b T^2.$$

On a alors :

(4)

Remarque 1 :

Dans le cas où la valeur de la chaleur massique varie dans un intervalle de température $[T_1, T_2]$, (voir Annexe -3-).

Remarque 2 :

Il faut distinguer généralement entre chaleur massique à **pression constante** ou à **volume constant** notée C_p ou C_v .

Ces notions de C_p ou C_v seront mieux définies plus tard dans le deuxième chapitre, il suffit pour ce chapitre de savoir que :

Pour les **solides** ou les liquides, on a $C_p \approx C_v = C$.

Pour les **gaz** : $C_p \neq C_v$ et $C_p / C_v = \gamma$.

Remarque 3

De tous les corps c'est l'**eau** qui a la plus grande valeur de la chaleur massique, ce qui explique la valeur élevée des chaleurs massiques des denrées alimentaires (Jus, boissons gazeuses, etc...) qui sont des matières organiques contenant beaucoup d'eau.

La chaleur massique de l'eau vaut : $4.185 \cdot 10^3$
 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

A-1

Chaleur Massique, Chaleur Molaire

Et Capacité Calorifique

A-1-1

La Chaleur Massique

La chaleur massique d'un corps représente la quantité de chaleur **C** qu'il faudrait fournir à l'unité de masse de ce corps pour **élever** sa température de **1 Kelvin ou 1°C**.

L'équation de dimension de **C** est $[C] = \text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

A-1-2

La Chaleur Molaire

De la même manière, on définit la chaleur molaire d'un corps gazeux, comme étant la quantité de chaleur nécessaire pour **élever** de 1 Kelvin ou 1°C la température d'une mole de ce gaz, Ce qui nous donne :

$$dQ = n C dT \quad (5)$$

n désigne le nombre de moles de gaz.

Q désigne la chaleur en Joules.

L'équation de dimension de C est $[C] = \text{J.mole}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

A - 1 - 3

La Capacité Calorifique

Si Q une quantité de chaleur fourni par un corps donné de masse m , de chaleur massique C lors de son échauffement de la température θ_1 °C à θ_2 °C tel que :

$$dQ = m C dT \quad (6)$$

La quantité ($m C$) est définit comme étant la capacité calorifique de ce corps et noté C avec :

L'équation de dimension de C est $[C] = \text{J.K}^{-1}$.

B - La chaleur latente

B

Un apport de chaleur n'entraîne pas toujours une augmentation de température. Dans certains cas, il favorise une transformation à température constante (si la pression demeure **identique**), un changement d'état.

Si nous imaginons que nous apportons de la chaleur à un morceau de glace qui se trouve à 0°C, et à la pression atmosphérique, nous allons d'abord constater que la glace va se transformer en eau liquide, sans que la température augmente, puis lorsque **toute la glace** sera devenue liquide, la température augmentera si l'apport de chaleur se poursuit.

Cette chaleur qu'il faut appliquer pour transformer l'état d'un corps s'appelle chaleur latente. Dans l'exemple choisi, la transformation de la glace à 0°C en eau liquide à 0°C, correspond à la **chaleur latente de fusion**.

La chaleur latente représente donc la quantité d'énergie calorifique nécessaire qu'il faut retirer ou fournir à un corps pour changer son état physique sans pour autant modifier sa température. La chaleur latente est définie par :

$$Q = m L \quad (7)$$

L désigne la chaleur massique associée à un changement d'état physique donné.

L'équation de dimension de L est $[L] = \text{J.Kg}^{-1}$.

Lors de tout changement d'état, on distingue des chaleurs latentes de fusion L_f , de vaporisation L_v , de sublimation L_s , etc... .

Il faut noter que cette chaleur est soit libérée ou absorbée comme le montre ce qui suit :

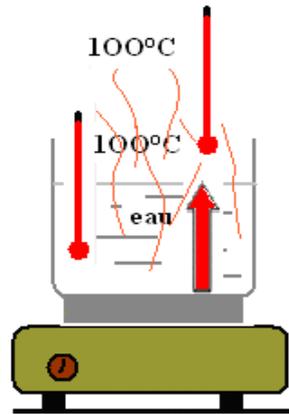
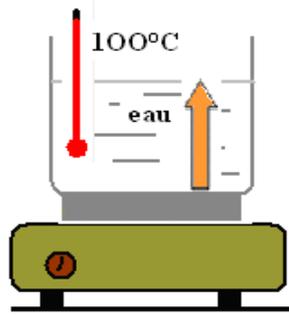
Solide Liquide : Apport de chaleur
Fusion

Gaz Liquide : Evacuation de chaleur
Condensation

Liquide Gaz : Apport de chaleur
Vaporisation

Liquide Solide : Evacuation de chaleur
Solidification

Exemple schématisé: Chaleur latente de vaporisation de l'eau.



A la pression atmosphérique, pour ramener de l'eau de 20°C (état liquide) à 120°C (état vapeur), il faut apporter :

1

Une quantité de chaleur sensible, (de 20°C liquide à 100°C liquide).

21

Une quantité de chaleur latente, (de 100°C liquide à 100°C vapeur).

3

Une quantité de chaleur sensible, (de 100°C vapeur à 120°C vapeur).

Applications :TD LECON 1 -

A**A - Notion de source de chaleur**

Une source de chaleur ou thermostat est un système physique susceptible de recevoir ou de fournir n'importe quelle quantité de chaleur sans pour autant que sa température ne varie.

B**B - Notion de température**

C'est la manifestation mesurable de la chaleur.

Exemple: La colonne de mercure du thermomètre visualise la chaleur stockée dans l'ampoule de verre, le thermocouple visualise l'effet thermoélectrique, le pyromètre est un instrument servant à mesurer des températures élevées par exemple dans un moteur ou un four.



Un pyromètre

mesure la température d'un four.

On peut exprimer ici un lien de causalité :

CAUSE
**Chaleur
stockée**

EFFET
**Variation de
Température**

Pour maîtriser la température dans un procédé, il faudra des transferts de chaleur et observer, par la mesure ou par le calcul la nouvelle température obtenue.

Il convient de rappeler que les échelles de température sont arbitraires et basées sur des points fixes :

Par exemple, pour l'échelle **Celsius** :

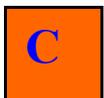
0°C pour la température de la glace fondante.

100°C pour la température de l'eau en ébullition.

Un **degré centigrade** représente la même quantité qu'un kelvin, leurs échelles sont cependant décalées de 273 degrés.

Dans les pays anglo-saxons on utilise des unités différentes : ainsi, l'énergie est exprimée en **BTU**, le « British Thermal Unit » et la température en degré **Fahrenheit** de symbole **F** avec les correspondances suivantes :

$$1\text{kJ} = 0.2389 \text{ kcal} = 0.9478 \text{ Btu}$$



C - Notion de calorimÉtrie

La calorimÉtrie représente une partie expérimentale de la thermodynamique consistant en la mesure des quantités de chaleur, des chaleurs massiques, des capacités calorifiques, des chaleurs latentes, etc.

Les mesures calorimétriques s'effectuent comme suit :

Au moyen d'un dispositif approprié, on apporte une quantité de chaleur parfaitement connue au système ; Cette quantité de chaleur provoque une transformation de ce dernier qui peut être à l'origine d'un changement d'état ou d'un échauffement.

Dans une première approche, on doit admettre que la quantité de chaleur apportée au système est entièrement captée par ce dernier, c'est à dire qu'il n'y a aucune perte de chaleur.

C'est le principe de l'égalité des échanges de chaleur.

Mais lorsqu'on veut approcher la réalité et affiner le résultat, il est nécessaire de tenir compte de ces pertes et de faire ce qu'on appelle

des corrections calorimétriques.

C - 1

Notion de CalorimÈtre

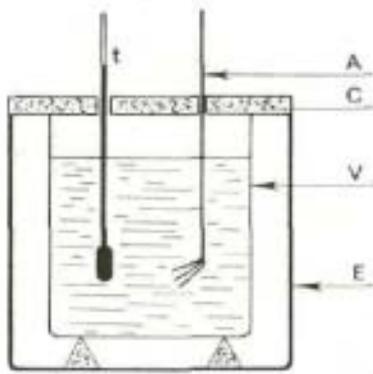
Remarquons que quelque soit la méthode calorimétrique, l'utilisation d'un **calorimètre** est nécessaire.

Les calorimètres (Annexe - 4-), de laboratoire assez variés sont généralement composés de deux vases en laiton comme le montre la figure ci dessous.

Le vase intérieur en laiton mince **V** est poli extérieurement; le vase extérieur **E** lui est poli intérieurement pour éviter les pertes de chaleur par rayonnement.

Le vase intérieur repose sur le vase extérieur par l'intermédiaire de picots de liège évitant ainsi les pertes de chaleur par conduction.

Enfin un couvercle en liège **C** limite les échanges de chaleur par convection avec le milieu extérieur.



Un agitateur **A** permettant d'homogénéiser la température au sein de la masse d'eau et un thermomètre **t** complètent le dispositif.

D

D – Les méthodes calorimétriques

Toute détermination de chaleur massique repose sur le principe de l'égalité des échanges de chaleur, l'expérience suivante permet de bien vérifier ce principe.

D-1

Principe de l'Égalité des Echanges de Chaleur

Dans un récipient supposé parfaitement calorifugé versons 1kg d'eau à la température 10°C suivi de 0,5kg d'eau à 100°C. Le mélange

obtenu se stabilise à une température de 40°C, c'est la température d'équilibre.

En appliquant la formule (3) à l'échauffement de la masse d'eau de 1kg, nous pouvons déduire qu'il a fallu fournir la quantité de chaleur :

$$Q_1 = m C (\theta_2 - \theta_1) = 4,185 \cdot 10^3 (40^\circ - 10^\circ).$$

$$Q_1 = 125,565 \cdot 10^3 \text{ J} = 125,565 \text{ kJ}.$$

La masse d'eau de 0,5kg nous a fourni en se refroidissant de 100°C à 40°C la quantité de chaleur :

$$Q_2 = m C (\theta_3 - \theta_2) = 4,185 \cdot 10^3 (100^\circ - 40^\circ).$$

$$Q_2 = 125,565 \cdot 10^3 \text{ J} = 125,565 \text{ kJ}.$$

Nous concluons alors que :

Il y a donc égalité entre les quantités de chaleurs échangées entre le corps chaud et le corps froid.

Cette égalité d'échange de chaleur est à la base de toute méthode calorimétrique qui permet la détermination des chaleurs massiques des solides et des liquides.

Parmi les méthodes calorimétriques, nous citons :

La méthode électrique.

La méthode des mélanges.

D - 1 - 1

La méthode électrique -

a - Mesure de la chaleur massique d'un liquide

On se propose de mesurer la chaleur massique d'un liquide homogène, pour cela on place le liquide dans un vase calorimétrique qui lui même est un calorimètre **isolé** du milieu extérieur.

On immerge dans ce liquide une résistance électrique de valeur spécifique **R**, un thermostat et un agitateur.

Lorsqu'on fait varier le courant **I** dans la résistance pendant un certain temps **t**, une énergie par effet joule est libéré dans la liquide et si on néglige les pertes ;

Nous pouvons dire que :

$$m c \Delta T = m c (T_2 - T_1) = R I^2 t \quad (8)$$

(9)

C: représente ici la chaleur massique à pression constante.

La méthode des mélanges

D - 1 - 2

a - Mesure de la chaleur massique d'un solide

Dans un vase calorimétrique, plaçons une masse d'eau m_0 à la température T_0 .

Dans une autre étuve, nous avons placé un morceau de métal de masse m de chaleur massique C pendant un temps suffisamment long de manière que le morceau de métal ait une température T_1 uniforme.

A un instant donné, on sort le morceau de métal de l'étuve et on le met **très rapidement** dans le vase calorimétrique. L'ensemble prend une température T_2 .

Au cours de cette opération, le morceau de métal a perdu une quantité de chaleur :

$$Q = m C (T_1 - T_2) \quad (10)$$

Cette quantité de chaleur est intégralement captée par l'eau, le vase calorimétrique et les accessoires ;

l'équation s'écrit :

$$m C (T_1 - T_2) = (m_0 + \mu) C_0 (T_2 - T_0) \quad (11)$$

μ désigne la valeur en eau du calorimètre.

La masse en eau μ du calorimètre représente tout simplement la masse du calorimètre si il était eau.

μ représente la masse d'eau qui serait équivalente, d'un point de vu calorimétrique au vase et aux accessoires.

m_0 , m , C_0 et C , sont connus.

T_2 est mesurée.

μ est déterminée par une expérience préliminaire.

(12)

b - Quelques valeurs de chaleurs massiques

L'eau ayant la plus forte chaleur massique de tous les corps, elle s'échauffera et se refroidira lentement. Cette forte chaleur massique explique le rôle important joué par l'eau dans les calorifères et les frigorifères ainsi que le rôle régulateur des mers et des océans sur les climats.

A ce titre indicatif nous donnons ci-dessous la chaleur massique de quelques corps usuels.

Corps	C $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	Corps	C $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Plomb	0.120	Verre	0.837
Mercure	0.138	Glace	2.093
Cuivre	0.397	Alcool	2.469

Fer	0.465	Eau	4.185
-----	-------	-----	-------

Applications :TD LECON 2

Introduction -

Lorsque deux corps sont à des températures différentes, il y a obligatoirement un transfert d'énergie calorifique du corps le plus chaud vers le corps le plus froid.

On distingue trois modes de transfert thermique chacun régi par des lois bien spécifiques soit : la conduction, la convection et le rayonnement.



A – La Diffusion Thermique

Le phénomène de conduction pure se rencontre essentiellement dans les solides. La propagation de chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps se fait suivant deux mécanismes bien distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. L'importance relative de chacun des deux mécanismes dépend évidemment de la nature du corps.

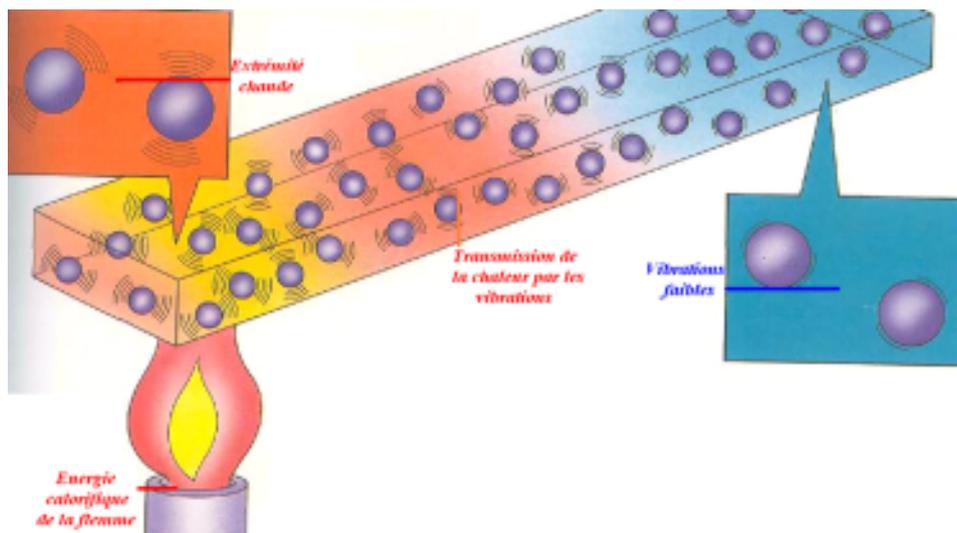
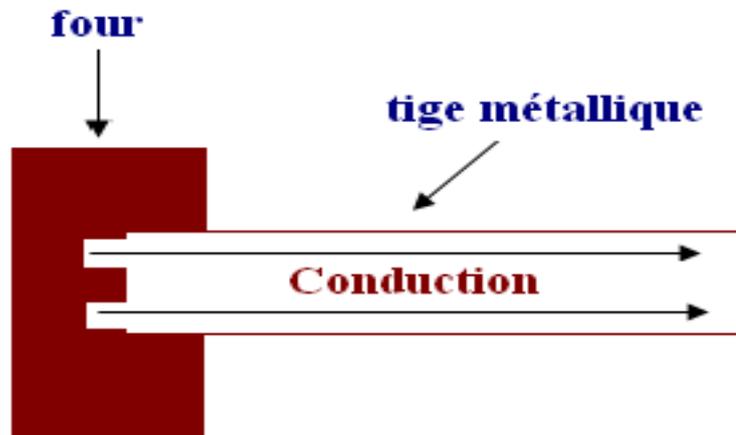
Nous pouvons dire donc que la conduction thermique existe dans tous les corps, solides ou fluides. La partie la plus froide s'échauffe au contact de la partie la plus chaude du corps.

Cette élévation de température correspond bien à

un accroissement de :
L'énergie microscopique de vibration du réseau
cristallin pour les solides;

L'énergie cinétique microscopique d'agitation
désordonnée des molécules d'un fluide, du aux
chocs incessants entre ces molécules.

Exemple : propagation de la chaleur le long d'une
barre de fer dont une extrémité est soumise a
l'action d'une flamme. Lorsqu'une des extrémités
d'une tige métallique est placée au contact d'une
source chaude (Voir Figures ci-dessous).



Ce transfert thermique ne s'accompagne pas, à l'échelle macroscopique, de mouvement de

matière.

C'est le seul mécanisme qui intervienne dans les solides homogènes et opaques. Dans les fluides, la conduction est souvent masquée par le phénomène de convection.

Un milieu dont la température n'est pas homogène est au moins le siège de phénomènes de transfert thermique par conduction.

Flux Thermique Et Loi De Fourier

A-1

A-1-1

Flux thermique

On considère un corps dont la température T ne dépend que d'une seule coordonnée d'espace x et du temps t .

La quantité d'énergie δQ élémentaire qui traverse une surface élémentaire ds perpendiculaire à l'axe (ox) et pendant une durée de temps dt est d'autant plus grande que ds et dt sont grands.

Nous pouvons écrire par conséquent que :

$$\delta Q = J_{th} ds dt$$

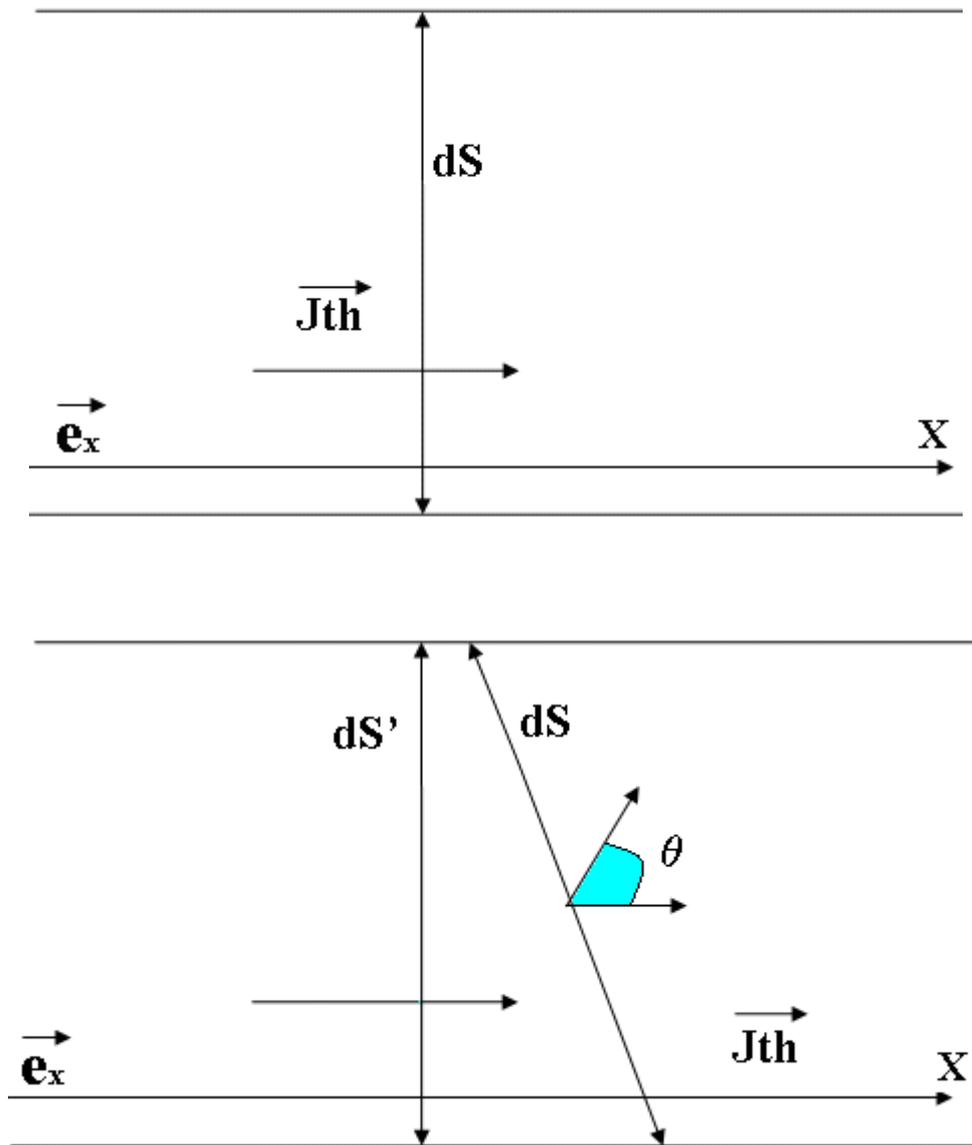
(1)

avec $\delta Q = d\Phi dt$ et $d\Phi = J_{th} ds$

Lorsque l'élément de surface possède une orientation quelconque, il sera traversé par la même quantité d'énergie que la surface normale

à (\mathbf{ox}) de surface $d\mathbf{s}'$ (voir figures ci-dessous)
avec :

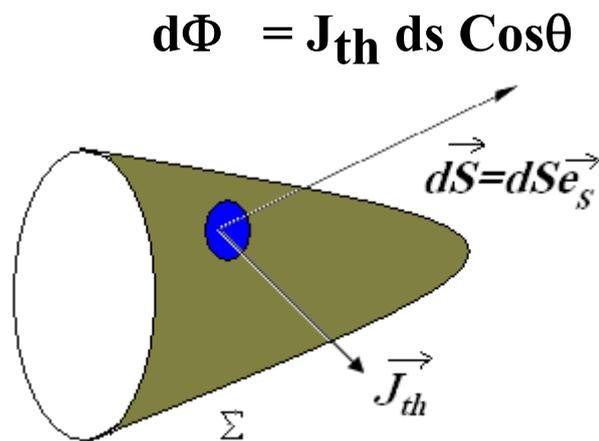
$$d\mathbf{s}' = d\mathbf{s} \cos\theta. \quad (2)$$



Flux Thermique

Nous pouvons écrire par conséquent que :

$$\delta Q = J_{th} ds' dt = J_{th} ds \cos\theta dt = d\Phi dt \quad (3)$$



(4)

Le flux thermique Φ représente la quantité d'énergie qui traverse une surface Σ par unité de temps, ce flux correspond donc à une puissance et s'exprime en watt.

Pendant une durée de temps dt , l'énergie qui traverse la surface Σ vaut donc :

$$\delta Q = \Phi \cdot dt \quad (5)$$

Φ représente le flux du vecteur densité de courants thermique à travers la surface Σ .

(6)

\mathbf{J}_{th} s'exprime en $W.m^{-2}$.

A - 1 - 2

Loi de Fourier

a - Loi de la conduction thermique

Dans un milieu dont la température $T(\mathbf{x},t)$ varie dans la direction de l'axe (\mathbf{ox}), la conduction se manifeste par l'existence d'un vecteur densité de flux thermique orienté dans le sens des températures décroissantes.

Fourier a observé expérimentalement une relation de proportionnalité entre la densité de flux thermique et la dérivée spatiale de la température tel que :

(7)

Le coefficient λ , positif représente la conductivité thermique du corps étudié et s'exprime en $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Le coefficient λ représente l'aptitude du milieu à conduire la chaleur. Il dépend de la nature du matériau et de son état physique.

Remarques

••• Le signe «-» nous indique que le flux thermique est dirigé dans le sens des températures décroissantes.

••• Cette loi linéaire peut être remise en cause dans le cas de gradients de température trop importants : c'est un modèle empirique correspondant à certaines conditions expérimentales.

••• λ peut, pour certains matériaux, dépendre de la température.

Le **tableau 1** ci dessous donne des ordres de grandeur de K pour un certain nombre de matériaux dans des conditions ordinaires de pression et de température.

MATÉRIAUX	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	REMARQUES
Gaz	0.006 à 0.18	Mauvais conducteur
Air	0.026	
Liquide (non métalliques)	1 à 1	Conducteurs moyens
Eau	0.6	
Solides métallique	10 à 400	Excellents conducteurs
Cuivre	390	
Acier	16	
Matériau non métalliques	0.004 à 4	Isolants
Verre	1.2	Conducteurs moyens
Béton	0.92	
Bois	0.25	
Laine de verre	0.04	Mauvais conducteurs (Isolants thermiques)
Polystyrène expansé	0.004	

Remarque: Notons qu'un bon conducteur électrique, comme un métal, est aussi un bon conducteur thermique.

A - 2

Analogie entre les lois de Fourier et d'Ohm

A - 2 - 1

Loi d'Ohm

Lorsqu'un conducteur, de conductivité électrique σ est soumis à une différence de potentiel, il est

le siège d'un courant électrique dont le vecteur densité de courants électrique est relié au champ électrique :

(8)

selon la loi d'Ohm locale :

(9)

L'intensité I qui traverse le conducteur est égale au flux

du vecteur à travers la section du conducteur et représente le flux des charges électriques.

Tout comme la loi d'Ohm, la loi de Fourier est une loi considérée comme « phénoménologique ».

Cela signifie que ce n'est pas une loi fondamentale (comme la loi de gravitation), mais une relation généralement bien vérifiée entre deux grandeurs. Ces deux lois traduisent que, dans un certain domaine d'approximation, l'effet (densité de courants ou densité de flux thermique) est proportionnel à la cause (gradient de potentiel ou de température).

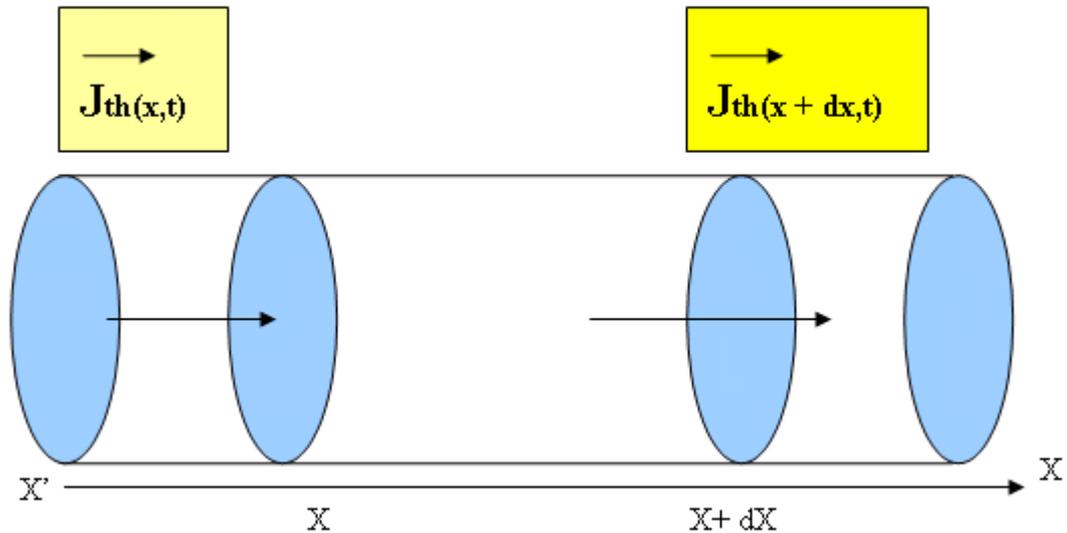
Application : Conductivité thermique des métaux λ .

Nous Considérons un corps homogène (barre métallique cylindrique par exemple) de masse volumique ρ , de conductivité thermique λ et de capacité thermique massique C .

Nous supposons, pour tout ce qui suit, ρ , C et λ sont constants, dans le domaine de température étudié.

Nous nous plaçons dans le cas où la température du matériau T ne dépend que de l'abscisse x et du temps t .

Considérons alors un petit volume compris entre les abscisse x et $(x + dx)$, de section S , et effectuons un bilan énergétique entre deux instants voisins t et $(t + dt)$ en supposant qu'il n'ya pas d'apport d'énergie autre que par conduction comme le montre le document suivant :



■ À l'abscisse x , il entre une énergie :

$$\delta Q_e = J_{th}(x, t) S dt. \quad (10)$$

■ À l'abscisse $(x + dx)$, il sort une énergie :

$$\delta Q_s = J_{th}(x + dx, t) S dt. \quad (11)$$

D'après le premier principe de la thermodynamique que nous détaillerons plus loin dans le prochain chapitre, la différence entre ces deux valeurs correspond à la variation d'énergie interne dU du volume considéré dont la température varie de dT , tel que :

$$dU = dm C dT = \rho S dx C dT. \quad (12)$$

$$dU = \delta Q_e - \delta Q_s. \quad (13)$$

Soit :

$$\rho S dx C dT = J_{th}(x, t) S dt - J_{th}(x + dx, t) S dt.$$

(14)

d'où :

(15)

Sachant que l'élévation de la température dT s'effectue pendant une durée dt dans la tranche de matériau d'abscisse x donnée, nous pouvons écrire:

(16)

et nous pouvons déduire que :

(17)

Enfin, en utilisant la **loi de Fourier**, il vient que :

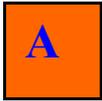
(18)

Le corps étant supposé homogène, λ ne dépend pas de x .

Dans le cas où la conduction à une seule dimension est le seul transfert thermique, la température $T(x,t)$ vérifie l'équation de la diffusion thermique précédente appelée aussi **équation de la chaleur**

Remarque : Une deuxième application à ce type de transfert sera étudiée de plus près en travaux pratique ; les équations nécessaires à cette étude (Annexe -5-), seront repris en détail durant la séance de travaux pratique.

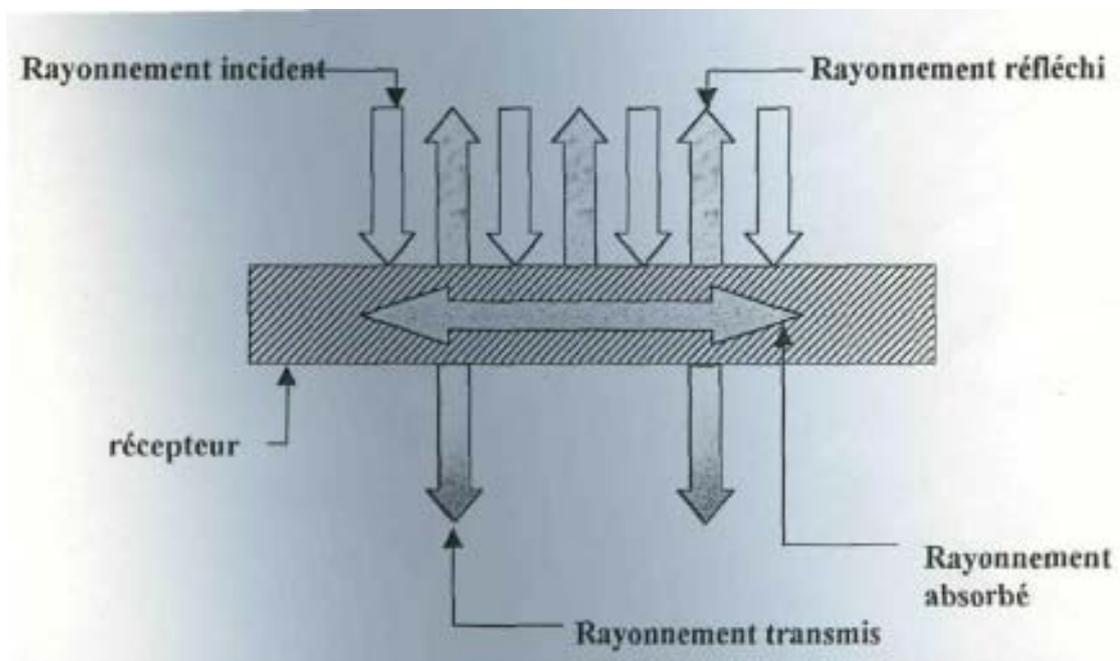
Applications :TD LECON 3



A – Le Rayonnement

Tous les corps émettent par leur surface de l'énergie sous forme de radiations électromagnétiques. Si cette énergie rayonnée rencontre un corps absorbant pour ses longueurs d'onde, elle se transforme en chaleur.

La transmission de chaleur par rayonnement se produit même aux basses températures (il suffit que la température soit supérieure à 0 K) dès que deux corps à des températures différentes sont séparés par un milieu perméable. Ce transfert de chaleur qui ne nécessite aucun support matériel se produit même dans le vide.



L'énergie reçue par la surface du corps le plus froid se divise en trois parties :

- une fraction de l'énergie reçue est réfléchié;
- une autre fraction peut passer à travers le corps.
- une troisième fraction enfin est absorbée par le corps et de ce fait élève sa température.

Exemples :

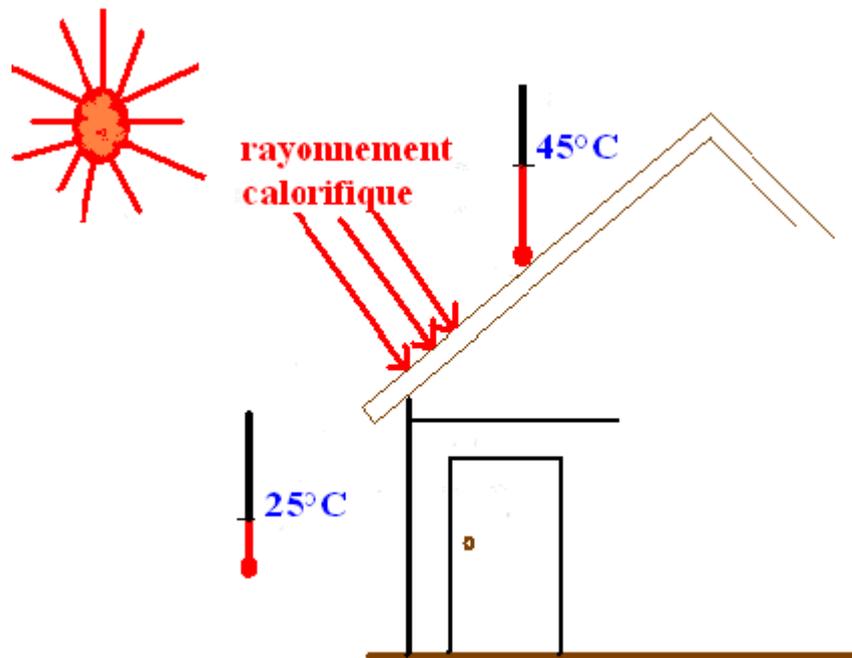
↑ Le soleil chauffe la terre par rayonnement.

Le radiateur à rayons infrarouge ou la lampe incandescente chauffent un objet placé à proximité.

Dans ces exemples, les rayons calorifiques se sont propagés de la source de chaleur à température élevée vers des objets plus froids. Ce mode de transmission présente la particularité de s'exercer sans support matériel, puisque le rayonnement

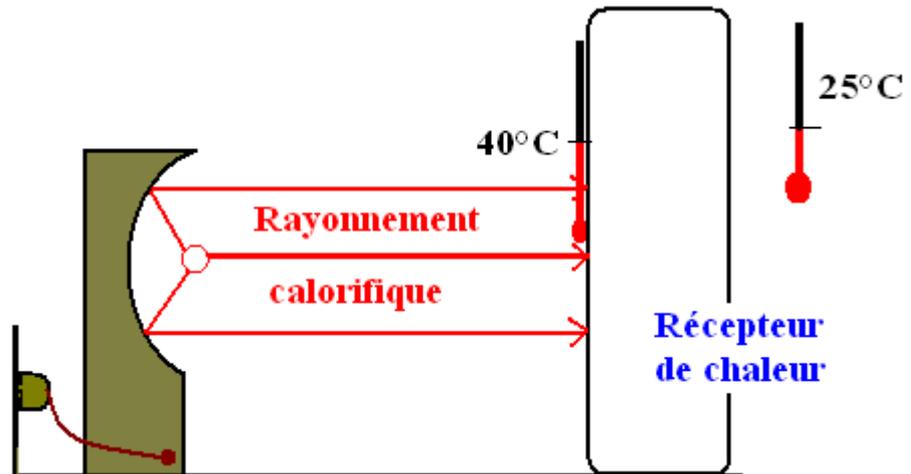
solaire nous parvient après avoir traversé le vide de l'espace interplanétaire.

Sur terre, la présence d'air, de brume ou brouillard réduit l'intensité de ce rayonnement, la part manquante ayant été absorbée ou réfléchi.



Document a) - Rayonnement solaire.

La température du toit est supérieure à celle de l'air ambiant.



Document b) - Le radiateur a rayons infrarouges.

La température de l'objet est supérieure à celle de l'ambiance.

Dans les deux exemples précédents, la source du rayonnement calorifique a une température très élevée:

Plusieurs milliers de degrés a surface du soleil.

Près de mille degré pour le tube radiant.

Le rayonnement émis par ces sources est très important.

Portés à des températures plus modestes, les corps physiques émettent aussi de la chaleur par rayonnement. Celui-ci est en revanche plus faible.

Ainsi un radiateur à eau chaude et un panneau radiant électrique, dont la température de surface n'est que de 60°C à 90°C , émettent par rayonnement une part importante de leur énergie calorifiques.

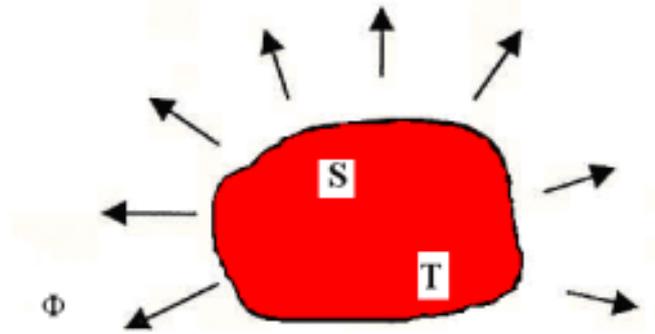
A-1

Grandeurs Énergétiques et lois du rayonnement

A-1-1

Flux énergétique

Le flux énergétique représente la quantité d'énergie transportée sous forme de radiations pendant l'unité de temps, il caractérise le rayonnement total émis dans toutes les directions par une surface émettrice S.



A-1-2

Émittance ou radiance M

Pour rendre cette énergie indépendante des dimensions de la surface émettrice on introduit l'émittance énergétique ou la radiance M, rapport du flux émis dans toutes les directions par unité de surface émettrice.

(1)

L'équation en dimension de M est $[M] = \text{W.m}^{-2}$ (S.I).

A-1-3

Intensité I

L'intensité I caractérise le flux énergétique émis par une surface S dans une direction donnée Ox.

Soit $d\Phi$ le flux élémentaire contenu dans un angle solide $d\Omega$ autour de la direction Ox ;

α $d\Omega$ Ox

Dans la direction Ox , le flux énergétique Φ_{Ox} :

 S

(2)

L'unité de I est $W \cdot Ster^{-1}$ dans le Système International.

A - 1 - 4

Luminance L

La surface émettrice S fait un angle α avec la normale à la direction dans laquelle on a évalué l'intensité énergétique I .

La projection de S sur cette normale, soit

$S \cos\alpha$ est appelée surface apparente Σ , et l'intensité énergétique par unité de surface apparente définit la luminance :

(3)

L'unité de L est $\text{Wm}^{-2}\text{Ster}^{-1}$ dans le Système International.

Grandeurs Monochromatiques

A - 1 - 5

Si $d\Phi$ est le flux énergétique transports par l'ensemble des radiations comprises dans l'intervalle de longueurs d'onde λ et $(\lambda + d\lambda)$ on définira le flux énergétique **monochromatique**.

(4)

et d'une façon analogue, l'émittance et la luminance monochromatique s'écrit :

(5)

(6)

Physique Du Rayonnement D'un

A - 2

Corps Noir

A - 2 - 1

Introduction

En physique, le **corps noir** est un modèle utilisé pour représenter le rayonnement électromagnétique (infrarouge, lumière) d'un objet en fonction de sa température. Il est défini comme étant un objet **absorbant totalement** la lumière à toutes les longueurs d'ondes.

Contrairement à ce que son nom suggère, un corps noir n'est pas nécessairement noir mais émet de la lumière dont le spectre dépend uniquement de la température.

Le nom corps noir a été introduit par Gustav Kirchhoff en 1862.

Le modèle du corps noir permit à Max Planck de découvrir la quantification des interactions électromagnétiques, ceci fut un des fondements de la physique quantique.

Le modèle du corps noir

A - 2 - 2

Le corps noir est donc un objet idéal qui absorberait toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit, sans en réfléchir ou en transmettre.

Il n'est fait aucune autre hypothèse sur la nature de l'objet. La lumière étant une onde électromagnétique, elle est absorbée totalement et donc l'objet devrait donc apparaître noir, d'ou son nom.

L'objet qui se rapproche le plus de ce modèle est l'intérieur d'un four percé sur l'une de ses faces d'un petit trou; en effet, on observe la surface de l'objet, peu importe que celle-ci soit à l'extérieur ou bien soit une cavité intérieure. C'est d'ailleurs un four qui fut utilisé par Wien pour déterminer les lois d'émission électromagnétique en fonction de la température.

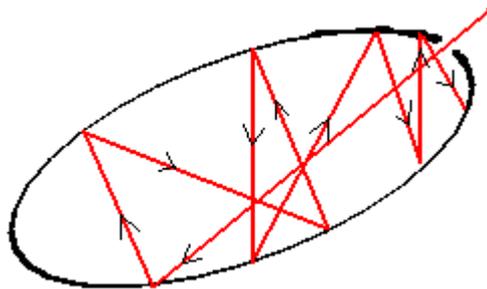
Les parois de l'intérieur de l'enceinte émettent toutes sortes de rayonnement, de l'infrarouge à l'ultraviolet. En se réfléchissant de paroi en paroi et d'absorptions en émissions successives, un équilibre se crée.

Le trou pratiqué dans l'enceinte laisse s'échapper une fraction de rayonnement qui se trouve à l'intérieur de cette cavité.

Bien qu'un corps noir soit un corps idéal, en pratiquant une petite ouverture dans une enceinte imperméable à la chaleur, et noircie intérieurement, on réalise un piège à radiations.

En effet un rayonnement qui pénètre par l'ouverture subit un certain nombre de réflexions et d'absorptions jusqu'à ce qu'il ait totalement disparu.

Inversement, en portant l'enceinte du piège à radiations à une température déterminée uniforme et constante, on provoque l'émission d'un « rayonnement noir » puisque c'est un corps noir qui rayonne.



Le corps noir rayonne donc de l'énergie : puisqu'il absorbe toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit, il doit nécessairement en céder, si non,

sa température augmenterait sans cesse.

A - 2 - 3

Le spectre électromagnétique du corps noir

La caractéristique principale est que le spectre de l'énergie rayonnée (c'est-à-dire la répartition de la quantité d'énergie en fonction de la longueur d'onde) ne dépend que de la température et de rien d'autre. C'est ce qu'on appelle le rayonnement du corps noir. Cette émission est due à l'agitation des atomes.

La température mesure l'agitation des atomes; ceux-ci « oscillent » autour de leur position. Ce faisant, chaque atome se comporte comme un dipôle vibrant (dipôle formé par le noyau et le nuage électronique), qui rayonne donc de l'énergie.

Le corps noir est un récepteur intégral, sa surface présente un facteur d'absorption est maximum c'est-à-dire égal à l'unité, quelle que soit la longueur d'onde de la radiation incidente, Soit **a** le facteur d'absorption tel que :

$a_\lambda = a = 1$ pour toute longueur d'onde.

Comme le corps noir **absorbe** complètement toutes les radiations incidentes et les **transforme** en chaleur.

C'est donc un concept théorique vers lequel tendent certaines substances comme le noir de platine, le noir de bismuth où $a > 0,98$.

A - 2 - 4

Loi de Stefan Boltzmann pour le corps noir

L'émittance énergétique totale du rayonnement noir est proportionnelle à la puissance 4 de la température absolue de l'émetteur noir comme :

$$M^o = \sigma T^4 \quad (7)$$

Cette loi, établie expérimentalement par Stéfán en 1879 et retrouvée à partir de la thermodynamique statistique de Boltzman en 1884, introduit la température absolue T et la constante de Stéfán σ tel que :

$$\sigma = 5,72 \cdot 10^{-8} \cdot \text{m}^{-2}\text{K}^{-4}.$$

La densité de flux d'énergie $d\Phi$ pour une longueur d'onde λ donnée est donnée par la loi

de Planck :

(8)

où **c** est la vitesse de la lumière dans le vide, **h** est la constante de Planck.

Le maximum de ce spectre est donné par la loi de Wien :

(9)

A - 2 - 5

Rayonnement d'Un Corps Réel
ou Corps Gris

Le corps noir est un corps idéal, l'émission des corps réels est toujours inférieure (voir tableau Annexe -6-) à celle des corps noirs.

En effet l'émittance **M** s'écrit :

$$\mathbf{M} = \varepsilon \mathbf{M}^{\circ} = \varepsilon \sigma \mathbf{T}^4 \quad (10)$$

Le flux d'énergie sera alors :

$$\Phi = M^{\circ}S = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4 \quad (11)$$

avec $0 < \varepsilon < 1$.

B

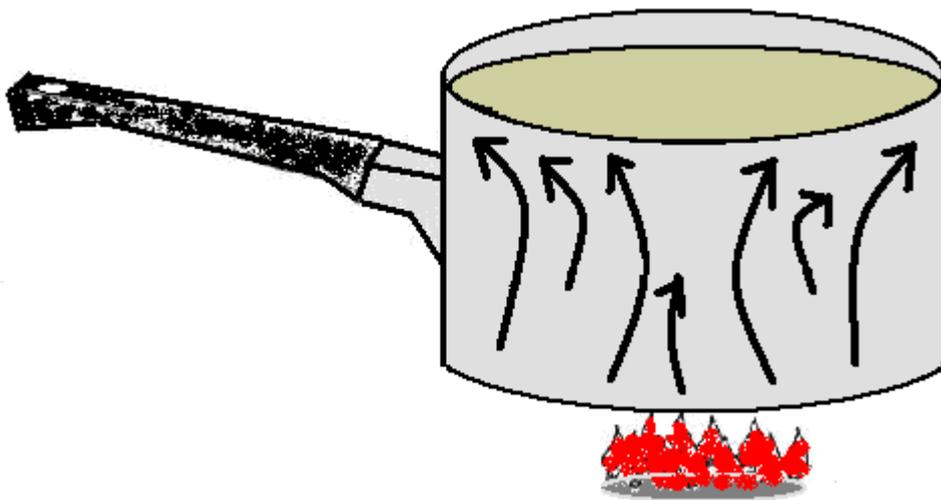
B – La Convection

Les échanges de chaleur par convection qui mettent en jeu le déplacement de matière ont lieu essentiellement dans les fluides et trouvent leurs origines dans le mouvement de ceux-ci.

En effet la densité des liquides et des gaz diminue lorsqu'on les chauffe.

Exemples :

Dans le récipient, le fond chauffe au contact de la flamme, puis l'eau chauffe à son tour. Etant devenue plus légère, elle s'élève et est remplacée par l'eau froide, un courant s'établit.

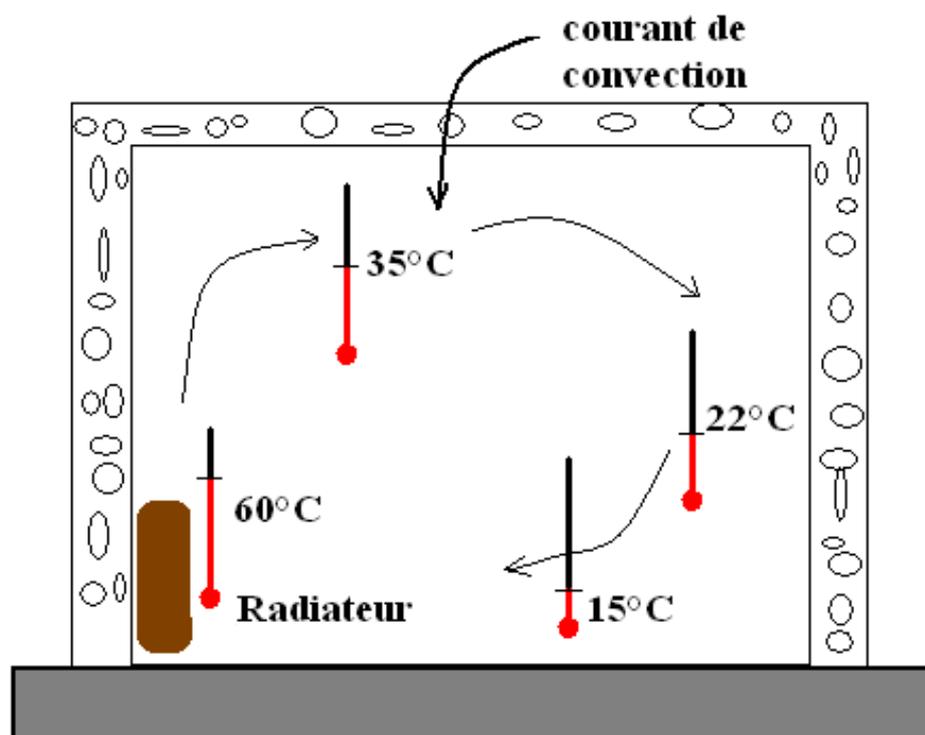


eur

Chal

Dans un local chauffé par un radiateur, l'air s'élève au contact de ce dernier, car sa température a augmenté de l'air plus froid vient le remplacer, il s'établit un courant de convection.

La chaleur cédée par le radiateur est véhiculée vers les zones les plus froides.



Dans le cas général, lorsque le mouvement des fluides est provoquée par une action mécanique extérieure (action d'une pompe pour la circulation d'un fluide dans une canalisation - agitateur mécanique pour un fluide chauffé dans un réacteur ...), la convection est dite forcée.

Nous parlerons de convection naturelle lorsque le mouvement des fluides est dû aux **variations de masse volumique** au sein des fluides qui **apparaissent sous l'effet des échanges thermiques** entre fluides et parois par suite des différences de température.

Exemple : Le convecteur (le mot radiateur est impropre) de chauffage central élève la température de l'air au contact de ses ailettes.

En réalité, tout échange thermique s'effectue simultanément sous les trois modes de transferts qui se concurrencent. L'échange est alors la somme des trois effets.

Exemple : le refroidissement à l'air d'une plaque métallique à très haute température.

Lorsque l'un des modes est prédominant, on négligera évidemment les deux autres.

Coefficient De Convection

Le flux calorifique transmis par convection entre un solide et un fluide qui le baigne dépend de nombreux facteurs, soit :

différence de température entre fluide et paroi,

vitesse de déplacement du fluide,

Conductivité thermique,

Viscosité,

masse,

Chaleur massique du fluide nature,

forme et dimensions de la paroi.

Les lois de la transmission de chaleur par convection sont donc extrêmement complexes. Le coefficient de transmission par convection noté h_c est défini comme étant : la quantité de chaleur qui passe en une heure d'une surface de un mètre carré au milieu ambiant lorsque la différence de température entre la surface et le milieu ambiant est de un degré Celsius.

h_c s'exprimera donc en $W.m^{-2}.K^{-1}$ dans le système international.

B - 2

Quantité De Chaleur Transmise

Considérons la surface A d'un solide à une température θ_1 en contact direct avec un fluide à une température θ_2 (voir figure suivante). Le flux calorifique échangé entre la paroi et le fluide sera :

$$\Phi = h_c A (\theta_1 - \theta_2) \quad (1)$$

La quantité de chaleur transmise pendant le temps t aura pour valeur :

$$Q = \Phi.t = h_c A (\theta_1 - \theta_2).t \quad (2)$$

[t] : exprimé en secondes.

[Φ] : exprimé en watts.

[Q] : exprimé en Joules.

Simultaneite Des Trois Modes _

De Transmission

B - 3

Les échanges de chaleur d'un local avec l'extérieur ou d'un appareil émetteur avec une ambiance montre que les trois modes de transmission s'exercent le plus souvent simultanément comme l'illustre le document ci-après.

En effet le mur du local est exposé au rayonnement solaire : sa température extérieure s'élève donc du fait de cet apport de chaleur dont une partie est rejetée par le mouvement de convection de l'air et par rayonnement.

La fraction restante se transmet dans l'épaisseur de la paroi par conduction, pénètre ensuite dans le local et la chauffe par rayonnement et convection.

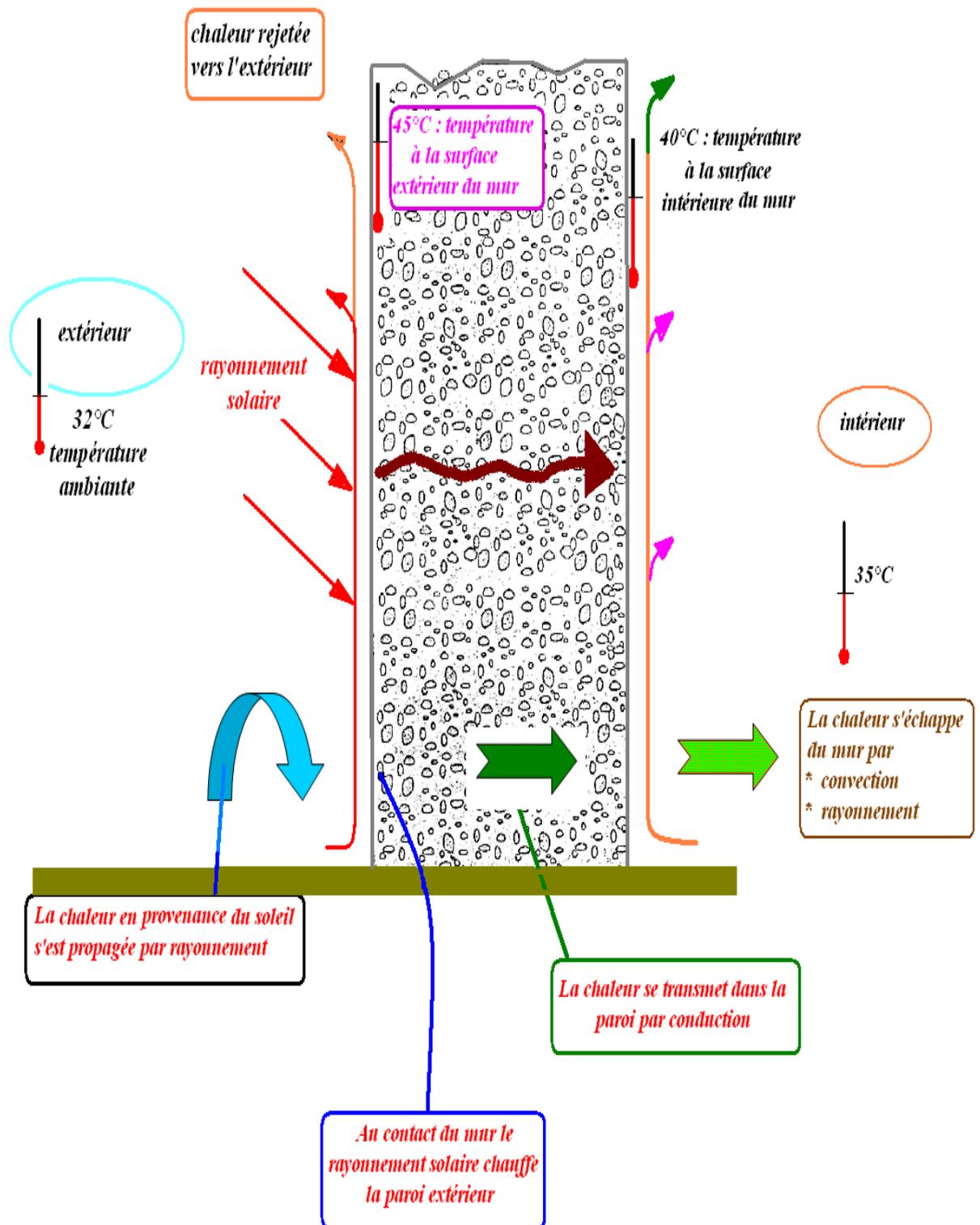
B- 3 - 1

Conclusion

Il règne à la surface du globe terrestre une grande variété de climats, dont les caractéristiques dépendent en tout premier lieu de l'influence du rayonnement solaire.

Dans les régions où ce dernier est le plus important, le climat est chaud; au contraire, dans

les régions où il est plus faible, le climat est froid. Entre ces extrêmes, règnent des conditions moyennes; on dit alors que le climat est tempéré (Annexe - 7 -).



Document : Simultanéité des trois modes de transferts thermiques.

Applications :TD LECON 4

En Cour

Introduction et Préliminaire

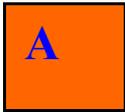
La thermodynamique est principalement centrée sur l'étude du corps pur. Les fluides, et particulièrement les gaz de faible concentration, sont délibérément choisis comme exemples.

Un système thermodynamique est une partie de l'univers définie le plus souvent comme le contenu intérieur de parois délimitant un volume fini. Un milieu extérieur représente le reste de l'univers au-delà de ces parois.

Le plus souvent les parois existent réellement; il faudra alors préciser si elles font partie du système ou non. Cependant, cette existence réelle des parois n'est pas une nécessité : il peut très bien s'agir de surfaces purement imaginaires que l'on évoque pour délimiter le système.

Si aucun transfert de matière ne peut avoir lieu à travers les parois, le système sera qualifié de fermé, dans le cas contraire on parlera de système ouvert.

A – Description D'un Système -



Thermodynamique



Introduction

La description que l'on peut faire d'un système dépend bien sur du degré de connaissance que l'on a de ce système. Un système tel qu'un mélange gazeux apparaît au premier abord comme un fluide homogène dont nous avons une parfaite connaissance dès lors que sa constitution chimique est connue comme étant la nature et quantité des constituants et que sont connus le volume qu'il occupe et la pression qu'il exerce sur les parois.

Une description de ce type sera qualifiée de **macroscopique**.

Si l'on veut, au contraire, décrire le gaz en rendant compte de l'existence des molécules, il est hors de question, étant donné le nombre énorme de paramètres qui seraient nécessaires pour cela, de le faire en définissant précisément l'état de chaque molécule.

Dans l'ensemble de ce cours, c'est le point de vue de la thermodynamique macroscopique qui prévaudra et on ne tiendra compte d'aucun détail

qui soit à l'échelle moléculaire.

A-2

Paramètres d'état intensifs

Parmi les paramètres décrivant l'état d'un système en thermodynamique macroscopique, certains ont une définition locale : ils ont une valeur en chaque point du système, c'est le cas de la pression, de la masse volumique, de la tension d'un fil, du potentiel électrique, etc. Ce sont les paramètres intensifs, ou paramètres de tension.

A-3

Paramètres d'état extensifs

D'autres paramètres n'ont de sens que par extension à une partie du système : ils ont une valeur pour l'ensemble du système égale à la somme des valeurs pour les différentes parties, c'est le cas du volume, de la masse, de la longueur d'un fil, de la charge électrique, etc. Ce

sont les paramètres extensifs, ou paramètres de quantité.

A - 4

Phase

En outre, la définition complète d'un système suppose la connaissance d'un certain nombre de paramètres qualitatifs définissant la constitution chimique des différentes parties du système.

On appelle phase une partie de système dont les paramètres qualitatifs sont les mêmes en tous points et dont les paramètres intensifs varient dans l'espace sans aucune discontinuité. Si chaque paramètre intensif a même valeur en tous points, on parlera de phase homogène.

REMARQUE

Il faut limiter la liste des paramètres d'état au nombre minimal nécessaire pour définir l'état du système. Il est possible de définir à loisir autant de paramètres supplémentaires que l'on veut, dépendant des premiers. Par exemple, si l'on connaît le volume (V) et la masse volumique (ρ)

d'un système homogène, la masse (m) de ce système s'en trouve définie : il existe une relation de dépendance ($m = \rho V$) entre ces trois grandeurs dont deux seulement sont indépendantes.

B - Equilibre Thermodynamique

B

B - 1

Définition

Un système est à l'équilibre thermodynamique si l'ensemble de ses paramètres macroscopiques n'évolue pas durant le temps, et s'il n'est l'objet d'aucun échange avec l'extérieur.

L'équilibre thermodynamique d'un système suppose fréquemment l'homogénéisation des différentes phases du système, c'est-à-dire l'uniformisation, dans ces phases, de l'ensemble des paramètres intensifs. Ce n'est cependant pas une nécessité : une phase peut être en équilibre interne sans être homogène, s'il existe en son sein des forces volumiques d'origines extérieures.

La notion d'équilibre est relative à un observateur particulier. En thermodynamique, l'observateur se trouve le plus souvent dans le même référentiel, au sens de la mécanique, que le système qu'il étudie.

L'invariance des paramètres d'état ne suffit pas pour définir un équilibre. En effet, un système peut très bien subir des échanges avec le milieu extérieur compensés de telle sorte que son état

soit invariant. Il s'agit alors d'un état dynamique stationnaire et non pas d'un état d'équilibre.

B - 2

Equilibre thermique .

B - 2 - 1

Principe zéro

L'expérience montre que les satisfactions de chaque équilibre partiel, chimique, mécanique, électrique sont autant de conditions nécessaires, mais non suffisantes pour qu'un système soit en équilibre thermodynamique.

Pour que l'équilibre thermodynamique soit réalisé, il faut en plus que le système s'équilibre avec son environnement par des échanges énergétiques qui s'effectuent sans déplacement macroscopique de matière : on parle alors d'équilibre thermique.

Nous allons affirmer que la relation d'équilibre thermique entre deux systèmes est transitive. Cette propriété des équilibres thermiques, que l'on peut vérifier expérimentalement sur des cas particuliers, sera admise sans discussion comme principe de la thermodynamique principe zéro.

Principe zéro de la thermodynamique

Deux systèmes qui sont en équilibre
thermique
avec un même troisième sont en équilibre
thermique
entre eux

La réflexivité et la symétrie de la relation d'équilibre thermique étant inhérentes à la définition, il s'ensuit que la relation d'équilibre thermique est une relation d'équivalence. Les systèmes qui sont deux à deux en équilibre thermique constituent des classes d'équivalence que l'on caractérisera par une qualification commune: la température.

B - 2 - 2

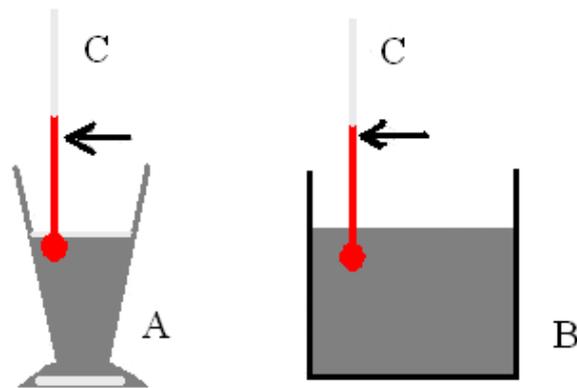
Principe thermométrique

Le principe zéro de la thermodynamique autorise l'utilisation de systèmes tensions de la température que l'on appelle : thermomètres.

Grâce au principe zéro, il est possible d'affirmer que deux systèmes A et B sont en équilibre thermique entre eux ou ont même température sans les avoir mis en relation directe.

Il suffit pour cela de les avoir mis en relation avec un troisième système C et d'avoir constaté que chacun d'entre eux est en équilibre thermique dans les mêmes conditions avec C, (voir figure

suivante).



B - 2 - 3

Adiabatisme

Cette description des équilibres thermiques sera complète si l'on ajoute, qu'il est possible d'imaginer une paroi thermiquement isolante, permettant l'établissement d'équilibres thermiques indifférents à la température extérieure.

Une telle paroi **idéale** sera appelée paroi adiabatique.

Pratiquement, il n'existe pas de paroi parfaitement adiabatique, mais il est possible par des techniques d'isolation thermique dont nous reparlerons plus tard de se rapprocher de cette propriété idéale, surtout si les différences de température ne sont pas trop importantes et si l'on n'envisage pas de constantes de temps trop grandes.

Exemple: dans une bouteille thermostatique (voir

figure ci-dessous), constitué d'un vase à double cloison de verre argenté appelée « vase Dewar », le café peut rester «chaud» plusieurs heures, si dehors il ne fait pas trop «froid».



Récipient

thermostatique

B - 2 - 4

Thermométrie, échelles de
températures

a - Thermomètre

L'usage des thermomètres est aujourd'hui familier. Leur fabrication est fondée sur les effets provoqués par l'augmentation ou la diminution de la température. Ces effets sont la dilatation ou la contraction, l'existence de phénomènes électriques liés à la différence de température, etc.

C'est au début du XVIII siècle qu'apparaissent les premiers thermomètres. En 1714 Gabriel Fahrenheit, fabricant d'instruments, fabrique un thermomètre à alcool qui est adopté jusqu'à ce

jour en Angleterre (Annexe -8-).

Nous appellerons :

***** grandeur thermométrique** : le paramètre du thermomètre variant avec la température, et

***** principe thermométrique** : la loi physique responsable de la variation de la grandeur thermométrique avec la température.

Nous définissons ensuite, arbitrairement,

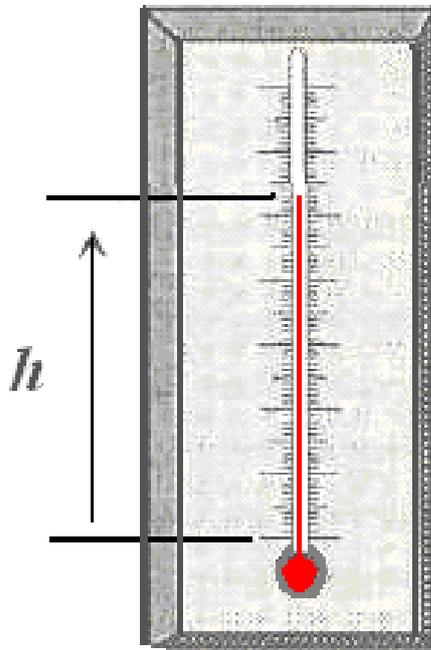
***** une fonction thermométrique** : établissant la relation entre la grandeur thermométrique x et la température θ du thermomètre particulier.

Si le choix était réellement arbitraire, il y aurait autant d'échelles thermométriques que de thermomètres et de fonctions thermométriques choisies. Nous allons rechercher au contraire une **certaine universalité**.

Une colonne de verre prolongeant un réservoir rempli d'un liquide colore est un thermomètre (figure ci-dessous), La hauteur h du liquide dans la colonne est la grandeur thermométrique.

Le principe thermométrique est la loi de dilatation volumique des liquides. Ce phénomène de dilatation des liquides est très couramment

utilisé en thermométrie, mais ce n'est bien sûr qu'un exemple parmi d'autres (Annexe 9).



Thermomètre usuel : Dilatation d'un liquide dans une colonne de verre.

C - Les Echanges D'énergie

C

Energie Interne, Chaleur Et Travail

C-1

Introduction

Un système peut échanger de la masse et de l'énergie avec le milieu extérieur, alors son état change par gain ou perte de masse ou d'énergie.

On dit que le système subit une transformation

qui entraîne une variation des variables d'état.

Chaque système a un **certain contenu en énergie** sous diverses formes, telles :

l'énergie mécanique (cinétique ou potentielle)

l'énergie chimique dégagée sous forme de chaleur lors des réactions chimiques

l'énergie nucléaire ($E = mc^2$) résultant d'une variation de la masse du noyau

Dans la pratique, les énergies nucléaire et chimique n'interviennent pas, car la masse du système ne varie pas dans les transformations courantes.

C - 2

Energie Interne U

L'énergie interne d'un système ou d'un corps est le contenu en énergie de ce système. Chaque système (solide, liquide ou gazeux) est une collection d'objets tels des atomes, molécules...

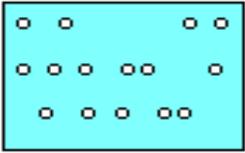
Ces particules sont toujours animées de mouvements incessants et aléatoires (agitation moléculaire) : vibrations dans les solides ou agitation thermique dans les liquides ou gaz.

A ces mouvements microscopiques des molécules est associée de l'énergie cinétique E_c . De plus, entre ces atomes ou molécules peuvent exister des forces d'interaction (attraction et répulsion) auxquelles on associe une énergie potentielle E_p .

A l'échelle microscopique, l'énergie interne U du système est définie comme la somme des énergies cinétiques E_{ci} et potentielles E_{pi} de toutes les particules formant le système.

Exemple 1: Le **gaz parfait** est caractérisé par l'absence

d'interactions entre les molécules ($E_p = 0$).

 $U = \sum_i E_{ci}$	<p>alors $U = \sum_i \frac{1}{2} m v_i^2 = N \cdot \frac{1}{2} m v^2$</p> <p>soit, $U = \frac{3}{2} N k T$</p> <p>où N est le nombre de molécules dans l'enceinte</p>
--	--

Exemple 2: le gaz réel est caractérisé lui par l'existence

d'interactions entre les molécules (alors $E_p \neq 0$),
d'où :

$$U = \sum_i E_{ci} + \sum E_{pi}$$

Propriétés de l'énergie interne U

A l'équilibre thermique, l'énergie interne U :

*** est une énergie exprimée en joule [J] ou [kcal].

*** elle a une valeur **bien définie** connue à une constante près (non connue dans l'absolu).

*** est une fonction **d'état**.

L'énergie interne U caractérise le contenu ou niveau énergétique du système thermodynamique.

L'énergie interne U d'un système **peut varier** par suite d'échanges d'énergie avec le milieu extérieur.

Les énergies sont principalement échangées sous forme de chaleur (Q) et de travail (W).

Applications :TD LECON 5

Forces intérieures, forces extérieures

Un système thermodynamique peut ne pas être en équilibre parce qu'il est l'objet de déséquilibres internes : ses paramètres intensifs ne sont pas homogènes et des échanges doivent se produire entre différentes parties du système pour le faire évoluer vers un état d'équilibre.

Les forces responsables de cette réorganisation interne sont des forces exercées réciproquement par certaines parties du système sur d'autres parties du système.

Nous les qualifierons tout naturellement de forces intérieures. Le travail éventuel de ces forces intérieures n'interviendra pas dans le bilan énergétique d'un système thermodynamique.

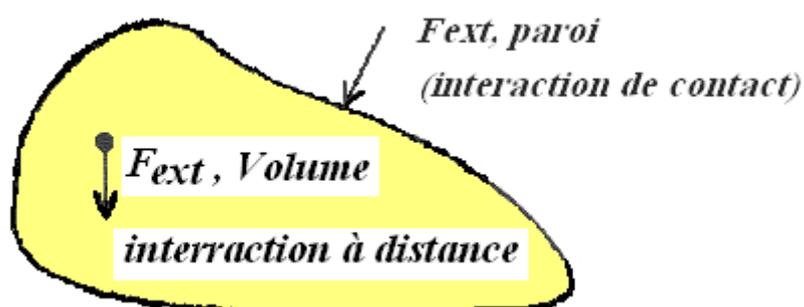
Un système thermodynamique initialement en équilibre interne peut être déséquilibré et, par conséquent subir une évolution par le fait de forces ayant pour origine l'interaction avec le milieu extérieur.

Nous les qualifierons tout naturellement de forces extérieures. Ces forces extérieures, nous l'avons vu en définissant l'équilibre d'un système, sont de deux types :

*** les forces extérieures s'exerçant au niveau des parois du système d'une part,

*** les forces extérieures s'exerçant au coeur du système, en volume, d'autre part.

Nous allons nous intéresser, dans un premier temps, aux forces extérieures appliquées au niveau des parois du système : le travail de ces forces est associé au déplacement des parois. Ces forces, ainsi que les déplacements qui leur sont associés, sont de différentes natures (voir figure ci-dessous).



Forces extérieures exercées à un système

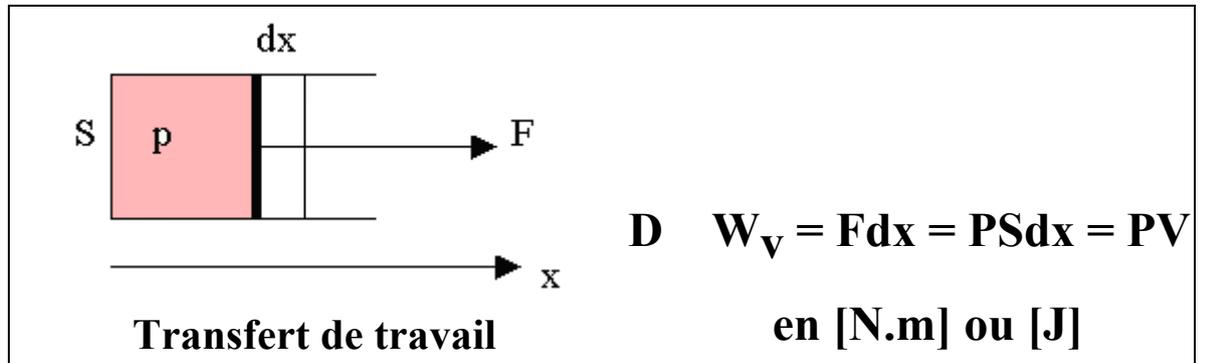
Nous distinguons trois types de travail, soit :

Le travail volumétrique,
Le travail technique et
Le travail de frottement.

A - 2

Travail volumétrique W_v

Le travail résulte le plus souvent d'une variation de volume du système déformable (non rigide) : ex. le déplacement d'un piston. On parle alors de travail volumétrique défini par:



d'où, le travail élémentaire s'écrit :

$$dW_v = - PdV \quad (1)$$

Remarque :

Le signe moins (-) est imposé par la convention de signe des énergies

Si le piston se déplace vers la droite alors dV

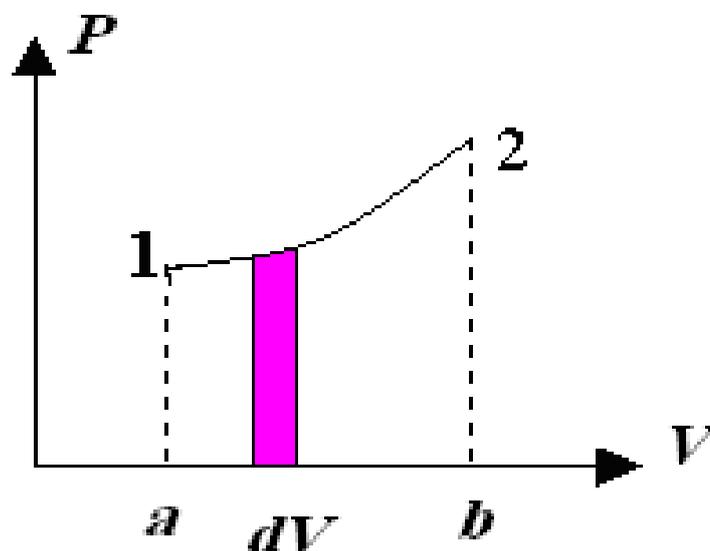
augmente ($dV > 0$) et le travail est cédé ou fournie au milieu extérieur (donc le travail est <0)

A - 2 - 1

Calcul du travail volumétrique W_v
pour une
transformation finie

Pour calculer le travail total entre l'état 1 et l'état 2, il faut intégrer la relation 1, d'où :

(2)



On distingue alors plusieurs cas :

a -

Transformation isobare ($P = \text{cte}$)

(3)

b -

Transformation isotherme ($T = \text{cte}$)

or pour un gaz parfait : $PV = nRT$, il vient
alors :

c -

(4)

Transformation isochore ($V = \text{cte}$)

alors, $dV = 0$ et le travail est nul, $W_{12} = 0$
(5)

A - 3

Travail technique W_t

Le travail technique W_t intervient dans les systèmes ouverts (Machines à piston, Turbines, fluides en écoulement...), il est défini par la relation suivante :

a -

transformation élémentaire :

$$dW_t = VdP \quad (6)$$

b -

transformation finie :

(7)

Le Calcul du travail technique W_t s'effectue par intégration de la relation (7) selon les mêmes règles que pour le travail volumétrique :

c -

Transformation isobare ($dP=0$), on a

$$W_{t12} = 0 \quad (8)$$

d -

Transformation isochore ($V=cte$):

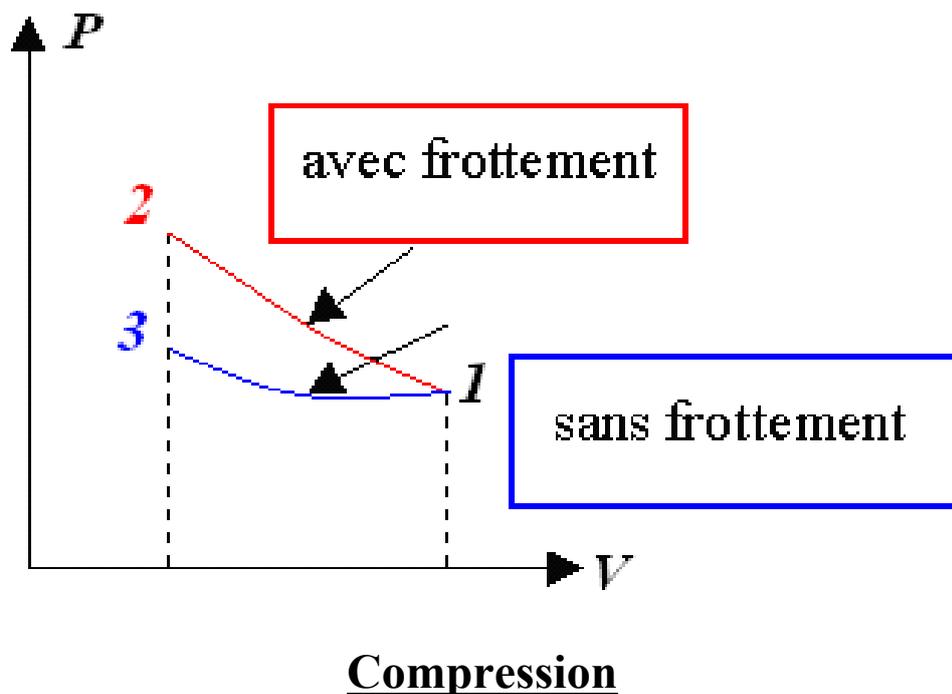
$$W_{t12} = V (P_2 - P_1) \quad (9)$$

A - 4

Travail de frottement W_f

Le travail de frottement W_f est une énergie mécanique dissipée par suite de frottement mécanique ou d'autres processus. Alors, le travail global d'un système fermé est donné par :

$$W_g = W_v + W_f \quad (10)$$

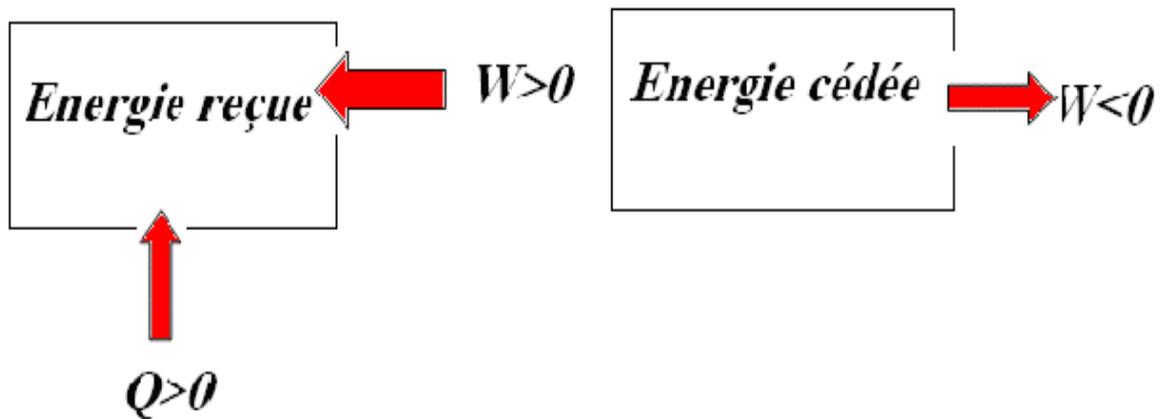


A-4-1

Convention de signe des énergies échangées (chaleur, travail...)

Les énergies (W,Q) **reçues** par le système sont **comptées > 0** et affectées du **signe +**

Les énergies (W,Q) **cédées** par le système sont **comptées < 0** et affectées du **signe -**



B

Le Premier Principe

Le premier principe dit aussi principe de conservation de l'énergie, stipule que :

l'énergie du système se conserve au cours des transformations du système (c.à.d ne se dégrade pas)

l'énergie du système est seulement transformée d'une forme d'énergie en une autre (équivalence des formes d'énergie)

L'énergie d'un système isolé reste constante, $U = \text{cte.}$

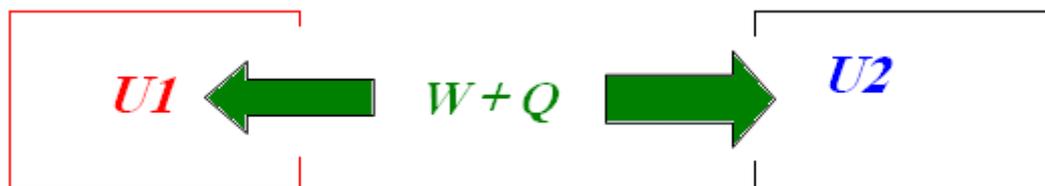
L'énergie d'un système non isolé peut varier par suite d'échanges d'énergie (Q, W) avec le milieu extérieur, dans ce cas, le système évolue d'un état 1 à un état 2 : on dit qu'il subit une transformation.

D'après le premier principe :

La variation d'énergie interne du système au cours d'une transformation est égale à la somme algébrique des énergies échangées $W + Q$

L'énergie interne du système varie donc pendant la transformation de la quantité :

$$\Delta U = U_2 - U_1 = W + Q \quad (11)$$



Variation de l'énergie interne du système

B - 1

Énoncé du premier principe

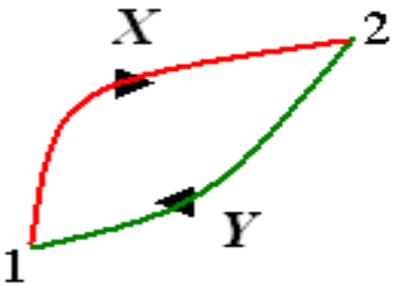
La somme algébrique du travail W et de la chaleur Q échangés par le système avec le milieu extérieur est égale à la variation ΔU de son énergie interne.

Cette variation est indépendante de la nature des transformations, c'est-à-dire du chemin suivi par cette transformation.

Cette variation ne dépend que de l'état initial 1 et de l'état final 2.

En d'autres termes, l'énergie interne est une fonction d'état, c'est-à-dire. que sa variation ne dépend pas du chemin suivi par la transformation.

En effet, deux transformations entre l'état 1 et l'état 2 formant un cycle, selon le chemin suivi x ou y donne :

 <p>Variation de U au cours d'un cycle</p>	$U_2 - U_1 = W_{12} + Q_{12}$ <p>chemin x</p> $U_1 - U_2 = W_{21} + Q_{21}$ <p>chemin y</p> <p>soit alors :</p> $W_{12} + Q_{12} = W_{21} + Q_{21} =$ <p>cte</p>
---	--

On a ainsi démontré que la somme $W + Q$ égale à ΔU ne dépend pas du chemin suivi et donc

la fonction U est une fonction d'état (alors que W et Q pris individuellement ne sont pas des fonctions d'état).

B - 2

Expression mathématique du premier principe

L'expression mathématique du premier principe est donc :

Pour un système fermé

Si la transformation est **finie** :

$$\Delta U = U_2 - U_1 = W + Q \quad (12)$$

Si la transformation est **élémentaire** :

$$dU = dW + dQ \quad (13)$$

Applications :TD LECON 6

L'Enthalpie H

A

L'enthalpie est définie par la relation :

$$\mathbf{H = U + PV} \quad \mathbf{(14)}$$

C'est une énergie exprimée en [J] ou [kcal]

C'est aussi une fonction d'état comme l'énergie interne U

On a vu que pour une transformation infinitésimale que :

$$\mathbf{dU = dW + dQ}$$

Soit,
$$\mathbf{dU = dQ - PdV}$$

(15)

or,
$$\mathbf{dH = dU + d(PV) = dU + PdV + VdP}$$

Soit,
$$\mathbf{H = dQ + VdP}$$

(16)

Conséquences

A - 1

– Pour une transformation isochore ($V = \text{cte}$) :

$$dU = dQ \text{ (car } dV = 0)$$

d'où,
(17)

$$\Delta U = \Delta Q = mc_v \Delta T$$

avec

(18)

– Pour une transformation isobare ($P = \text{cte}$) :

$$dH = dQ \text{ (car } dP = 0)$$

d'où,
(19)

$$\Delta H = \Delta Q = mC_p \Delta T$$

(20)

Pour les transformations isochores, nous utiliserons donc la fonction énergie interne soit $U = f(V, T)$ et les relations 17 et 18.

Pour les transformations isobares, nous utiliserons par contre la fonction enthalpie, soit $H = f(p,T)$ et les relations 19 et 20.

Autres Relations : les coefficients calorimétriques

A - 2

On utilise souvent les relations suivantes :

$$dQ = C_v dT + l dV \quad \text{où} \quad dQ = C_p dT + h dP$$

(21)

avec

$$dU = (l - P) dV + C_v dT$$

(22)

$$dH = (h + V) dP + C_p dT$$

(23)

où, l et h sont dits les coefficients calorimétriques tel que :

(24)

(25)

On pose également :

$$dQ = \lambda dp + \mu dV$$

(26)

(27)

(28)

A - 3

**Conclusion: Premier principe et
généralisation**

a) Systemes fermés :

$$\Delta U = W_{v12} + Q_{12} \quad (29)$$

est le travail volumétrique

– **s'il y a frottement :**

$$\Delta U = W_{v12} + W_{f12} + Q_{12} \quad (30)$$

où, W_f est le travail de frottement

b) Systèmes ouverts stationnaires

pour ces systèmes, il y a conservation de la
masse :

$$q_{m1} = q_{m2} \text{ soit, } \rho_1 S_1 w_1 = \rho_2 S_2 w_2 \quad (31)$$

$$- \text{ si, } \Delta E_c = \Delta E_p = 0$$

(32)

$$\text{avec, } W_{g12} = W_{t12} + P_1 V_1 - P_2 V_2$$

– si, ΔE_c et $\Delta E_p \neq 0$

(33)

où est le travail technique.

ΔE_c et ΔE_p les variations des énergies cinétique et potentielle du fluide en écoulement.

Applications :TD LECON 7

A

Introduction

Dans ce qui a précédé, nous avons provisoirement défini le gaz parfait par ses propriétés thermo élastiques, c'est-à-dire par son équation d'état.

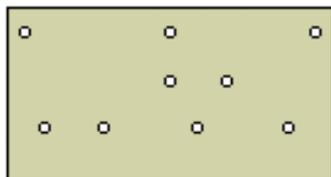
Nous allons à présent compléter cette définition en ayant pour exigence que le gaz parfait ait le même comportement énergétique que les gaz réels, dans la limite des très faibles concentrations molaires.

B

Définition

Le gaz parfait est un gaz idéal :

Il correspond à un gaz dilué c'est à dire un gaz à pression réduite, c'est un ensemble de N atomes ou molécules identiques sans interaction entre eux et soumis à une agitation perpétuelle et aléatoire (dite agitation moléculaire ou thermique).



Modèle du gaz parfait

- les molécules se déplacent dans **toutes les directions**
- l'énergie cinétique d'une molécule est **$1/2 m v_i^2$**

Hypothèses Du Gaz Parfait

C

(Théorie cinétique des gaz)

les atomes ou molécules du gaz sont assimilés à des masses ponctuelles

les molécules sont **sans interaction** entre elles (énergie potentielle $E_p = 0$)

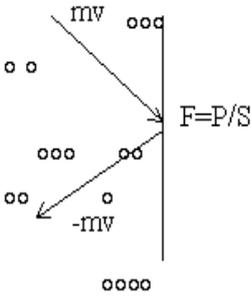
la pression est due aux nombreux **chocs** des molécules sur les parois de l'enceinte

D

La Pression Du Gaz

La pression du gaz résulte des chocs élastiques des molécules sur les parois de l'enceinte.

Soit N le nombre total de molécules dans l'enceinte ($N \approx 10^{23}$ molécules/m³).

 <p style="text-align: center;"><u>Chocs</u></p> <p><u>des molécules sur la paroi</u></p>	<p>Le choc étant élastique,</p> $Fdt = mdv$ <p>En projetant sur l'axe x :</p> $F_x dt = 2mv_x$ <p>Or, $P = F/S$ (1)</p>
--	---

Les molécules frappant la surface S de la paroi pendant le temps dt sont comprises dans un

cylindre de base S et de hauteur $v_x dt$: or statistiquement seulement la moitié de ces molécules se dirige vers la paroi :

Le nombre de molécules frappant la paroi est donc égal:

$$\text{(où } n_0 = N/V\text{)}$$

donc,

Or la répartition des vitesses dans l'enceinte est isotrope:

soit,

(2)

où v^2 est la vitesse quadratique moyenne des

molécules définit par :

On calcule cette vitesse à partir de la loi de distribution des vitesses de Maxwell .

La Température Absolue Du Gaz

E

D'après la théorie cinétique des gaz, la température **absolue** **T** est un paramètre qui caractérise l'état thermique du gaz, c'est à dire à **son degré** d'agitation thermique par la relation :

(3)

où k est la constante de Boltzmann

Si le degré d'agitation est élevé (c'est à dire v grand), alors la température et aussi la pression du gaz sont élevées.

La relation 3 définit la température absolue en degré Kelvin [K].

Equation D'état Du Gaz Parfait

F

La pression P défini par la relation 2 peut s'écrire en y introduisant la relation 3:

d'où,

(4)

en posant, $n = N/N_A$ et $R = k.N_A$ où, n est le nombre de moles, N_A est le nombre d'Avogadro et R est la constante universelle des gaz

La relation 4 est l'équation bien connue des gaz parfaits. Comme le nombre de moles est donné par :

La loi des gaz parfait peut aussi s'écrire :

Pour une **masse m** de gaz :

$$\mathbf{PV = mrT} \quad (5)$$

r = R/M désigne la constante individuelle de chaque gaz.

Energie Interne Du Gaz Parfait

G

L'énergie interne U est la somme des énergies cinétiques (car $E_p = 0$) des N molécules constituant le gaz, soit :

En y introduisant la relation 3, on obtient finalement le **moment** :
pour un gaz **monoatomique** :

(6)

H

Loi De Joule Pour Un Gaz

Parfait

L'énergie interne (et aussi l'enthalpie) **ne dépend que de T** , c'est à dire, $U = f(T)$ et $H = f(T)$ sont uniquement fonction de T .

les variations ΔU et ΔH pour une transformation **isotherme** ($T = \text{cte}$) sont donc **nulles** :

$$\Delta U = 0 \quad \text{et} \quad \Delta H = 0 \quad (7)$$

Conséquences

- **Gaz monoatomique** (Ar, He, Ne,..) :

Soit :

(8)

(9)

- **Gaz diatomique** (H₂, N₂, O₂ ,..) :

Soit :

(10)

(11)

En effet, il faut ajouter alors aux 3^{ème} degrés de liberté de translation des atomes ($3 \times \frac{1}{2}RT$), une rotation de la molécule autour de son axe (RT).

I

Diagrammes Des Gaz Parfaits

Deux diagrammes sont principalement utilisés pour représenter l'état d'un gaz :

Les diagrammes de **Clapeyron (P,V)** et **d'Amagat (PV,V)**.

Pour un gaz parfait, les **isothermes** sont des **hyperboles** d'équation $pV = nRT$, (voir Figure ci-dessous).

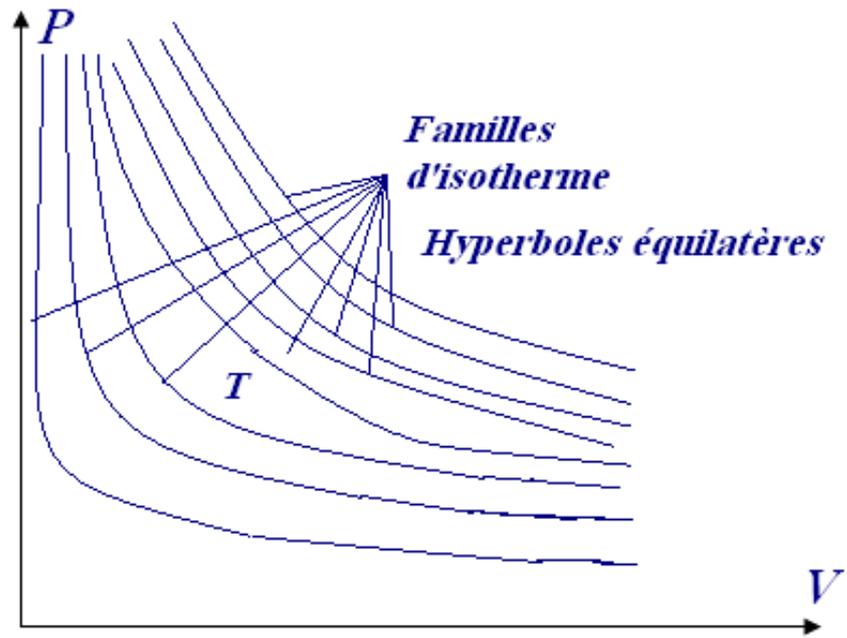


Diagramme de Clapeyron du gaz parfait

L'avantage du diagramme d'Amagat (Figure suivante) est qu'il met bien en évidence les écarts d'un gaz réel par rapport au gaz parfait, surtout aux hautes pressions.

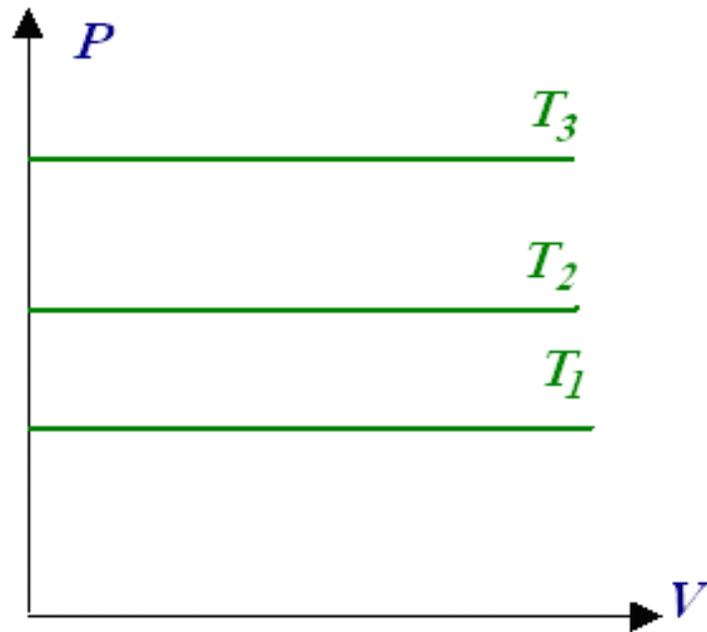
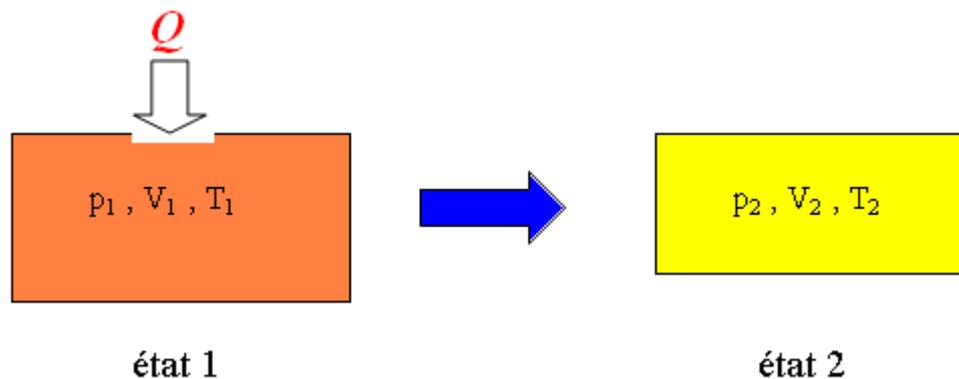


Diagramme d'Amagat du gaz parfait

Applications :TD LECON 8

Introduction et Préliminaire

Sous l'influence d'échanges ou transferts d'énergie entre le système et le milieu extérieur, le système évolue et les variables d'état du système sont modifiées. On dit que le système se transforme ou change d'état, en passant d'un état d'équilibre (1) à un autre état d'équilibre (2).



Transformation du système par échange d'énergie

(Apport de chaleur Q)

Au cours d'une transformation les variables d'état du système varient, pour atteindre un autre état d'équilibre.

Le passage de l'état d'équilibre (1) à l'état d'équilibre (2) se déroule généralement hors équilibre.

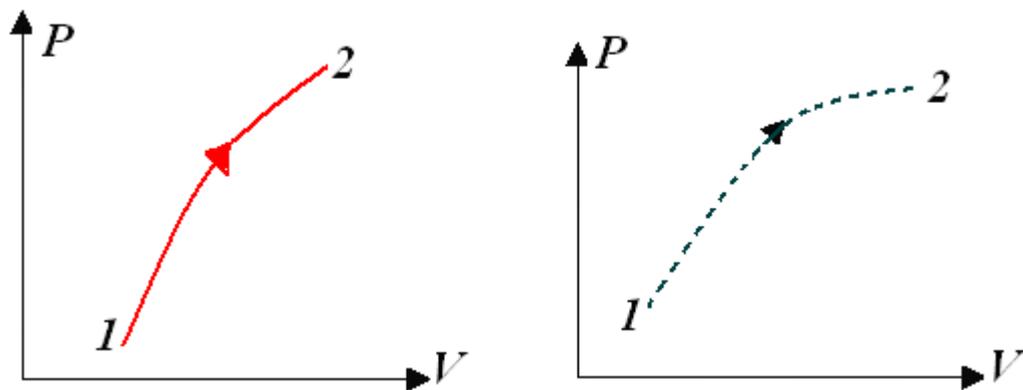
On distingue alors deux types de transformation, soit :

Transformations **réversibles** (ou idéales) : ce sont des transformations infiniment lentes formées d'une succession d'états d'équilibre

Transformations **irréversibles** : ce sont des transformations rapides et brutales hors équilibre.

La réversibilité d'une transformation exige que le système passe par une infinité d'états intermédiaires peu différents d'états d'équilibre (états quasi-statiques).

Les transformations spontanées sont irréversibles: elles ne peuvent évoluer que dans un seul sens.



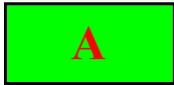
Transformations

a) réversibles

b)

irréversibles

Les Transformations Réversibles



Les transformations réversibles d'un système sont des transformations idéales qui jouent un rôle important dans les processus thermodynamiques. On ne considère alors que des processus sans frottement c'est-à-dire sans dissipation d'énergie, qui sont facilement calculables.

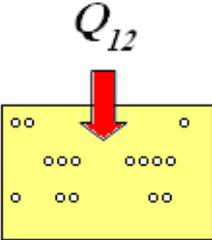
Le fonctionnement des machines thermiques est décrit par un cycle thermodynamique, formé de plusieurs transformations successives, qu'on suppose **réversibles**.

Dans les systèmes fermés, la masse de matière enfermée peut subir différentes transformations. On considère les différentes transformations simples et réversibles suivantes :

A - 1

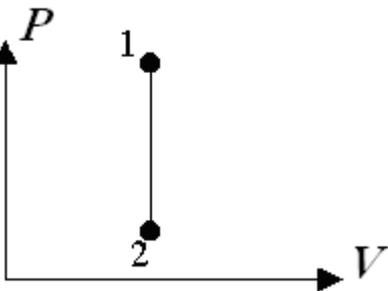
Transformation isochore ($V = \text{cte}$)

Soit un gaz **supposé idéal** et enfermé dans une enceinte rigide (non déformable $dV=0$).

	$P_1 V_1 = n R T_1$ $P_2 V_2 = n R T_2$
--	---

$V = \text{cte}$

$dV = 0$

 <p><u>Transformation</u> <u>isochore</u></p>	<p>(1)</p> <p><u>Loi de Gay Lussac</u></p>
--	--

a - Travail

Nous avons, $dW = -PdV$

(2)

l'enceinte étant indéformable ($dV=0$), $W_{12} = 0$

b - Chaleur

on a, $\Delta U = W_{12} + Q_{12}$

soit, $Q_{12} = U_2 - U_1 = m C_V (T_2 - T_1)$
(3)

c - Energie interne et enthalpie

on a, $\Delta U = Q_{12} + W_{12}$ (avec $W_{12} = 0$)

soit, l'énergie interne

$\Delta U = Q_{12} = mC_V(T_2 - T_1)$
(4)

et l'enthalpie,

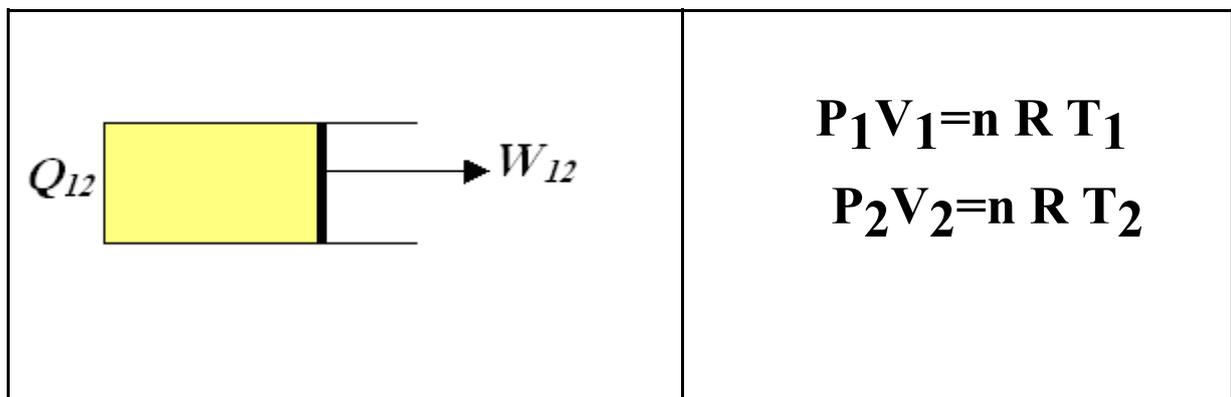
$$\Delta H = H_2 - H_1 = mC_p(T_2 - T_1)$$

(5)

A - 2

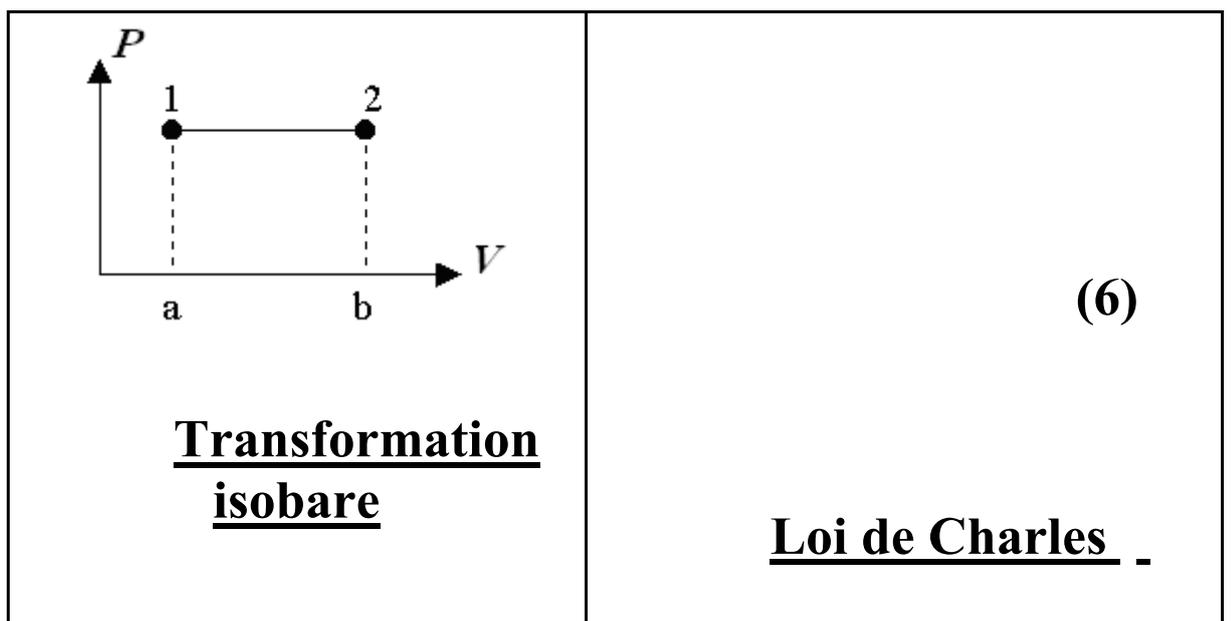
Transformation isobare (P = cte)

Soit un gaz **supposé idéal** et enfermé dans une enceinte rigide où la pression est constante.



$$P = \text{cte}$$

$$dP = 0$$



a - Travail

d'où,

$$\mathbf{W_{12} = -P (V_2 - V_1) = nR(T_1 - T_2)}$$

(7)

$$\mathbf{W_{12} = \text{Aire (a 1 2 b)}}$$

b - Chaleur

on a, dH = dQ + VdP (or dP = 0)

$$\mathbf{dQ = dH}$$

$$\mathbf{Q_{12} = H_2 - H_1 = mC_P(T_2 - T_1)} \quad \mathbf{(8)}$$

c - Energie interne et enthalpie

on a, $\Delta U = Q_{12} + W_{12}$

$$\mathbf{\Delta U = mC_V(T_2 - T_1)}$$

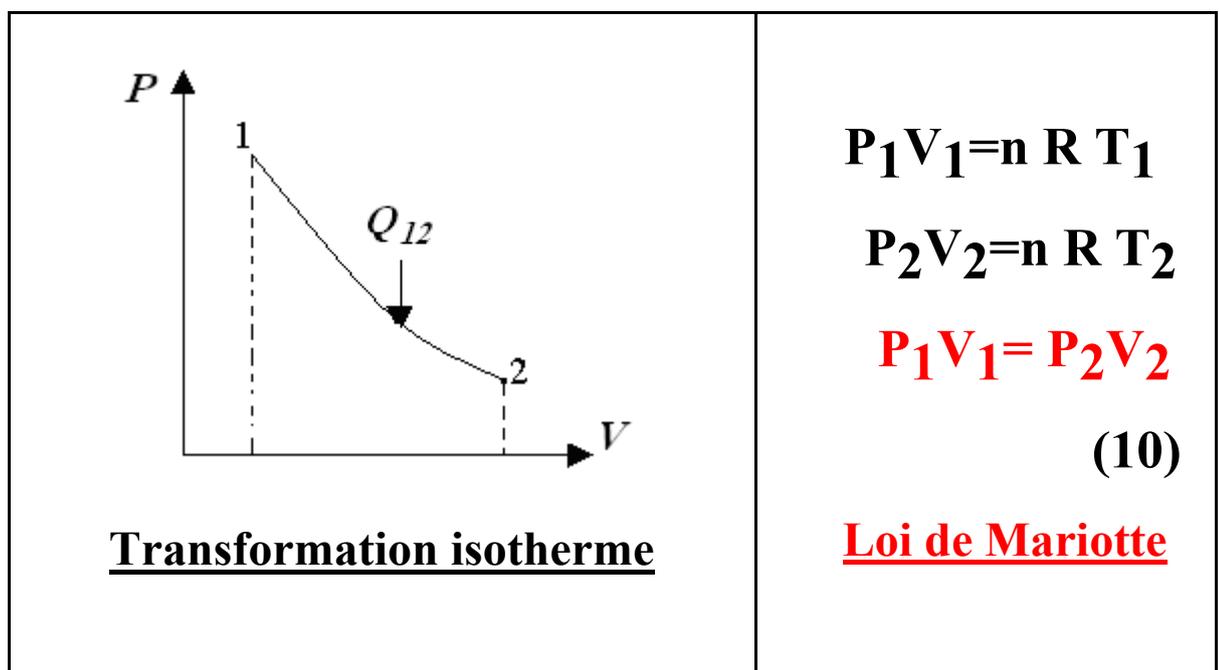
$$\Delta H = Q_{12} = mC_p(T_2 - T_1)$$

(9)

Transformation isotherme (T = cte)

A - 3

Soit un gaz **supposé idéal** et enfermé dans une enceinte où la température est constante.



T = cte

dT = 0

a – Travail

(1 1)

b - Chaleur

comme, $T = \text{cte}$ et $U = f(T)$ uniquement on a :

$$\Delta U = 0)$$

(car

(12)

c - Energie interne et enthalpie

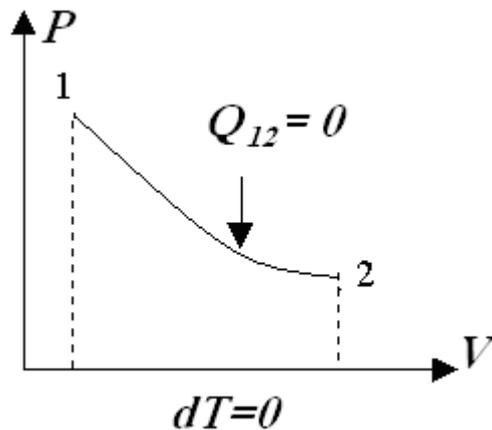
on a, $\Delta U = 0$ car, $U = f(T)$

d'où, $\Delta H = 0$ car, $H = f(T)$

(13)

A - 4

Transformation isentropique (Q = 0)
(ou adiabatique réversible)



Transformation isentropique

$$dU = dQ + dW$$

$$\text{et } dQ = 0$$

$$dQ = dU + PdV$$

$$dQ = mC_V dT + PdV$$

$$dQ = 0$$

$$dQ = dH - VdP$$

$$dQ = mC_p dT - VdP$$

$$dQ = 0$$

$$mC_V dT = -PdV$$

$$mC_p dT = +VdP$$

avec

(14)

En intégrant cette relation, on obtient l'équation

de **Laplace** bien connue d'un gaz subissant une transformation isentropique :

(15)

Loi de Laplace

Dans une transformation adiabatique quasi statique d'un gaz parfait dont l'exposant adiabatique γ , rapport

des capacités thermiques isobare C_P et isochore C_V ,

est indépendant de la température,

Le produit de la pression par le volume élevé à la puissance γ est invariant:

- * **Le gaz est parfait,**
- * **γ est indépendant de T ,**
- * **La transformation est adiabatique,**

- * **La transformation est quasi statique,**
- * **Le système est fermé.**

A - 5

Relations (P,T) et (V,T) pour les grandeurs thermiques

On a les relations : $PV = nRT$ et

Pour le couple (p,T) :	
Pour le couple (V,T) :	(16)
	(17)

D'où les relations suivantes :

(18)

(19)

a - Travail -

(20)

b - Chaleur

transformation adiabatique, $Q_{12} = 0$

c - Energie interne et enthalpie

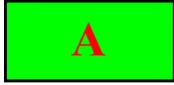
$$\Delta U = W_{12} = mC_V(T_2 - T_1)$$

(21)

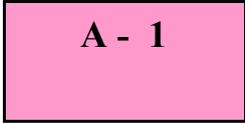
et $\Delta H = mC_P(T_2 - T_1) = \gamma \Delta U$

(22)

Applications :TD LECON 9



APROXIMATION DE L'OPTIQUE GEOMETRIQUE



Qu'est ce que c'est la lumière ?

Cette question a longtemps provoqué de vifs débats parmi les physiciens (Annexe 10).

Cependant, nous pouvons remarquer qu'un objet nous n'est visible que s'il envoie de la lumière qu'il reçoit ou qu'il produit, dans nos yeux qui jouent le rôle de détecteurs.

Nous allons, dans cette étude succincte, limiter notre description de la propagation de la lumière aux milieux homogènes et **isotropes**. L'énergie lumineuse se propage alors de façon rectiligne selon des directions que l'on appelle **rayons lumineux**.

Les rais de lumière solaire perçant à travers les nuages en sont une image que nous connaissons tous.

Le très fin pinceau de lumière émis par un LASER représente bien ce que nous entendons par « rayon ».

Caractéristique des faisceaux lumineux

Les phénomènes lumineux correspondent à un transport d'énergie émise sous forme de lumière par des sources lumineuses.

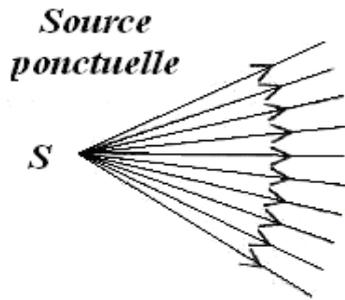
Ces sources lumineuses peuvent être naturelles : le Soleil, les étoiles, le feu, etc. ou artificielles : les ampoules électriques, les tubes fluorescents, les LASER, etc.

La lumière se propage dans le vide mais aussi dans certains matériaux que l'on qualifie alors de «transparents», tels que de nombreux gaz tel que l'air, des corps liquides tel que l'eau, le benzène, etc. et quelques solides parmi lesquels se trouvent en bonne place les «verres» et les «quartz».

Cohérence spatiale

Les sources lumineuses sont généralement très complexes. Elles font intervenir des phénomènes physiques et chimiques divers et variés et ont, nécessairement, une certaine extension spatiale et temporelle (Annexe 11).

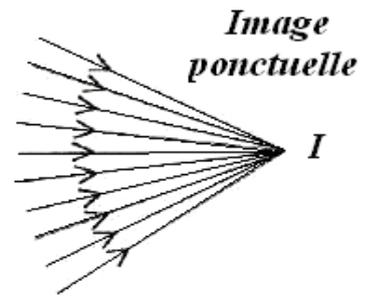
Dans cette première approche de l'optique, nous ne considérerons que des sources lumineuses ponctuelles à partir sont émis des faisceaux de lumière divergents (Figure ci-dessous) que l'on qualifera de spatialement cohérents.



Faisceau lumineux
Faisceau lumineux
divergent
convergent



Faisceau lumineux
parallèle



Sources lumineuses spatialement cohérentes

A - 4

A - 4 - 1

Emission et propagation de la lumière

Source primaire

Ce sont des sources lumineuses qui produisent la lumière qu'elles émettent (Photo 1). Les corps chauffés peuvent émettre dans certaines conditions un rayonnement lumineux, ainsi les étoiles comme notre soleil ou de simples lampes à incandescence en sont des exemples.

Les gaz soumis à de fortes tensions électriques sont capables d'émettre de la lumière. C'est en fait les électrons des atomes qui passent à des niveaux d'énergie supérieure, on dit qu'ils sont excités, puis ils se désexcitent en émettant de la lumière (photons) tel qu'une lampe à vapeur de sodium ou tubes fluorescents...



Photo -1 -

A - 4 - 2

Source secondaire

Ce sont des sources lumineuses qui **ne produisent pas** de la lumière (Photo 2), elles ne font que diffuser les rayons reçus d'autres sources lumineuses, c'est-à-dire qu'elles renvoient les rayons dans toutes les directions.

Ainsi, la plupart des objets et les personnes que vous observez autour de vous sont de telles sources, vous voyez le monde extérieur grâce aux rayons diffusés qui atteignent vos yeux. La lune est une source secondaire qui diffuse la lumière du soleil.

Notons qu'un miroir ne diffuse pas mais réfléchit la lumière dans une direction bien déterminée, |c'est également une source secondaire.

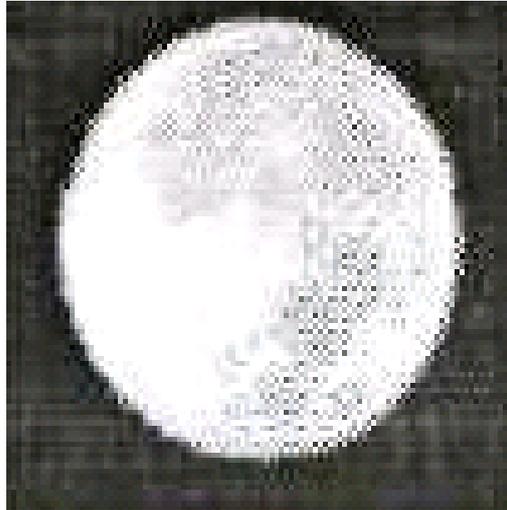


Photo -2 -

A - 5

Propagation rectiligne

On a tous observé un jour le trajet d'un rayon laser, soit dans un concert, soit dans un laboratoire! Pour visualiser nettement le trajet du faisceau, il est nécessaire d'avoir des particules diffusantes sinon il restera invisible.

D'après ces observations, il est clair que la

propagation de la lumière est rectiligne. Cette propriété s'énonce de manière plus complète de la façon suivante :

Dans un milieu homogène, un rayon lumineux se propage en ligne droite (Photo 3).

Le terme homogène signifie que le milieu traverse possède les mêmes propriétés en tout point. Si ce n'est pas le cas, la propagation n'est plus rectiligne.

Ce phénomène est à l'origine par exemple des mirages observé sur les flaques d'eau.



Photo - 3 –

Propagation rectiligne de la lumière.

Les rayons sont rendus visibles par les poussières en suspension dans l'air.

Photo -3- scannée à partir de l'encyclopédie :

« Sciences et Techniques d'Aujourd'hui »
aux éditions LA ROUSSE.

A - 5 - 1

Propagation dans le vide, vitesse de la lumière

La lumière contrairement au son, peut se propager dans le vide. C'est grâce à cette propriété qu'on est capable d'observer la

lune ou les étoiles très lointaines, la lumière parcourt dans le vide des distances gigantesques.

La lumière se propage à vitesse constante, la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide est une constante universelle notée **C** tel que **$C = 3.10^8 \text{ ms}^{-1}$** .

Cette vitesse est indépendante du type de rayonnement émis c'est-à-dire sa couleur et elle constitue en physique une limite absolue.

A - 5 - 2

Propagation dans un milieu homogène quelconque

Lorsque la lumière se propage dans un milieu autre que le vide, la vitesse v dépend du nouveau milieu. Il est alors nécessaire de caractériser ce milieu par une grandeur appelée indice de réfraction et notée n , définie de la manière suivante :

(1)

C : vitesse de la lumière dans le vide.

v : vitesse de la lumière dans le milieu.

n : indice de réfraction du milieu.

Exemples : n (air)=1,0003 ; n (eau)=1,33 n (diamant)=2,43.

B

Lois de Snel-Descartes

B - 1

Définitions

B - 1 - 1

Dioptre

On appelle dioptre la surface de séparation de deux milieux transparents différents. Cette surface, pour être parfaite du point de vue optique, ne doit présenter localement que des aspérités dont les dimensions sont très inférieures à la longueur d'onde.

B - 1 - 2

Réflexion et réfraction

Lorsque la lumière heurte la surface d'un objet, elle rebondit, exactement comme une balle sur un mur ou un sol. Ce phénomène est

appelé réflexion. La réflexion est d'importance **inéga**le selon les surfaces sur lesquelles elle se produit : une feuille de papier noir réfléchit très peu la lumière, tandis qu'un miroir la réfléchit presque intégralement.

Nous pouvons dire alors qu'un faisceau lumineux incident se sépare généralement en deux au niveau d'un dioptré. Une partie de la lumière est réfléchi



Photo - 4 -

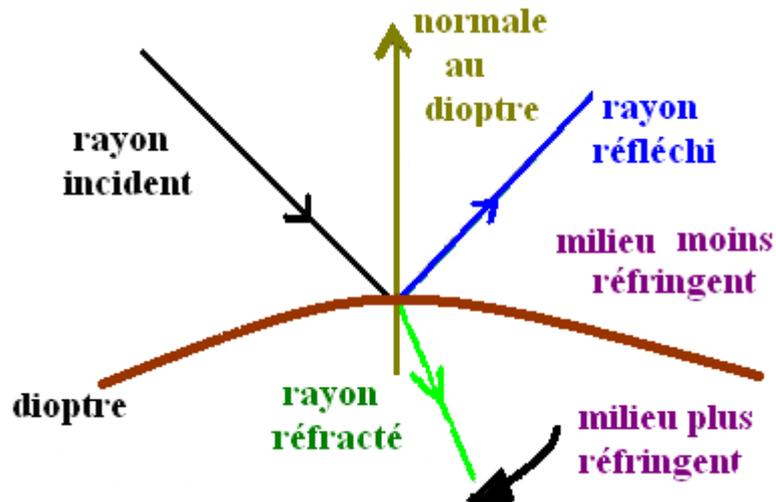
Photographie d'un lever de Lune au-dessus de la terre

La partie inférieure du disque lunaire est déformée par la **réfraction** de la lumière dans les couches supérieures de l'atmosphère.

Photo – 4 - scannée à partir de l'encyclopédie : « Sciences et Techniques d'Aujourd'hui » aux éditions LA ROUSSE.

Cette traversée du dioptre s'accompagne donc d'un **changement de direction** des rayons lumineux ; c'est la réfraction de la lumière (figure ci dessous).

Lorsque le rayon réfracté se rapproche de la normale au dioptre, le second milieu sera qualifié de plus réfringent.



B - 2

Plan d'incidence

On appelle plan d'incidence le plan défini par la direction du rayon incident et la normale au dioptre au point d'incidence.

La première loi de **Snel-Descartes** traduit bien la symétrie des phénomènes de réflexion et de réfraction :

Première loi de Snel-Descartes

**Le rayon réfléchi et le rayon réfracté
sont tous deux
dans le même plan d'incidence.**

Loi de la réflexion

B - 3

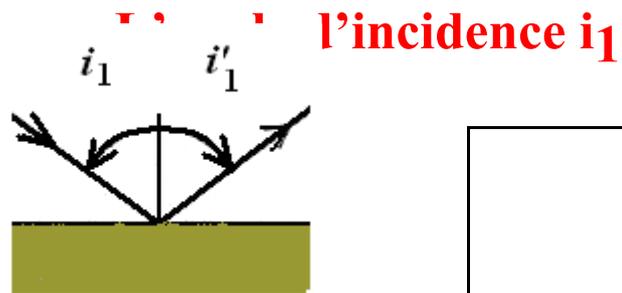
Nous avons vu que toute surface qui reçoit de la lumière la réfléchit exactement comme une balle rebondit sur un mur ou sur un sol. C'est un phénomène important parce que c'est la lumière réfléchie par les objets qui atteint nos yeux et nous permet de les voir.

La 2^{ème} loi de **Snel - Descartes** est relative au phénomène de réflexion et concerne non seulement la réflexion dioptrique, mais aussi la réflexion sur un miroir métallique.

Deuxième loi de Snel-Descartes

L'angle de réflexion i_1'

est égal à



Loi de la réfraction

B - 4

Un rayon lumineux du laser est réfracté lorsqu'il traverse un bêcher rempli d'eau. Une partie de la lumière est réfléchiée par la surface du verre (Photos 5).

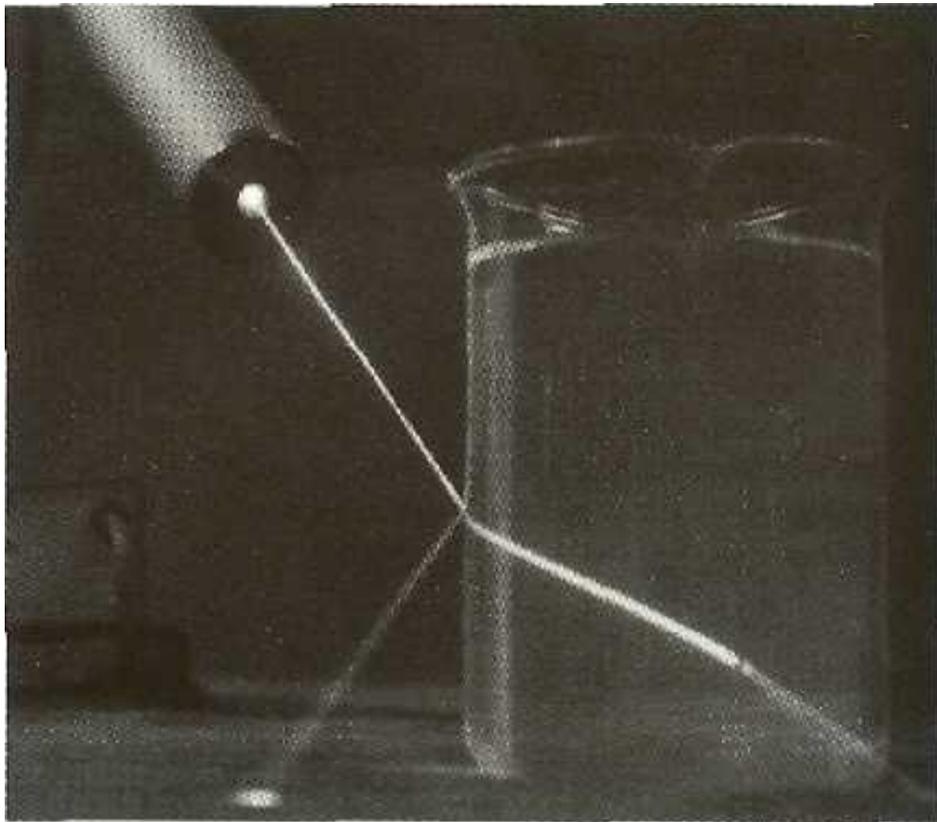


Photo - 5 -

Photo- 5- scannée à partir de l'encyclopédie :

« Sciences et Techniques d'Aujourd'hui »
aux éditions LA ROUSSE.



Photo – 6 : - Réfraction de la lumière

L'image de la cuillère plongée dans le verre d'eau (à gauche) est réfractée. A droite, le verre ne contient pas d'eau, il n'y a pas de réfraction.

Photo-6- scannée à partir de l'encyclopédie:

« Sciences et Techniques d'Aujourd'hui »
aux éditions LA ROUSSE.

La troisième loi de **Snel-Descartes**, que l'on appelle encore «loi des sinus », décrit le phénomène de réfraction interprétée autrement par **Huygens** selon (Annexe 12).

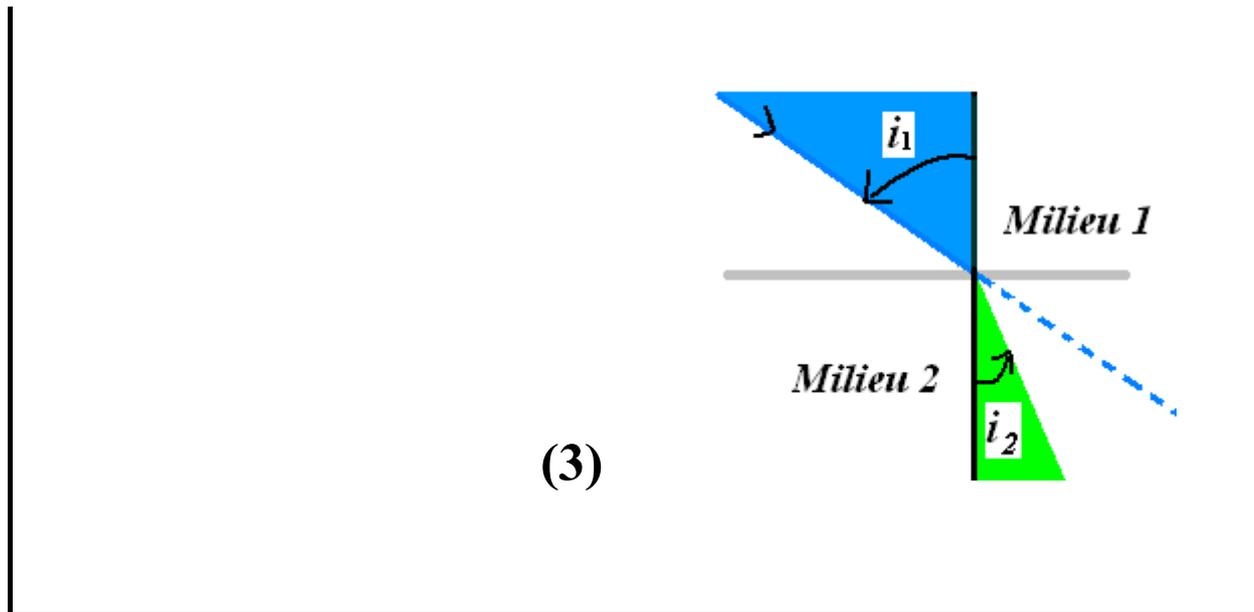
Troisième loi de Snel-Descartes

Pour chaque milieu transparent, On peut définir un nombre réel n , que l'on appelle indice de réfraction, tel que, pour un rayon franchissant un dioptré,

Les sinus de l'angle d'incidence i_1 et de l'angle de réfraction

i_2 sont dans le rapport inverse des indices

n_1 et n_2 des deux milieux.



B - 5

Réflexion totale

Dans le cas où le deuxième milieu est plus réfringent que le milieu incident, le phénomène de réfraction **est toujours** possible. Le rayon réfracté se rapproche de la normale et l'on a :

(4)

Si, au contraire, le second milieu est moins réfringent que le milieu incident, il existe **un angle limite** $i_{1\max}$ pour lequel le rayon réfracté s'écarte de la normale d'un angle i_2 égal à $(\Pi/2)$, tel que :

(5)

Soit $i_{1\max}$ donné par :

(6)

Applications :TD LECON 10

Introduction et Préliminaire:

Dans l'expression des lois de **Snel - Descartes**, les deux milieux interviennent de façon parfaitement symétrique. Cela implique que le trajet suivi par la lumière ne dépend pas du sens de propagation : deux rayons lumineux se propageant en sens inverse entre deux points A et B, suivront les mêmes parcours dans l'espace. Cette affirmation, qui est vraie quel que soit le nombre de dioptries traversés et quel que soit le nombre de miroirs rencontrés, s'appelle le «principe du retour inverse de la lumière» (Annexe -13-).



Miroir plan, stigmatisme rigoureux

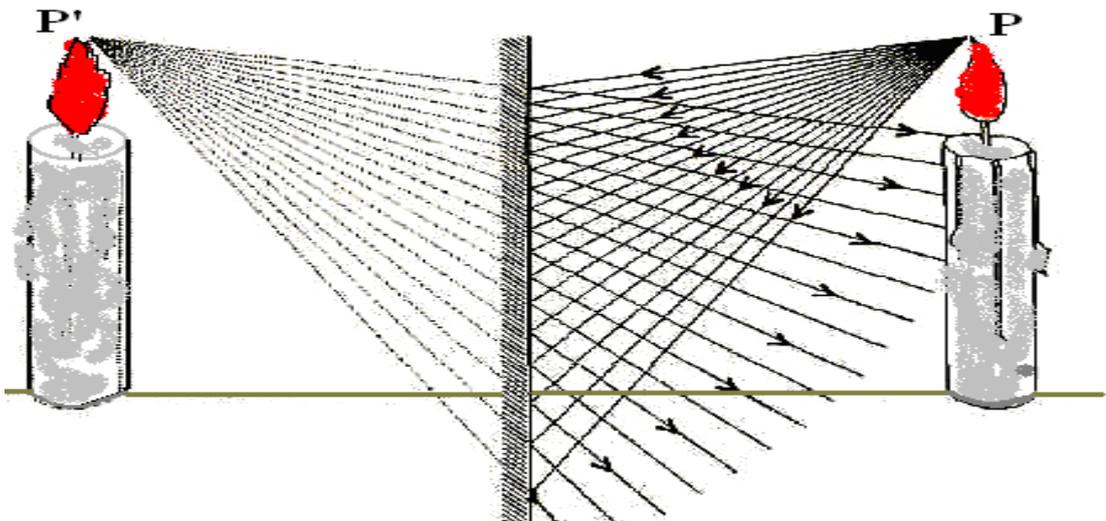
Un miroir est constitué d'une plaque de verre dont la face postérieure est enduite d'une mince couche de métal. La lumière se propageant en ligne droite, il ne nous est pas possible de voir sur le côté à moins de se munir d'un miroir qui permet de réfléchir la lumière de biais par rapport à sa direction d'origine.

Lorsqu'on se regarde dans un grand miroir, on aperçoit une image de soi-même. Un examen plus attentif permet de remarquer quelque chose d'intéressant : fermez l'oeil droit, l'image dans le

miroir aura l'oeil gauche fermé.

De même, si vous levez le bras gauche, vous verrez se lever le bras droit.

La construction géométrique des rayons réfléchis par un miroir plan montre que tous les rayons issus d'une même source ponctuelle de lumière P semblent, après réflexion, provenir d'une source virtuelle P' située derrière le miroir, à une position symétrique de P par rapport au plan du miroir (figure suivante).



Stigmatisme rigoureux du miroir plan

L'adjectif « virtuel » signifie très clairement que cette source de lumière P' n'existe pas. Il est inutile d'essayer de saisir l'image derrière le miroir, comme le fait un tout petit enfant qui se voit pour la première fois dans une glace ; cette image est irréelle, on ne peut ni la saisir ni la projeter sur un écran. Si le miroir est parfait, l'illusion est parfaite.

On dit que le miroir plan est rigoureusement stigmatique : il produit une image virtuelle parfaitement conforme à l'objet original, quelle que soit la position de cet objet, qu'elle que soit l'inclinaison des rayons lumineux.

Miroirs sphériques

B

B - 1

Définitions

Un miroir sphérique est constitué d'une calotte sphérique recouverte d'un métal réfléchissant. Un miroir creux est qualifié de concave, un miroir bombé est qualifié de convexe.

On appelle centre du miroir le centre de courbure de la surface réfléchissante, c'est-à-dire, dans le cas d'un miroir sphérique, le centre de la sphère.

On appelle axe optique du miroir l'axe de symétrie de la calotte sphérique constituant le miroir. L'axe optique passe par le centre du miroir et par le sommet du miroir qui est le point de symétrie de la calotte sphérique.

Astigmatisme du miroir sphérique

B - 2

La photo 7 ci dessous représente le phénomène de l'astigmatisme. Sur cette photo, il apparaît clairement que les rayons issus P de l'image source de la dame ne convergent pas. Ces rayons ne semblent pas non plus être issus d'une source virtuelle. L'image est déformée par la réflexion irrégulière de la lumière ; Il n'y a donc pas en général formation d'image, ni réelle, ni virtuelle : nous dirons que **le miroir sphérique est astigmaté**.



Astigmatisme d'un miroir sphérique

Photo - 7 - scannée à partir de l'encyclopédie :

« Sciences et Techniques d'Aujourd'hui: La

lumière Les couleurs » aux éditions LA
ROUSSE.

B - 3

Stigmatisme au centre et au sommet

Il existe deux cas particuliers (figures suivantes) dans lesquels le miroir sphérique est rigoureusement stigmatique :

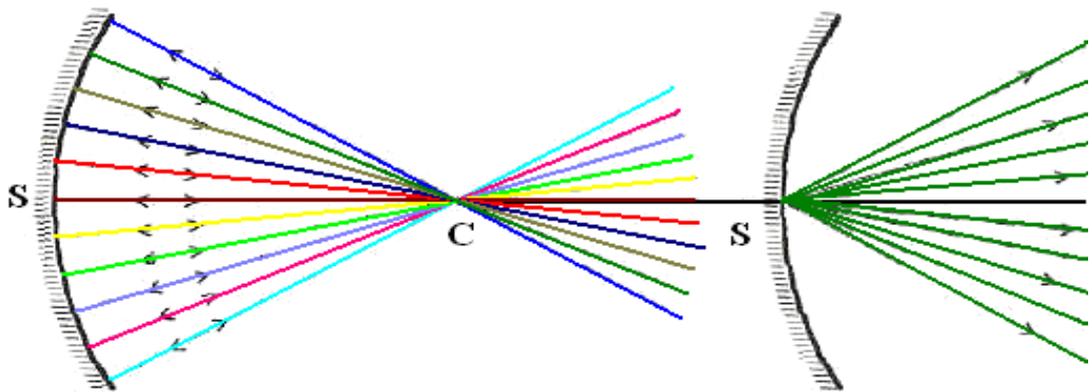
Si l'on place une source ponctuelle au centre du miroir, tous les rayons lumineux ont une incidence nulle sur le miroir. Ces rayons, tous perpendiculaires à la surface, se réfléchissent en revenant sur leurs pas et convergent au centre du miroir d'où ils sont issus.

Le centre du miroir sphérique est rigoureusement stigmatique pour lui-même, il est sa propre image réelle dans le miroir.

Si l'on place une source ponctuelle sur la surface du miroir, les rayons lumineux émis en direction

du miroir s' y réfléchissent comme sur un miroir plan et semblent être issus de la source elle-même.

Les points situés sur la surface du miroir sont rigoureusement stigmatiques pour eux-mêmes, ils sont leur propre image virtuelle dans le miroir.



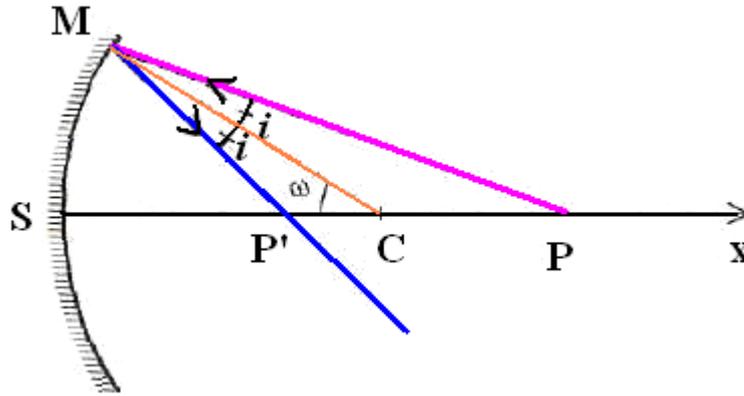
Stigmatisme rigoureux au centre et au sommet

Stigmatisme approché sur l'axe optique

B - 4

Nous allons étudier (figure suivante) le tracé d'un rayon lumineux issu d'un point P de l'axe optique du miroir. Nous noterons P' le point d'intersection du rayon lumineux avec l'axe optique après réflexion sur le miroir en M, sans préjuger à priori du stigmatisme du miroir, c'est-à-dire sans préjuger du fait que P' soit ou non l'image de P.

Nous allons montrer, au contraire, que le point P' est fonction non seulement de P, mais aussi de la direction du rayon incident, c'est-à-dire du point de réflexion M que nous identifierons par l'angle au centre ω .



Trace d'un rayon lumineux

Dans les triangles MPC et MP'C, nous écrivons les relations traduisant la proportionnalité entre les longueurs des côtés et les sinus des angles opposés et nous obtenons.

(7)

Ce qui donne :

(8)

Ces relations sont algébriques. Sur le cas de figure, nous avons, , et .

En faisant la différence de ces égalités membre à membre et en divisant par $\sin(i)$, nous obtenons la relation algébrique de conjugaison entre s et s' suivante :

$$(9)$$

Cette formule nous montre que, dans le cas général, tous les rayons issus d'un point P de l'axe optique ne convergent pas au même point P' de l'axe après réflexion sur le miroir sphérique.

Cependant, si l'angle au centre ω est suffisamment petit, $\cos\omega$ peut être assimilé à l'unité et nous aurons une quasi-convergence en un point de l'axe, donné par la relation de conjugaison caractérisant le stigmatisme approché du miroir sphérique :

(10)

Cette formule est **algébrique**.

Elle est parfaitement symétrique entre P et P' que nous qualifierons de couple de points conjugués. Nous démontrerons en exercice qu'elle est toujours vraie dans le cas d'un miroir convexe, avec

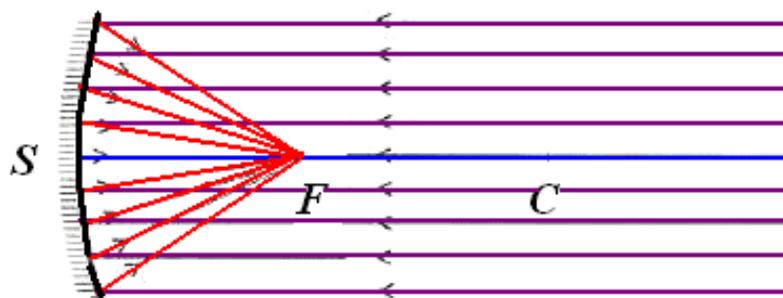
B - 5

Foyer, distance focale

La formule de conjugaison montre qu'une source ponctuelle de lumière placée en un point F à égale distance entre le centre et le sommet du miroir produit, après réflexion, un faisceau de lumière parallèle dans la direction de l'axe optique.

Ce point s'appelle le foyer du miroir (figure ci-dessous). D'après le principe du retour inverse de la lumière, nous observons réciproquement qu'un faisceau de lumière parallèle à l'axe optique, se réfléchissant sur le miroir, converge vers le foyer.

La distance algébrique f s'appelle la distance focale du miroir sphérique. Elle sera conventionnellement considérée comme positive pour un miroir concave et négative pour un miroir convexe.



d'un miroir

Foyer

Aplanétisme

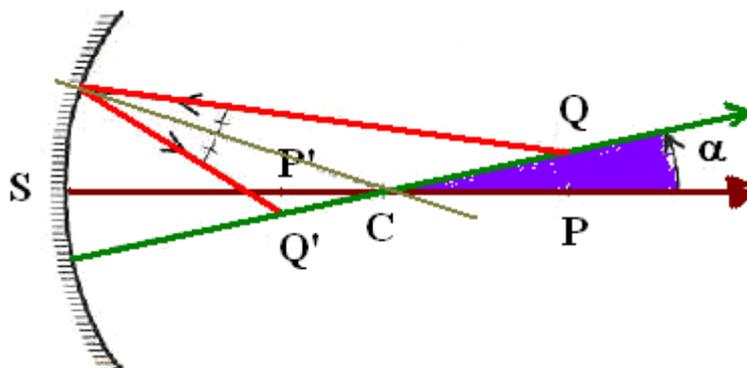
B - 6

La condition de stigmatisme approché étant vérifiée sur l'axe optique, nous pouvons affirmer qu'elle l'est aussi au voisinage de l'axe optique. En effet, le problème est invariant par rotation autour du centre du miroir (figure ci-dessous).

Considérons un couple de points conjugués P et P' sur l'axe optique. Par rotation d'un angle α , nous obtenons un deuxième couple de points conjugués Q et Q', à condition que l'angle α soit suffisamment petit pour que la condition de stigmatisme approché ($\cos\omega \approx 1$) soit toujours vérifiée.

Nous dirons que le miroir sphérique est aplanétique.

Ce terme sera utilisé pour tout système centre stigmatique sur l'axe optique qui reste stigmatique au voisinage de l'axe optique.



Stigmatisme approché au voisinage de l'axe

C

Construction des images dans l'approximation

de Gauss :

Les trois règles suivantes permettent de construire géométriquement n'importe quel faisceau de rayons réfléchis par le miroir sphérique dans l'approximation de Gauss, c'est-à-dire lorsque le miroir est fortement diaphragmé et que les rayons lumineux sont très peu inclinés par rapport à l'axe optique (figure ci-dessous).

Tout rayon passant par le centre du miroir sphérique revient précisément sur ses pas après réflexion (**rayon 1**).

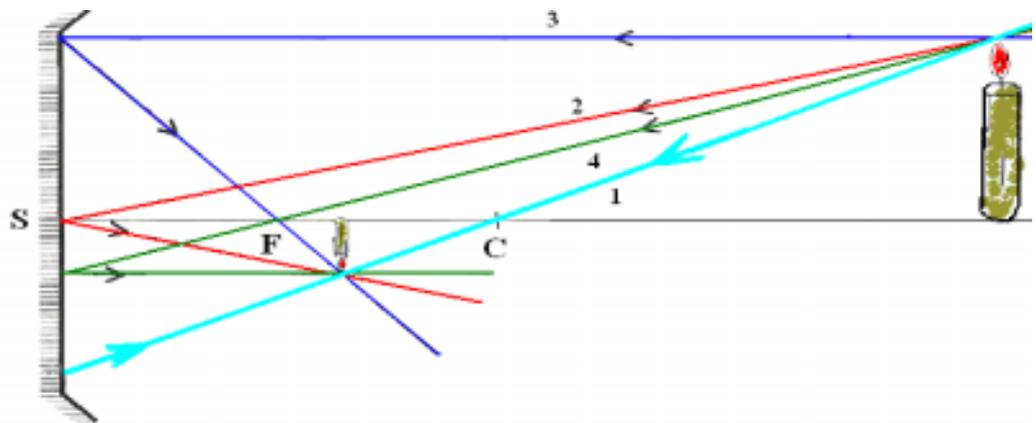
Tout rayon passant par le sommet du miroir sphérique se réfléchit symétriquement par rapport à l'axe optique du miroir (**rayon 2**).

Tout rayon parallèle à l'axe optique passe par le

foyer après réflexion (rayon 3) être
réciproquement (rayon 4).

Ces régies de construction permettent de tracer quatre rayons.

Deux rayons suffisent pour représenter l'image d'un point.



Dans les conditions de l'approximation de Gauss, le miroir sphérique sera symboliquement représenté par un segment rectiligne dont les extrémités sont repliées dans le sens de la concavité. La face métallisée est indiquée de façon explicite par des hachures.

Le creux d'une cuillère bien polie tenue normalement fait l'effet d'un miroir concave. L'image réfléchie apparaîtra inversée au fond de

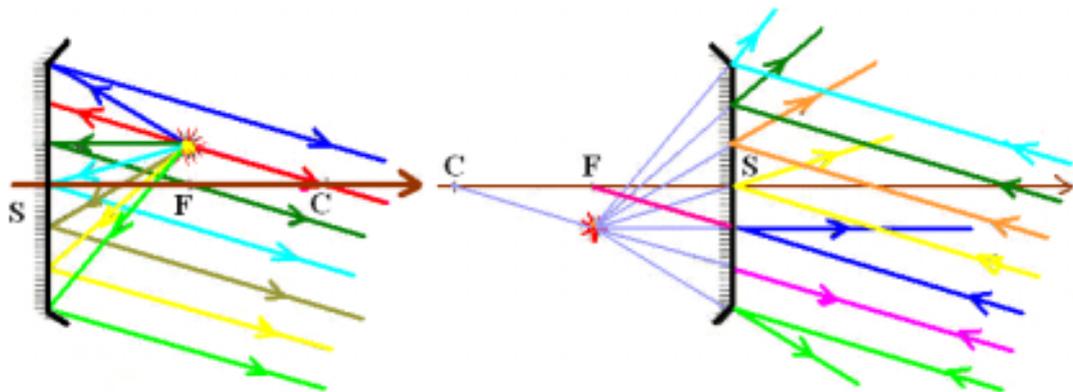
la cuillère. Si on retourne la cuillère, elle présente la surface bombée d'un miroir convexe. La même image apparaîtra.

C - 1

Cas particulier

Dans le cas d'un objet situé dans le plan focal plan perpendiculaire à l'axe optique passant par le foyer, l'image est rejeté a l'infini (figure ci dessous).

Réciproquement, dans le cas d'un objet à l'infini, observé dans une direction faisant un angle θ par rapport a l'axe optique, l'image est formée dans le plan focal du miroir a une distance $(f \theta)$ de l'axe optique, en un point que l'on qualifie de foyer secondaire d'inclinaison θ . Cette image est réelle dans le cas d'un miroir concave, virtuelle dans le cas d'un miroir convexe.



Miroir concave:
convexe:

Miroir

Image à l'infini d'un objet Image virtuelle dans
le plan focal d'un objet
réel situe dans le plan focal focal d'un objet
à l'infini

Propriétés des foyers secondaires d'un miroir sphérique

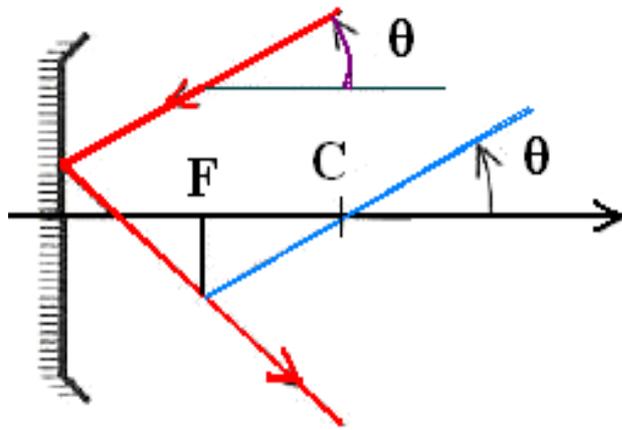
C - 2

Cas général, construction d'un rayon réfléchi

Tous les rayons lumineux passant par un même foyer secondaire ont même inclinaison après réflexion sur le miroir. Nous en déduisons une méthode générale de construction du rayon réfléchi, correspondant au théorème suivant.

Théorème

Un rayon lumineux se réfléchit sur un miroir sphérique en passant (réellement dans le cas d'un miroir concave, virtuellement dans le cas d'un miroir convexe) par le foyer secondaire correspondant à son inclinaison.



Applications :TD LECON 11

Définitions

On appelle lentille tout milieu homogène transparent limité par deux surfaces dont l'une au moins n'est pas plane c'est-à-dire sphérique.

La plupart des lentilles utilisées sont en verre ou en matière plastique, limitées généralement par deux calottes sphériques. Elles sont utilisées dans les instruments (Microscope, Télescope etc... Annexe 14) permettant de mieux voir ce que notre vue perçoit mal.

Les lentilles affectent généralement six formes principales représentées sur la figure 1.

Habituellement, on les classe en deux catégories: les lentilles à bords minces et les lentilles à bords épais.

Les lentilles plus épaisses au centre que sur les bords sont convergentes, elles transforment un faisceau de lumière parallèle en un faisceau

convergent, tandis que les lentilles plus épaisses sur les bords qu'au centre sont au contraire divergentes.

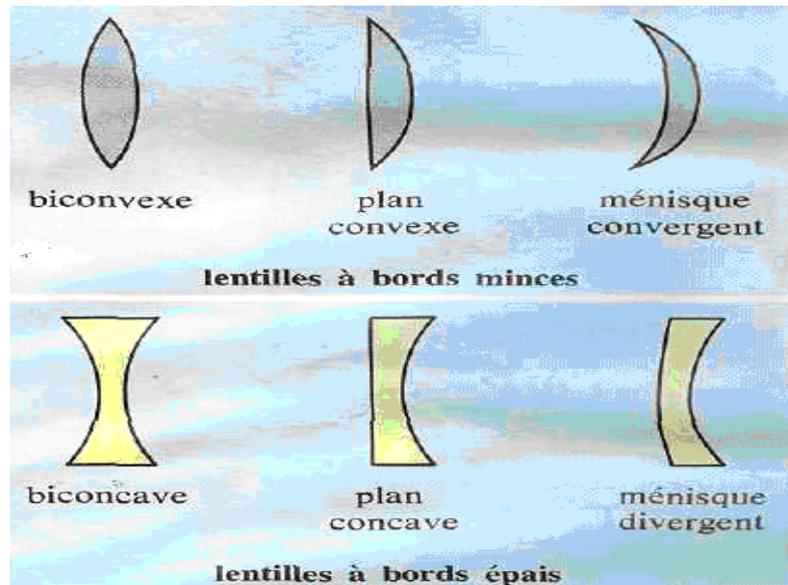


Figure 1

Les éléments géométriques d'une lentille sont :

Les centres de courbure C_1 et C_2 des calottes sphériques et les rayons de courbures R_1' et R_2' ;

L'axe principal Δ , axe de révolution passant par C_1 et C_2 et appelé le plus souvent axe de la lentille;

Une section principale, plan de symétrie passant par l'axe principal. C'est dans ce plan que nous

représenterons les rayons lumineux;

Le diamètre d'ouverture D , diamètre du cercle limitant la lentille.

Nous limiterons l'étude qui suit aux lentilles minces, c'est-à-dire aux lentilles (à bords minces ou épais) telles que leur épaisseur S_1S_2 {figure 2) est négligeable devant les rayons de courbure R_1 et R_2 .

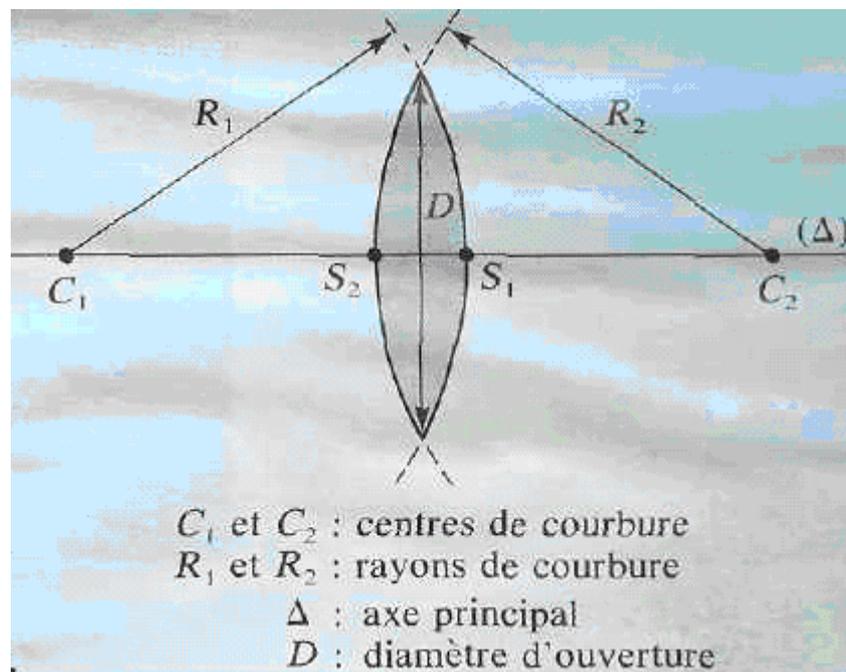


Figure 2

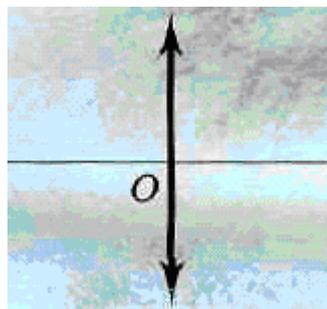
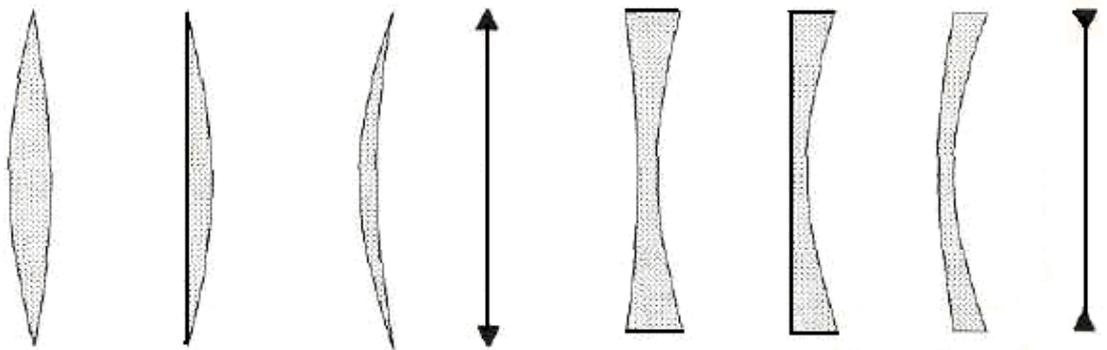
Nous allons admettre, sans démonstration, que de tels systèmes sont toujours stigmatiques et

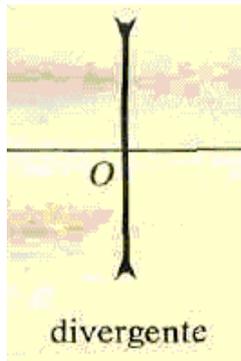
aplanétiques au voisinage de leur axe optique.

Nous nous intéresserons exclusivement aux lentilles minces, dont l'épaisseur est très petite par rapport aux rayons de courbure des dioptries.

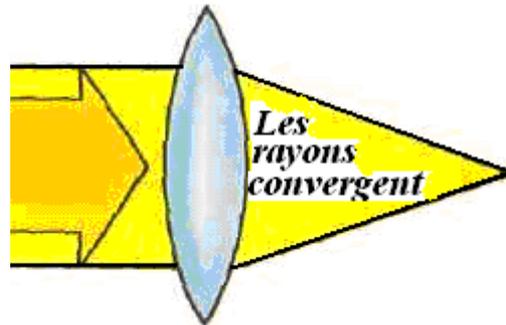
Ces lentilles seront représentées par des segments sans épaisseur.

Des flèches placées aux extrémités indiquent la convergence ou la divergence de la lentille.

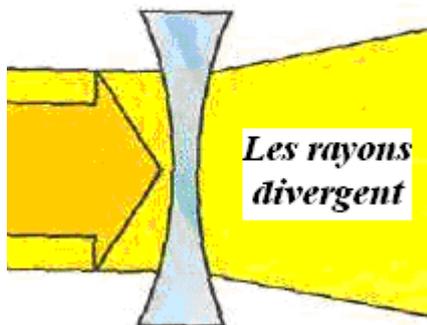




Lentille convexe



Lentille concave



Lentilles convergentes
divergentes

Lentilles

Diverses formes de lentilles

A - 1

Lentilles convergentes

Dans une cuve à ondes, lorsqu'une onde plane

atteint une lentille à bords minces, elle est transformée en une onde approximativement sphérique qui converge vers une région de l'axe (Photo 3).

Une loupe est une lentille convexe; elle fait converger la lumière à son foyer. Les rayons du Soleil qui convergent sur une feuille de papier peuvent renflammer (Photo 4).



Photo - 3-

Photo - 4 -

Une expérience semblable peut être réalisée en optique (figure 3 et photo 5), un faisceau de rayons parallèles donnant un faisceau de rayons convergents.

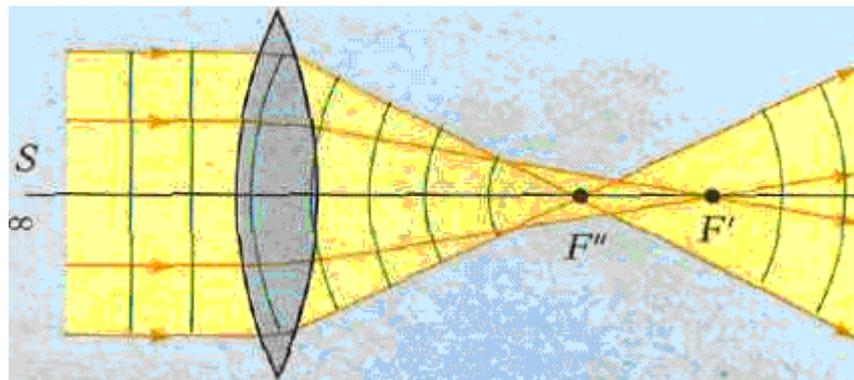


Figure 3 :

L'onde plane incidents est transformée en une onde approximativement sphérique. Les rayons centraux viennent converger en F'' . Les rayons marginaux sont plus convergents. Une lentille à bords minces est convergente.

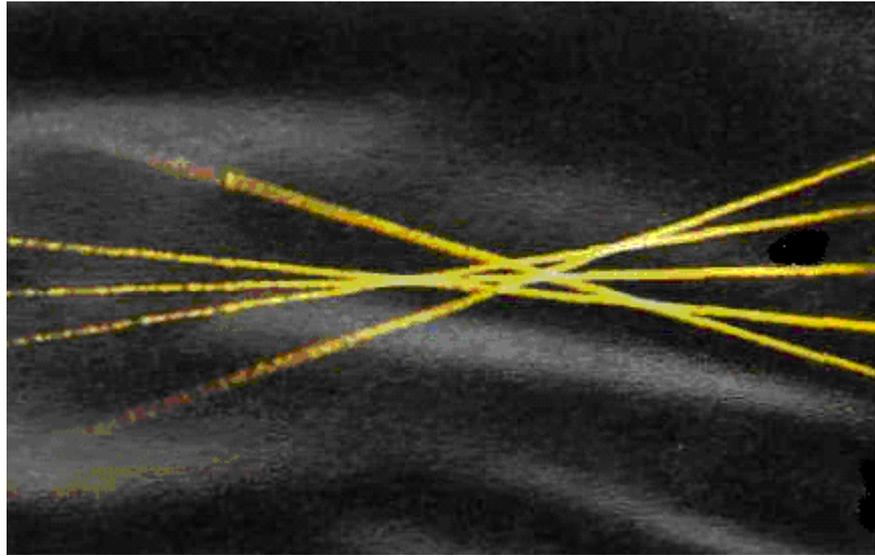


Photo 5 :

Faisceaux lumineux tombant sur une lentille à bords minces. Les faisceaux tombant sur les bords de la lentille convergent plus que les faisceaux du centre.

A - 2

Les lentilles divergentes

Les photographies 6 suivantes montrent que, par rapport aux rayons incidents, les rayons émergents s'écartent de l'axe optique d'une lentille à bords épais.

Alors que les rayons du faisceau incident sont

parallèles, ceux du faisceau émergent sont divergents et semblent provenir d'une région située devant la lentille.

Une lentille à bords épais est divergente.

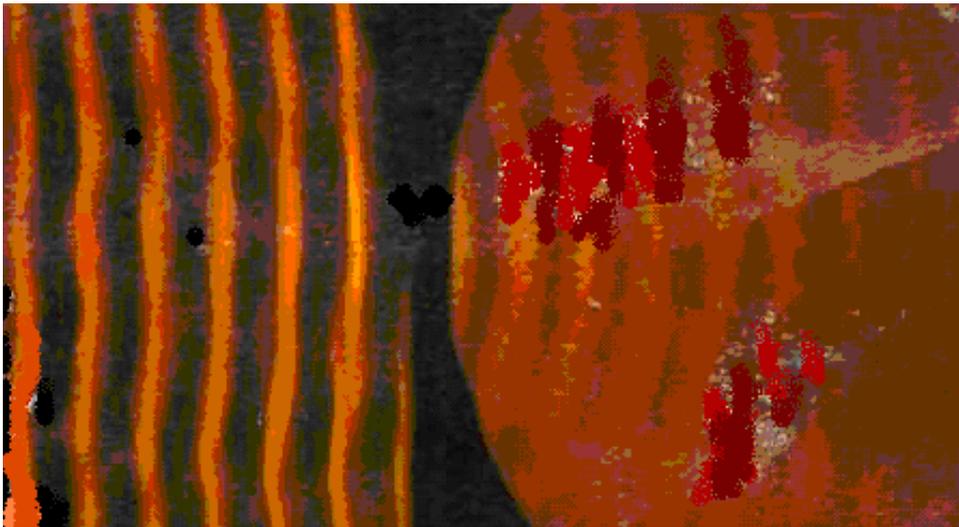


Photo – 6 a :

Expérience sur la cuve à ondes : divergence des ondes transversal une **lentille à bords épais**.

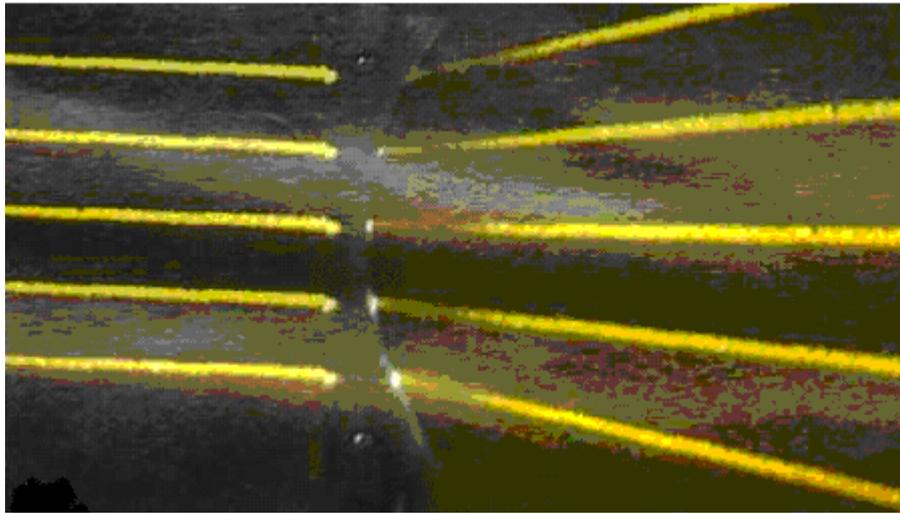


Photo – 6 b :

Expérience d'optique : la lentille à bords épais provoque la divergence du faisceau lumineux.

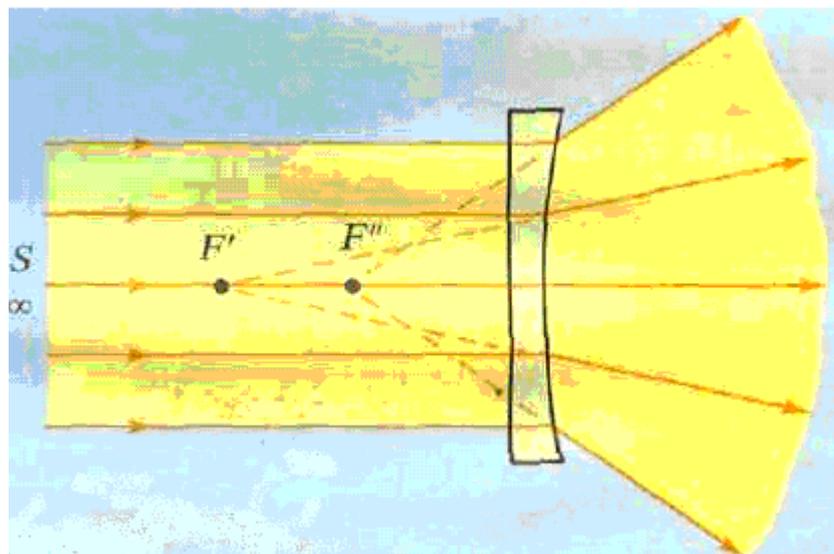


Figure 4 :

L'image F' donnée par les rayons centraux est

différente de celle qui est donnée par les rayons marginaux : il y a aberration de sphéricité.

B

FORMATION DES IMAGES

B - 1

Les conditions de Gauss

Supprimons les rayons marginaux à l'aide d'un diaphragme disposé devant la lentille (Annexe - 15 -).

Les rayons convergent alors quasiment en un seul point de l'axe (photo 7).

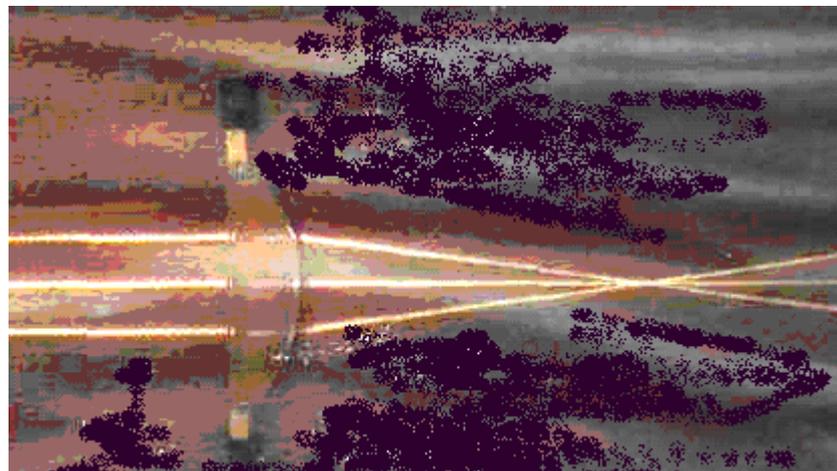


Photo 7 : -

Les conditions de Gauss, les rayons convergent pratiquement en un seul point de l'axe de la lentille.

Plaçons un objet lumineux devant une lentille convergente (photos 8-a et 8-b). Nous observons une image réelle renversée, un peu floue.

Diaphragmons la lentille : l'image devient plus nette. Ecartons l'objet lumineux de l'axe principal tout en diaphragmant la lentille : la netteté de l'image diminue.



Photo 8-a :

La lentille n'est pas utilisée dans les conditions de Gauss : -

L'image est floue.



Photo 8-a :

Un diaphragme est placée contre la lentille : -

L'image apparaît nette sur l'écran.

En résumé, une lentille donne des images nettes si:

Elle est diaphragmée;

L'objet, voisin de l'axe, est vu de la lentille sous un angle faible.

Dans ces conditions, tous les rayons lumineux pénétrant dans la lentille sont peu inclinés sur l'axe de la lentille et restent au voisinage de cet axe.

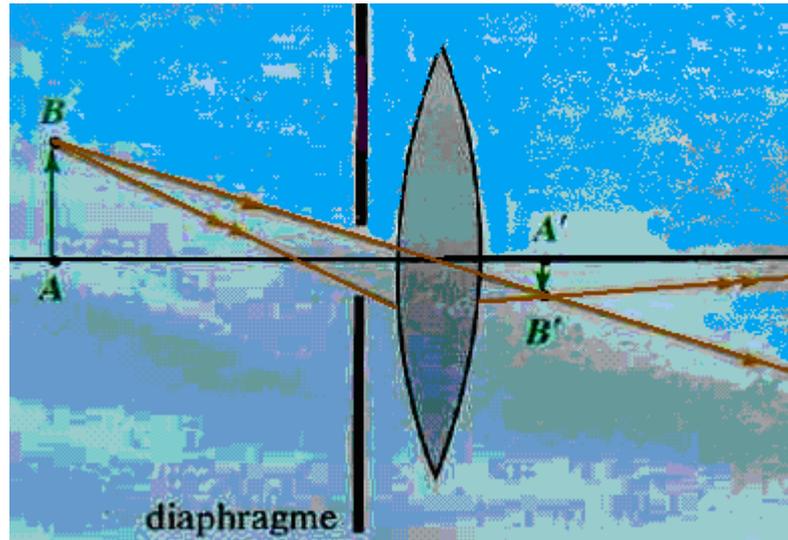
Cet exemple particulier expose **les conditions de Gauss**, qu'on peut généraliser à des systèmes optiques comportant plusieurs lentilles coaxiales.

Les conditions de Gauss sont au nombre de deux

1/ Les rayons lumineux font un petit angle avec l'axe optique de la lentille.

2/ Les rayons lumineux rencontrent la lentille au voisinage de sa région centrale.

Utilisée dans ces conditions, une lentille donne des images nettes.



Lentille utilisée dans les conditions de Gauss :

Les rayons extrêmes peu inclinés par rapport à l'axe optique;

Les rayons extrêmes voisins de l'axe optique et tombant près du centre de la lentille.

C

Propriétés et caractéristiques fondamentales des lentilles minces

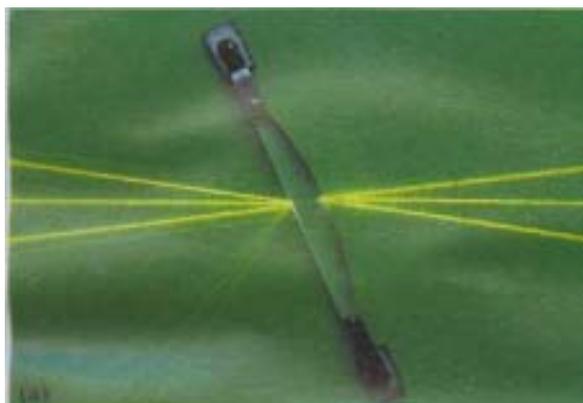
C - 1

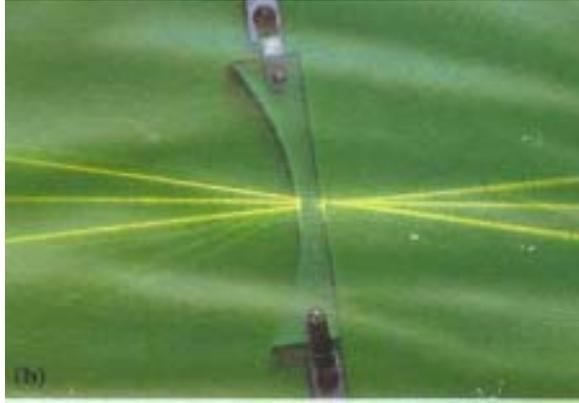
Le Centre Optique

Nous limiterons notre étude aux lentilles minces et nous négligerons leur épaisseur.

Nous constatons sur les photographies suivantes que, pour les deux types de lentilles :

Tout rayon passant par le centre optique ne subit quasiment aucune déviation.





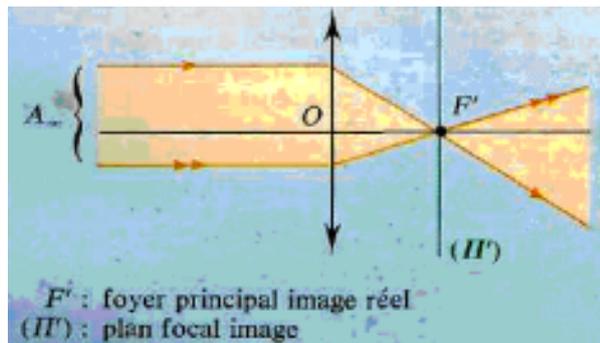
Tout rayon passant par le centre optique ne subit quasiment aucune déviation

C - 2

Le Foyer Principal Image d'une lentille convergente

Si on éclaire dans les conditions de Gauss, une lentille convergente avec un faisceau parallèle à son axe principal (photos et figure suivantes):





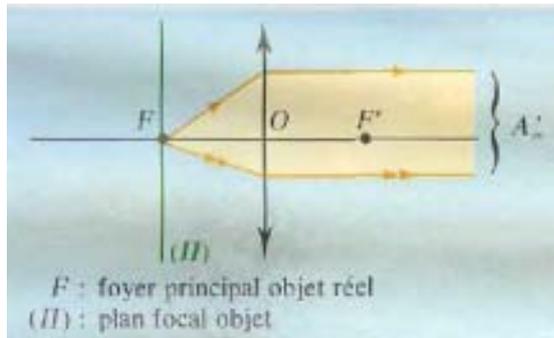
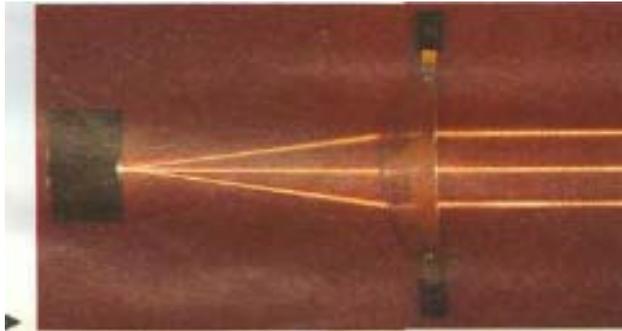
Tous les rayons émergents convergent en un point F' de l'axe principal. Ce point est appelé foyer principal image de la lentille.

Si nous retournons face pour face la lentille, la position du point F' est inchangée.

L'objet A , situé à l'infini sur l'axe optique, et le foyer principal image F' sont dits points conjugués.

Comme la lumière passe effectivement par le point F' , nous dirons que c'est un **foyer image réel**.

Plaçons une source lumineuse quasi ponctuelle au point F située sur l'axe et symétrique du foyer image F' par rapport au centre optique O (photo et figure suivantes) :



Les rayons issus de F émergent de la lentille parallèlement à l'axe principal.

Ce point est appelé foyer principal objet de la lentille. Le point F et son image A' située à **l'infini** sur l'axe optique sont dits **points conjugués**.

Si nous retournons face pour face la lentille, la position du point F est inchangée.

Comme les rayons lumineux sont effectivement issus du point F , situé en avant de la lentille, nous dirons que c'est un **foyer objet réel**.

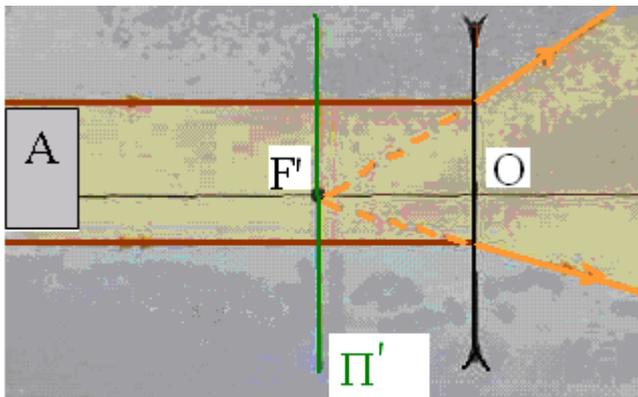
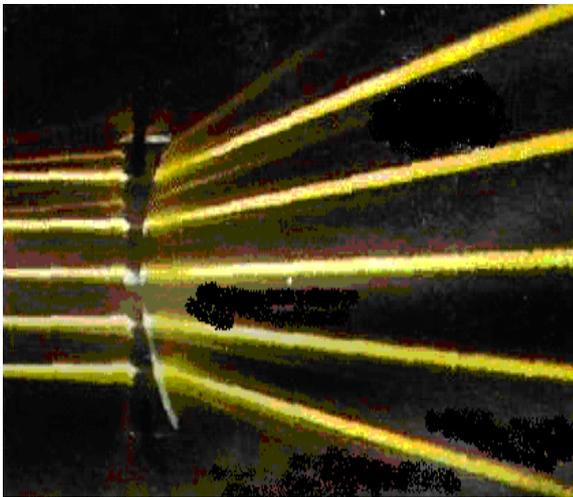
Nous pouvons remarquer que le foyer F est la position limite au-delà de laquelle, en

rapprochant l'objet de la lentille, nous n'observons plus d'image réelle.

C - 3

Le Foyer Principal Image d'une lentille divergente

Eclairons maintenant, dans les conditions de Gauss, une lentille divergente avec un faisceau parallèle a son axe principal (photo et figure suivante) :



F' : foyer principal image virtuel
 Π' : plan focal image

Nous remarquons que tous les rayons émergents divergent comme s'ils venaient d'un point F' de

II' axe principal. Ce point est appelé **foyer principal image de la lentille.**

Si nous retournons face pour face la lentille, la position du point F' est inchangée.

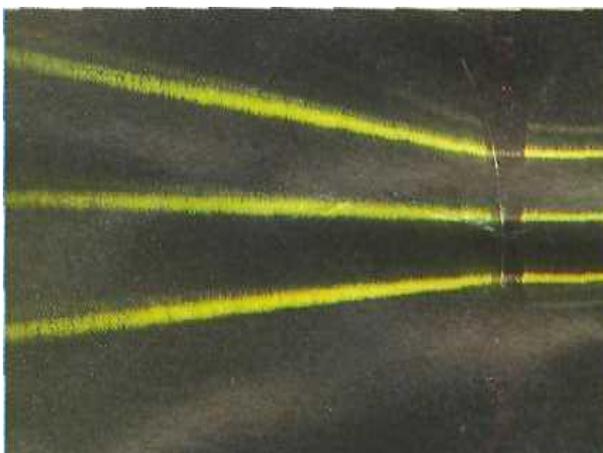
L'objet A, situé à l'infini sur l'axe optique, et le foyer principal image F' sont dits **points conjugués.**

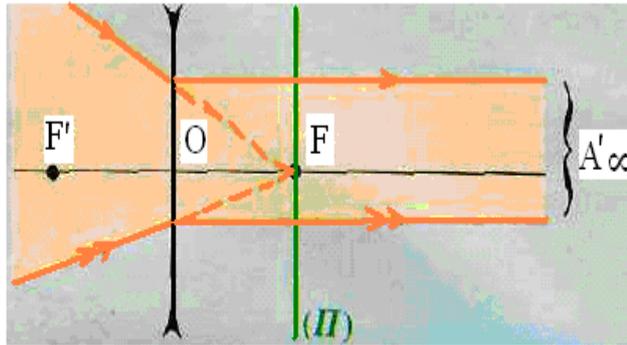
Le point F' se trouvant à l'intersection des prolongements des rayons lumineux émergents, nous dirons que c'est un foyer **image virtuel.**

C - 4

Le Foyer principal objet d'une lentille divergente

Faisons converger maintenant un faisceau lumineux en un point F de l'axe optique d'une lentille divergente, située au-delà de la lentille et symétrique du foyer image F' par rapport au centre O (photo et figure suivantes) :





F : foyer principal objet virtuel

Π : plan focal objet

Nous observons que le faisceau émergent est parallèle à l'axe. Le point F est appelé foyer **principal objet de la lentille.**

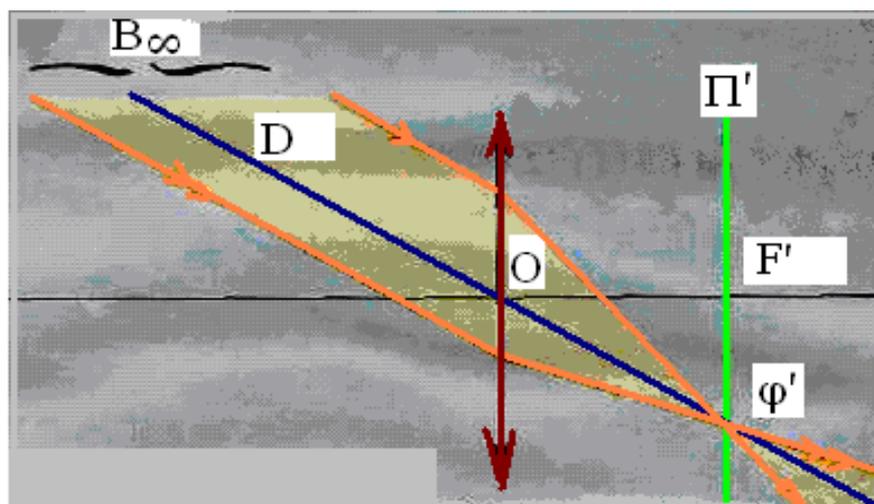
Le point F se trouvant à l'intersection des prolongements des rayons lumineux incidents, nous dirons que c'est un foyer **objet virtuel.**

C - 5

Les Foyers secondaires

Inclinons légèrement sur l'axe principal d'une lentille un faisceau incident de rayons parallèles :

Les rayons émergents convergent en un point φ' du plan de front passant par F' , (figure ci-dessous).

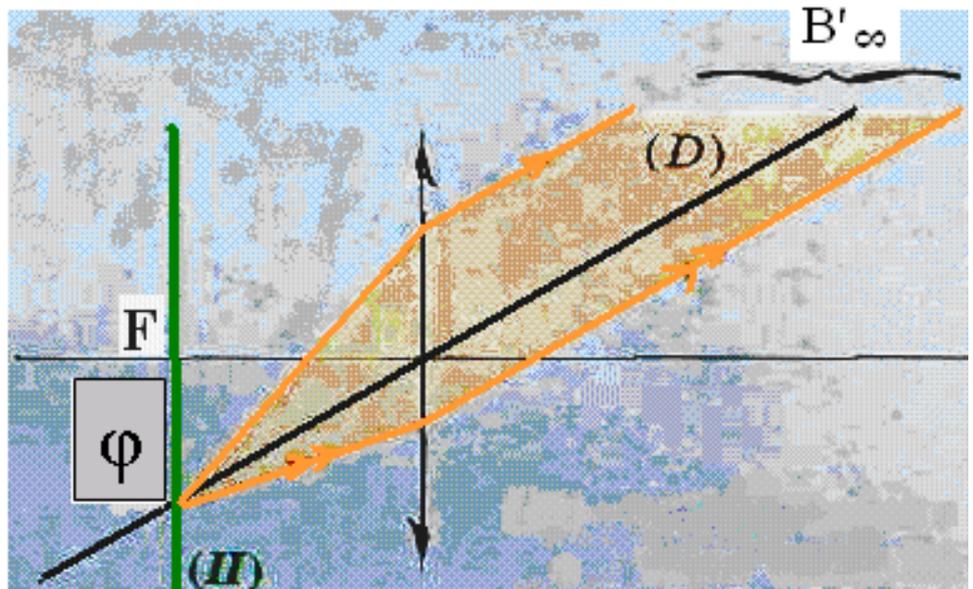


φ' : foyer secondaire image D : axe secondaire

Ce point φ' est appelé foyer secondaire image. Il est situé à l'intersection du plan de front passant par F' (plan focal image) et du rayon incident passant par le centre optique O , rayon non dévié.

Le support d'un tel rayon $\varphi'O$ définit un axe secondaire.

De même, si nous plaçons une source lumineuse en un point quelconque φ du plan de front passant par F (plan focal objet) :
Tous les rayons émergents de la lentille sont parallèles (figure ci dessous).



φ est appelé **foyer secondaire objet**. La droite φO définit un axe secondaire; les rayons émergents sont parallèles à cet axe.

Construction des images dans l'approximation De Gauss

D

Retenons d'abord les trois régies simples suivantes.

Tout rayon passant par le centre optique traverse la
lentille mince sans déviation.

Tout rayon incident parallèle à l'axe optique passe
par le foyer image (ou semble issu du foyer
image) après avoir traverse une lentille mince.

Tout rayon incident passant par un foyer (ou intercepté tandis qu'il allait passer par un foyer) est parallèle à l'axe optique après avoir traverse une lentille mince.

Marche d'un rayon lumineux

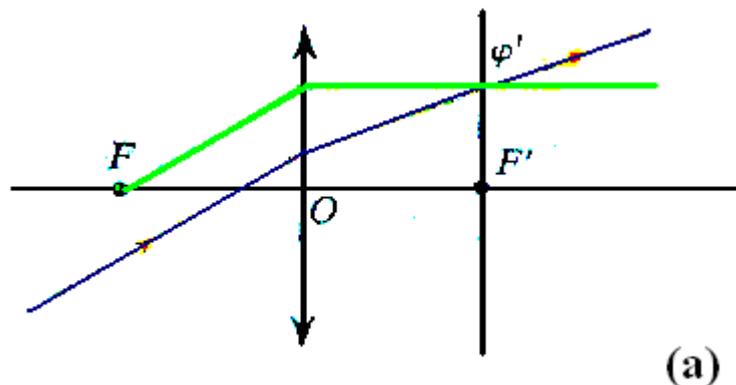
D - 1

Connaissant la direction d'un rayon lumineux incident arrivant sur une lentille, nous voulons tracer le rayon émergent. A cette fin, il nous suffit d'utiliser les propriétés que nous venons d'énoncer.

Nous disposons de trois méthodes, qui font l'objet des figures a, b et c suivantes :

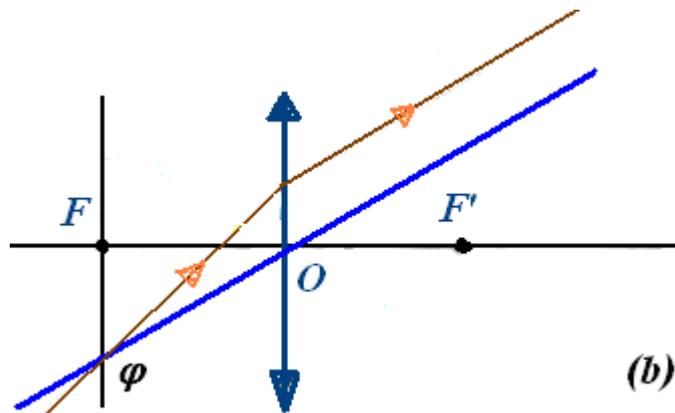
D - 1 - 1

Utilisation du foyer objet (figure a);



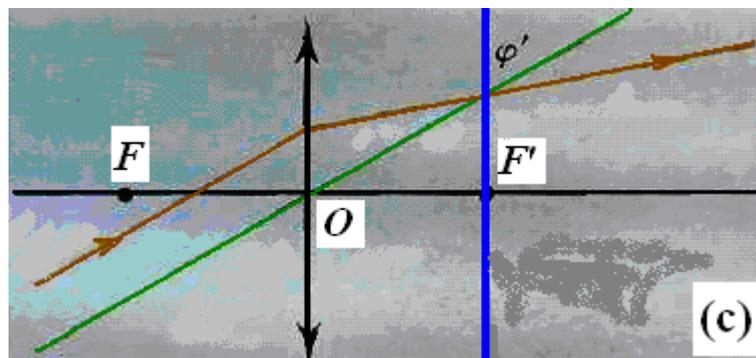
Traçons un rayon fictif passant par F et parallèle au rayon considéré. Ce rayon émerge de la lentille parallèlement à l'axe optique et coupe le plan focal image φ' . Les rayons incidents étant parallèles, les rayons émergents doivent se croiser en φ' .

D- 1 - 2 Utilisation d'un foyer secondaire objet φ (figure b);



L'intersection du rayon lumineux avec le plan focal objet définit un foyer secondaire objet φ . Le rayon émergent de la lentille est parallèle au rayon fictif φO qui n'est pas dévié.

D - 1 - 3 Utilisation d'un foyer secondaire image φ' (figure c).



L'intersection avec le plan focal image du rayon fictif, parallèle au rayon incident et passant par le centre

optique, définit le foyer secondaire image φ' . Le rayon lumineux émergent passe lui aussi par φ' .

D - 1 - 4

Construction de l'image d'un objet

Soit un objet AB contenu dans un plan de front, le point A étant sur l'axe principal.

Quelle est son image A'B'?

Tout rayon issu de B et traversant la lentille passe par le point image B'.

Il suffit donc de tracer deux rayons particuliers issus de B;

B', image de B, se trouvera à l'intersection des deux rayons émergents (point image réel) ou à celle de leurs prolongements (point image virtuel).

On utilisera deux des trois rayons particuliers suivants :

- rayon issu de B et passant par le centre optique, rayon

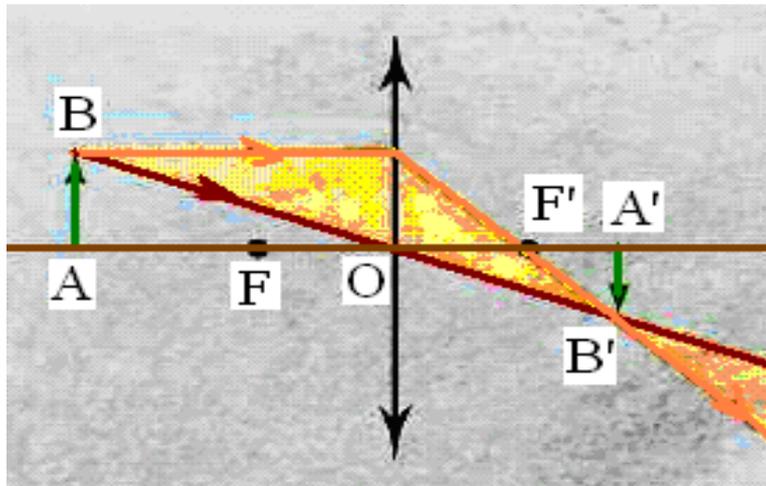
qui n'est pas dévié;

- rayon issu de B et parallèle à l'axe optique, rayon qui émerge en passant par le foyer image F' ;
- rayon issu de B et passant par le foyer objet F , rayon qui émerge parallèlement à l'axe optique.

L'image $A'B'$ cherchée est, comme l'objet, perpendiculaire à l'axe principal; A' , image de A, sera donc la projection orthogonale de B' sur l'axe principal.

Le point objet A et son image A' sont appelés points conjugués. Il en est de même pour les points B et B' .

Comme application, nous présentons un exemple de construction d'image avec une lentille convergente.



Objet réel et Image réelle renversée

E

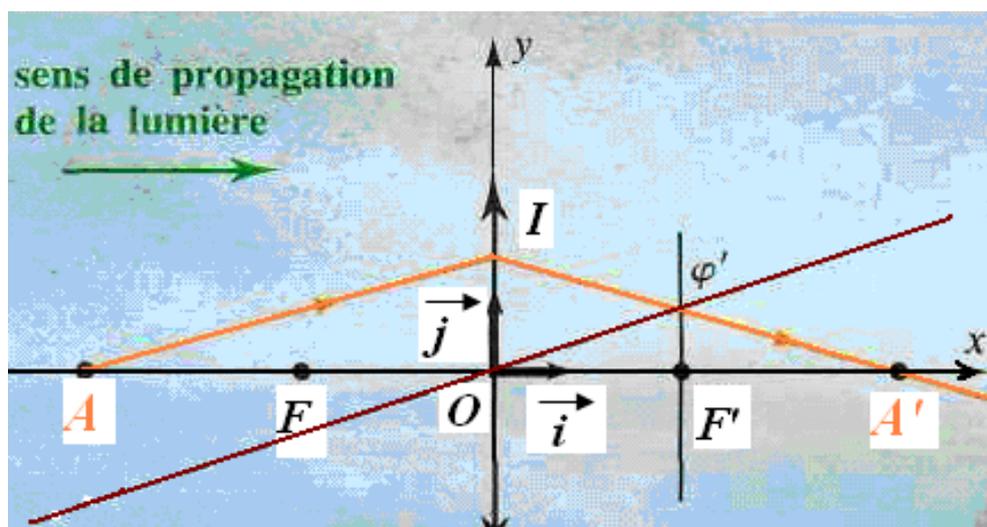
Formules De Conjugaison Des Lentilles Minces

Nous venons de déterminer à l'aide de constructions simples la position et la grandeur de l'image, connaissant la distance focale et la nature (convergente ou divergente) de la lentille.

Nous pouvons retrouver ces résultats par le calcul.

A cette fin, définissons un repère ortho normal la façon suivante: le point O est le centre optique; un vecteur unitaire porté par l'axe principal et orienté dans le sens de la propagation de la lumière; un vecteur unitaire orthogonal à \vec{i} et situé dans le plan de la figure où chemineront les rayons lumineux (figure suivante).

Soit un point objet A situé sur l'axe optique d'une lentille (figure ci après) ; ce rayon émet un rayon lumineux AI .



Pour construire le rayon émergent IA' , traçons la droite passant par O et parallèle à AI ; elle

coupe le plan focal image en φ' .

Le rayon émergent est alors $I\varphi'$, qui coupe l'axe en A' , image de A .

Nous utiliserons comme unité de longueur le centimètre ou le mètre et, dans les formules qui suivent, les mesures des segments seront des grandeurs algébriques.

Nous allons établir la formule de conjugaison avec origine au centre optique avec les données qui suivent (Annexe - 16 -).

Posons $OA = x$, $OA' = x'$ et $OF = f$.

La relation de conjugaison pour une lentille mince est donnée par la relation suivante :

$$(1)$$

Ce raisonnement est général et ne dépend pas de la nature (convergente ou divergente) de la lentille mince. Cette formule, appelée relation de conjugaison, permet de déterminer la

position de l'image connaissant celle de l'objet, et inversement.

Elle permet de déterminer également la distance focale image (grandeur algébrique) de la lentille.

Avec nos conventions, la distance focale image, est positive pour une lentille convergente, négative pour une lentille divergente.

Remarque 1: Les foyers F et F' ne sont pas des points conjugués.

Lorsque le point A tend vers un point situé à l'infini, A' tend vers le foyer F'.

Lorsque le point A tend vers le foyer F, A' tend vers un point situé à l'infini.

Remarque 2:

L'objet est réel ;

L'image

est réelle;

L'objet est virtuel ;
virtuelle;

L'image est

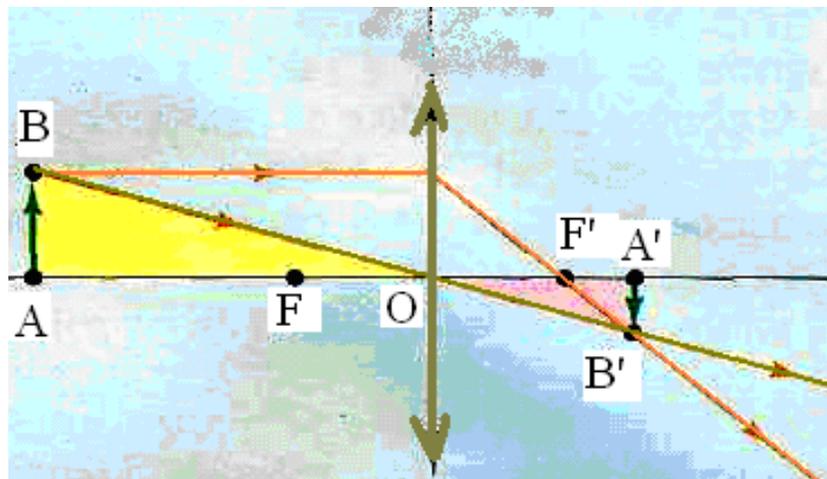
Formule De Grandissement

F

On appelle grandissement le rapport γ tel que:

(2)

Cette formule permet de définir la taille et le sens de l'image (droite ou renversée ; figure ci dessous):



si $\gamma < 0$, l'image est renversée par rapport à l'objet;

si $\gamma > 0$, l'image est droite par rapport à

l'objet.

Applications :TD LECON 12

Introduction et Préliminaire

La photographie suivante 1 montre un arc-en-ciel qui résulte de la décomposition, par les gouttelettes de pluie, de la lumière blanche du Soleil (schéma 1).

Ce schéma montre comment la lumière pénétrant dans une goutte de pluie est réfractée, c'est-à-dire déviée et dissociée en toutes les couleurs du spectre pour former un arc-en-ciel.

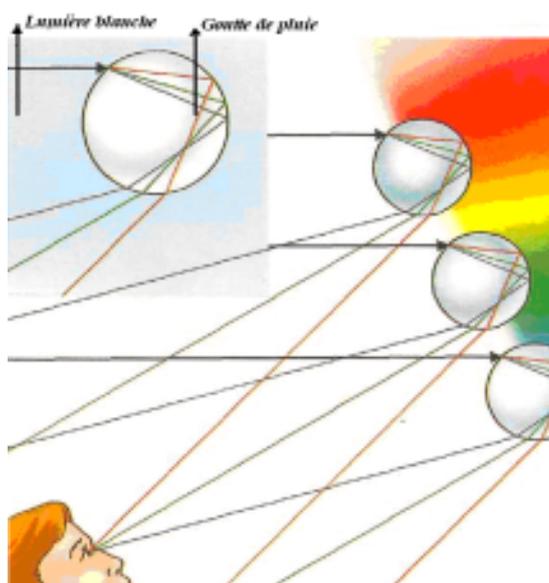




Schéma -1-

Photo – 1-

Le premier cercle, le plus petit est le violet; Le plus grand est le rouge. On passe du violet au rouge de façon continue par le bleu, le vert, le jaune et l'orange.

Cette décomposition appelée aussi dispersion peut aussi être réalisée par vous-même à la maison (Annexe 17) ou à l'aide d'un **prisme**.

A

DISPERSION DE LA LUMIERE BLANCHE

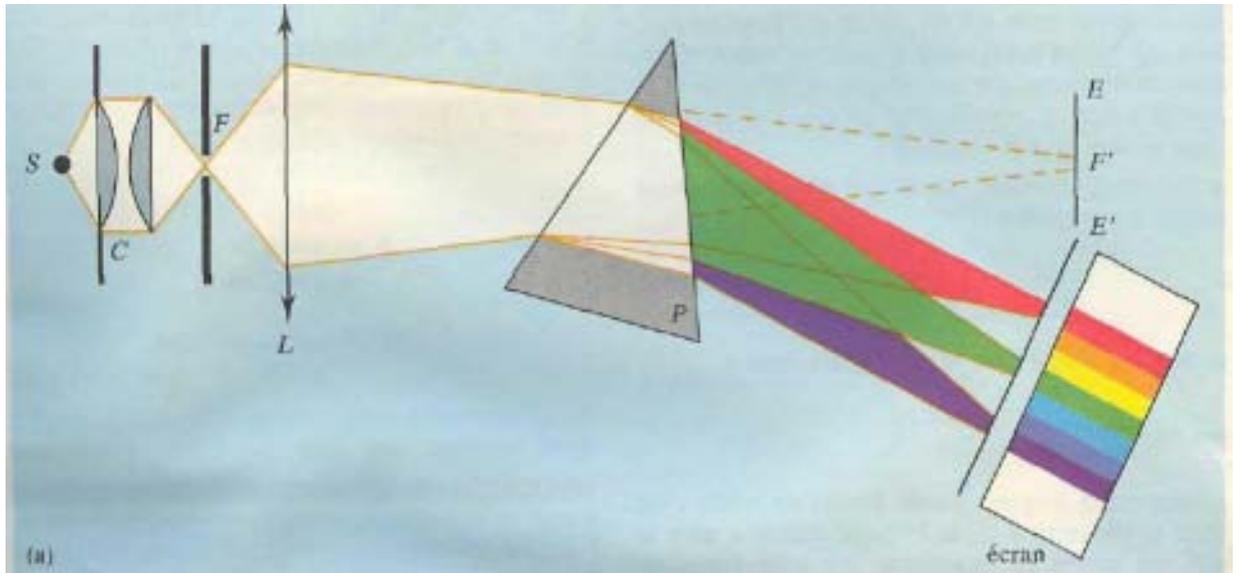
PAR UN PRISME

A - 1

Analyse de la lumière a l'aide d'un prisme

Réalisons la décomposition de la lumière par un prisme de verre (figure 2 - montage ci dessous).

Une fente F est éclairée par une source de lumière blanche.

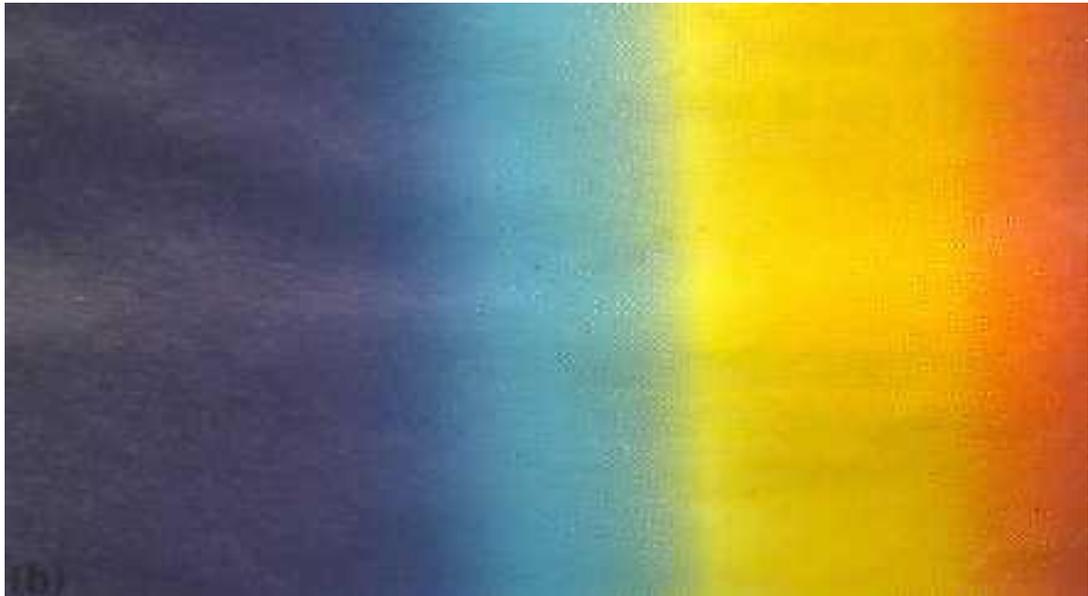


S : source. C : condenseur; le faisceau issu de S converge sur la fente F . F : fente fine, parallèle à l'arête du prisme. L : lentille. P : prisme. E' : écran sur lequel les images colorées de F apparaissent nettement.

La lentille L en donne une image blanche P projetée sur l'écran E . L'interposition du prisme P , d'arête parallèle à la fente F , dévie les rayons lumineux.

Nous observons sur l'écran F . une plage colorée,

continue, comportant dans l'ordre les couleurs principales : violet, indigo, bleu, vert, jaune, orange, rouge. Cette plage colorée, image de la fente F, constitue le spectre de la lumière blanche issue de la fente F (photographie ci dessous).



Photographie de l'écran d'observation

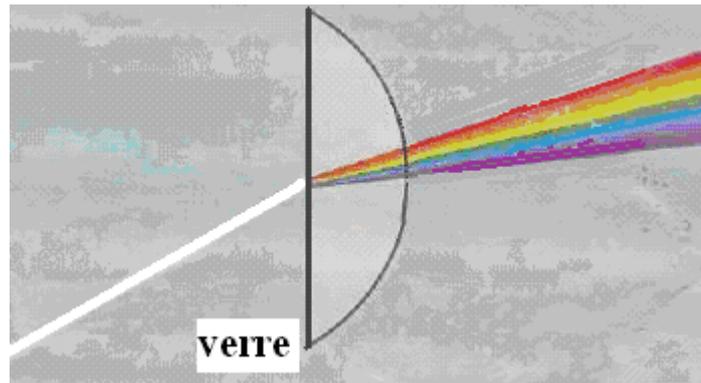
Les radiations violettes et bleues sont plus déviées que les jaunes, lesquelles le sont plus que les rouges; la déviation provoquée par le prisme de verre dépend donc de la couleur et augmente avec la fréquence des radiations.

Plaçons devant la fente F différents filtres colorés: l'image F' de la fente se réduit alors à une bande colorée de même couleur que le filtre obtenue par un filtre de qualité, la bande colorée, très étroite, est appelée **raie**; la lumière transmise par un tel filtre peut être considérée comme monochromatique.

L'ensemble obtenu à l'aide d'un prisme des diverses images colorées d'une fente éclairée par une source constitue le spectre de la lumière émise par cette source. **La séparation des radiations monochromatiques constitue le phénomène appelé décomposition de la lumière.**

Notion de dispersion : Interprétation de l'expérience de dispersion

Lorsqu'un rayon de lumière blanche arrive sur un disque de verre, nous constatons que le rayon réfracté est irisé (figure suivante). Les diverses radiations colorées qui constituent le faisceau incident se séparent lors de la réfraction :



La radiation violette est plus déviée que la radiation rouge;

L'indice du milieu pour la radiation violette est supérieur à celui de la radiation rouge.

Les radiations ne se réfractent pas de la même façon.

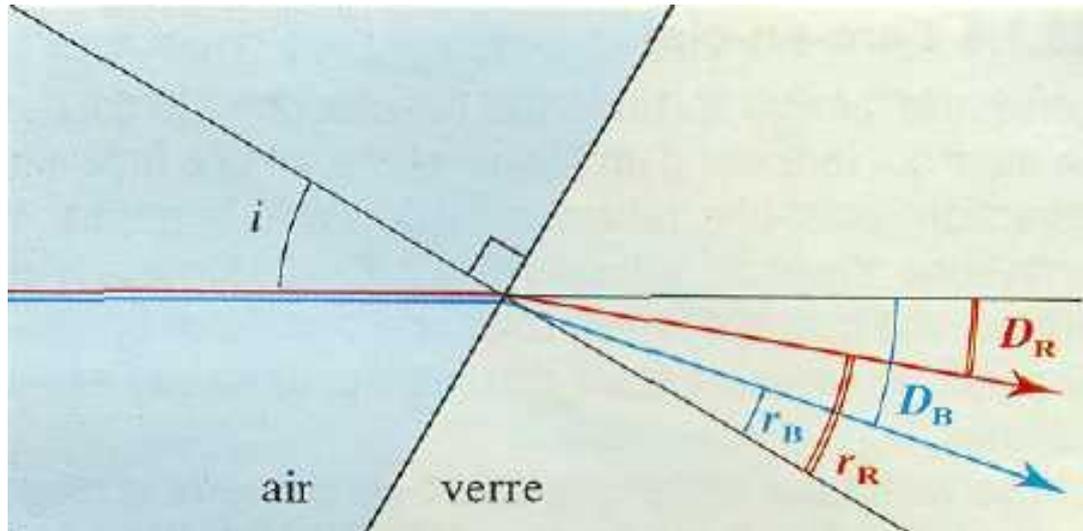
Pour une même valeur de l'angle d'incidence i , l'angle de réfraction r dépend de la couleur de la radiation, donc de sa fréquence.

D'une manière générale, un indice absolu dépend donc non seulement de la nature du milieu de propagation mais aussi de la fréquence de l'onde lumineuse considérée.

Un milieu est dit dispersif si son indice dépend de la fréquence de l'onde qui se propage dans ce milieu.

Les milieux transparents, à l'exception du vide, sont plus ou moins dispersifs.

La figure suivante représente la séparation d'un rayon bleu et d'un rayon rouge après une réfraction air/verre;



La déviation D_B d'un rayon bleu est supérieure à la déviation D_R d'un rayon rouge, tandis que l'angle de réfraction r_B est inférieur à l'angle de réfraction r_R , soit:

$$D_B > D_R$$

$$r_B > r_R$$

Selon la 3^{ème} relation de Descartes, nous avons :

$$\text{Sin } i = n_B \text{ Sin } r_B = n_R \text{ Sin } r_R \quad (1)$$

Ce qui implique que :

$$n_B > n_R$$

(2)

D'après l'équation (1) de la leçon 10 qui donne l'expression de l'indice de réfraction d'un milieu fonction de la vitesse de propagation, nous pouvons déduire que :

(3)

V_B et V_R représentent les vitesses de propagation de la radiation dans le milieu.

La relation permet de dire que :

(4)

- L'indice absolu d'un milieu transparent dispersif **augmente en général avec la fréquence des radiations.**

Donnons, à titre d'exemple, les valeurs d'indices correspondant à trois radiations différentes, et ce pour deux types de verres couramment utilisés en optique (crown et flint):

Radiatio	Rouge	Jaune	Bleu
----------	-------	-------	------

n			
$\lambda(\text{nm})(\text{vide})$	656,3	589,3	486,1
n_{crown}	1,504	1,507	1,521
n_{flint}	1,612	1,621	1,671

Nous pouvons maintenant interpréter l'expérience de décomposition de la lumière par le prisme de la figure 2, réalisé à l'aide d'un verre dispersif.

Le rayon incident, quand il atteint la première face du prisme (dioptré plan), subit le phénomène de réfraction et donne naissance à un faisceau, les différentes radiations ne se réfractant pas identiquement.

Le phénomène se reproduit sur la seconde face du prisme, et on obtient à la sortie un large constitué de plages de différentes couleurs.

A - 3

Déviatiion de la Lumière par un prisme

Soit un rayon de lumière monochromatique SI situé dans un plan de section principale d'un prisme

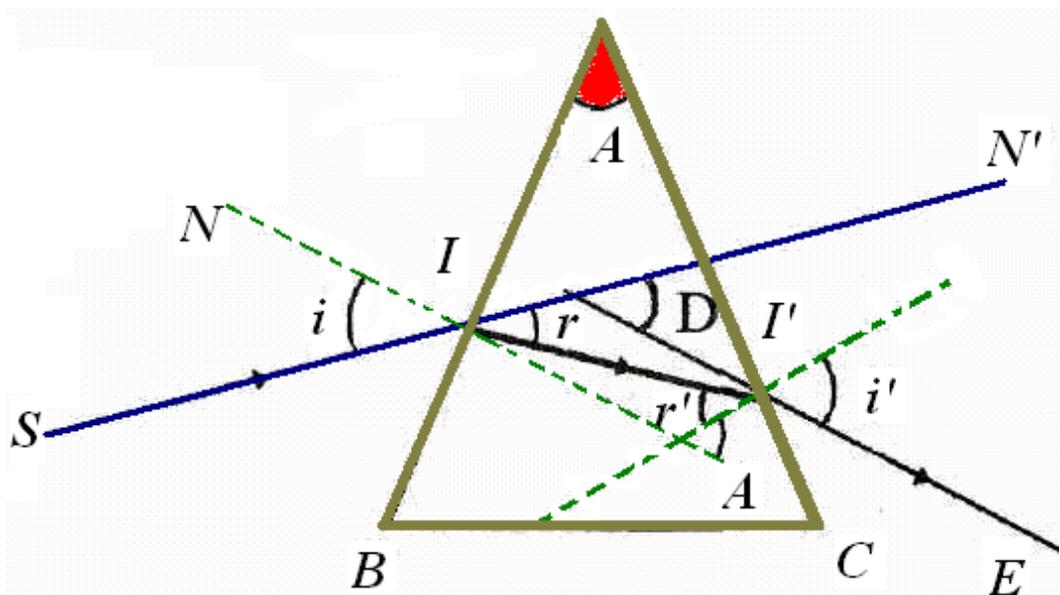
d'angle A (figure ci-dessous). Il arrive en I sur la face d'entrée AB avec un angle d'incidence i , angle que fait le rayon incident avec la normale IN:

$$i = (\mathbf{IN}, \mathbf{IS})$$

Cet angle est positif si le rayon lumineux est situé entre la normale et la base du prisme. Il sera négatif si le rayon incident est situé entre la normale et l'arrête A du prisme.

On se placera, au cours de cette expérience dans le cas où $i > 0$. n étant l'indice du prisme pour la longueur d'onde utilisée.

La relation $\sin i = n \sin r$ montre que le passage de la lumière à travers la face d'entrée qui se fait d'un milieu moins réfringent ($n = 1$) à un milieu plus réfringent ($n_2 = n > 1$) est toujours possible quelque soit i .



Le rayon réfracté dans le prisme attaque la face AC au point I avec une incidence r' tel que $r' = A - r$.

Il s'agit maintenant du passage d'un milieu réfringent ($n_1 = n$) à un milieu moins réfringent ($n_2 = 1 < n$).

Ce passage n'est pas toujours possible: pour que la lumière puisse sortir de la face AC, on doit avoir $r' < \lambda$;

λ étant l'angle limite de réfraction par la relation :

(5)

A - 3 - 1

Conditions d'émergence

Le rayon lumineux peut sortir du prisme après deux réfractions, sans réflexion totale sur la seconde où le passage de la lumière se fait d'un milieu dans un autre moins réfringent.

Pour cela, deux conditions doivent être satisfaites:

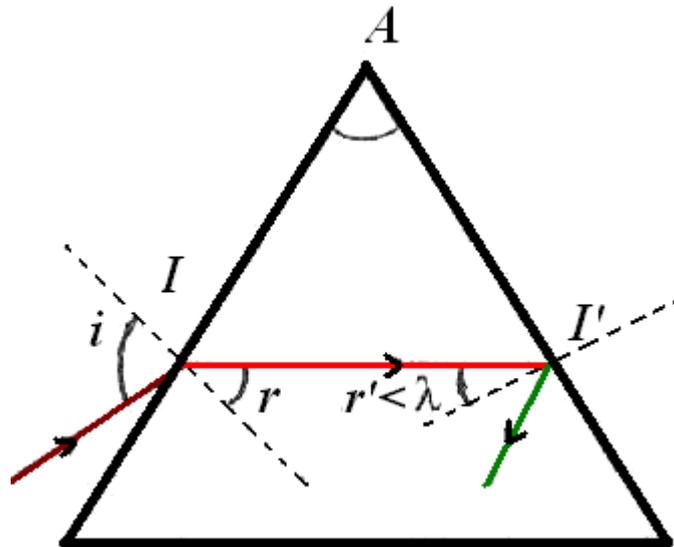
Condition sur l'angle du prisme

Soit λ l'angle limite de réfraction de la matière qui compose le prisme. Il n'y aura pas de réflexion totale en I' si $r' < \lambda$. Or l'angle r est lui même inférieur à λ puisque r est l'angle de réfraction correspondant au passage de la lumière de l'air dans le prisme.

Comme $A = r + r'$ et que $r < \lambda$ et $r' < \lambda$, la condition d'émergence pour l'angle du prisme est donc :

Selon la figure ci-dessous, nous constatons que :

Si $A > 2\lambda$, tous les rayons entrés dans le prisme subissent la réflexion totale sur la deuxième face.



A - 3 - 3

Condition sur l'angle d incidence

La condition $A < 2\lambda$ étant satisfaite, cherchons quelle valeur doit avoir l'angle d'incidence i pour que le rayon puisse sortir du prisme en I' . D'après la relation du prisme,

$A = r + r'$, on a toujours $r = A - r'$.

La condition d'émergence en I' étant, $r' < \lambda$, on obtient :

$$-r' > -\lambda, \text{ soit } r > A - \lambda \quad (6)$$

—

Cela implique que :

(7)

Multiplions les deux membres de cette inégalité par l'indice de réfraction du prisme n .

(8)

et d'après la troisième loi de Descartes, on aura :

(9)

On désigne par i_0 le plus petit des angles satisfaisant la relation précédente tel que :

(10)

La condition d'émergence pour le rayon incident est alors :

(11)

Angle de déviation de la lumière par un prisme:

A - 3 - 4

Supposons les conditions d'émergence réalisées. On appellera l'E le rayon qui sortira de la face AC (rayon émergent).

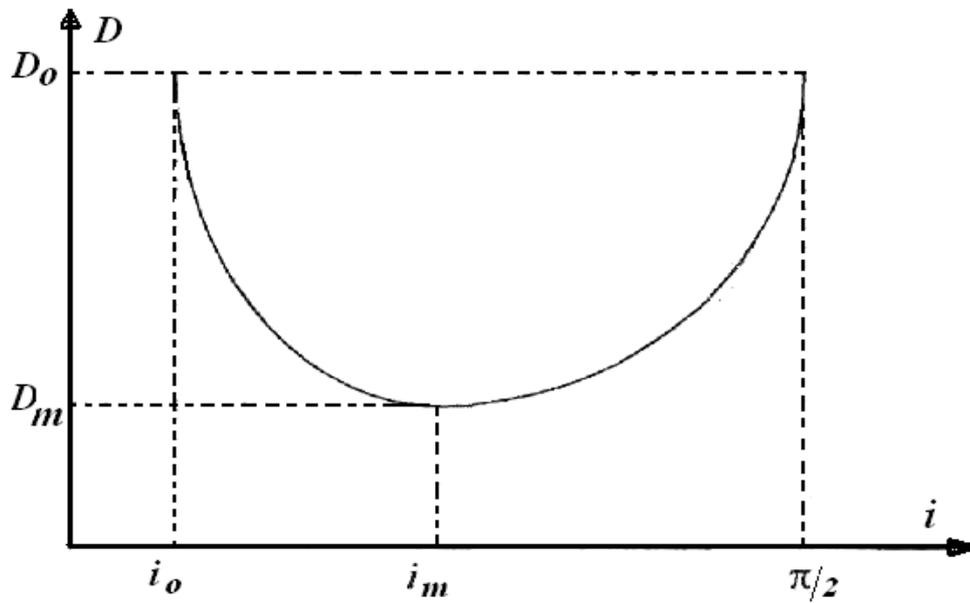
Ce rayon n'a pas la même direction que le rayon incident.

On appellera alors **D** l'angle de déviation.

C'est l'angle que fait le rayon émergent avec le rayon incident.

Pour un prisme et une longueur d'onde donnée, on peut faire varier l'incidence i et mesurer pour chaque valeur de i , la valeur correspondante de la déviation D

La courbe qui représente la variation de D en fonction de i est donnée par la figure suivante,



Nous voyons bien que la déviation D passe par un minimum D_m et ceci pour une certaine valeur de l'incidence qui sera notée i_m .

Soit l'expression de i_m :

$$(12)$$

et

$$(13)$$

Applications :TD LECON 13

Annexe -1-

Historique concernant les **unités** employées

Avant la révolution française de 1789, les unités de mesure utilisées en France pour le commerce étaient extrêmement nombreuses. En effet aucun réformateur politique n'avait encore réussi à imposer un système unique.

Avec la révolution française est né le système métrique. Ce système uniformisait les mesures de longueurs, d'aires et de volumes, ainsi que les mesures de masses.

En effet, le mètre avait été défini, par souci d'universalité, le gramme était la masse d'un centimètre cube d'eau pure.

A la fin du XIX^{ème} siècle que le système métrique s'est imposé à l'échelle mondiale. Un mètre étalon et un kilogramme étalon en platine iridié ont été construits pour servir de référence internationale.

Les Unités de base du système international(S.I)

Les unités de base du système international sont au nombre de sept, soit :

◆ L'unité de masse est le **kilogramme** (*symbole: kg*), toujours défini comme la masse de l'étalon prototype en platine iridié réalisé en 1889 sous la forme d'un cylindre.

◆ L'unité de temps, ou plus précisément l'unité de durée (intervalle de temps), est la **seconde** (*symbole: s*), définie depuis 1967 comme la durée de 9192631770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

◆ L'unité de longueur est le **mètre** (*symbole : m*), longueur du trajet parcouru dans

le vide par la lumière pendant la durée de 1/299 792 458 seconde.

◆ L'unité d'intensité de courant électrique est **l'ampère** (*symbole*: A), intensité d'un courant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles de longueur infinie, de section circulaire négligeable, et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à 2×10^{-7} newton par mètre de longueur.

◆ L'unité de température thermodynamique est le **kelvin** (*symbole*: K), fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau.

◆ L'unité de quantité de matière est la **mole** (*symbole*: **mol**), quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kg de carbone 12.

◆ L'unité d'intensité lumineuse est le **candela** (*symbole* : cd), intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un

rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} Hz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de 1/683 watt par stéradian.

Les Unités Dérivées Du Système International

Chaque grandeur physique qui n'est pas une grandeur de base voit son unité définie à partir d'une formule physique simple. Le Système international d'unités précise pour chaque cas le phénomène physique de référence.

Le plus souvent, les unités dérivées ont un nom composé à partir des noms des unités de base par exemple, **mètre par seconde** (*symbole*: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) pour l'unité de vitesse. Pour certaines grandeurs physiques, les unités dérivées ont un nom spécial. Les listes suivantes ne sont pas exhaustives, nous nous limitons aux principales définitions.

Les Unités Dérivées Mécaniques

- Le **hertz** (*symbole*: Hz) est l'unité de fréquence. C'est la fréquence d'un phénomène dont la période est égale à 1 seconde.
- Le **newton** (*symbole*: N) est l'unité de force. C'est la force qui, appliquée à une masse de 1 kilogramme, lui donne une accélération de 1 mètre par seconde au carré.
- Le **pascal** (*symbole*: Pa) est l'unité de pression. C'est la pression résultant d'une force de 1 newton appliquée orthogonalement sur une aire de 1 mètre carré.
- Le **joule** (*symbole*: J) est l'unité d'énergie, sous toutes ses formes. C'est l'énergie correspondant au travail d'une force de 1 newton se déplaçant sur une longueur de 1 mètre dans sa propre direction.

■ Le **watt** (*symbole*: W) est l'unité de puissance. C'est la puissance d'un système produisant une énergie de 1 joule en 1 seconde.

Les Unités Dérivées Electromagnétiques

■ Le **coulomb** (*symbole* : C) est l'unité de charge électrique. C'est la charge transportée en 1 seconde par un courant d'intensité 1 ampère.

■ Le **volt** (*symbole* : V) est l'unité de tension électrique. C'est la différence de potentiel aux bornes d'un dipôle électrocinétique parcouru par un courant de 1 ampère lorsque la puissance dissipée dans ce dipôle est égale à 1 watt.

■ L'**ohm** (*symbole*: Ω) est l'unité de résistance électrique. C'est la résistance d'un dipôle électrocinétique linéaire aux bornes duquel la différence de potentiel est égale à 1 volt quand il

est traversé par un courant de 1 ampère.

■ Le **Siemens** (*symbole*: S) est l'unité de conductance électrique. C'est la conductance d'un dipôle de résistance égale à 1 ohm.

■ Le **farad** (*symbole*: F) est l'unité de capacité électrique. C'est la capacité d'un condensateur dont la charge est égale à 1 coulomb lorsque la tension à ses bornes est égale à 1 volt.

■ Le **weber** (*symbole*: Wb) est l'unité de flux d'induction magnétique. Une variation de flux d'induction magnétique de 1 weber par seconde fait apparaître dans un circuit une force contre-électromotrice de 1 volt.

■ Le **tesla** (*symbole*: T) est l'unité d'induction magnétique. Le flux d'une induction uniforme de 1 tesla à travers une aire de 1 mètre carré orthogonale au champ est égal à 1 weber.

■ Le **henry** (*symbole*: H) est l'unité d'inductance. C'est l'inductance d'un circuit filiforme dont le flux propre est égal à 1 weber quand il est parcouru par un courant dont l'intensité est égale à 1 ampère.

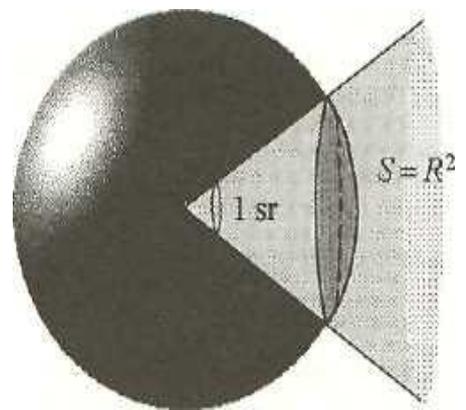
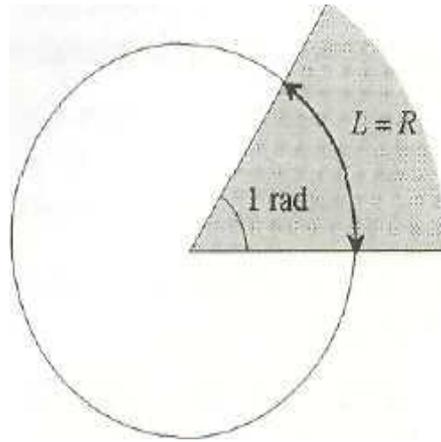
Les Unités Supplémentaires

La mesure des angles plans et des angles solides relève non pas du choix d'une unité, mais de simples conventions (Figure 1). Les valeurs numériques des angles sont indépendantes du choix des unités de base du Système international. Il ne s'agit donc pas d'unités dérivées, nous les qualifierons d'unités supplémentaires sans dimension.

■ Le **radian** (*symbole facultatif*: rad) est l'unité

d'angle plan, sans dimension. Le radian est l'angle au centre qui découpe sur le cercle un arc dont la longueur est égale à la longueur du rayon du cercle. Le plan tout entier correspond à un angle de 2π rad.

■ Le stéradian (*symbole facultatif*: sr) est l'unité d'angle solide, sans dimension. Le stéradian est l'angle solide correspondant à l'intérieur d'un cône dont le sommet est au centre d'une sphère, découpant sur la sphère une aire égale à l'aire d'un carré ayant pour cote le rayon de la sphère. L'espace tout entier correspond à un angle solide de 4π sr .



Angle Plan de 1

Angle Solide 1

Figure 1 : Représentation de **1 radian** et de **1 stéradian**.

Les Unités En Usage Avec Le S.I

Certaines unités pour lesquelles il existe une convention d'usage international sont maintenues parallèlement au Système international.

Il en est ainsi des multiples usuels de la seconde qui peuvent être utilisés pour les mesures de temps avec les conventions d'usage suivantes :

☺ La minute (*symbole*: min) : $1 \text{ min} = 60 \text{ s}$.

☺ L'heure (*symbole*: h) : $1 \text{ h} = 60 \text{ min}$.

☺ Le jour (*symbole*: d): $1 \text{ d} = 24 \text{ h}$.

N.B: Les normes françaises autorisent l'usage du

symbole « j » au lieu de « d »).

Les angles plans peuvent être exprimés en degrés, minutes et secondes sexagésimales avec les conventions suivantes :

$$\pi \text{ rad} = 180^\circ, 1^\circ = 60' \text{ et } 1' = 60''.$$

☺ Le litre (*symbole*: l) est une unité d'usage international pour les volumes, avec la définition suivante: $1 \text{ l} = 10^{-3} \text{ m}^3$.

☺ La tonne (*symbole*: t) est une unité d'usage international pour les masses avec la définition suivante : $1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$.

☺ Le degré Celsius (*symbole*: °C) est une unité d'usage pour le repérage des températures. La définition est la suivante : $\theta(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$.

Enfin, en physique microscopique, il est d'usage, autant pour des raisons de commodité que pour des raisons de précision métrologique, de mesurer les énergies en électronvolts et les masses en unités de masse atomique, avec les définitions suivantes :

☺ L'électronvolt (*symbole*: eV) est l'énergie cinétique acquise par un électron qui, dans le vide, remonte une différence de potentiel de 1 volt: $1 \text{ eV} = 1,60217733 \times 10^{-19} \text{ J}$.

☺ L'unité de masse atomique (*symbole* : u) est le douzième de la masse d'un atome de carbone 12:

$$1 \text{ u} = 1,6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}.$$

Ils existent bien d'autres unités éventuellement tolérées, d'autres sont déconseillées et d'autres sont tout simplement d'usage interdit.

Ils est alors conseillé de se limiter à l'usage du système international d'unités.

Nous ne reculerons dans ce qui suit de présenter d'autres unités spécifiques quand l'occasion se présente nécessaire, afin que l'étudiant puisse recevoir des informations complémentaires qui lui permettent parfois de bien dialoguer avec les fournisseurs ou avec des spécialistes de la discipline en question.

Annexe -2 -

Définitions Et Notion Préliminaires

Les notions définies dans cette partie sont plus ou moins reprises et utilisées dans ce qui suivra, tout en sachant que l'enseignement de la thermodynamique peut se faire de plusieurs manières et normalement sur plusieurs niveaux.

Nous nous contenterons de faire une introduction à la thermodynamique générale, dans l'objectif d'exposer par la suite les phénomènes d'échanges de chaleurs en insistant sur leurs différents modes de transferts.

CONNAISSANCES

Nous pensons qu'il est nécessaire que les étudiants doivent bien maîtriser l'utilisation des termes suivants aussi bien pour le **premier et le deuxième chapitre** :

- Système isolé.
- Système fermé.
- Système ouvert.
- Système homogène.
- Système hétérogène.
- Variable, intensive, extensive, d'état; équation d'état.
- État d'équilibre.
- Fonction d'état.
- Transformation réversible.
- Transformation irréversible.

- Transformation cyclique.
- Transformation ouverte.
- Transformation isochore.
- Transformation isobare
- Transformation monobare.
- Transformation isotherme.
- Transformation monotherme.
- Transformation adiabatique.
- Transformation exothermique.
- Transformation endothermique.
- État standard.
- Changement d'état.
- Travail.
- Chaleur.
- Énergie.

- Capacité calorifique.

SAVOIR – FAIRE

Nous pensons aussi qu'il est nécessaire que les étudiants doivent aussi savoir :

- Équilibrer une réaction chimique,
- Caractériser un système, une évolution, un chemin thermodynamique,
- Différencier les grandeurs d'état et les grandeurs d'échange,
- Déterminer le signe d'une variation d'énergie,
- Exprimer le travail, la chaleur fournis au

systeme
en fonction des variables d'etat.

Introduction Et Définitions

La thermodynamique est la science qui régit les échanges d'énergie sous quelque forme que ce soit et qui permet de prévoir dans quel sens un système macroscopique donné va évoluer spontanément.

A ce titre, la thermodynamique s'applique à toutes les autres branches de la science.

Tout phénomène électrique, toute interaction rayonnement - matière, toute réaction chimique, toute transformation thermomécanique et tout échange métabolique obéissent aux lois de la thermodynamique.

A ce stade on peut faire trois remarques :

† Bien que pouvant prévoir l'évolution d'un système donné, la thermodynamique de l'équilibre qui fait l'objet de ce cours, ne fait pas intervenir le temps t de manière explicite.

Ce paramètre intervient avec la cinétique.

‡ La thermodynamique peut être abordée sous deux aspects, l'un macroscopique, l'autre microscopique.

‡ Dans la mécanique du point, la thermodynamique classique (ou macroscopique) ne fait intervenir que des grandeurs macroscopiques comme la pression, le volume, la température etc...

Avant d'aborder les lois de la thermodynamique classique, nous allons définir une série de termes qui seront très utiles tout au long de ce cours.

SYSTEME

On appelle système la portion de l'univers qui fait l'objet de l'étude thermodynamique, le reste de l'univers étant appelé milieu extérieur (M.E.).

SYSTEME ISOLE

C'est un système qui n'échange rien avec le milieu extérieur, ni travail, ni chaleur, ni matière, ni rayonnement, ni information (Exemple: de la glace dans une bouteille thermos).

Un tel système est un cas idéal qui n'existe pas réellement mais dont le concept est très utile et que l'on ne doit pas confondre avec le concept d'isolation thermique. Un réfrigérateur est isolé thermiquement, sa partie interne ne constitue pas un système isolé au sens défini ici.

SYSTEME FERME

C'est un système qui peut échanger du travail ou de la chaleur avec le milieu extérieur mais pas de matière,

(exp : gaz dans une ampoule scellée, la terre si on néglige les météorites).

SYSTEME OUVERT

C'est un système qui peut tout échanger avec le milieu extérieur, y compris de la matière (exp: casserole d'eau qui bout, cellule vivante).

SYSTEME HOMOGENE

C'est un système n'ayant qu'une seule phase et dont les variables intensives (P,T,...) sont les mêmes en tous ses points. (Nous allons définir la notion de variable intensive un peu plus loin).

SYSTEME HETEROGENE

C'est un système, soit composé de plusieurs phases (même avec un seul constituant), soit dans lequel les variables intensives diffèrent d'un point à un autre (exp: gradient de T).

VARIABLES INTENSIVES

Ce sont des variables indépendantes de la quantité de matière considérée (température, pression, concentration...). Ces variables ne sont pas additives; elles peuvent être définies en n'importe quel point du système.

VARIABLES EXTENSIVES

Ce sont des variables qui sont proportionnelles à la quantité de matière considérée (masse, volume, énergie...); ce sont des variables

additives; elles ne peuvent être définies que sur l'ensemble du système.

VARIABLES D'ETAT

Ce sont des variables qui permettent de définir l'état d'un système. On peut démontrer qu'avec trois variables d'état, tout système homogène peut être défini, et que deux variables suffisent quand la quantité de matière mise en jeu est connue (ceci n'est vrai qu'à l'équilibre, voir ci-après).

EQUATION D'ETAT

Les différentes variables d'état ne sont pas indépendantes et sont reliées entre elles par des équations d'état dont la plus connue est l'équation des gaz parfaits : $PV = n R T$. Si n , P , V sont connus, alors T est automatiquement fixée et l'état du système est parfaitement défini.

FONCTION D'ETAT

C'est une grandeur physique qui ne dépend que de l'état du système (indépendante de l'histoire du système). Elle est fonction des autres variables d'état et est caractérisée par le fait

que sa variation ne dépend que de l'état initial et de l'état final du système. Ce n'est pas le cas de toutes les grandeurs; en particulier ce n'est pas le cas en général de la chaleur et du travail. En revanche, le produit PV est une fonction d'état.

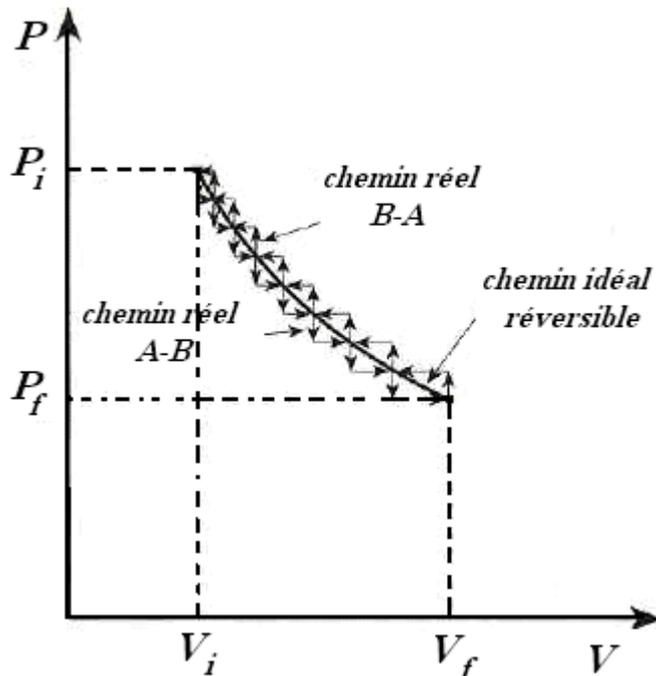
ETAT D'EQUILIBRE

On dit qu'un système est dans un état d'équilibre (au sens macroscopique) si les variables d'état de ce système n'évoluent pas dans le temps et sont uniformes en tout point du système. En outre, lorsque l'on s'écarte un peu de cet état. Le système a tendance à y revenir spontanément.

La deuxième partie de cette définition permet d'éliminer le cas des équilibres instables ou métastables. La thermodynamique qui sera traitée cette année repose sur cette notion d'état d'équilibre. Il existe une extension de cette thermodynamique des états d'équilibre appelée thermodynamique des phénomènes irréversibles.

TRANSFORMATION REVERSIBLE

C'est une transformation **idéale** qui peut être considérée comme le passage d'un état initial à un état final par la succession d'états d'équilibres **infiniment** voisins (transformation quasi-statique) et dans laquelle n'apparaît aucun phénomène dissipatif (frottements par exemple). Il est toujours possible de revenir à l'état initial par une succession de changements **infiniment petits** des variables d'état. Ce n'est que dans le cas idéal d'une telle transformation que l'on saura décrire le système tout au long de la transformation, i f.



TRANSFORMATION IRREVERSIBLE

C'est une transformation qui ne se fait pas par une succession d'états infiniment voisins et pour laquelle on ne peut pas revenir à l'état initial en passant par le même chemin, (Exemples: une explosion).

On ne sait alors décrire que les états i et f mais pas les états intermédiaires.

TRANSFORMATION OUVERTE

C'est une transformation pour laquelle l'état initial diffère de l'état final, contrairement à une transformation cyclique ou $i = f$.

TRANSFORMATION ISOCHORE

$V =$ constante: $\Delta V = 0$. Transformation à volume constant.

TRANSFORMATION ISOBARE

$P =$ constante: $\Delta P = 0$. Transformation à pression extérieure constante tout au long du chemin suivi.

TRANSFORMATION MONOBARE

$P_i = P_f$: $\Delta P = 0$. Mais P peut varier entre i

et f.

TRANSFORMATION ISOTHERME

$T = \text{constante} : \Delta T = 0$. Transformation tout au long de laquelle la température reste constante. Cette transformation est souvent réversible.

Elle est par exemple irréversible lors du mélange de différents gaz ou lors d'une réaction chimique.

TRANSFORMATION MONOTHERME

$T_i = T_f$. Transformation où la température finale est égale à la température initiale sans pour autant être constante au cours de cette transformation. Cette transformation est irréversible.

TRANSFORMATION ADIABATIQUE

$Q = 0$. Transformation au cours de laquelle il n'y a aucun échange de chaleur avec le milieu

extérieur.

Attention ! A ne pas confondre avec une transformation isotherme.

Annexe -3 -

Variation de la chaleur massique

*** Lorsque la chaleur massique C varie;
soit C_m sa

valeur moyenne entre deux températures
 T_1 et T_2 .

Lorsque C varie dans l'intervalle $[T_1, T_2]$, on
prend alors une valeur moyenne C_m tels que :

(4)

En effet la variation de la quantité de chaleur sera donnée par l'expression suivante : $Q_{12} = Q_{02} - Q_{01}$.

La valeur moyenne est calculée à partir de tables donnant ces valeurs.

Annexe - 4 -

Quelques Calorimètres usuels

Les calorimètres utilisés dans les laboratoires de recherches, ainsi que ceux en usage dans les stations d'essais de matériel frigorifique ou d'autres industries, présentent généralement des formes diverses et sont tellement variés dans leurs types que nous ne pouvons entreprendre de les étudier tous.

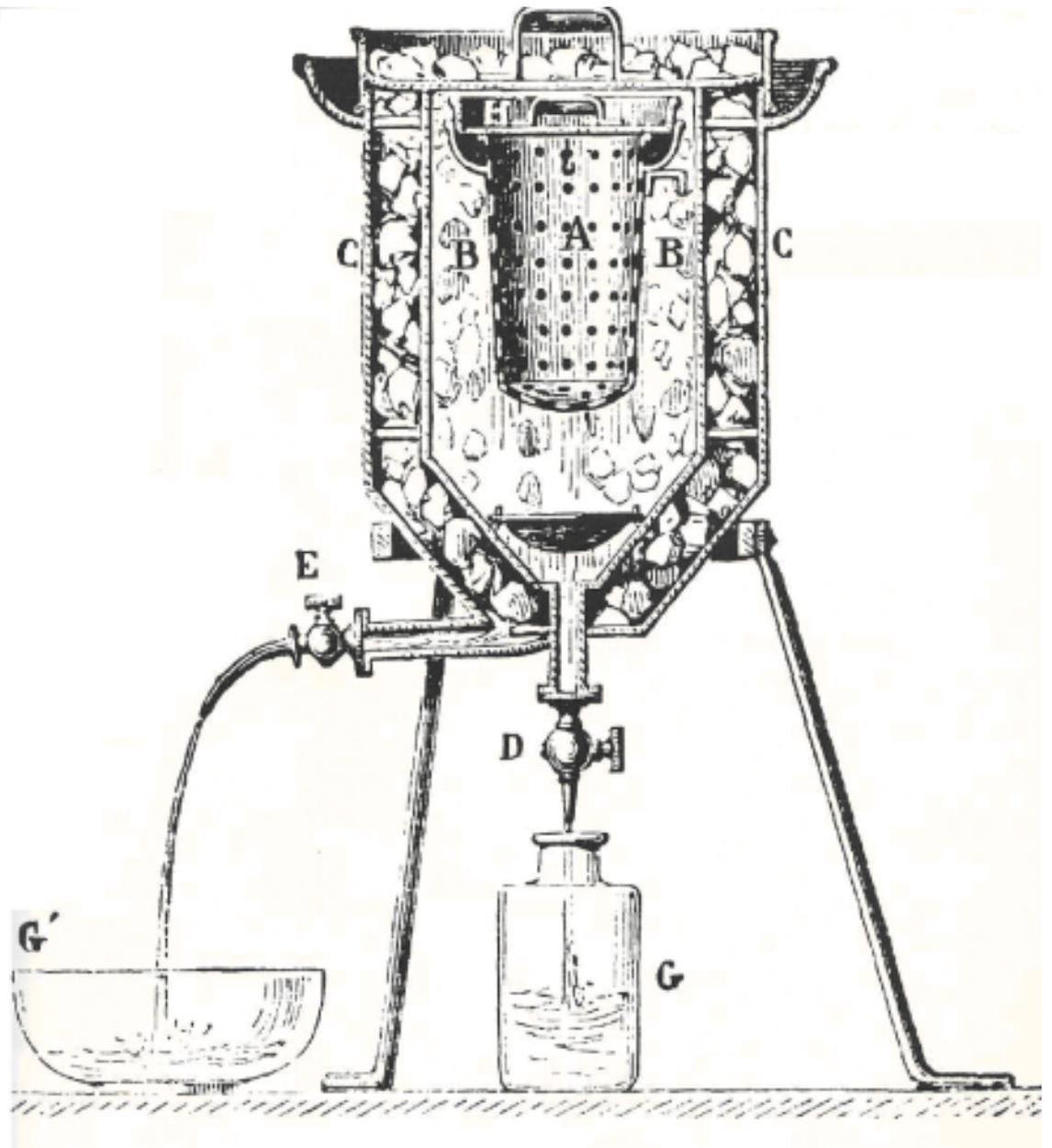
En 1780 Lavoisier et Laplace sont les premiers à effectuer des mesures de quantité de chaleur.

Ci-dessous, une photo du calorimètre à glace de Lavoisier

Nous nous bornerons dans ce cours à décrire deux calorimètres dont l'usage est fréquent dans l'industrie frigorifique à savoir:

- Le calorimètre de Berthelot,

- Le calorimètre d'Arsonval-Dewar.



Le calorimètre à glace de Lavoisier. Collection Viollet.

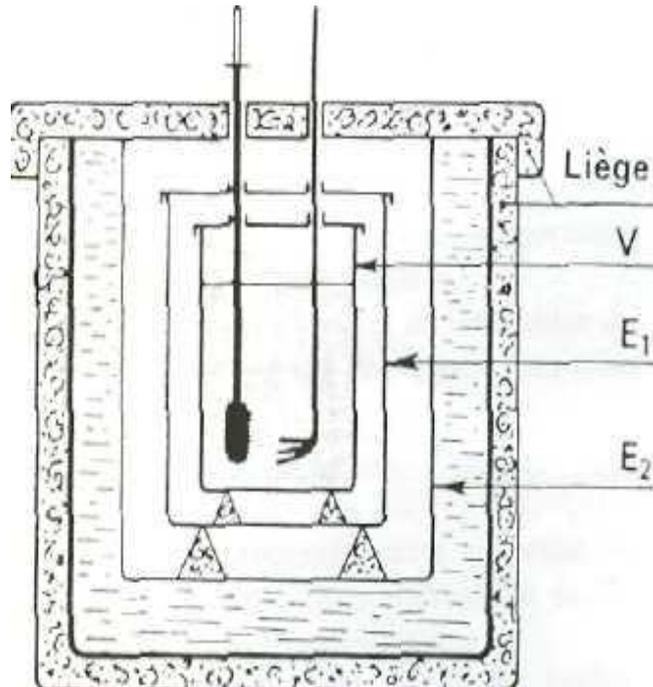
Photo scannée du livre « MATIERE ET ENERGIE » de Jean Rosmorduc aux Editions Messidor/La Farandole.

a - **Le calorimètre de Berthelot** -

Ce calorimètre est un perfectionnement de celui décrit précédemment.

De multiples précautions ont été prises pour éliminer tout échange de chaleur parasite, notamment : argenture et polissage des parois des vases:

V argenté et poli extérieurement, E_1 , argenté et poli intérieurement et extérieurement, E_2 intérieurement poli.



De plus le volant thermique de l'eau du vase externe et l'isolation de celui-ci ainsi que le couvercle en liège contribuent à l'élimination des échanges parasites.

Les picots de liège relient les trois vases entre eux.

b - Le calorimètre d'Arsonval-Dewar

- -

Généralement plus fragile que le calorimètre de Berthelot, il est en contrepartie moins encombrant. Le vase calorimétrique V est placé dans un récipient en verre à doubles parois P_1 et P_2 entre lesquelles le vide a été réalisé.

Les parois en regard étant argentées et polies, les échanges de chaleur sont pratiquement nuls.

Malgré les perfectionnements apportés à leur conception et à leur construction ils nécessitent néanmoins pour l'ensemble des calcul la détermination de la capacité calorifique du vase calorimétrique.

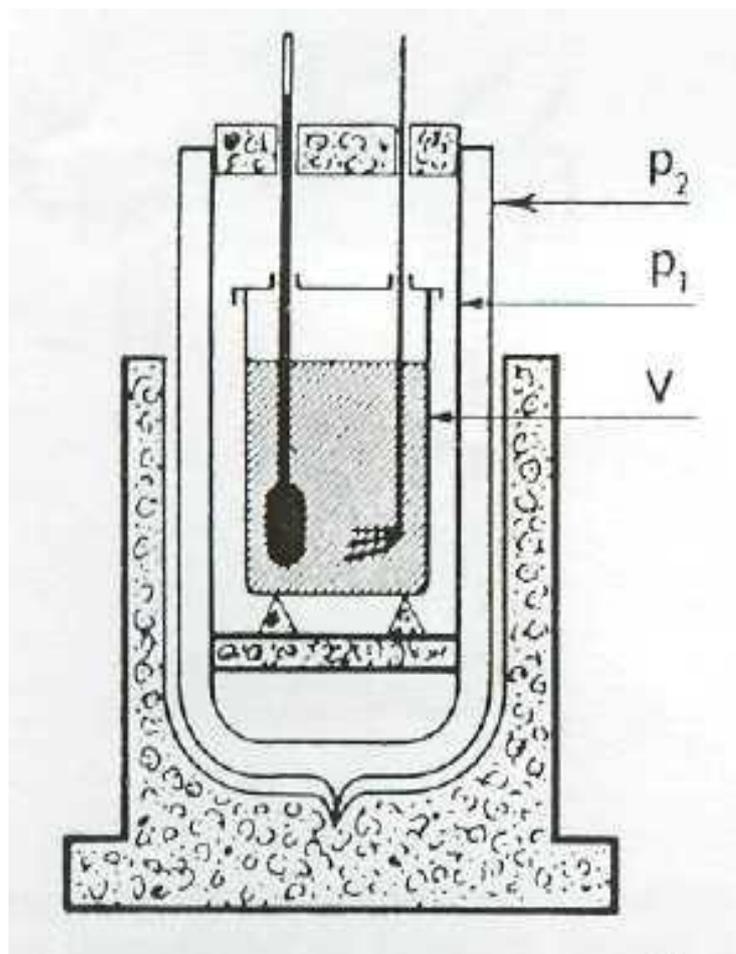
Afin de s'affranchir de cette détermination, on utilise fréquemment des calorimètres dits à régime permanent; calorimètres dans lesquels la température du vase calorimétrique reste constante.

Si ce vase est isolé thermiquement et si, de plus, il est placé dans une enceinte à même température que le vase calorimétrique. Il n'est plus nécessaire de connaître la capacité

calorifique du calorimètre.

En effet la quantité de chaleur fournie est utilisée uniquement pour la réalisation du phénomène thermique étudié.

C'est sur ce principe qu'est basé le calorimètre que nous allons décrire ci-dessous et qui sert à la détermination de puissances de machines frigorifiques.



Annexe - 5 -

Étude d'un mur simple :

Régime permanent ou stationnaire

Soit un mur dont les parois parallèles sont respectivement aux températures θ_1 et θ_2 avec $\theta_1 > \theta_2$.

La résolution mathématique des différentes équations précédentes donne.

Φ étant le flux du vecteur densité de courants thermique \mathbf{J}_{th} à travers la surface A d'une des faces du mur.

En reprenant les équations :

Si on considère une étude unidimensionnelle selon l'axe des x , on aura:

=

(19)

d'où $\mathbf{J}_{th} dx = -\lambda d\theta$.

(20)

Après intégration de l'équation précédente entre les deux extrémités du mur, on obtient :

$$\mathbf{J}_{th} x = -\lambda (\theta - \theta_1). \quad (21)$$

Pour $x = e$ (épaisseur du mur) tel que $\theta = \theta_2$, on obtient :

$$\mathbf{J}_{th} \cdot e = -\lambda (\theta_2 - \theta_1). \quad (22)$$

(23)

Pour une surface A du mur, on obtient

(24)

La quantité de chaleur transmise à travers le mur pendant le temps t est égale à :

$$Q = \Phi t$$

(25)

Annexe – 6 -

Tableau : Valeur d'émissivités ϵ pour quelques corps :

Nature du corps	Température en °C	Facteur d'émission ϵ
Acier Inox 18 /18	230 - 1000	0.3 – 0.6
Aluminium poli	200 – 600	0.06 – 0.09
Cuivre poli	100	0.05
Cuivre légèrement oxydé	200 – 600	0.075
Fer poli	400 – 1000	0.15 – 0.40
Fer Oxydé	100	0.75
Mercure	0 – 100	0.1
Tôle en Fer galvanisé	20	0.25
Brique réfractaire	700 – 1000	0.75
Brique rouge	20	0.9
Ciment	1000	0.63

Eau	20	0.95
Verre	200	0.95

Annexe - 7 -

Notions De Confort Thermique :

1

Les protections traditionnelles contre la chaleur et le froid

Au cours des temps, l'homme a cherché à se protéger des rigueurs du climat:

Il a fabriqué des vêtements qui le protègent d'une chaleur ou d'un froid excessif.

Il a appris à construire des abris de plus en plus confortables, afin de vivre et d'exercer toutes sortes d'activités.

Avec le développement des techniques, des moyens ont été créés, puis perfectionnés, dans le but d'améliorer le confort à l'intérieur des constructions, en corrigeant les effets du climat.

Les techniques du chauffage sont anciennes, car leur mise en oeuvre est relativement simple dès l'instant où la maîtrise du feu est acquise.

Les protections modernes contre

2

la chaleur et le froid :

A l'heure actuelle, il existe sur le marché des appareils très diversifiés qui permettent de traiter toutes sortes de locaux a savoir:

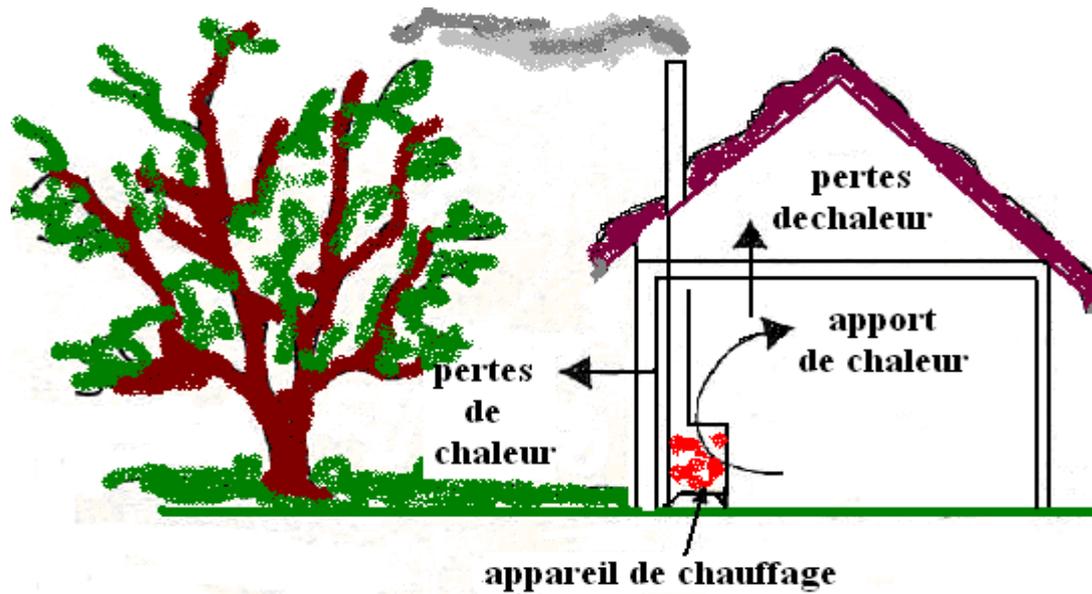
Chauffer des locaux; (Document -1) ;

Rafrâichir des locaux; (Document -2) ;

Purifier l'air en le filtrant ;

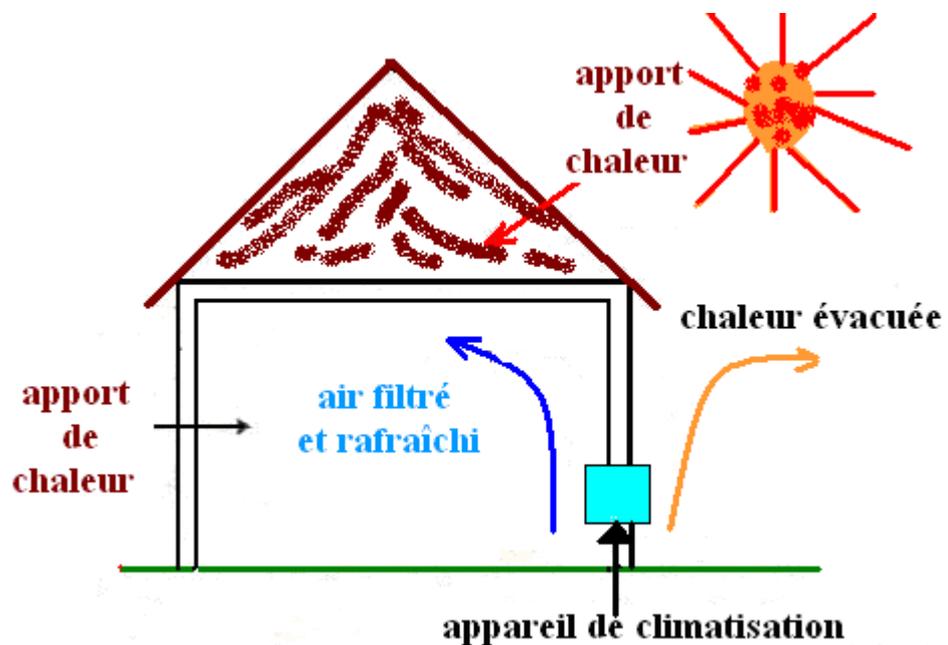
Agir sur l'humidité, en croissant le taux d'humidité ou au contraire en le réduisant.

Remarque : Le chauffage et la climatisation constituent un moyen de contrôle des ambiances (climat des locaux).



Document – 1 : Chauffage d'un local ;

L'appareil apporte de la chaleur pour combattre les pertes.



Document – 2 : Climatisation d'un local.

L'appareil évacue la chaleur excédentaire du local, il la rafraîchit, il pourrait le réchauffer si nécessaire et il est possible de purifier l'air aussi.

3

Le confort thermique

Le corps humain, un peu comme une machine, consomme de l'énergie. Une partie de cette énergie est utilisée pour se mouvoir et assurer les fonctions vitales de l'organisme. L'excédent est évacué sous forme de chaleur.

La sensation de confort dépend de l'équilibre thermique établi entre le corps humain et l'ambiance dans laquelle il se trouve place.

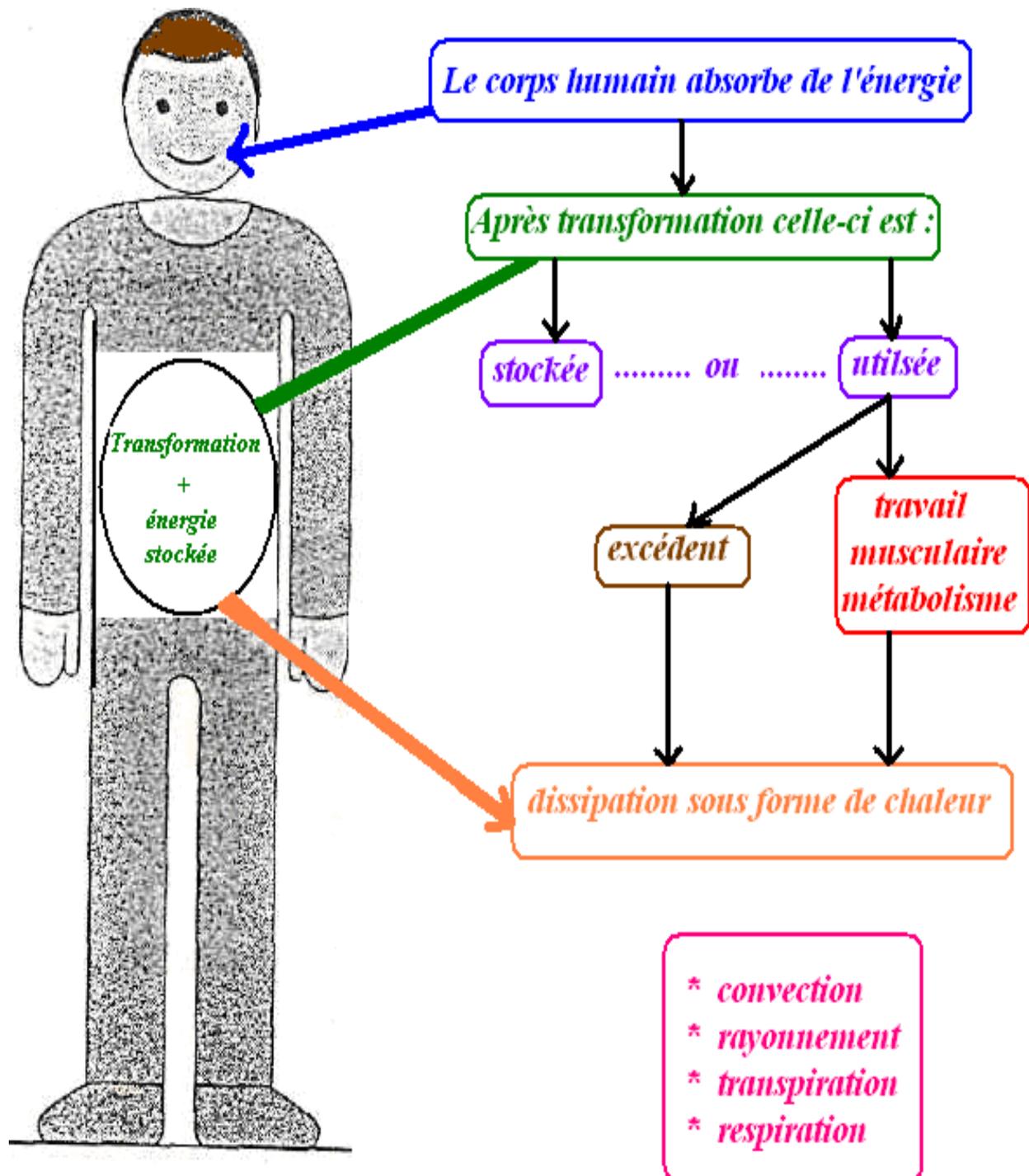
La santé et le confort dépendent du maintien de l'équilibre thermique entre le corps humain et l'ambiance dans laquelle il évolue.

Cet équilibre dépend de nombreux paramètres, définis

♣ Par rapport à l'individu;



Par rapport à l'environnement.



Les principaux paramètres individuels :

- ♣ L'activité: elle conditionne la quantité d'énergie à évacuer;
- ♣ Les vêtements : ils freinent les échanges thermiques avec le milieu;
- ♣ L'accoutumance au climat: selon leur lieu de vie, les individus ne ressentent pas de la même façon la rigueur du climat, ils peuvent être accoutumés au chaud ou au froid, ce qui modifie leur notion personnels de confort.

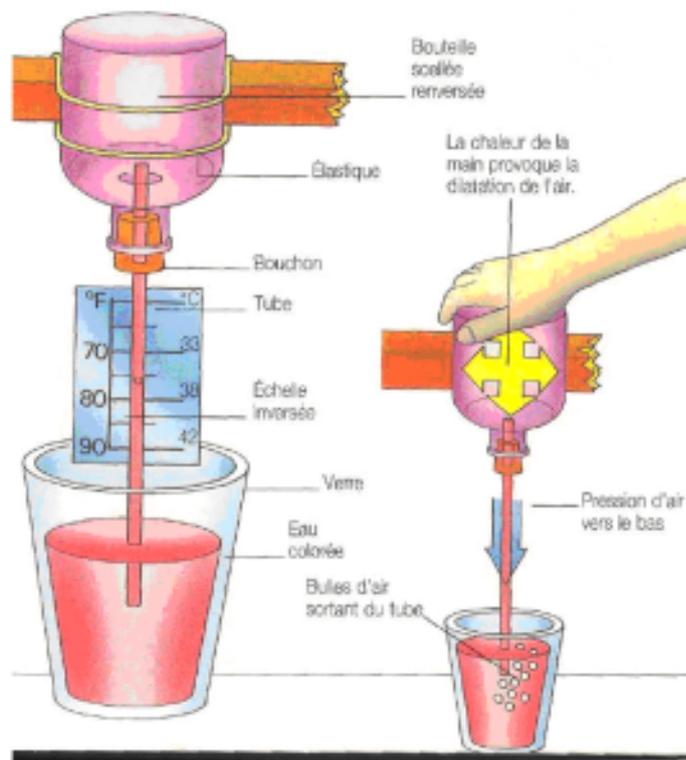
Annexe-8-

Thermomètre de Fahrenheit

En 1714 Gabriel Fahrenheit, fabricant d'instruments, fabrique un thermomètre à alcool et crée l'échelle qui porte son nom à partir des points fixes suivants : la température d'ébullition de l'eau comme point supérieur et pour le point inférieur le niveau auquel s'arrêtait le liquide du thermomètre plonge dans un mélange de sel ammoniac et de neige. L'intervalle séparant ces deux points était divisé en 212 parties de sorte que le point de congélation de l'eau correspondait à 32 degrés et naturellement celui d'ébullition de l'eau à 212 degrés.

FABRIQUEZ UN THERMOMÈTRE À AIR

Pour fabriquer un thermomètre simple, il vous faut une petite bouteille munie d'un bouchon percé d'un trou dans lequel vous introduisez avec précaution un tube de pastique transparent. Fixez la bouteille à l'envers, le tube plongeant dans un peu d'eau colorée. Placez la main sur la bouteille pour la chauffer. Des bulles d'air s'échappent par le tube. Retirez la main, l'eau s'élève dans le tube. Placez le thermomètre à différents endroits et observez le niveau de l'eau. Essayez de fabriquer une échelle thermométrique au moyen d'un carton fixe au tube.



Annexe -9-

Exemples de principes thermométriques

Le phénomène de dilatation des liquides est très couramment utilisé en thermométrie, mais ce n'est bien sûr qu'un exemple parmi d'autres ; Citons aussi :

Les thermomètres à résistance métallique, en platine en particulier, dont le principe thermométrique est l'augmentation de la résistivité des métaux avec l'augmentation de température.

Les thermomètres à thermistances semi-conductrices, dont le principe thermométrique est l'augmentation de la conductance des semi-conducteurs avec l'augmentation de température.

Les thermocouples, où l'on mesure une différence de potentiel entre deux jonctions métalliques portées à des températures différentes. Le principe thermométrique est la variation avec la température de la différence de potentiel de jonction.

Enfin, et surtout, les thermomètres à gaz qui utilisent le principe de dilatation des gaz à pression constante ou celui d'augmentation de leur pression avec la température à volume constant.

Tous ces thermomètres définissent des échelles thermométriques différentes, qui ne coïncident par définition qu'aux points 0°C et 100°C .

Annexe -10-

**L'OPTIQUE A TRAVERS QUELQUES
PHYSICIENS**



René Descartes (1596-1650). Il publie en 1637 les lois de la réflexion et de la réfraction obtenues, sans doute en 1621, par Snel.



Christiaan Huygens (1629-1695),

Astronome, physicien et mathématicien hollandais. Ayant perfectionné la lunette astronomique, il découvre en 1655 les anneaux de Saturne. Il élabore à partir de 1678 une théorie ondulatoire de la lumière qui lui permet d'interpréter les lois de la réflexion et de la réfraction, Il introduit la notion de polarisation de la

lumière et donne une interprétation du phénomène de biréfringence, découvert en 1669 par Erasmus Bartholinus.



Augustin Fresnel (1788-1827).

Physicien français. Il explique complètement en 1815 les phénomènes de diffraction et d'interférence. Il réalise en 1821 la première détermination des longueurs d'onde lumineuses et développe de 1821 à 1823 la théorie de l'optique des milieux anisotropes.



**Sir Isaac Newton
(1642-1727).**

Astronome, mathématicien, physicien et théologien anglais. Parmi son oeuvre, considérable dans tous les domaines, on citera le

traité d'optique paru en 1675. Newton explique la dispersion de la lumière par le prisme. Partisan d'une théorie particulière de l'optique, il ne parvient pas à expliquer les phénomènes d'interférence qu'il observe.

Annexe -11-

Caractéristiques d'un faisceau lumineux(Complément)

Ainsi, une source ponctuelle émet-elle un faisceau conique de lumière dont l'énergie lumineuse se dilue indéfiniment dans l'espace du fait de la divergence. Si l'on se place très loin d'une telle source, les rayons lumineux seront pratiquement parallèles entre eux : on parlera alors de faisceau de lumière parallèle. La lumière émise par les LASER se rapproche assez de ce cas de figure.

Enfin, en utilisant des dispositifs optiques que l'on qualifiera de systèmes stigmatiques convergents, nous savons transformer un faisceau conique divergent de lumière en un faisceau conique convergent.

Le point de convergence sera alors qualifié de point image, L'énergie lumineuse émise par une source de lumière, après s'être propagée dans l'espace par différents chemins, est ainsi reconstituée au point image.

Un faisceau de lumière est caractérisé premièrement par la puissance lumineuse transportée. On appelle photométrie la science ayant pour objet l'étude des phénomènes énergétiques associés à l'émission, au transport et à la réception de lumière.

Nous ne nous intéresserons pas précisément à cet aspect des choses, mais il est important de savoir que les ordres de grandeur en la matière peuvent être extrêmement différents.

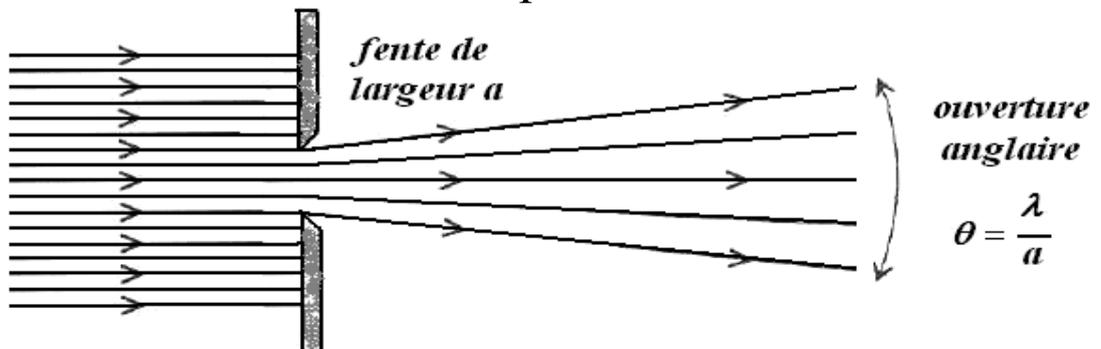
Une autre caractéristique des émissions lumineuses est leur nature spectrale, ou leur «couleur». Il existe des sources de lumière correspondant à toutes les couleurs de **l'arc-en-ciel**, la lumière blanche correspondant à une superposition de toutes ces couleurs.

Aspect ondulatoire

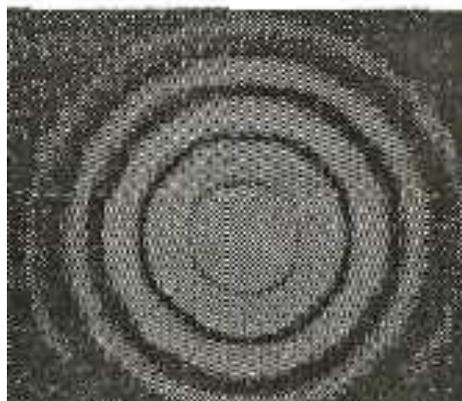
Diffraction de la lumière

Le phénomène de diffraction de la lumière est très facile à observer. Il se produit chaque fois que **extension** spatiale du phénomène lumineux est limitée.

En particulier, il est impossible d'isoler un rayon lumineux. Essayons de le faire en interposant un diaphragme circulaire sur la trajectoire d'un faisceau lumineux parallèle. On observe alors (figure ci-dessous) une divergence de la lumière, d'autant plus marquée que le diaphragme utilisé est petit. Ce phénomène de diffraction trouve une interprétation simple dans le cadre d'une théorie ondulatoire de la lumière. On montre alors que l'ouverture angulaire du pinceau de lumière derrière l'obstacle est au minimum égal au rapport λ/a , ou λ est la longueur d'onde du phénomène vibratoire associé à la lumière et a est la plus petite dimension caractéristique de l'obstacle.



Phénomène de Diffraction de la lumière



Phénomène de diffraction de la lumière à travers une source circulaire

Cohérence temporelle

La lumière est un phénomène vibratoire de nature électromagnétique. Les grandeurs physiques vibrantes associées au phénomène lumineux ne sont généralement pas des fonctions sinusoïdales de l'espace et du temps.

Cependant, il nous arrivera souvent de considérer que nous avons affaire à une vibration sinusoïdale propagative, de période temporelle τ et de période spatiale (ou longueur d'onde) λ parfaitement définies. Une telle vibration sera qualifiée de vibration harmonique ou monochromatique. Une vibration scalaire monochromatique se propageant dans une direction d'espace x est une fonction sinusoïdale de la position x et du temps t , de la forme :

(1)

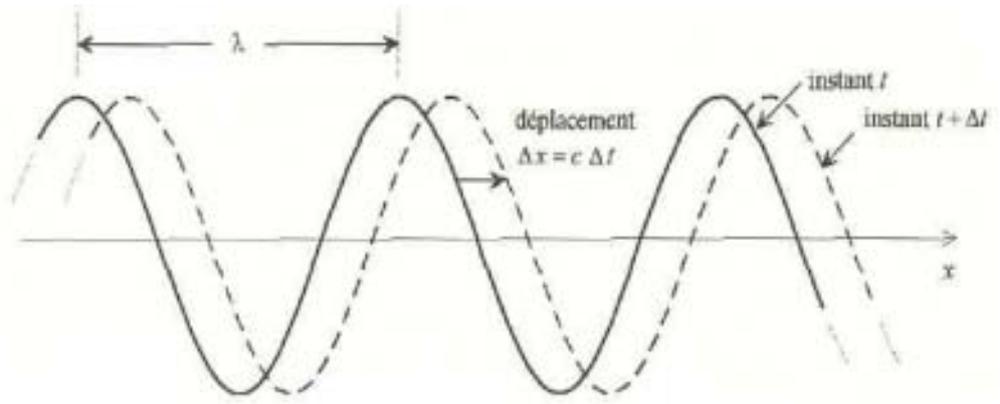
(2)

(3)

S_m et Φ s'appelle respectivement amplitude et phase de la vibration.

k et ω sont le module du vecteur d'onde et la pulsation.

λ et τ sont la longueur d'onde ou période spatiale et la période temporelle.



Propagation d'une vibration harmonique

Annexe – 12 -

Construction de Huygens

Le Hollandais **Christian Huygens** propose dans son traité de la lumière en 1690 une interprétation des lois de **Snel-Descartes** basée sur une théorie ondulatoire.

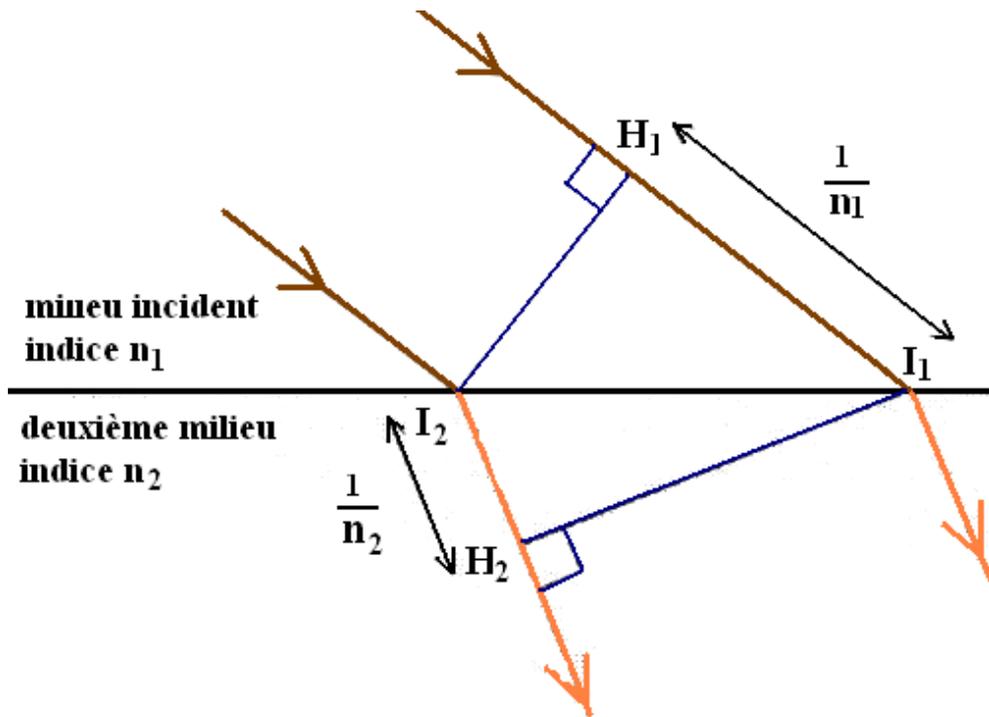
Huygens considère la lumière comme un phénomène vibratoire dont l'aspect alternatif nous échappe du fait de la fréquence trop élevée de la vibration. Il propose une méthode de construction géométrique du rayon diffracté (Figure ci après) basée sur le principe suivant:

******* Un plan perpendiculaire au rayon lumineux est appelé un **plan de phase** ou **surface d'onde**. Cela veut dire qu'à un même instant, la vibration doit avoir la même valeur en tout point d'un tel

plan.

*** Cela doit être vrai pour le rayon incident aussi bien que pour le rayon réfracté, aussi les distances supplémentaires parcourues du fait de l'obliquité des rayons (H_1I_1 et I_2H_2) doivent-elles introduire un retard de phase identique.

*** Cela revient à dire que ces distances doivent être parcourues dans le même temps, elles doivent donc être dans le rapport des vitesses de propagation de la lumière dans les deux milieux, c'est-à-dire dans le rapport inverse des indices de réfraction :

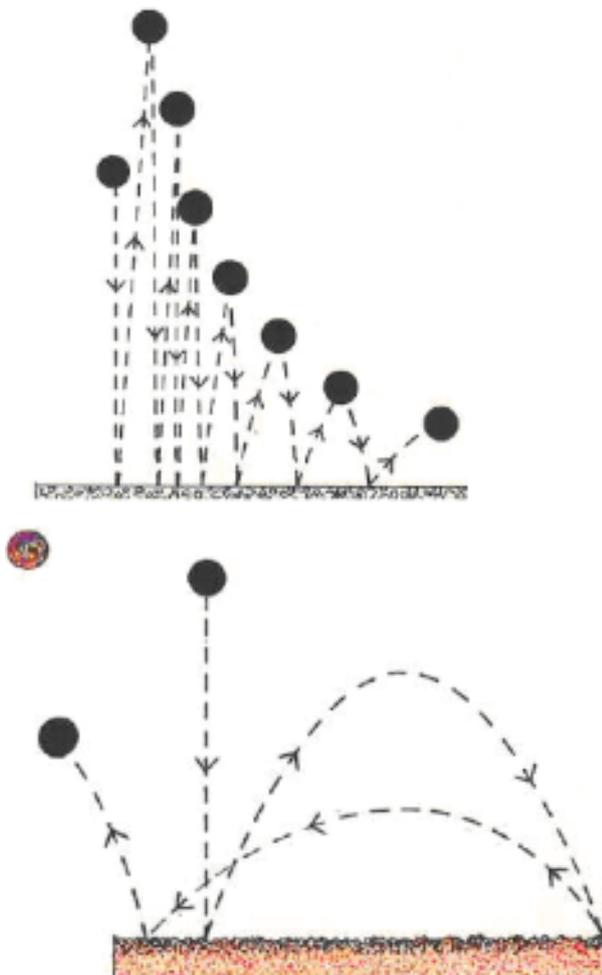


Construction de Huygens du rayon réfracté

Principe du retour inverse de la lumière :

Réflexion métallique

Lorsqu'on lance une balle sur une surface lisse, elle rebondit directement dans la main tandis que, sur une surface inégale telle qu'une allée en graviers, elle rebondira de manière imprévisible, et chaque fois selon un **angle différent**.



De la même façon, la lumière est réfléchi

différemment par les surfaces lisses et les surfaces irrégulières. De plus, la réflexion de la lumière est également affectée par la couleur et la nature des surfaces.

Les surfaces des substances transparentes, bien que celles-ci soient traversées par la lumière, en réfléchissent une petite quantité ; Un peu de lumière est également absorbée par la matière transparente.

Une substance opaque, au contraire, n'est pas traversée par la lumière. Lorsque la lumière arrive sur une surface opaque, une partie est absorbée et le reste est réfléchi. La quantité de lumière absorbée par la surface dépend de sa couleur.

Le blanc et les couleurs très claires réfléchissent presque toute la lumière qui les touche, tandis que les couleurs sombres l'absorbent presque intégralement.

Outre la couleur, la nature de la surface a son importance; une surface ne réfléchira pas la lumière de la même façon selon que sa texture est lisse ou irrégulière.

Si vous placez une feuille de papier glacé blanc au soleil), elle brille tellement qu'on ne peut la

fixer longtemps : la lumière est réfléchi par la couleur blanche et la texture lisse la renvoie directement en sens inverse.

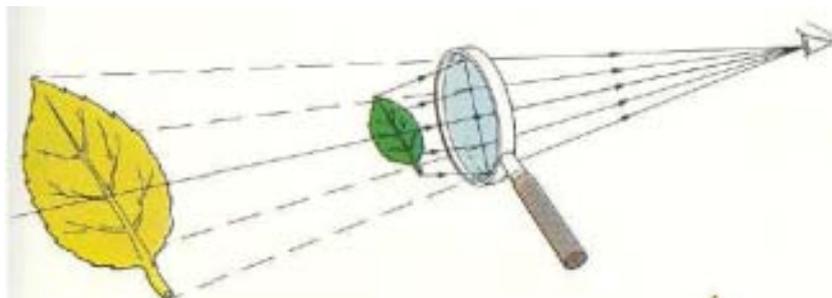
Par contre, une éponge de couleur sombre réfléchira la lumière d'une manière toute différente sous le même soleil. La couleur absorbe une bonne partie de la lumière et la texture en alvéoles la renvoie dans toutes les directions; une très faible quantité sera réfléchi en direction des yeux. Ce phénomène est comparable au rebondissement irrégulier d'une balle sur une surface couverte de graviers.

Annexe -14 -

Le Microscope

Le grossissement d'un microscope est le taux d'agrandissement de l'image virtuelle par rapport à l'objet réel. Une loupe qui grossit deux fois et demie (**2,5 x**) produit une image virtuelle deux fois et demie plus grande que l'objet observe.

Pour obtenir un très fort grossissement, une simple loupe ne suffit pas. Il faut procéder en deux étapes successives.



Une

LOUPE

On utilise un microscope composé de deux lentilles : l'oculaire et l'objectif.

Ce type de microscope grossit plus de trente fois (**30 x**) les objets. La lentille de l'objectif, celle qui se trouve la plus rapprochée de l'objet, produit une image réelle inversée. La lentille de l'oculaire augmente le grossissement. L'œil perçoit une image virtuelle toujours inversée.

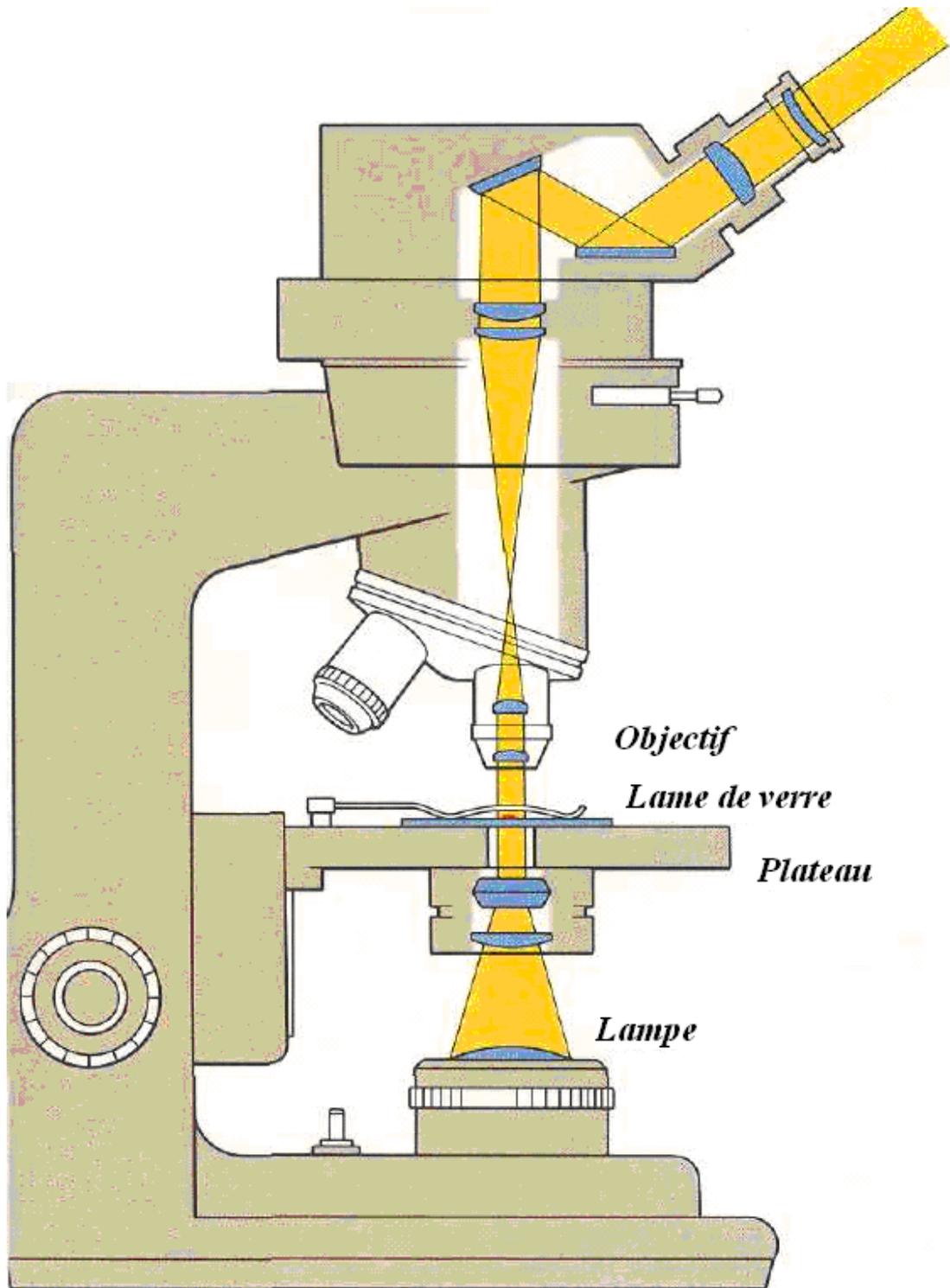
Il n'a été question jusqu'à présent que des lentilles convexes. Lorsqu'un rayon lumineux traverse une lentille concave exactement en son centre, il ne change pas non plus de direction, mais les rayons qui traversent la lentille autour du centre sont déviés dans des directions divergentes, si bien qu'un rayon lumineux qui traverse une lentille concave ne sera pas concentré en un point mais à l'inverse s'élargira en sortant de la lentille.

Une lentille concave ne grossit pas les objets, elle les fait, au contraire, apparaître plus petits qu'ils ne sont.

Les lentilles concaves sont beaucoup moins utilisées que les lentilles convexes; elles servent, cependant, à fabriquer des verres de lunettes pour les myopes.



Microscope ancien (vers 1680). Depuis son invention, en 1590, le microscope s'est révélé un outil précieux pour les scientifiques, en particulier pour les biologistes. Les premiers microscopes ne possédaient que deux lentilles; ceux d'aujourd'hui en possèdent plusieurs qui agrandissent davantage et donnent une image plus précise.



Les microscopes grossissent jusqu'à 2000 fois des objets placés entre deux lamelles de verre sur le plateau.

La lumière traverse les lames de verre de l'objectif interchangeable avant d'être renvoyée vers l'œil.

LE TELESCOPE



Photo -1

Télescope à réfraction

Pour étudier le ciel nocturne, les astronomes utilisent des télescopes. Ceux-ci permettent de mieux voir des objets éloignés, tels que des planètes ou des constellations. Les télescopes **concentrent** la lumière et rendent les images plus claires.

Ils sont de deux types. Le schéma du dessus montre un télescope à réfraction. Celui-ci utilise une lentille pour concentrer la lumière céleste et une lentille plus petite pour agrandir l'image.

Le télescope du dessous est à réflexion. Il utilise deux miroirs pour réfléchir la lumière à travers une petite lentille.

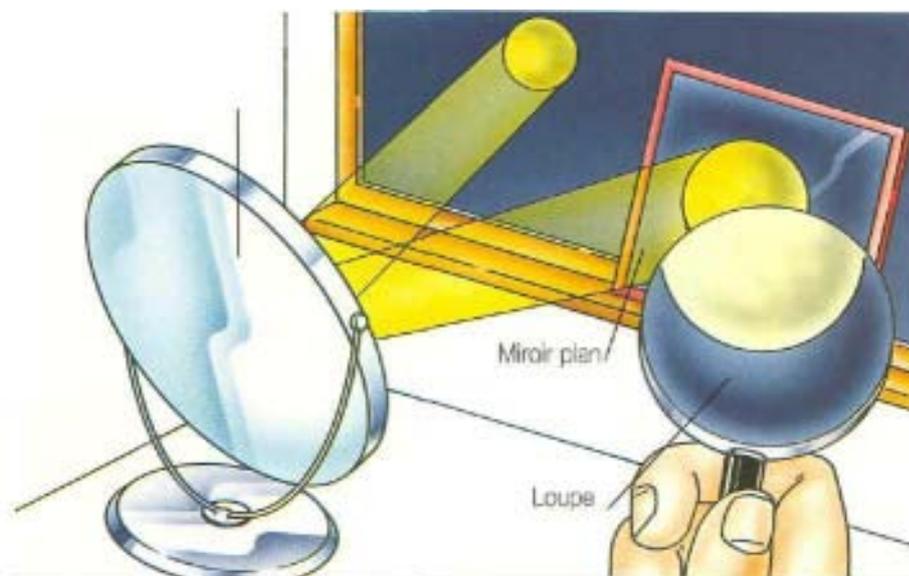
FABRIQUER VOUS MÊME VOTRE TELESCOPE

Placez un miroir à raser près d'une fenêtre, face à la Lune.

Prenez ensuite un miroir plan et tenez-le de façon à ce que l'image recueillie par le miroir à raser vienne s'y réfléchir.

Regardez cette image à travers une loupe: la Lune vous paraîtra plus brillante.

Attention: procédez toujours à ces observations de nuit car l'observation du Soleil au télescope est **dangereuse**.



Télescope à réflexion

Les défauts d'une lentille

Les rayons centraux issus d'une source S située à l'infini (fig. 4) viennent converger en un point F' différent du point de convergence F'' correspondant aux rayons marginaux qui atteignent le bord d'une lentille à bords minces.

Dans ces conditions, la lentille ne donne pas de la source S une image nette : on dit que la lentille n'est pas stigmatique et qu'elle présente une aberration de sphéricité (photo 7).

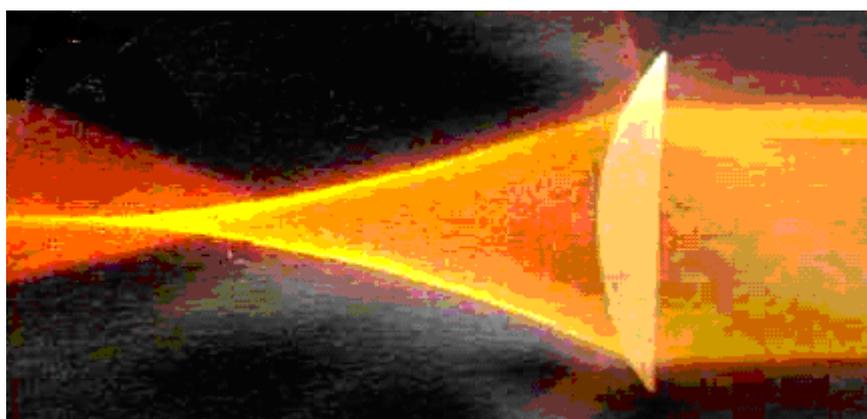


Photo 7 :

Lentille présentant une aberration de sphéricité; les rayons marginaux enveloppent une surface

de révolution sur laquelle s'accumule la lumière. Un phénomène analogue s'observe avec une lentille divergente.

D'une manière générale, dès que les rayons ne sont plus voisins de l'axe de la lentille, il n'est pas possible d'obtenir une image nette d'un objet; la figure observée est plus ou moins floue et déformée.

Parmi les diverses aberrations, citons l'aberration de distorsion, mise aisément en évidence en réalisant l'image d'un quadrillage sur un écran à l'aide d'une lentille et d'un diaphragme placé avant ou après celle-ci: les lignes du quadrillage sont déformées en forme de «barillet» ou en forme de coussinet (fig. 8).

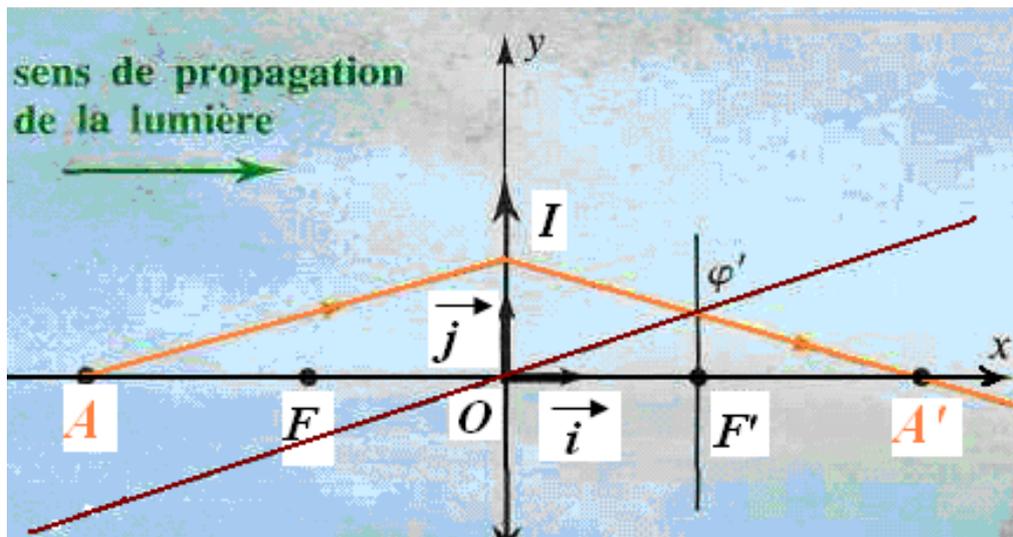


Figure 8 :

Distorsion d'un système optique.

Annexe – 16 –

La démonstration de la relation de conjugaison est déterminée à partir de la propagation de la lumière à travers une lentille convergente ; Soit :



Posons $OA = x$, $OF = f$ et $OA' = x'$.

La droite $O\phi'$ a même **pende** que la droite AI ,
autrement dit la quantité $\frac{y}{x}$.

Dans le repère (O, \vec{i}, \vec{j}) , son équation s'écrit
donc :

(1)

Nous en déduisons les coordonnées de φ :

et (2)

La droite IA' a pour équation :

(3)

Le point φ' appartenant aussi à cette droite, il vient que :

On obtient alors :

(4)

Annexe – 17 -

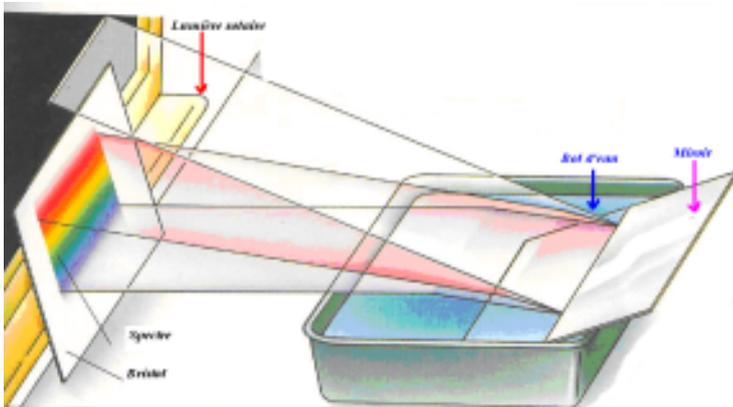
R é a l i s e z vous-même un Arc-en-ciel

Vous pouvez
voir les
couleurs du
spectre en
réalisant votre
p r o p r e
arc-en-ciel.

Par une
j o u r n é e
ensoleillée,
remplissez
d'eau un bol et
déposez un
miroir incliné.
Placez le en
face d'une
fenêtre de

façon à ce que
les rayons
solaires
frappent le
miroir.
Disposez un
carton blanc
face au miroir
et déplacez le
jusqu'à ce
qu'un
arc-en-ciel y
apparaisse. Il
est possible
que, pour
atteindre ce
résultat, vous
soyez obligé de
modifier la
position du mi-
roir. L'eau et le

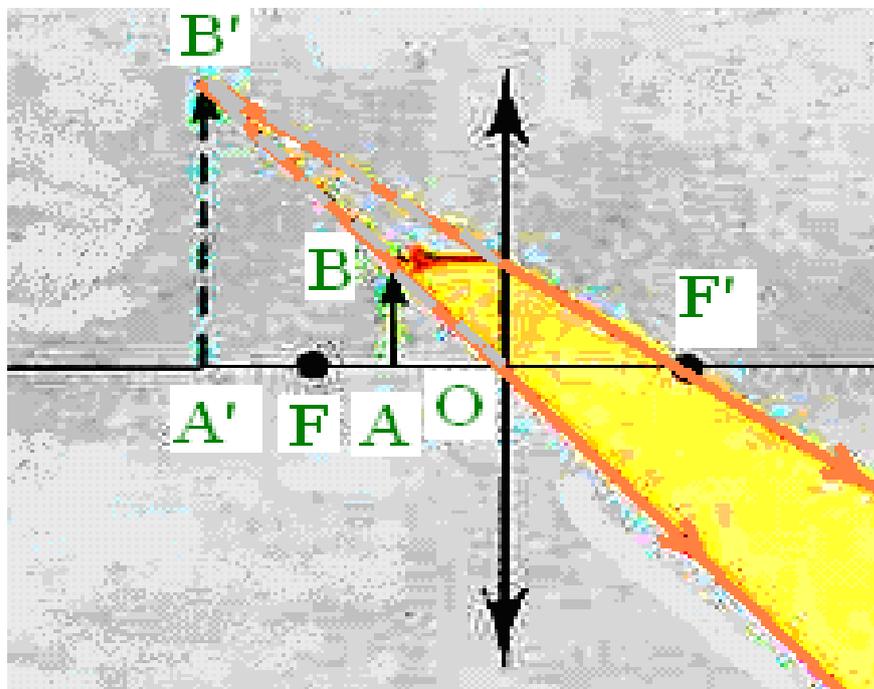
miroir se
comportent
comme un
prisme: ils
dissocient la
lumière
blanche en ses
couleurs
composantes.



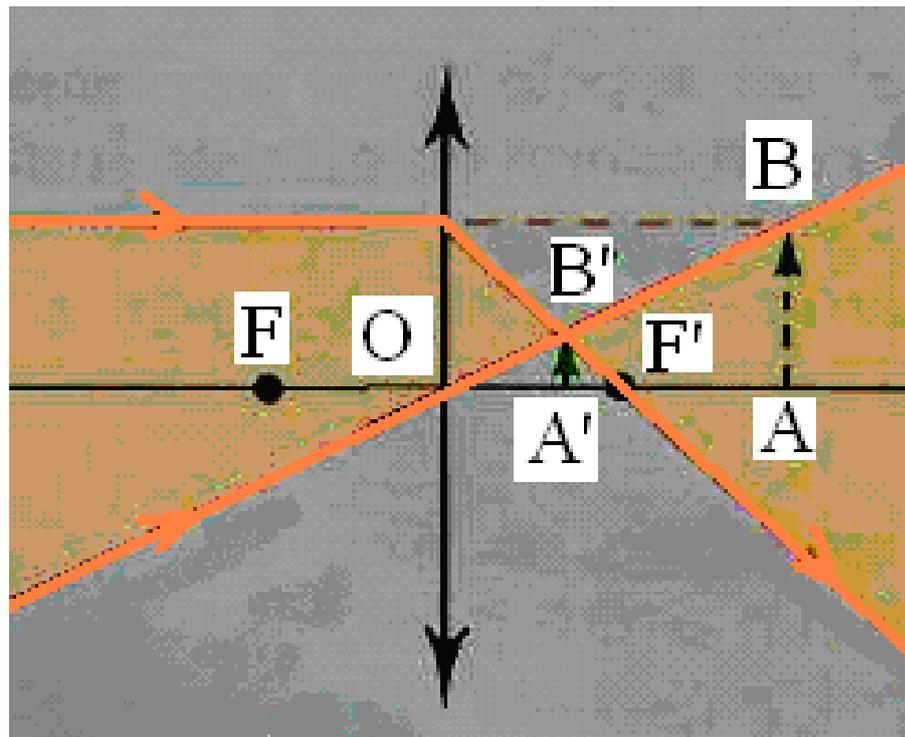
Annexe -19-

Nous avons tracé les différents cas de figures et images que donnent des lentilles convergentes et divergentes pour d'autres positions de l'objet.

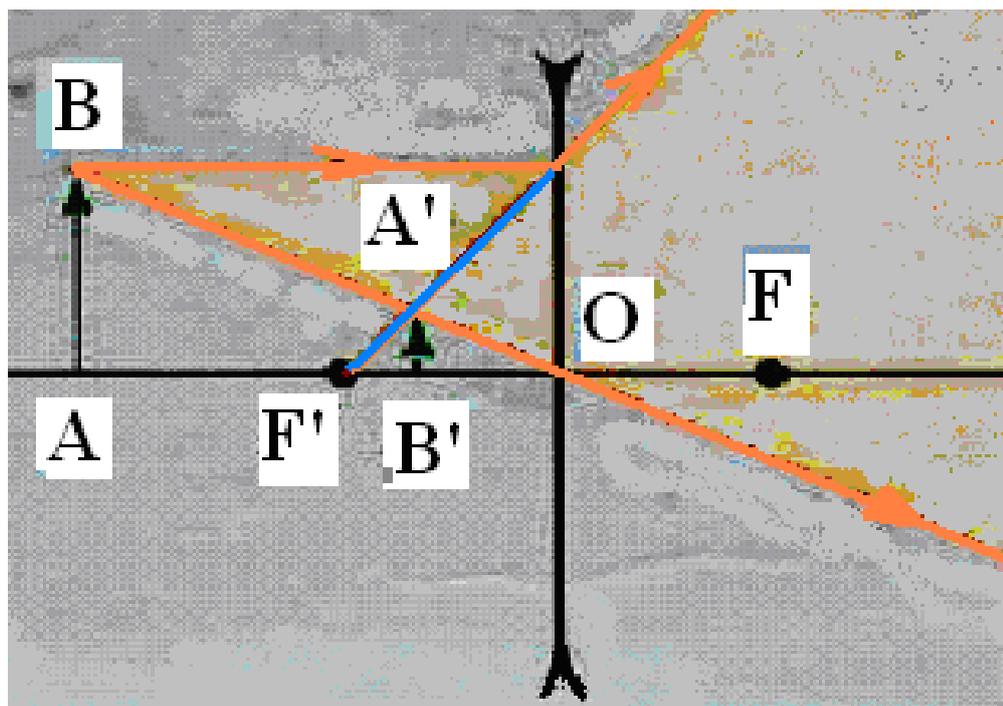
Il en ressort que la position, la nature (réelle ou virtuelle), le sens (image droite ou renversée) et la grandeur de l'image par rapport à celle de l'objet dépendent de la position de l'objet et du type de lentille utilisée (convergente ou divergente).



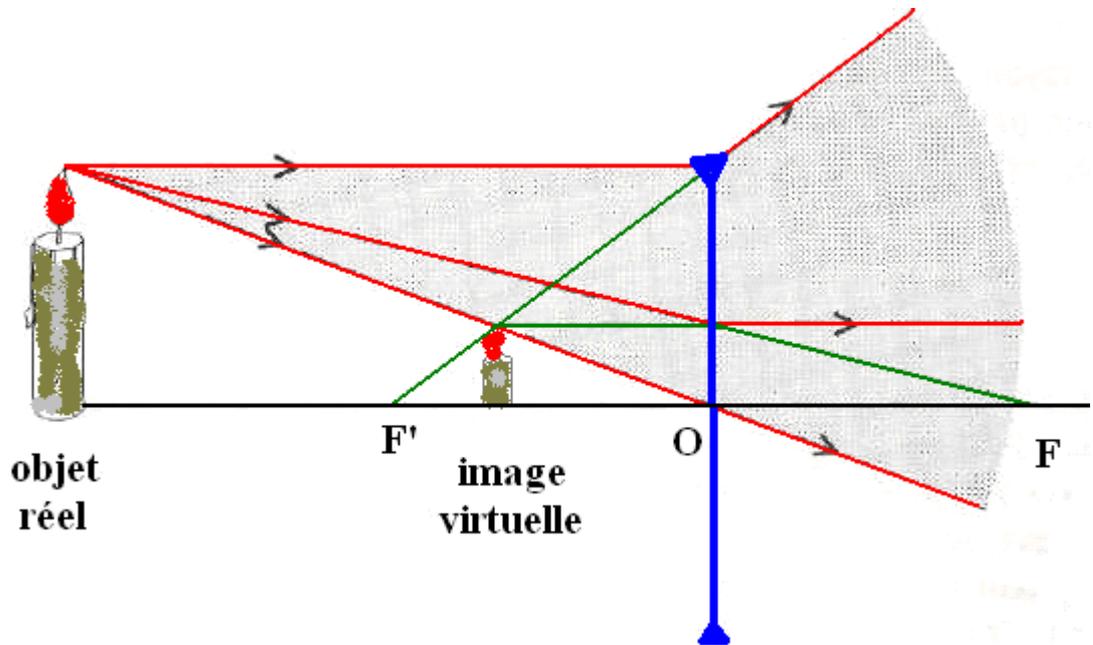
Objet réel et image virtuelle droite



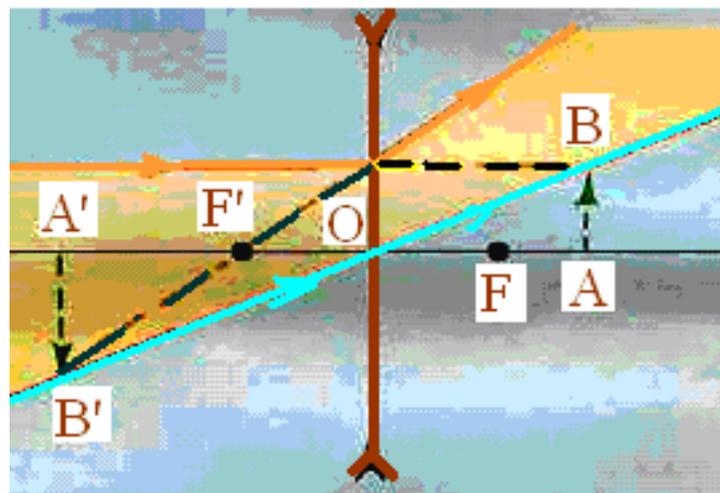
Objet virtuel et Image réelle droite



Objet réel et Image virtuelle droite



Objet réel et Image virtuelle droite



**objet virtuel - image virtuelle
renversée**

Nous déduisons que :

♣♣♣ L'objet est réel s'il est situé en avant de la lentille; l'image est réelle si elle se forme derrière la lentille; elle peut donc être recueillie sur un écran.

♣♣♣ Il est virtuel s'il se trouve derrière la lentille (c'est le cas d'un objet qui est, avant interposition de la lentille, en fait une image réelle donnée par un instrument d'optique situé en avant de la lentille).

L'image est virtuelle si elle se forme en avant de la lentille (elle se trouve alors sur le prolongement virtuel des rayons lumineux qui émergent de la lentille).

Une image virtuelle ne peut pas être recueillie sur un écran mais on peut l'observer directement en plaçant son œil en arrière de la lentille.

♣♣♣ L'image est dite droite si son sens est le même que celui de l'objet; elle est renversée si elle a un sens contraire.

BIBLIOGRAPHIE

PREMIER CHAPITRE

&

DEUXIEME CHAPIRE

echanges thermiques

&

modes de transferts

THERMIQUE

ET

INTRODUCTION

À

LA THERMODYNAMIQUE

Livre [1]

Titre : Transfert De Chaleur.

Tome 1 : Les Principes

Auteurs :

Jean CRABOL

Ed. MASSON.

Livre [2]

Titre : Thermodynamiques.

Les Cahiers du 1^{er} Cycles.

Résumés de cours. Exercices Corrigés.

Auteurs :

Jean DATCHARY.

Ed. Marketing – Groupe SIGMA.

Livre [3]

**Titre : Theorie et Application de la
Thermodynamique**

Auteurs :

Michael M.ABBOT, Ph. D

Hendrick C. Van Ness, D. Eng.

Série SCHAUM

Livre [4]

Titre : Thermodynamique Générale Et Applications

Auteurs :

Roger KLING.

Préface de Marcel BARRERE

Publications de L'Institut français du Pétrole

Ed. TCHNIP.

Livre [5]

Titre : Cours de Physique Thermodynamique

Auteurs :

J. BOUTIGNY

Ed. VUIBERT.

Livre [6]

Titre : Thermodynamique.

54 Exercices de Concours Commentés

Auteurs :

Philippe. ODERMATT

Ed. Dunod.

Livre [7]

Titre : Thermique Theorique Et Pratique.

Auteurs :

Bernard EYGLUMENT

Ed. HERMES

Livre [8]

Titre : **Thermodynamique**
Diffusion Thermique
Cours et Exercices Résolus

Auteurs :

Préface de Raymond CASTING
Jean Le HIR

Ed. MASSON

Livre 9]

Titre : **Thermodynamique**

Cours et Exercices Résolus

Auteurs :

CLAUDE MAÎTRE

Série Le HIR / MARUANI

Ed. MASSON.

Livre [10]

Titre : La Thermique des serres

Auteurs :

Yves Carmary.

Christian Nicolas.

Préface de Robert Brun

**Collection de la direction des Etudes et Recherches
d'Electricité de France.**

Ed. EYROLLES.

BIBLIOGRAPHIE

TROISIEME CHAPITRE

Livre [1]

Titre : Thermodynamique – Optique
Geometrique.

Cours Et Exercices résolus

Auteurs :

Jean Le HIR.

Préface de Evry Schatzman

Ed.MASSON.

Remarque : D'autres titres de livres pour le troisième
Chapitre seront transmis dans cette semaine.

Bibliographie

LIVRE [1]

TITRE : TRANSFERT DE CHALEUR.

TOME 1 : LES PRINCIPES

AUTEURS :

JEAN CRABOL

Ed. MASSON.

LIVRE [2]

TITRE : THERMODYNAMIQUES.

LES CAHIERS DU 1^{er} Cycles.

Résumés de cours. Exercices Corrigés.

AUTEURS :

Jean DATCHARY.

Ed. Marketing – Groupe SIGMA.

LIVRE [3]

TITRE : THEORIE ET APPLICATION DE LA THERMODYNAMIQUE

AUTEURS :

Michael M.ABBOT, Ph. D

Hendrick C. Van Ness, D. Eng.

Série SCHAUM

LIVRE [4]

TITRE : THERMODYNAMIQUE GENERALE ET APPLICATIONS

AUTEURS :

Roger KLING.

Préface de Marcel BARRERE

Publications de L'Institut français du Pétrole

Ed. TCHNIP.

LIVRE [5]

TITRE : COURS DE PHYSIQUE THERMODYNAMIQUE

AUTEURS :

J. BOUTIGNY

Ed. VUIBERT.

LIVRE [6]

TITRE : THERMODYNAMIQUE.

54 EXERCICES DE CONCOURS COMMENTES

AUTEURS :

PHILIPPE. ODERMATT

Ed. Dunod.

LIVRE [7]

TITRE : THERMIQUE THEORIQUE ET PRATIQUE.

AUTEURS :

Bernard EYGLUMENT

Ed. HERMES

LIVRE [8]

TITRE : THERMODYNAMIQUE

DIFFUSION THERMIQUE

COURS ET EXERCICES RESOLUS

AUTEURS :

Préface de Raymond CASTING

Jean Le HIR

Ed. MASSON

LIVRE [9]

TITRE : THERMODYNAMIQUE

COURS ET EXERCICES RESOLUS

AUTEURS :

CLAUDE MAÎTRE

Série Le HIR / MARUANI

Ed. MASSON.

LIVRE [10]

TITRE : LA THERMIQUE DES SERRES

AUTEURS :

Yves CARMARY.

Christian NICOLAS.

Préface de Robert BRUN

Collection de la direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France.

Ed. EYROLLES.