

Bienvenu(e)s au cours

PHY1522 Principes fondamentaux de physique II Hiver 2012

Professeur Serge Desgreniers
Université d'Ottawa

PHY 1522 – Principes fondamentaux de physique II Professeur Serge Desgreniers (département de physique)

- ⦿ **Cours:**
 - Mardi, 8h30 à 10h00 et vendredi, 10 h00 à 11h30 au MCD146
 - Heures de consultation (MCD133): mardi, 10h10 à 11h00 et vendredi, 9h00 à 9h50
 - Vous pouvez me joindre par courriel: serge.desgreniers@uottawa.ca
- ⦿ **DGD** (non obligatoire, mais fortement recommandé!) :
 - Mardi de 11h30 à 12h30 (possiblement jusqu'à 12h50) au FTX 227
- ⦿ **Chargés d'exercices et correcteurs:**
 - Nicolas Monette-Catafard et Carlee Glendenning
- ⦿ **Centre d'aide de physique:**
 - L'horaire du centre d'aide sera affiché au MCD, dès que connu
- ⦿ **Laboratoires**
 - Les sessions débiteront le 16 janvier 2012
 - Consulter l'hyperlien suivant: <http://www.phylab.uottawa.ca/bienvenue.html>

PHY 1522 – Principes fondamentaux de physique II

- Introduction
- Chapitre 1 La charge électrique. La loi de Coulomb et le champ électrique (~3 cours)
- Chapitre 2 Le théorème de Gauss (~2 cours)
- Chapitre 3 Le potentiel électrique (~3 cours)
- Chapitre 4 Résistance et capacité. Les circuits électriques en courant continu (~2 cours)
- Chapitre 5 Hydrostatique et hydrodynamique (~3 cours)
- Chapitre 6 Chaleur et thermodynamique (~4 cours)
- Chapitre 7 La lumière. Optique géométrique (~3 cours)
- Chapitre 8 Ondes et oscillations. Optique physique (~4 cours)

Évaluation: 9 quiz (10%), un examen intra-semesteriel (20%), un examen final (50%) et le laboratoire (20%).

PHY1522 - Livres de cours



- **PHYSIQUE 1, 2 et 3**
par Harris Benson
Adaptation de Marc Séguin - Benoît Villeneuve -
Bernard Marcheterre - Nicole Lefebvre
- 4ème édition. ERPI
- Les livres sont nécessaires pour vos lectures et les devoirs.
- Disponibles chez AGORA et possiblement à la Librairie universitaire.
- Éditions antérieures:



à la pagination
et la numérotation des problèmes

PHY1522 – Page Web du cours

- ⦿ <http://www.courseweb.uottawa.ca/PHY1522>
- ⦿ Vous y trouverez
 - Le calendrier des lectures, des cours, des DGD, devoirs/quiz et des examens
 - Les notes de cours
 - Les devoirs
 - Les solutionnaires des devoirs, affichés après les quiz
 - Vos résultats non-officiels (dépendamment de la politique d'affichage)
 - Des hyperliens d'intérêts
- ⦿ Consulter le site Web régulièrement pour connaître les dernières nouvelles
- ⦿ <http://www.courseweb.uottawa.ca/phylab> (laboratoires)

PHY1522 – Autres informations utiles

- ⦿ Quelques dates limites importantes :
 - inscription et modification de choix de cours : 23.01.12
 - abandon de cours : 16.03.12
 - Fin des cours: 10.04.12
- ⦿ Consulter les règlements de la Faculté des sciences concernant la présence, les examens, abandon de cours, justificatif d'absence (voir la page web du cours).
- ⦿ Les notes de cours seront disponibles sur la page Web et à la centre de reprographie, sous-sol de pavillon MCD.

PHY1522 - Méthode de travail

- Votre préparation au cours : **LISEZ LE LIVRE!**
- Les *cours* complètent vos lectures :
 - révision des notions
 - compléments d'explication des concepts importants
 - démonstrations et solutions de problèmes
- Les *lectures* vous préparent à profiter des explications données en cours.
- Les *devoirs*
 - Vous les faites seuls ou en groupe (fortement encouragés).
 - Assurez-vous de bien comprendre ce que vous faites et de pouvoir vous-même formuler les solutions.
 - Les devoirs ne sont pas corrigés.
- **Les quiz:** À l'échéance de la date du devoir, un court quiz vous sera posé en début d'un cours (en général le vendredi); le quiz portera sur le devoir précédent.
- La somme des notes de tous les quiz comptera pour 10% de la note finale. A ne pas négliger!

PHY1522 - Méthode de travail

- Au **DGD**,
 - Résolution de problèmes supplémentaires reliés à la matière et au devoir seront résolus
 - Les problèmes faits aux DGD sont affichés sur le calendrier, de sorte que vous puissiez venir au DGD en étant bien préparés!
 - De l'aide pour vos questions.
- Un **examen intra-semestriel** (80 minutes) sans documentation sauf pour la liste des formules.
 - L'examen couvrira essentiellement l'électrostatique.
 - 20 % de la note finale.
- **L'examen final** (180 minutes) sans documentation sauf pour la liste des formules.
 - L'examen couvrira toute la matière.
 - 50 % de la note finale.
 - Seule une des calculatrices autorisées par la Faculté des sciences sera permise.
- **Le laboratoire** (3 heures à toutes les deux semaines):
 - 20% de la note finale

L'électricité - Introduction

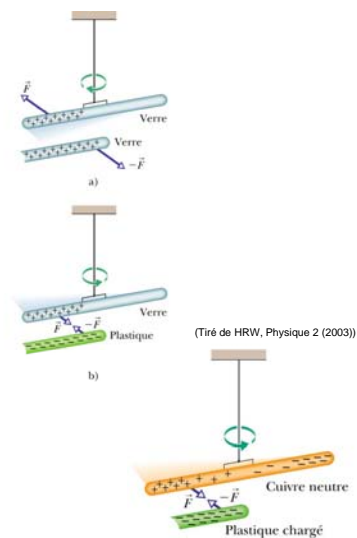
- L'électricité est partout! Nous nous imaginons mal la vie moderne sans électricité;
- Non seulement, l'électricité est nécessaire pour le fonctionnement d'appareils (ordinateurs, projecteur, ampoule, les véhicules, etc), mais elle est aussi à la base de la vie;
- La lumière est en fait une onde électromagnétique;
- Au niveau cellulaire et moléculaire, elle intervient dans le processus vitaux; le cœur a besoin d'électricité pour battre;
- Nous ne pourrions pas voir sans électricité;
- Nous ne pourrions pas penser sans électricité! L'information circule dans les neurones par le déplacement de charges.

La charge électrique

- Les atomes sont formés de protons, neutrons et électrons;
- Le proton et l'électron possèdent la même charge élémentaire mais en signe opposé;
- Un atome peut être neutre ou ionisé (-: anion, +: cation);
- Un objet macroscopique peut se charger + ou -, par frottement, par exemple;
- Une charge peut être induite;
- Des charges électriques identiques se repoussent alors que des charges électriques opposés s'attirent;
- Des charges peuvent se déplacer facilement dans les matériaux *conducteurs, semi-conducteurs et supraconducteurs* et plus difficilement dans les *isolants*.
- La charge est quantifiée: $q = ne = \pm 1, \pm 2, \text{ etc.}$
- La charge élémentaire:

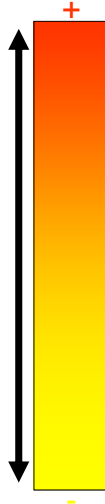
$$e = \pm 1,602 \times 10^{-19} \text{ Coulomb (C)}$$

Particule	Symbole	charge
Électron	e ou e ⁻	-e
Proton	p	+e
Neutron	n	0



Électrisation par frottement La séquence triboélectrique

- Amiante
- Fourrure de lapin
- Verre
- Mico
- Laine
- Quartz
- Fourrure de chat
- Plomb
- Soie
- Peau humaine, aluminium
- Coton
- Bois
- Ambre
- Cuivre, laiton
- Caoutchouc
- Souffre
- Pellicule de celluloid
- Caoutchouc des Indes

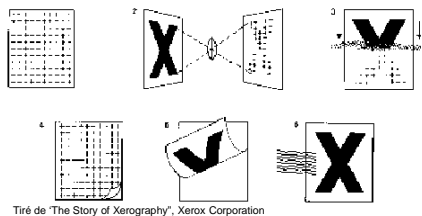


Lorsque deux substances de la liste ci-contre viennent en contact, celle du haut de la liste se charge positivement par rapport à une suivante dans la liste qui elle se charge alors négativement.

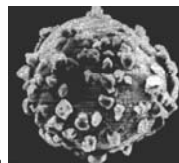
L'électrisation par frottement de deux substances augmente avec leur écart dans la liste.

Adapté de "Physique" de E. Hecht

Utilisations de la force d'attraction entre des charges - la xérographie (1938)



Tiré de "The Story of Xerography", Xerox Corporation



Xerox Corporation

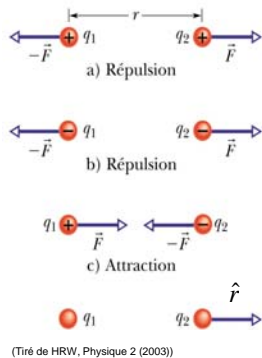
1. Une surface photoconductrice est chargée positivement;
2. Une image est créée optiquement sur cette surface; cette image fixe les charges avant le drainage;
3. Les particules d'encre chargées – se déposent à l'endroit de l'image;
4. Une feuille de papier chargée + est déposée sur la surface d'encre; les particules chargées sont transférées à la feuille électrostatiquement;
5. L'étape finale consiste à 'cuire' l'encre pour la rendre indélébile.

La loi de Coulomb

La force entre deux charges électriques:

$$\vec{F}_C = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

la force électrostatique ou la loi de Coulomb



$$|\vec{F}_{1,2}| = |\vec{F}_{2,1}| = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}, \quad [\vec{F}] = N$$

$$\vec{F}_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N m}^2)$$

ϵ_0 = permittivité électrique du vide
 ϵ_r = permittivité électrique relative

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \times 10^9 \text{ N m}^2 / \text{C}^2$$

La loi de Coulomb – la permittivité électrique relative ϵ_r

Substance	ϵ ($10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N m}^2)$)	ϵ_r
Vide	8,85 (ϵ_0)	1
Air	8,85	1,00054
Corps humain	71	8
Verre	44-89	5-10
Mica	27-53	3-6
Nylon	31	3,5
Papier	18-35	2-4
Polyéthylène	20	2,3
Polystyrène	23	2,6
Caoutchouc	18-27	2-3
Huile de silicone	19-25	2,2-2,8
Chlorure de Na	50	5,6
Téflon	19	2,1
Éthanol (25 °C)	220	24,3
Méthanol (20°C)	300	33,6
Eau (20 °C)	710	80

La loi de Coulomb – problèmes

- L'atome d'H consiste en un électron situé en moyenne à une distance de 53 pm du proton. Déterminez la force électrostatique subie par l'électron en terme de la force gravitationnelle.
- Trois charges, q_1 , q_2 et q_3 sont alignées et séparées de 2 et 6 cm, respectivement. Les charges q_1 et q_3 se trouvent de part et d'autre de la charge q_2 . Quelle est la force électrostatique subie par la charge q_2 ?

PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II - Chapitre 1

15

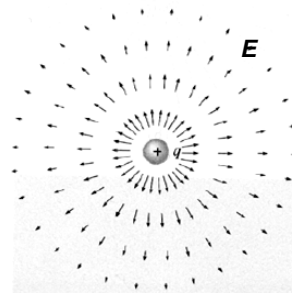
Le champ électrique

Le champ électrique \vec{E} en tout point de l'espace est la force électrostatique subie par une charge d'essai q_0 placée à ce point, divisée par la charge:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \text{ et } \vec{F} = q_0 \vec{E}$$

Le champ électrique \vec{E} produit par une charge ponctuelle q est égal à:

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2} \hat{r}, \quad [\vec{E}] = N/C$$

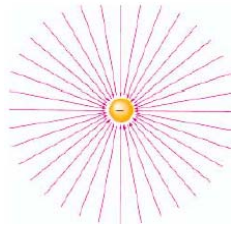


(Tiré de HRW, Physique 2 (2003))

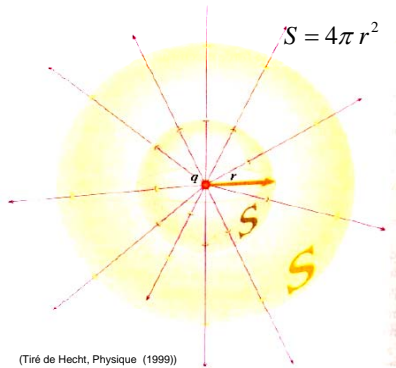
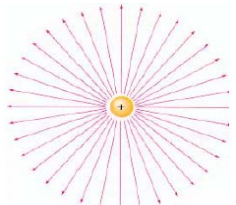
PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II - Chapitre 1

16

Les lignes de champ électrique



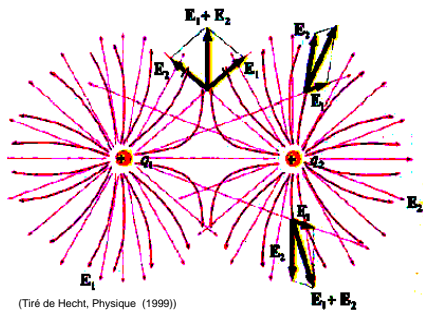
Les lignes de champ partent d'une charge + pour aboutir à une charge -



(Tiré de Hecht, Physique (1999))

La densité des lignes de champ électrique, i.e. le nombre de lignes par unité de surface, diminue comme $1/r^2$, en accord avec la loi de Coulomb

Le champ électrique



(Tiré de Hecht, Physique (1999))

- Les champs électriques s'additionnent vectoriellement:

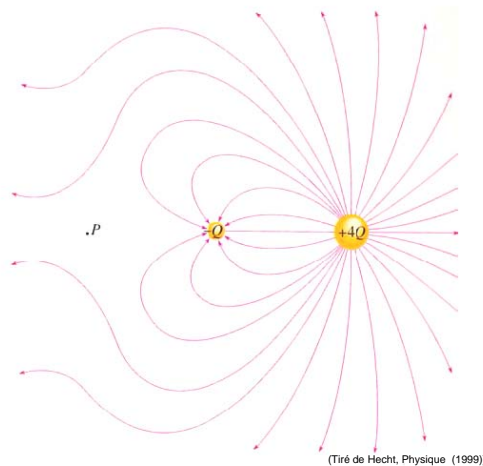
$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$$

- Attention au sens du champ électrique: il émane d'une charge positive et se dirige vers une charge négative;
- Les lignes de \mathbf{E} ne se croisent jamais;
- La force subie par une charge + est tangente à la ligne de champ \mathbf{E} ;
- Plus les lignes de champ \mathbf{E} sont concentrées en un point, plus la force subie par une charge en ce point est grande.

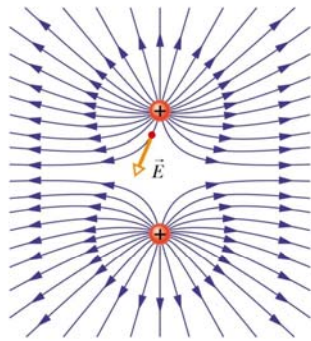
Le champ électrique – problèmes

- Deux charges de $+10 \text{ nC}$ sont situées à $(0,0)$ et $(0, 8)$. Calculez le champ électrique aux points A $(0,4)$, B $(4,4)$ et C $(4, -4)$.
- Une charge ponctuelle de $10 \text{ }\mu\text{C}$ baigne dans l'eau de constante diélectrique 80. Calculez le module du champ électrique à $0,20 \text{ m}$ de cette charge.

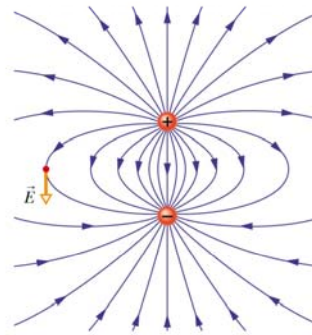
Champ électrique de charges ponctuelles



Champ électrique de charges ponctuelles

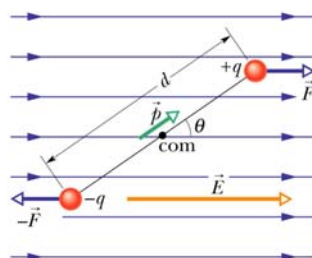


Le dipôle électrique

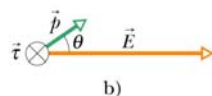


(Tiré de HRW, Physique 2 (2003))

Le dipôle à l'intérieur d'un champ électrique



a)



b)

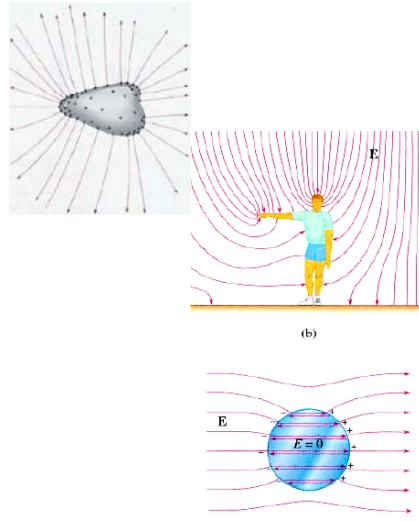
(Tiré de HRW, Physique 2 (2003))

- Le champ électrique provoque un moment de force sur le dipôle.
- Le moment de force fait tourner le dipôle de sorte à l'aligner le long des lignes de champ électrique:

$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$$

Matériau conducteur dans un champ E

- La distribution des charges à la surface d'un conducteur n'est pas nécessairement uniforme: elle dépend de la forme de la surface;
- Le champ électrique est nul en tout point à l'intérieur d'un conducteur chargé et les lignes de champ électrique extérieur sont normales à la surface du conducteur;
- Si le champ E n'était pas perpendiculaire à la surface, alors il existerait une composante tangentielle de E qui déplacerait les charges et par conséquent détruirait l'équilibre électrostatique.

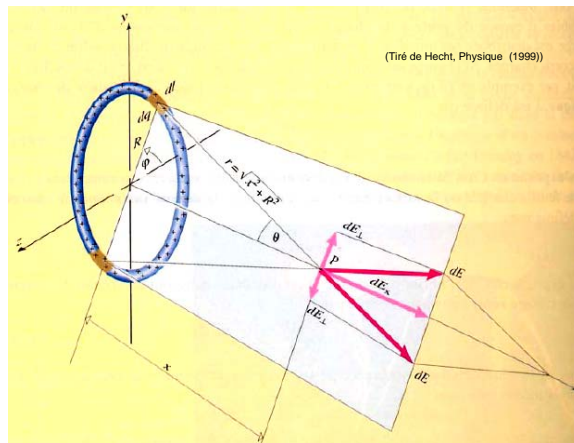


PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II - Chapitre 1

(Tiré de Hecht, Physique (1999))

Le champ électrique – problème

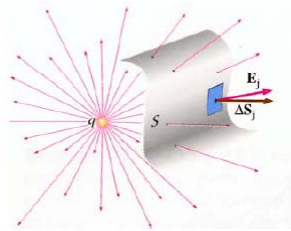
Calcul du champ électrique au point P dû à une distribution uniforme de charges + sur l'anneau de rayon R dont le centre est à une distance x de P



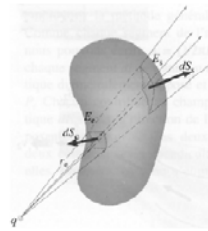
(Tiré de Hecht, Physique (1999))

PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II - Chapitre 1

Théorème de Gauss



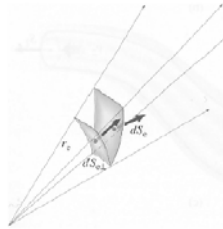
(Tiré de Hecht, Physique (1999))



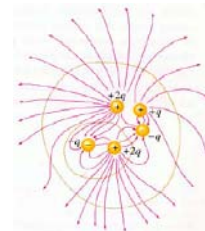
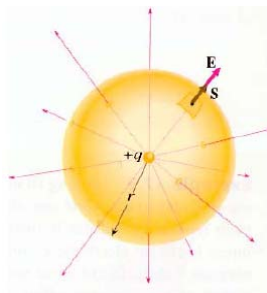
Le flux électrique:

$$\Phi_E = \int_{\text{surface}} \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_{\text{surface}} \vec{E} \cdot \hat{n} ds$$

Le flux électrique qui traverse une surface de Gauss est proportionnel au nombre de lignes de champ électrique qui traversent cette surface



Théorème de Gauss et la loi de Coulomb
Flux électrique dû à une charge (symétrie sphérique)



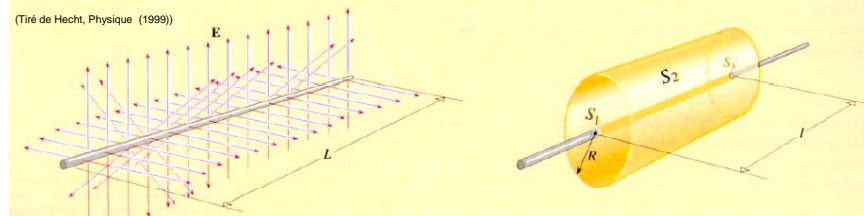
(Tiré de Hecht, Physique (1999))

$$\Phi_E = \oint_{\text{surface}} \vec{E} \cdot d\vec{s} = \oint_{\text{sphère}} E ds = E \oint_{\text{sphère}} ds = E 4\pi r^2 = \frac{q_{\text{int}}}{\epsilon}$$

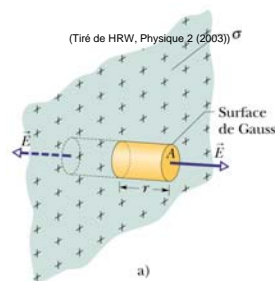
Le théorème de Gauss – problème

Déterminez le champ électrique \vec{E} en un point situé à une distance normale R d'un long fil métallique rectiligne, de longueur R et portant une charge totale Q répartie uniformément sur le conducteur.

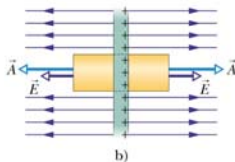
Utilisons le théorème de Gauss et la symétrie cylindrique...



Le théorème de Gauss – problème



- Quel est le champ électrique dû à une feuillard non-conducteur mais chargé?
- Appliquer le théorème de Gauss. Symétrie planaire.



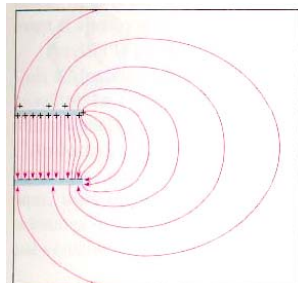
Le théorème de Gauss – problème

Soit le champ électrique variable suivant :

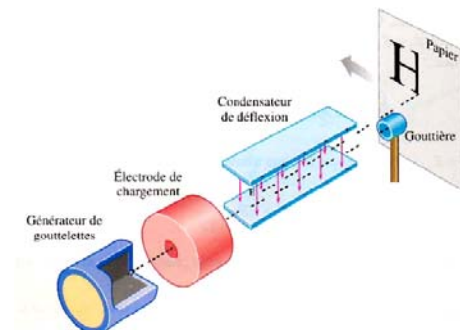
$$\vec{E}(x) = 3,0x\hat{i} + 4,0\hat{j}$$

Ce champ électrique traverse une surface de Gauss définie par un cube de 2 m de côté centré à (2,1,1). Le champ \mathbf{E} est exprimé en N/C et x en mètre. Quel est le flux électrique qui traverse les faces droite, gauche et supérieure?

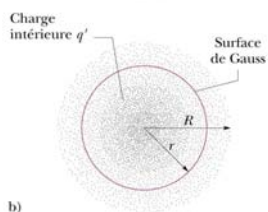
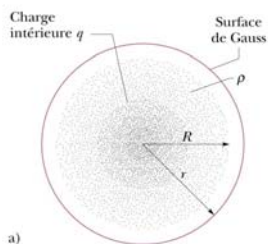
Champ électrique entre deux plans parallèles chargés



(Tiré de Hecht, Physique (1999))



Théorème de Gauss – symétrie sphérique



(Tiré de HRW, Physique 2 (2003))

- Pour une distribution de charge à symétrie sphérique la densité volumique varie avec la distance par rapport au centre de la distribution.

$$E = \left(\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \right), \quad r \geq R$$

$$E = \left(\frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^3} \right) r, \quad r \leq R$$

Le potentiel électrique

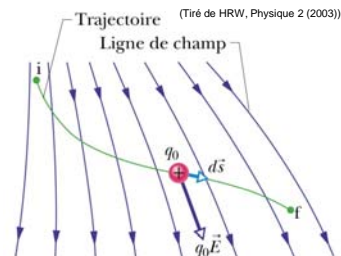
- Le potentiel électrique est une propriété du champ électrique, peu importe qu'un objet chargé s'y trouve ou non;
- On mesure le potentiel (électrique) en J/C ou en V (volt);
- L'énergie potentielle électrique est l'énergie d'un objet chargé au sein d'un champ électrique extérieur;
- On mesure l'énergie potentielle électrique en J.

L'énergie potentielle électrique

- La force électrostatique est conservative;
- Le travail fait par la force électrostatique pour modifier un système de particules chargées est relié à la variation d'énergie potentielle du système:

$$\Delta U = U_b - U_a = -W$$

$$\Delta U = -W = -\int_a^b \vec{F} \cdot d\vec{s} = -q \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{s}$$



- L'énergie potentielle électrique est conservée (force conservative)

Le potentiel électrique

- Le potentiel électrique correspond à l'énergie potentielle électrique par unité de charge en un point donné d'un champ électrique, soit:

$$V = \frac{U}{q}; \quad [V] = \text{Joule} / \text{coulomb} = \text{Volt (V)}$$

- Le potentiel électrique est un scalaire et non un vecteur;
- La différence de potentiel, entre deux points quelconque a et b à l'intérieur d'un champ électrique, est la différence d'énergie potentielle par unité de charge entre ces deux points:

$$\Delta V = V_b - V_a = \frac{U_b}{q} - \frac{U_a}{q} = \Delta U = -\frac{W}{q}$$

Unités utiles

- L'énergie nécessaire pour déplacer une charge élémentaire à travers une différence de potentiel de 1V est un électron-volt:

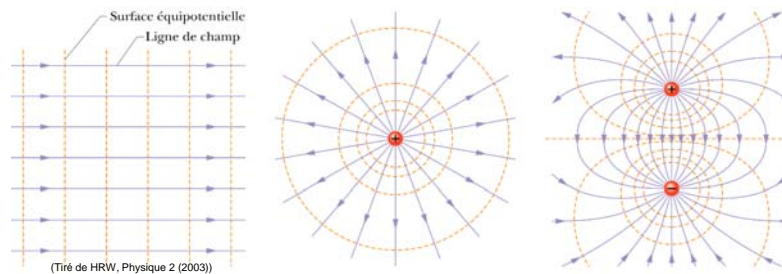
$$-W = q\Delta V = e(1V) = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} (1 \text{ J} / \text{C}) = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

- Les unités du champ électrique: $[E] = \text{V/m}$

$$1 \text{ N} / \text{C} = \left(1 \frac{\text{N}}{\text{C}}\right) \left(\frac{1 \text{ V} \cdot \text{C}}{1 \text{ J}}\right) \left(\frac{1 \text{ J}}{1 \text{ N} \cdot \text{m}}\right) = 1 \text{ V} / \text{m}$$

Les surfaces équipotentielles

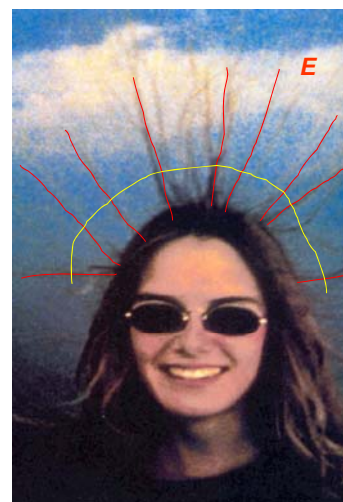
- L'ensemble des points adjacents qui ont un même potentiel électrique constituent une surface équipotentielle;
- Le déplacement d'une charge le long d'une surface équipotentielle résulte en un travail nul fait par le champ électrique sur la charge;
- Les lignes de champ \mathbf{E} sont perpendiculaires à la surface équipotentielle;



PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II – Chapitre 3

36

Les surfaces équipotentielles



PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II – Chapitre 3

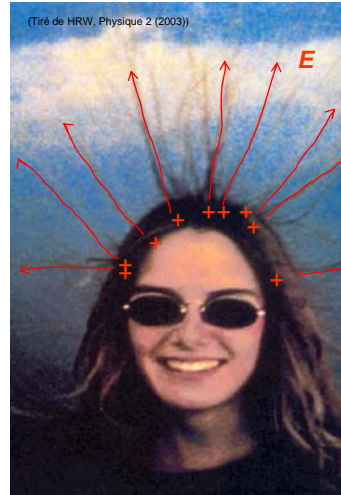
37

Les surfaces équipotentielles

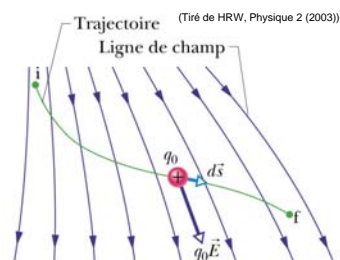
Au moment de la photographie:

$$|\mathbf{E}| < 3 \times 10^6 \text{V/m}$$

avant l'ionisation de l'air!



Calcul du potentiel à partir du champ \mathbf{E}



$$V = -\int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Calcul du potentiel dû à une charge ponctuelle

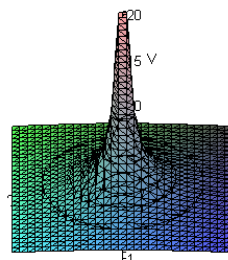
- Une charge positive ponctuelle q engendre un potentiel positif et inversement

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

- Et pour n charges ponctuelles:

$$V(r) = \sum_{i=1}^n V_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i}$$

Le potentiel dû à une charge ponctuelle positive située à l'origine



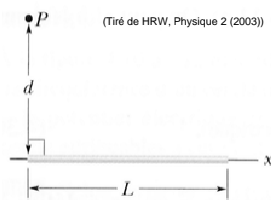
Calcul du potentiel dû à une distribution de charges continue

- On suppose que le potentiel est nul à l'infini;
- Le potentiel dV est celui dû à la charge dq ;
- L'intégrale doit tenir compte de toute la charge et de sa distribution spatiale;

$$V = \int dV = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r}$$

Calcul du potentiel dû à une ligne de charges

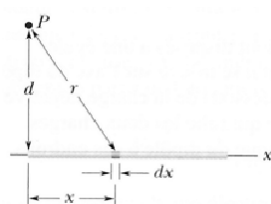
- Soit une fine ligne non-conductrice de longueur L possédant une charge uniforme de densité linéique λ
- On cherche le potentiel au point P situé à une distance d , perpendiculaire à la ligne, à une des extrémités;



- On détermine le potentiel par:

$$V = \int dV = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r}$$

$$dq = \lambda dx$$

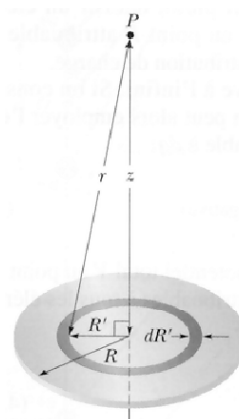


Calcul du potentiel dû à un disque chargé

- On cherche le potentiel au point P situé à une distance z du centre d'un disque possédant une charge uniforme de densité surfacique σ ;
- On détermine le potentiel par:

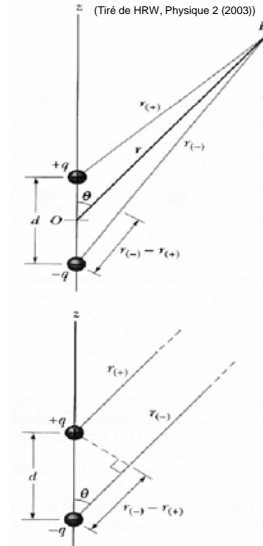
$$V = \int dV = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r}$$

$$dq = \sigma(2\pi R')(dR')$$



(Tiré de HRW, Physique 2 (2003))

Calcul du potentiel dû à un dipôle électrique



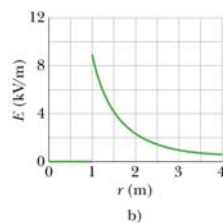
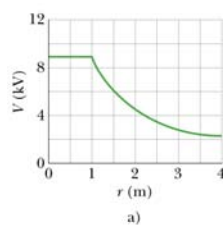
PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II – Chapitre 3

44

Le potentiel d'un conducteur chargé et isolé

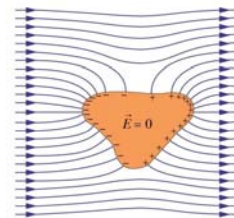
Une charge excédentaire placée sur un conducteur isolé se répartira à la surface de ce conducteur de telle sorte que tous les points de ce dernier soient au même potentiel, puisque $\mathbf{E} = 0$ en tout point à l'intérieur d'un conducteur.

$$V_b - V_a = -\int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{s}$$



(Tiré de HRW, Physique 2 (2003))

$V(r)$ et $|\mathbf{E}(r)|$ d'une coquille chargée d'un rayon de 1m

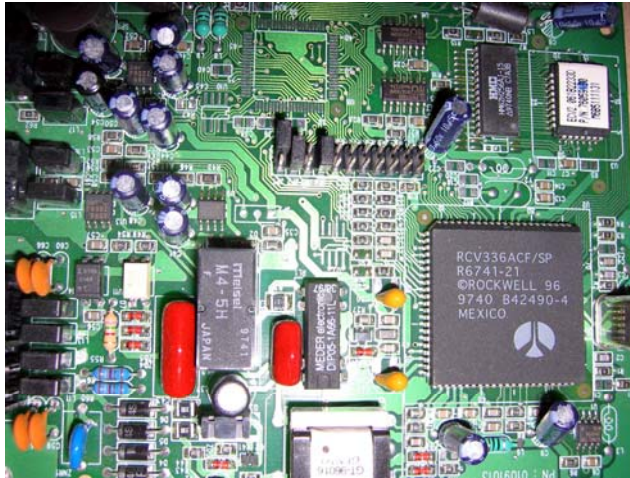


La modification du champ \mathbf{E} dû à un conducteur neutre

PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II – Chapitre 3

45

Résistance et capacité
Les circuits électriques en courant continu



PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II – Chapitre 4

Conducteurs: fils,
circuits imprimés

Condensateurs

Résistances

Électronique
numérique:
Circuits intégrés

Autres composantes

46

Résistance et capacité.
Les circuits électriques en courant continu.

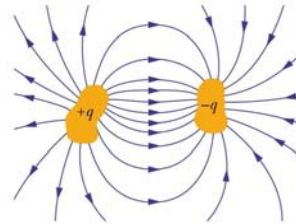
- Nous verrons dans ce chapitre les notions de
 - résistance et résistivité électrique
 - capacité
 - courant électrique
 - puissance électrique
- Nous étudions
 - les propriétés électriques des matériaux
 - les circuits électriques simples formés de résistances électriques et de condensateurs qui fonctionnent sous un courant continu
 - Les lois importantes des circuits électriques
 - Le travail et l'énergie relatifs au déplacement de charges

Capacité

- Pour un potentiel V donné, la quantité de charge Q qui peut être emmagasinée par un matériau est appelé la **capacité** C ;
- Plus la capacité électrique est grande plus la charge Q accumulée sous un potentiel V est grande, i.e.

$$C = \frac{Q}{V}$$

$$[C] = \left[\frac{Q}{V} \right] = \frac{C}{V} \equiv F$$

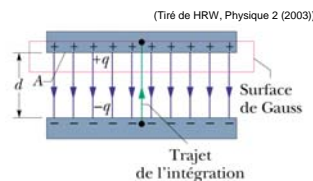


(Tiré de HRW, Physique 2 (2003))

- La capacité est un scalaire toujours positif.
- Un farad (F) est une très grande capacité; on a en général des mF au pF.

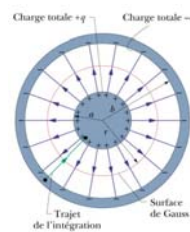
Condensateurs

- Un condensateur est un accumulateur de charges;
- Il existe différents types de condensateurs présentant des capacités variées: plan, cylindrique, électrolytique, variable, etc.
- Les condensateurs sont très utiles dans les circuits électriques; ils servent à accumuler des charges;
- Ils se branchent en série et en parallèle;



(Tiré de HRW, Physique 2 (2003))

Condensateur plan



Condensateur cylindrique

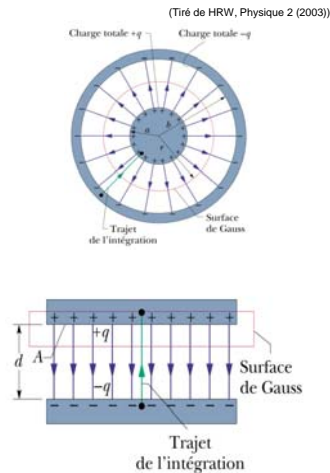
Capacité d'une sphère métallique et d'un condensateur plan

- Soit une sphère métallique de rayon R ;
- Déterminer sa capacité alors qu'elle est placée dans le vide ($R=0,50\text{m}$);

$$C = 4\pi\epsilon_0 R$$

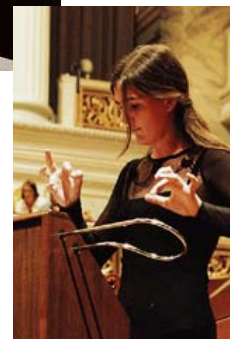
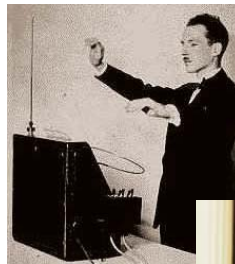
- Pour le condensateur plan de surface A et dont les plans sont séparés de d , on obtient:

$$C = \epsilon_0 A / d$$



Application du condensateur variable: le thérémin

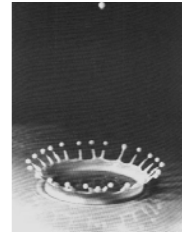
- Instrument de musique inventé en Russie dans les années 1920 par Lev Sergeivitch Termen (Leon Theremin)
- Cet instrument unique est « joué » sans qu'il ne soit touché!
- La distance entre les mains du musicien et les deux antennes détermine la capacité de deux condensateurs;
- La variation de la capacité détermine le timbre et le volume du son produit (fréquence et amplitude d'un oscillateur).



Application du condensateur: la « lampe-éclair »



Photos de H. (Doc) Edgerton (1930)

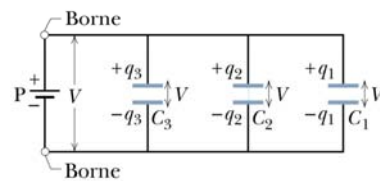


- La « lampe-éclair » ou le flash électronique permet la photographie à haute vitesse grâce à la décharge rapide d'un condensateur dans une lampe à gaz
- Des éclairs répétitifs permettent de « découper » le mouvement.

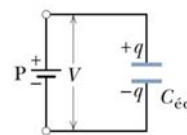
Condensateurs – Association en parallèle

- Le potentiel (tension) est la même aux bornes de chacun des condensateurs mis en parallèle;
- La charge d'un condensateur individuel dépend donc de sa capacité;
- La capacité équivalente d'un circuit de condensateurs en parallèle est donnée par:

$$C_{\text{éq}} = \sum_{i=1}^n C_i; \quad q_{\text{totale}} = \sum_{i=1}^n q_i = C_{\text{éq}} V$$



a)



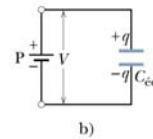
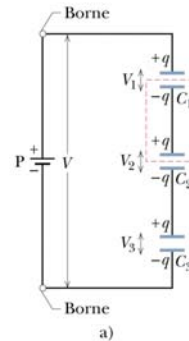
b)

(Tiré de HRW, Physique 2 (2003))

Condensateurs – Association en série

- Les condensateurs individuels mis en série portent la même charge q ;
- Le potentiel (tension) aux bornes des condensateurs individuels dépend de leur capacité;
- La capacité équivalente d'un circuit de condensateurs en série est donnée par:

$$1/C_{\text{éq}} = \sum_{i=1}^n 1/C_i; \quad q = C_{\text{éq}} V$$



(Tiré de HRW, Physique 2 (2003))

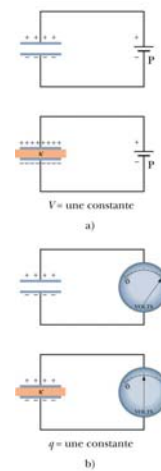
PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II – Chapitre 4

54

Condensateur avec un diélectrique

- L'ajout d'un matériau diélectrique (autre que l'air ou le vide) entre les plaques d'un condensateur plan modifie la capacité;
- Les équations de la capacité et du champ électrique sont alors modifiées pour tenir compte de la constante diélectrique du matériau, κ ;
- On alors remplace ϵ_0 par $\epsilon_0 \kappa$; $C = \kappa \epsilon_0 A/d$
- Ainsi le champ électrique dû à une charge ponctuelle à l'intérieur d'un matériau diélectrique est:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\kappa\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$$



(Tiré de HRW, Physique 2 (2003))

PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II – Chapitre 4

55

Energie stockée par un condensateur

- L'énergie du système doit être conservée;
- L'énergie potentielle d'un condensateur chargé est celle correspondante au champ électrique entre les deux plaques d'un condensateur plan, par exemple;
- L'énergie emmagasinée sous forme électrique est équivalente au travail fait pour stocker les charges dans le condensateur:

$$U = \frac{1}{2} V Q = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} Q^2 / C$$

- En général, on montre que l'énergie associée au champ électrique **E** est donnée par

$$U = \int_{\text{espace}} u \, dv = \int_{\text{espace}} \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \, dv$$

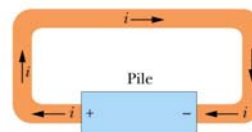
La résistance électrique

- Une différence de potentiel appliquée aux extrémités d'une tige d'aluminium ou à celles d'une tige de bois engendre des courants électriques différents;
- Cette différence se traduit par la résistance électrique définie par: $R = V/i$, où i est le courant, V est la tension et R est la résistance;
- Le courant est lui défini par la variation (passage) de la charge par unité de temps, soit $i = dq/dt$;
- La résistance est mesurée en ohm (Ω)
- La résistance d'un objet dépend de sa composition et de sa forme; pour un matériau donné on parle plutôt de résistivité ρ ;

Conducteur de résistance R



a)



b)

(Tiré de HRW, Physique 2 (2003))

La résistivité électrique

- La résistance d'un corps dépend du matériau dont il est fait et de sa géométrie;
- On peut caractériser la réponse d'un corps (le courant i) à une différence de potentiel en éliminant l'effet de la géométrie en définissant la **résistivité**;
- En effet $R \sim 1/S$, S étant la section efficace et $R \sim L$, L étant la longueur. Ainsi la résistivité ρ est définie par:

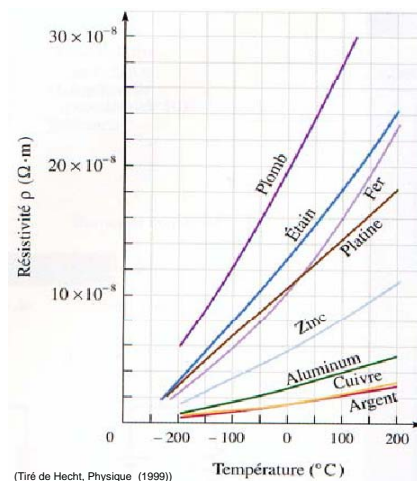
$$R = \rho \frac{L}{S}, \quad [\rho] = \Omega \cdot m$$

Substance	ρ (Ωm)
Cuivre	$1,7 \times 10^{-8}$
Aluminium	$2,8 \times 10^{-8}$
Tungstène	$5,5 \times 10^{-8}$
Pb	21×10^{-8}
Germanium	0,5
Silicium	100-1000
Diamant	10^{14}
Polystyrène	$10^7 - 10^{11}$

Conducteur, semiconducteur, isolant

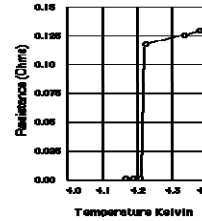
La résistivité électrique varie en fonction de T

- La résistivité des métaux augmentent avec la température;
- Les "collisions" entre les électrons augmentent avec l'augmentation d'énergie thermique ce qui limite leur déplacement;
- Cette propriété $\rho(T)$ peut servir pour fabriquer un thermomètre;

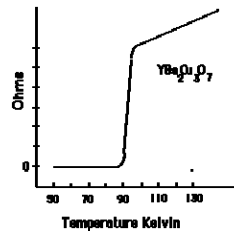


Les matériaux supraconducteurs

- En dessous de la température critique (T_c), un matériau supraconducteur présente aucune résistance électrique;
- Dans l'état supraconducteur, un grand courant peut circuler sans perte d'énergie;
- Dans l'état supraconducteur, le matériau ne peut pas être pénétré par les lignes de champ magnétique (effet Meissner)



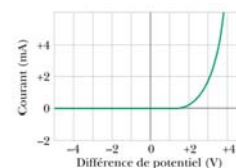
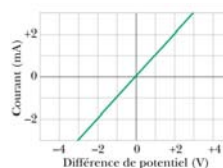
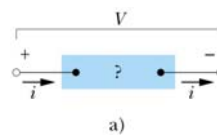
Hg
HKO (1911)



(1987)

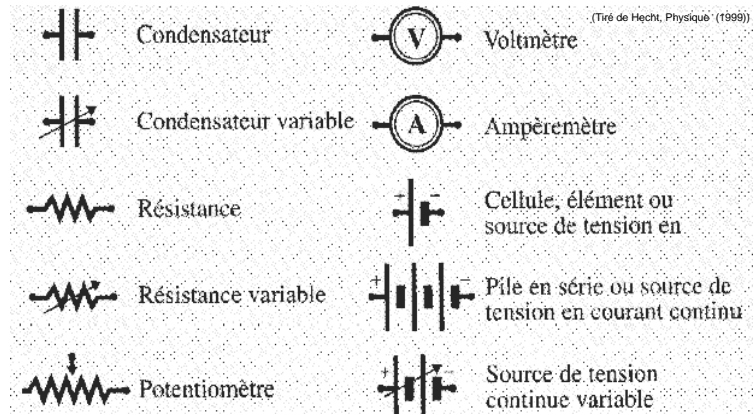
La loi d'Ohm

- La loi d'Ohm exprime la relation linéaire entre la différence de potentiel et le courant engendré dans un circuit formé d'une résistance;
- La constante de proportionnalité entre le potentiel et le courant est justement la **résistance électrique**; $V = R i$;
- $V = R i$; indépendante de la polarité;
- Un matériau conducteur qui n'obéit pas à $V = R i$, est dit être « non-ohmique ».



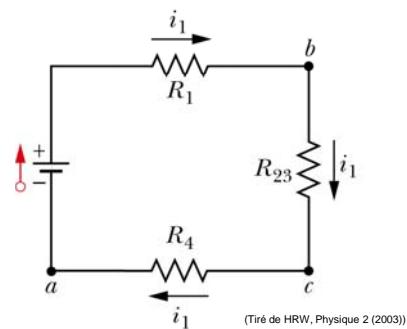
(Tiré de HRW, Physique 2 (2003))

Symboles des composants de circuits électriques



Résistances – Association en série

- Les résistances individuelles mises en série sont traversées par le même courant i ;
- Le potentiel (tension) aux bornes des résistances individuelles dépend de leur résistance respective;
- La résistance équivalente d'un circuit de résistances en série est donnée par:

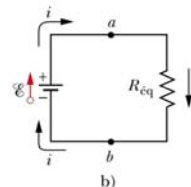
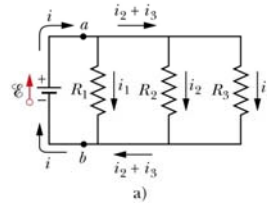


$$R_{eq} = \sum_{i=1}^n R_i; \quad V_i = R_i i$$

Condensateurs – Association en parallèle

- Le potentiel (tension) est la même aux bornes de chacune des résistances mis en parallèle;
- Le courant dans une résistance individuelle dépend donc de sa résistance;
- La résistance équivalente d'un circuit de résistances en parallèle est donnée par:

$$1/R_{\text{éq}} = \sum_{i=1}^n 1/R_i; \quad i_{\text{totale}} = V/R_{\text{éq}} = \sum_{i=1}^n i_i$$

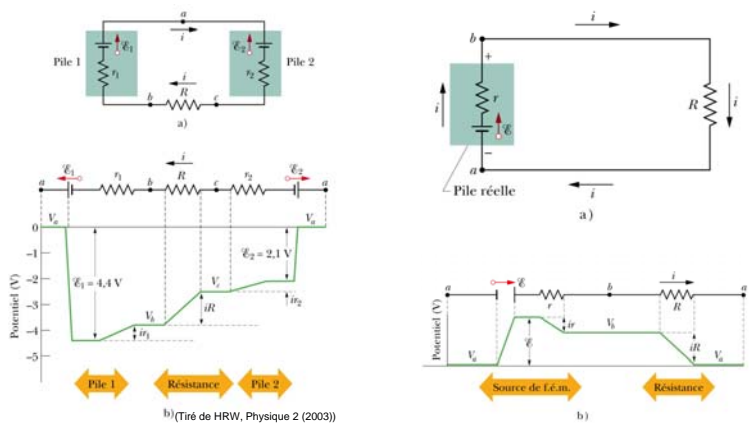


(Tiré de HRW, Physique 2 (2003))

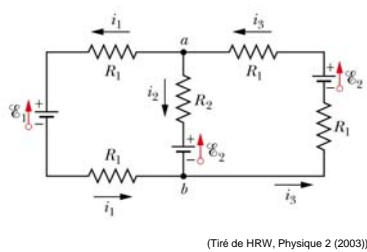
Les circuits électriques en courant continu Les lois importantes

- **La loi de la résistance**
 - Lorsqu'on traverse une résistance dans le sens du courant (+ vers -), la différence de potentiel, ou la chute de potentiel, est égale $-iR$, et inversement.
- **La loi des f.é.m.**
 - Lorsqu'on traverse une source de f.é.m (force électromotrice) en passant de la borne négative à la borne positive, la différence de potentiel est positive et inversement (exemple d'une pile);
- **La loi des mailles**
 - La somme algébrique des différences de potentiel dans un circuit fermé (maille fermée) est nulle.
- **La loi de nœuds ou la loi de Kirchoff**
 - La somme algébrique des courants qui entrent dans un nœud d'un circuit et la même que celle des courants qui en sortent.

Les circuits électriques en courant continu
Les lois importantes

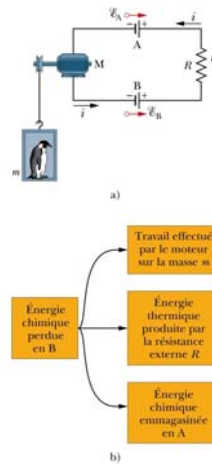


Les circuits électriques en courant continu
Application des lois des circuits



Travail et puissance

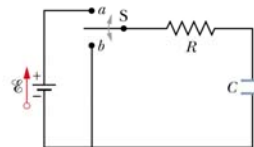
- Une pile (f.é.m.) qui établit un courant dans un circuit conducteur (résistif) transfère de l'énergie depuis sa source (chimique) vers les charges mises en mouvement;
- La puissance déployée par la pile de potentiel V est donnée par $P = iV$;
- La puissance dissipée due à la chute de potentiel au travers une résistance R est égale à $P = R i^2$



(Tiré de HRW, Physique 2 (2003))

Le circuit RC

- Afin de charger un condensateur, il faut le relier à une source de charge (potentiel) par un fil conducteur;
- Ceci constitue un circuit RC (résistance et condensateur)
- Quelle est la variation temporelle de la charge sur le condensateur et la variation temporelle du courant dans la résistance du circuit lors de la charge ou la décharge?
- On utilise la loi des mailles...



$$q(t) = CV(1 - e^{-t/RC}) \quad \text{charge}$$

$$q(t) = q_0 e^{-t/RC} = CV e^{-t/RC} \quad \text{décharge}$$

$$i(t) = \frac{dq}{dt}$$

Hydrostatique et hydrodynamique

- Dans ce chapitre nous verrons
 - Les notions de pression et densité;
 - La génération des hautes pressions statiques en laboratoire et son utilisation en recherche;
 - Le principe de Pascal;
 - Le principe d'Archimède;
 - L'écoulement des fluides;
 - Le théorème de Bernoulli; les équation de continuité et de Bernoulli;
 - Les applications du théorème de Bernoulli: le tube de Venturi et la portance.

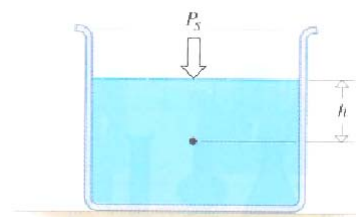
Pression et densité

- Une force F qui agit de façon normale et uniformément sur une surface d'aire S définit une pression tel que $P = F/S$;
- La pression est un scalaire;
- $[P]=N/m^2 = \text{Pascal (Pa)}$, SI;
- La pesanteur (poids) résulte en une pression hydrostatique; ainsi pour un liquide de hauteur h on a:

$$P_{\text{liquide}} = \frac{F_g}{S} = \frac{m_{\text{liquide}}g}{S} = \frac{\rho_{\text{liquide}}Shg}{S} = \rho_{\text{liquide}}hg$$

- Si la surface d'un liquide est soumise à une pression externe P_{surface} , alors on a:

$$P = P_{\text{surface}} + P_{\text{liquide}}$$



(Tiré de Hecht, Physique (1999))

- Densité ou masse volumique moyenne:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

- Si la densité varie d'un point à l'autre du volume alors

$$\rho = \frac{dm}{dV}$$

La pression au fond des océans

- Les fosses Mariannes (fosses de subduction) représentent les points les plus profonds de l'océan à plus de 11 000 m;
- La pression à une telle profondeur...



$$\frac{dP}{dy} = -\rho g$$
$$-\int_{y_1}^{y_2} dP = P_2 - P_1 = -\int_{y_1}^{y_2} \rho g dy$$

La pression atmosphérique en fonction de l'altitude

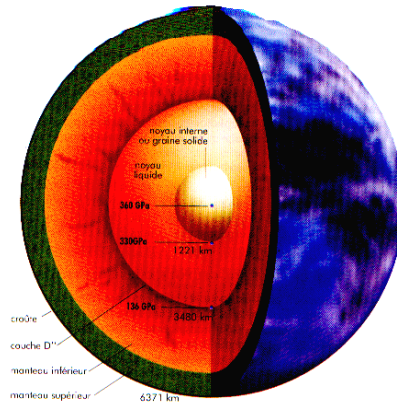
- Quel est le changement de pression entre le niveau de la mer et le point culminant au Canada?



$$\frac{dP}{dy} = -\rho g$$

La pression au centre de la Terre

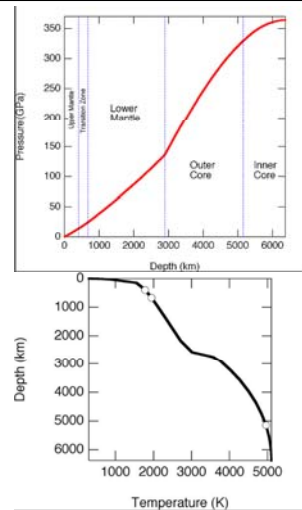
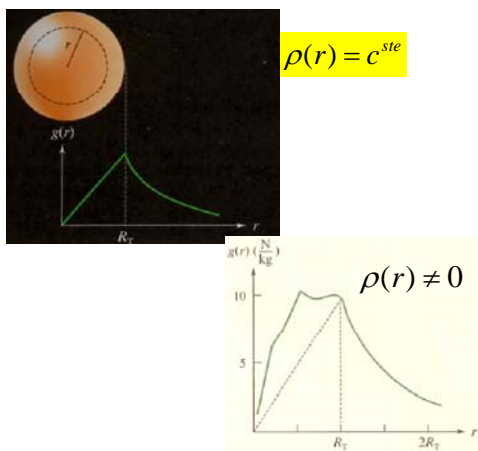
- Calcul de la pression au centre de la Terre;



Source: La Recherche, décembre 1995

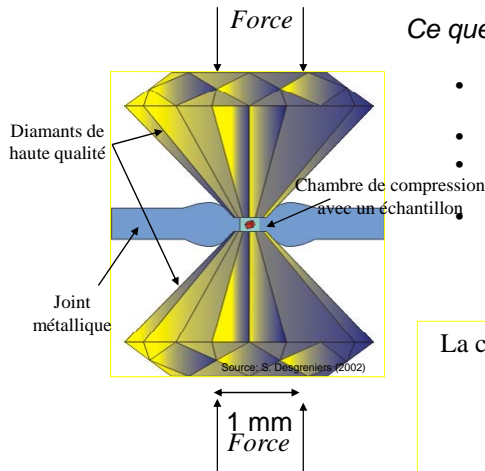
- Quelle est la température qui prévaut au coeur de la Terre?

Les profils de P et T en profondeur de la Terre



Source: <http://www.geo.lsa.umich.edu/~crlb/COURSES/117/Lec17/lec17.html>

Comment générer les hautes pressions statiques?



Ce que nous recherchons...

- L'échantillon doit être chauffé et comprimé simultanément à $P, T \gg$
- Accès optique (microscopie et spectroscopie)
- Accès aux rayons-X (diffraction, absorption et spectroscopie Mössbauer)
- Accès électrique (transport électrique)

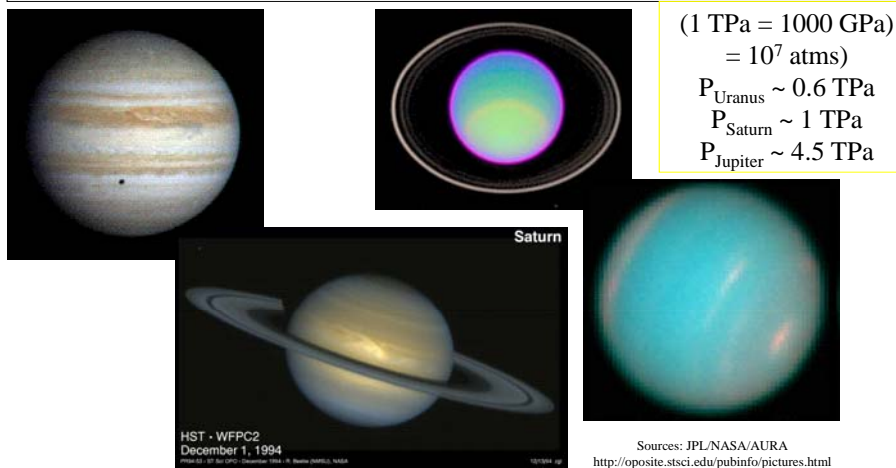
La cellule à enclumes de diamant (CED)

(Diamond Anvil Cell ou DAC)

$P \sim < 400 \text{ GPa}$

$T < 800 \text{ K (ext.)}; T < 5000 \text{ K (int.)}$

Les planètes géantes et leurs satellites:
surtout de l' H_2 avec des traces de He, H_2O , CH_4 , and NH_3
Modélisation des systèmes moléculaires
sous conditions extrêmes

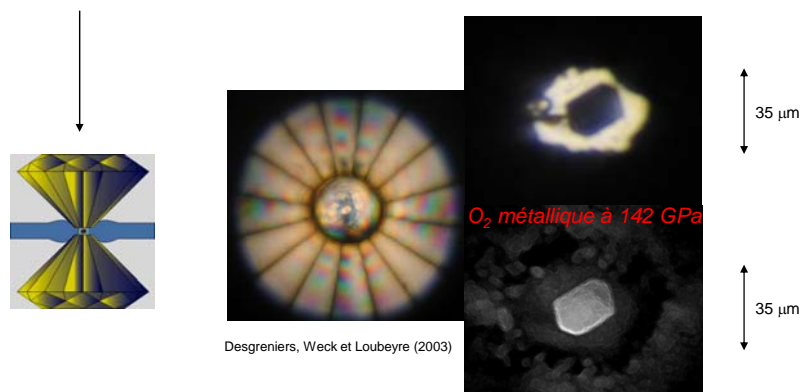


Quelques pressions de référence (en Pa)

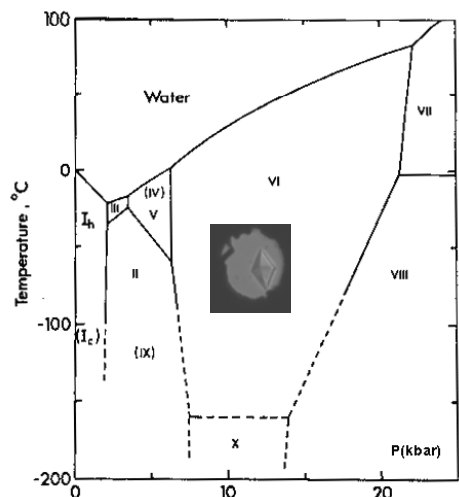
<ul style="list-style-type: none"> • Pression hors-équilibre d'H₂ dans l'espace intergalactique: $\sim 10^{-27}$ • Espace interplanétaire : $\sim 10^{-14}$ • Meilleur vide en labo : $\sim 10^{-12}$ • Son à peine audible: $\sim 10^{-5}$ • Lumière solaire sur Terre: $\sim 10^{-4}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Profondeur océanique: $\sim 0,3 \times 10^9$ • Graphite \rightarrow diamant: 8×10^9 • Si, cubique \rightarrow Si, β-Sn: 11×10^9 • Centre de la Terre: $\sim 3,6 \times 10^{11}$ • Centre d'Uranus: 6×10^{11} • Centre de Saturne: 10×10^{11} • Centre de Jupiter: 45×10^{11} • Étoile à neutrons: $\sim 10^{34}$
<ul style="list-style-type: none"> • La patte d'un 'patineur' ~ 1 • Atmosphère : $1,01 \times 10^5$ 	<p>Pression statique en labo: < 500 GPa Pression dynamique en labo: < 5000 GPa</p>

(Adpatéde: A. Jayaraman, *Scientific American*, 1984)

Quelle est la structure cristalline de l'O₂ dans sa phase métallique?
 Croissance de monocristaux d'O₂ dans l'He et diffraction des rayons X



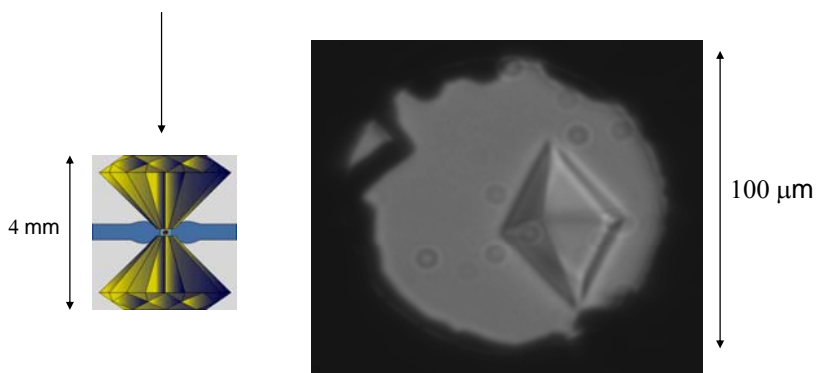
H₂O: un diagramme de phase complexe!



- 13 phases solides d'H₂O sont maintenant connues;
- Dans la glace, les molécules sont liées de façon tétraédriques par des "ponts hydrogène";
- Ice I_h - hexagonale;
- Ice VI - tétragonale;
- Ice VII - cubique.

Source: Liu et Bassett, « Elements, Oxides and Silicates », Oxford University Press

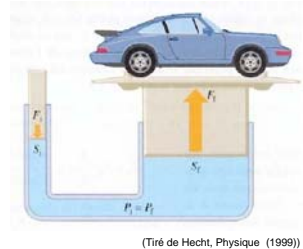
Un monocristal de glace VI at 1.0 GPa and 300K



(Source: S. Desgreniers (1998))

Principe de Pascal (1650)

- *Principe de Pascal*: une pression externe appliquée à un fluide à l'intérieur d'un récipient est transmise intégralement à travers tout le fluide;
- Une même pression s'applique au sein d'un liquide par des surfaces de sections différentes sur lesquelles s'appliquent des forces proportionnelles: $P_i = P_f$

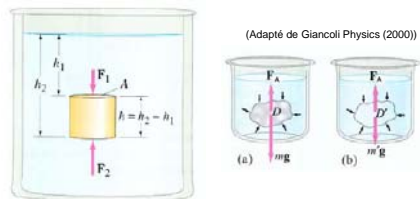


$$F_f = F_i \frac{S_f}{S_i}$$

- Applications: machines hydrauliques.

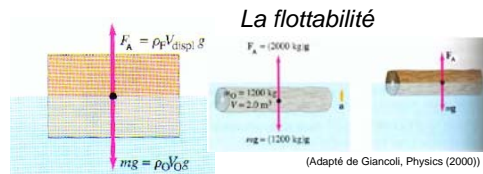
Principe d'Archimède (~275 av. J.–C.)

- Un corps totalement plongé dans un liquide déplace un volume de ce liquide égal à son propre volume;
- Le *principe d'Archimède*: un objet immergé dans un fluide paraît plus léger; il est poussé vers le haut avec une force égale au poids du fluide qu'il déplace (*puissance d'Archimède*);
- La *puissance d'Archimède* (force ascendante causée par le fluide) est causée par la pesanteur agissant sur un fluide (force de réaction);
- La *flottabilité*: Un objet moins lourd qu'un fluide de même volume s'enfonce jusqu'à ce que le poids de ce fluide déplacé par sa partie immergée équilibre son poids total.



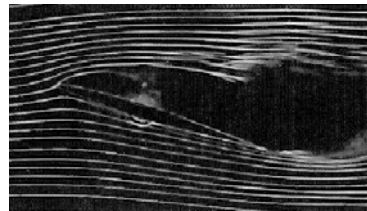
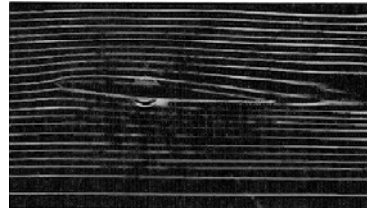
$$F_A = F_2 - F_1 = S(P_2 - P_1) = Sg\rho_{\text{fluide}}(h_2 - h_1)$$

$$F_A = Sg\rho_{\text{fluide}}h = g\rho_{\text{fluide}}V = m_{\text{fluide}}g$$



Écoulement des fluides

- Deux types d'écoulement des fluides sont possibles: écoulements *laminaire* et *turbulent*;
- Écoulement *laminaire*: le fluide s'écoule le long d'un chemin régulier; les lignes de courant ne se coupent pas;
- Écoulement *turbulent*: les lignes de courant forment des tourbillons. L'énergie mécanique est dissipée.



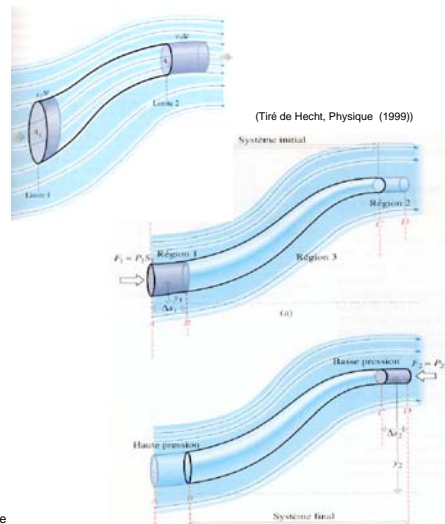
(Tiré de Giancoli, Physics (2000))

Les équations de continuité et de Bernoulli

- Le débit volumique dans un tube de courant est constant: c'est l'équation de continuité: $S_1 v_1 = S_2 v_2$
- Un fluide dont la pression varie subit une variation d'énergie;
- On applique la loi de la conservation de l'énergie, en cherchant une équation du type: $\Delta W + \Delta E_{\text{cinétique}} + \Delta U_{\text{potentielle}} = 0$;
- La densité d'énergie totale contenue dans un fluide est constante au cours de son déplacement le long d'un tube de courant;
- Le long d'une ligne de courant, un fluide parfait en écoulement régulier obéit à l'équation de Bernoulli:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g y = c^{\text{ste}}$$

\nearrow Pression + $E_{\text{cinétique}}/\text{volume}$ + $U_{\text{potentielle}}/\text{volume} = c^{\text{ste}}$



(Tiré de Hecht, Physique (1999))

Les équations de continuité et de Bernoulli (1738)
Applications: le tube de Venturi et la portance

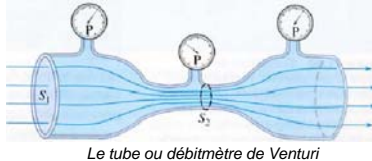
- *L'effet Bernoulli*: une partie du fluide qui est forcée à se déplacer plus rapidement subit une pression inférieure à celle subie par la partie qui se déplace plus lentement, i.e.

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2$$

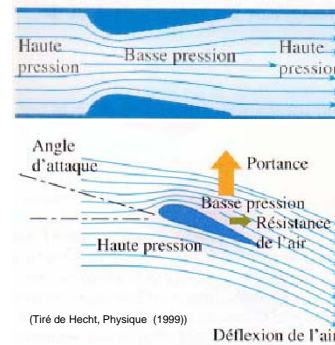
$$y_1 \approx y_2 \quad \therefore \quad P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$\Rightarrow P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 \left(1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}\right)$$



(Tiré de Hecht, Physique (1999))

La portance



La déviation du fluide vers le bas au-dessous de l'aile produit une force (la portance) exercée sur l'aile vers le haut.

La vitesse d'écoulement: le théorème de Torricelli (1644)

- Soit un récipient ouvert de surface S_1 possédant un orifice de surface S_2 , contenant un liquide de densité ρ ; $S_1 \gg S_2$;
- Aux ouvertures, $P_1 = P_2 = P_{atm}$
- D'après l'équation de Bernoulli, avec $h = y_2 - y_1$, on a:

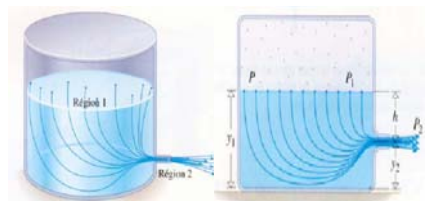
$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2$$

$$v_2^2 = v_1^2 + \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} + 2g(y_2 - y_1)$$

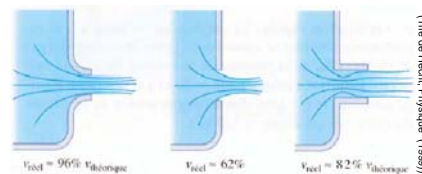
et avec $S_1 v_1 = S_2 v_2$, $S_1 \gg S_2$

$$v_2 = \sqrt{2g(y_1 - y_2)} = \sqrt{2gh}$$

- i.e le théorème de Torricelli



L'écoulement dépend de l'embouchure



Chaleur et thermodynamique

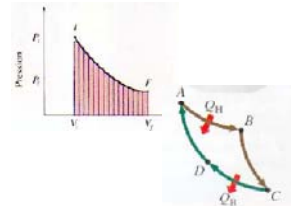


Nous verrons dans ce chapitre

- les notions de température
- le gaz parfait et ses propriétés
- l'effet de la variation de la température sur la matière
- les phases de la matière, les changements de phase et l'équilibre de phases
- les processus thermodynamiques
- la machine thermique et le cycle de Carnot
- l'entropie
- les lois de la thermodynamique



PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II – Chapitre 6



Source: Liu et Bassett, Elements, Oxides and Silicates • Oxford University Press

Température: échelles et mesure

- La mesure de la température est basée sur un phénomène physique:
 - variation de la résistance électrique;
 - variation de la capacité;
 - variation d'un voltage différentiel;
 - variation du volume ou de la pression (gaz ou liquide);
 - dilatation thermique des matériaux;
 - variation spectrale (émission de la lumière en fonction de la longueur d'onde);
- Il existe plusieurs échelles de température: Celsius, Kelvin, Fahrenheit, Réaumur, Rankine;
- Le calibrage de la température se fait à partir de points fixes:
 - Température du point triple de l'eau (0 °C ou 273,15 K)
 - Ébullition de l'eau (373,15 K), de l'azote liquide (77,4 K), de l'hélium 4 normal (4,2 K) et suprafluide (2,18K)

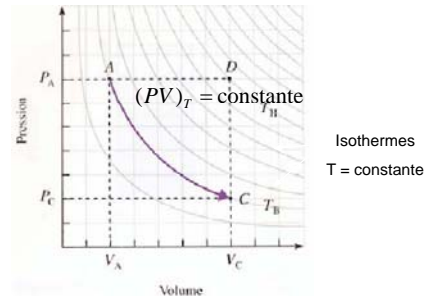


(Tiré de Hecht, Physique (1999))

°C	Phénomène	K
-273,15	Zéro absolu	0
-269	Ébullition de l'He	4,2
~ -196	Ébullition de l'N ₂	77,4
0	Glace fondante (point triple)	273,15
~37	Température corporelle	~ 310
100	Ébullition de l'eau	373,15
1870	Brûleur Bunsen	2143
3410	Fusion du W	3680
6000	Surface solaire	6280

Le gaz parfait et ses propriétés

- Le même nombre de molécules de tout gaz, à la même température et à la même pression, occupe le même volume.
- Un gaz qui obéit à la relation (*) est un gaz idéal ou parfait; c'est le cas de tous les gaz à faible densité;



$$PV = nRT = \frac{N}{N_A} RT = Nk_B T \quad (*)$$

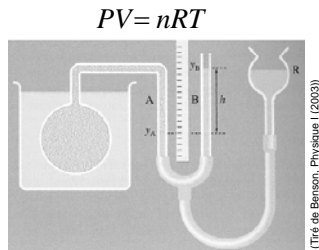
La constante universelle des gaz : $R = 8,31441 \text{ J / (mol} \cdot \text{K)}$

Le nombre d'Avogadro : $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

La constante de Boltzmann : $k_B = 1,3806 \times 10^{-23} \text{ J / K}$

Effet de la variation de la température sur la matière

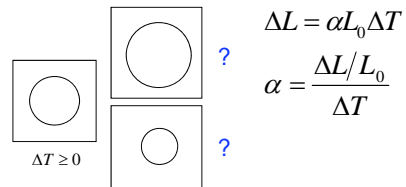
- Le thermomètre à gaz:



- L'enceinte de gaz est la sonde. Le volume du gaz change avec T .
- En déplaçant le tube flexible, on garde le volume de gaz constant.
- La variation de h donne la variation de P et ainsi la variation de température par la loi des gaz parfaits.

Effet de la variation de la température sur la matière

- Dilatation thermique linéique α des matériaux:



(Titre de Giancoli, Physics (2000))

Effet de la variation de la température sur la matière

La lame bimétallique:

α_1 et α_2



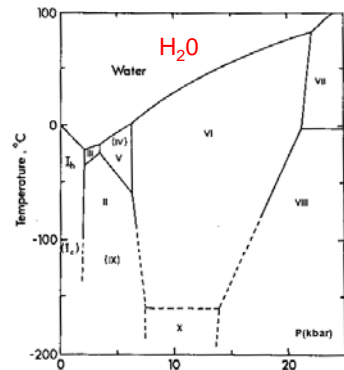
- Dilatation volumique des matériaux:

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T$$

$$\beta = \frac{\Delta V / V_0}{\Delta T}$$

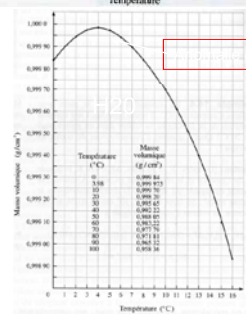
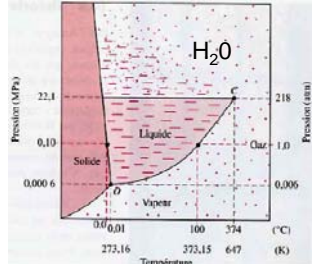
Les phases de la matière, les changements de phase et l'équilibre de phase

- Les conditions thermodynamiques P et T déterminent les *phases de la matière*;
- Le *diagramme de phase* donne les conditions pour l'existence des phases;
- Les *lignes de phase* du diagramme de phase indiquent les conditions de co-existence de phases;
- Le passage par une ligne de phase résulte en une transition de phase.
- Le *point triple*: l'intersection de 3 lignes de phases;
- Le *point critique*: le point terminal d'une ligne de phase.



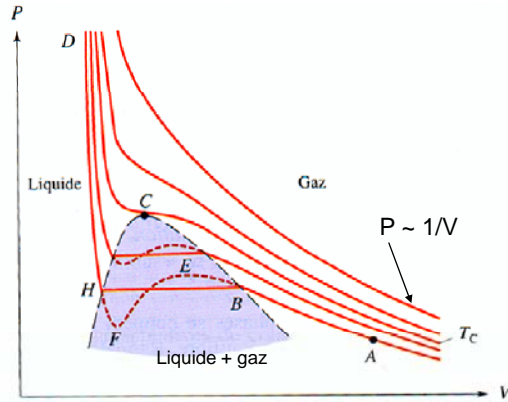
Les phases de la matière, les changements de phase et l'équilibre de phase

- Les conditions thermodynamiques P et T déterminent les *phases de la matière*;
- Le *diagramme de phase* donne les conditions pour l'existence des phases;
- Les *lignes de phase* du diagramme de phase indiquent les conditions de co-existence de phases;
- Le passage par une ligne de phase résulte en une transition de phase.
- Le *point triple*: l'intersection de 3 lignes de phases;
- Le *point critique*: le point terminal d'une ligne de phase.



(Titre de Hiecht, Physique (1999))

Diagramme de phase: liquide + gaz

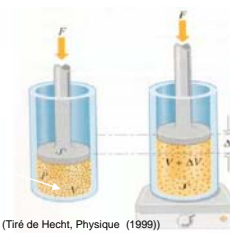


- À faible densité, on retrouve le diagramme PV du gaz parfait;
- Autrement, l'interaction entre les molécules / atomes de gaz sont importantes et le gaz n'obéit plus à la loi des gaz parfaits (loi de van der Waals)
- La phase liquide présente des isothermes "abruptes", qui traduit sa faible compressibilité;

Le travail accompli lors de la compression et de la dilatation

- Le travail accompli lors d'une compression ou d'une dilatation d'un gaz est exprimé en termes de quantités directement mesurables, i.e. la pression P et le changement de volume ΔV ;
- Ainsi, en considérant la pression constante lors de la compression d'un gaz, le changement de volume résulte du travail accompli:

GAZ



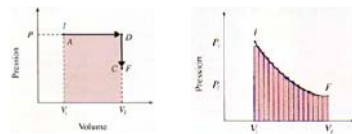
(Tiré de Hecht, Physique (1999))

$$W_{\text{externe}} = F\Delta l = PS\Delta l = P\Delta V = P(V_f - V_i)$$

- Lorsque le volume augmente, alors le travail fait par le système est positif;
- Lorsque le gaz se contracte, alors le travail fait par le système est négatif;
- Le travail effectué dépend de la façon dont le système est passé de son état final à son état initial;
- Autrement dit, il faut préciser le chemin suivi dans le plan PV pour calculer le travail effectué sur ou par le système.

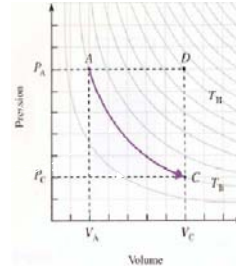
- Dans le cas où la pression n'est pas constante alors:

$$W = \int dW = \int_{l_i}^{l_f} F(l)\Delta l = \int_{V_i}^{V_f} P(V) dV$$

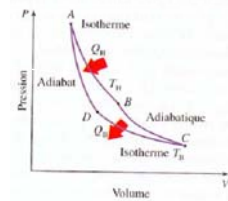


Les transformations thermodynamiques fondamentales

- Transformation *isotherme*:
 - la température reste constante
 - Q peut varier;
- Transformation *isobare*:
 - la pression reste constante;
 - T varie
- Transformation *isovolumique (isochore)*:
 - le volume reste constant;
 - T varie
- Transformation *adiabatique*:
 - aucune chaleur n'est transférée du ou au système; Q = constante;
 - La T augmente lors de la compression;
 - La T diminue lors de la dilatation;



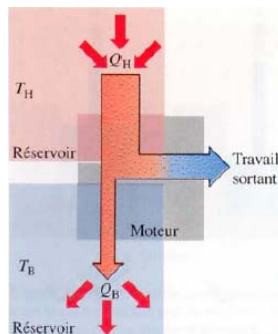
⚠ Les graphes ne sont pas reliés



(Tiré de Hecht, Physique (1999))

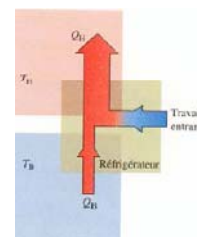
Peut-on produire du travail grâce à l'échange de chaleur?

$$\Delta U = Q - W$$



(Tiré de Hecht, Physique (1999))

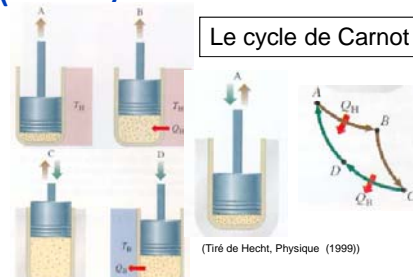
« Machine thermique »



« Machine frigorifique »

La machine thermique et le cycle de Carnot (1824)

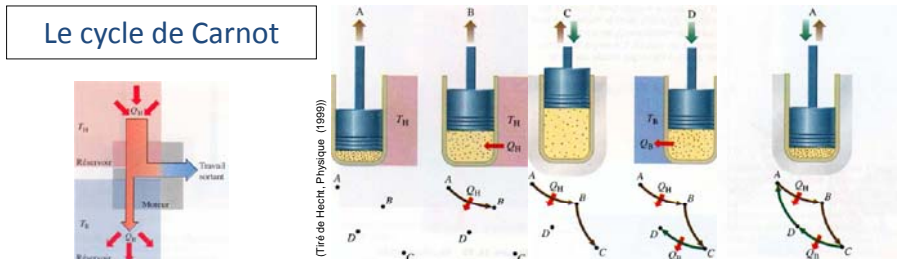
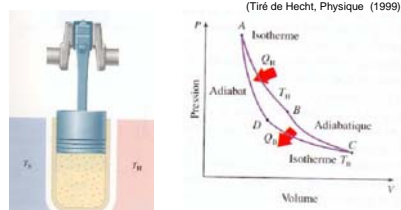
- La machine de Carnot est constituée d'un cylindre fermé par un piston et contenant un gaz;
- Le contact successif avec des réservoirs chaud et froid permet la génération d'une énergie mécanique;
- Le cycle de Carnot est une suite de 4 étapes: i) une détente isotherme (AB); ii) Une détente adiabatique (BC); iii) une compression isotherme (CD); iv) une compression adiabatique (DA);



Le rendement idéal (r) du cycle de Carnot

$$r = \frac{\text{Énergie disponible sortante}}{\text{Énergie entrante}} = \frac{\text{Travail sortant}}{\text{Énergie thermique entrante}}$$

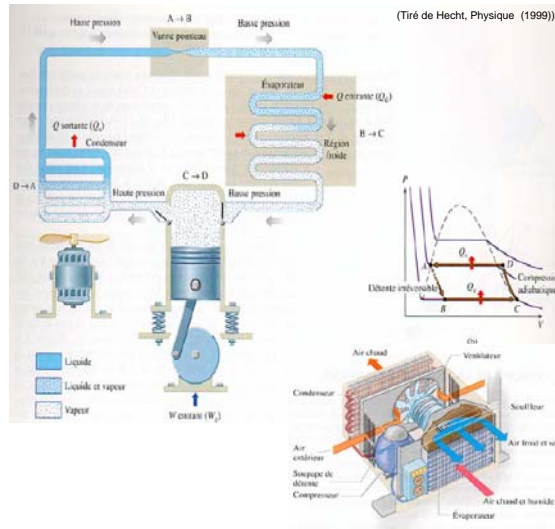
$$r = \frac{W_s}{Q_c} = \frac{Q_H - Q_B}{Q_H} = 1 - \frac{Q_B}{Q_H} = 1 - \frac{T_B}{T_H}$$



- Le trajet ABC est la course motrice de la machine thermique car le gaz effectue un travail positif sur l'extérieur
- Le long de AB (isotherme), le gaz est en contact avec la source chaude; il reçoit de la chaleur Q_H transformée en travail et en énergie interne;
- Le long de BC (adiabatique), le gaz ne reçoit aucune chaleur; son énergie interne se transforme en travail et, par conséquent, sa température diminue;
- À l'aide d'un système mécanique ou par gravité, le piston redescend en faisant un travail sur le gaz le long de CD (isotherme) alors qu'il se trouve en contact avec la source froide; le gaz perd la chaleur Q_B .
- La compression (adiabatique) se poursuit le long du parcours DA; le cycle recommence;
- En contact alternativement avec les sources à T_H et T_B , le gaz décrit deux isothermes; l'aire interne du cycle fermé n'est pas nulle, i.e. $Q_H - Q_B = W$, puisque $\Delta U = 0$ lors d'un processus réversible.

Réfrigérateurs et climatiseurs

- La plus part des machines réfrigérantes fonctionnent sur le cycle de la compression de la vapeur;
- La machine parfaite, celle qui transfère de la chaleur d'une région froide vers une région chaude, n'existe pas (2^{ème} loi de la thermodynamique);
- Un travail W doit être fait pour refroidir; ce travail est issu du cycle de la compression.



PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II – Chapitre 6

102

L'entropie

- *Entropie*: concept qui permet de distinguer la conservation de l'énergie et la réversibilité d'un processus;

- Pour un système isolé, l'entropie ne diminue jamais;

$$\Delta S = \int_i^f dS = \int_i^f \frac{dQ}{T} \geq 0$$

- L'entropie soit reste constante (*processus réversible*) ou soit s'accroît (*processus irréversible*);

par exemple, pour le cycle de Carnot :

$$\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_B}{T_B} = 0$$

- L'évolution d'un système est telle que l'entropie total augmente avec le temps. L'entropie n'est pas conservée!

- La variation de l'entropie dicte la « direction du temps ».

PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II – Chapitre 6

103

Les lois fondamentales de la thermodynamique

- *La « zéroième » loi:*
 - Si deux systèmes sont en équilibre thermique (i.e. à la même température) avec un troisième système, alors ils doivent tous être mutuellement en équilibre.
- *La première loi:*
 - La chaleur est une forme d'énergie qui doit satisfaire la conservation de l'énergie. L'énergie interne d'un système ΔU est le résultat du travail W fait par ou sur le système et de l'échange de chaleur Q avec le milieu environnant, i.e.

$$\Delta U = Q - W$$

- *La deuxième loi:*
 - La chaleur se propage spontanément d'un corps chaud vers un corps froid; d'elle-même, la chaleur ne passe jamais d'un corps froid à un corps chaud.
 - Aucun processus thermodynamique n'est possible, si son résultat unique est le transfert d'énergie thermique d'une région froide vers une région chaude.
 - Le *principe de l'entropie*: tout changement d'un système isolé passant d'un état à un autre est tel que son entropie augmente, ou au mieux, reste constante,

$$\Delta S \geq 0$$

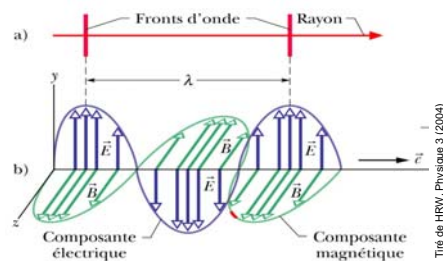
- *La troisième loi:*
 - L'entropie d'un système tend vers une valeur constante à mesure que la température approche la température absolue 0 K.

Chapitre 7: ondes et optique

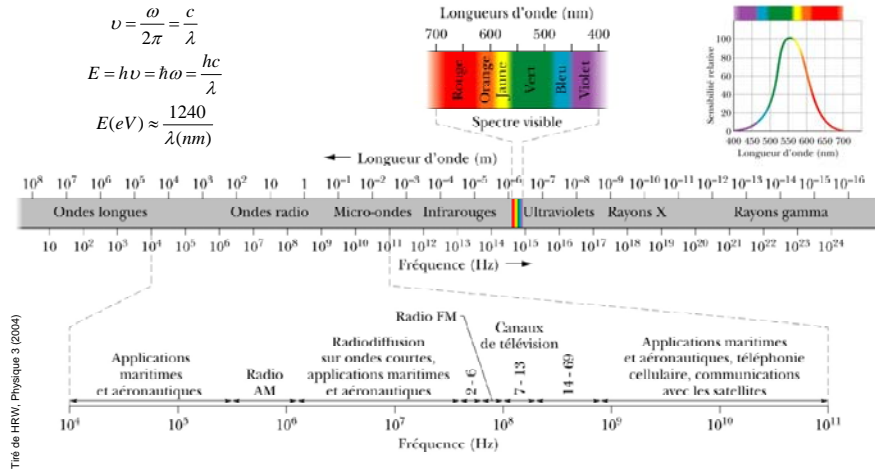
- Ce que nous verrons dans ce chapitre:
 - Les ondes lumineuses
 - Les propriétés de la lumière
 - La réflexion et la réfraction de la lumière
 - Les miroirs et lentilles simples
 - L'interférence et la diffraction de la lumière

La lumière: propriétés

- La lumière est une onde électromagnétique;
- Elle est formée d'un champ électrique et d'un champ magnétique, qui sont perpendiculaires et qui oscillent dans le temps à la fréquence $\nu = c/\lambda$;
- La longueur d'onde: λ ;
- Les champs \mathbf{E} et \mathbf{B} sont tous deux perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde lumineuse;
- L'onde électromagnétique se déplace dans le vide à la vitesse de la lumière soit:
 - $c = 2,99792458 \times 10^8$ m/s
 - $c \sim 3 \times 10^8$ m/s
- Dans un milieu matériel d'indice de réfraction n : $v_{\text{lumière}} = c/n$;
- La vitesse de la lumière est une constante fondamentale;



La lumière: spectre électromagnétique



Optique géométrique: réflexion et réfraction

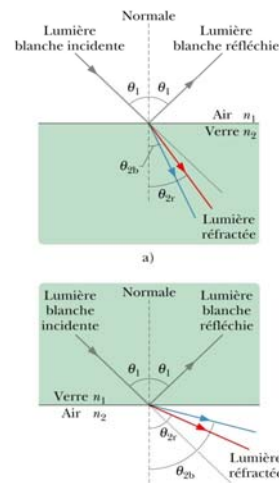
- À une interface entre deux milieux d'indice de réfraction différents (n_1 et n_2), la lumière est réfléchiée et réfractée;
- La réflexion obéit la loi de la réflexion:

$$\theta_r = \theta_i$$

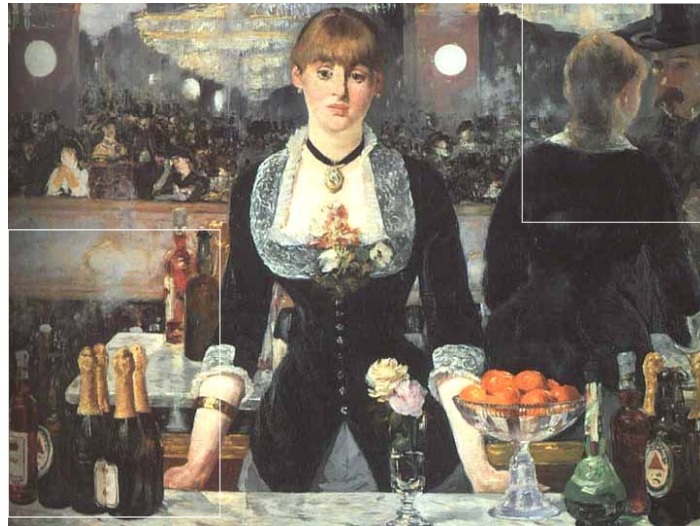
- La réfraction obéit à la loi de Snell-Descartes:

$$n_2 \sin(\theta_2) = n_1 \sin(\theta_1)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2} \sin(\theta_1)\right)$$



Une peinture fidèle à l'optique géométrique?



Le bar aux Folies-Bergère
Edouard Manet, 1882

PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II – Chapitre 7

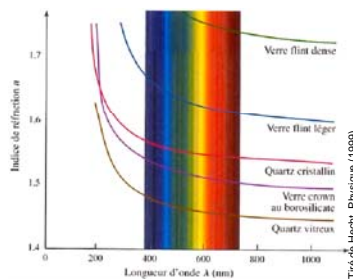
107

Optique géométrique: indice de réfraction des matériaux

- Le changement d'indice de réfraction, $n(\lambda)$ donne lieu à la dispersion;
- L'aberration chromatique dans les lentilles minces résulte de $n(\lambda)$;

Indice de réfraction de certains matériaux

Air	1,00029
Glace	1,31
Verre crown	1,52
Verre flint	1,66
Zircon ($ZrO_2 \cdot SiO_2$)	1,92
Diamant	2,42
Moissanite	2,6



PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II – Chapitre 7

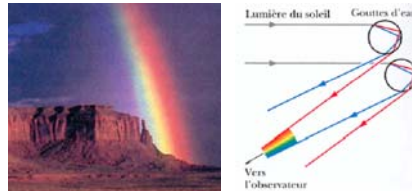


www.nikon.com

108

Optique géométrique: réfraction

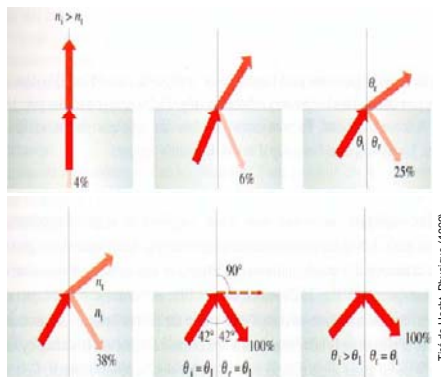
- La variation d'indice de réfraction dans un matériau donne lieu au phénomène de la dispersion de la lumière;



PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II – Chapitre 7

Optique géométrique: réflexion interne totale (RIT)

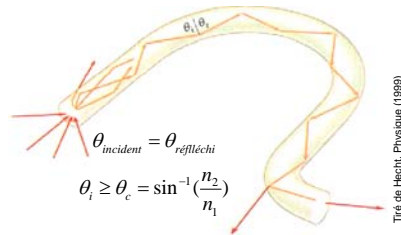
- La quantité de lumière réfléchiée et réfractée par une interface de deux milieux optiquement différents dépend de l'écart entre les indices de réfraction n_1 et n_2 et de l'angle de réfraction;
- Il existe un angle de réfraction au-delà duquel la lumière ne peut pas être réfractée d'un milieu d'indice n_1 vers un milieu d'indice n_2 pour $n_1 > n_2$;
- Il s'agit du phénomène de réflexion interne totale interne (RIT);



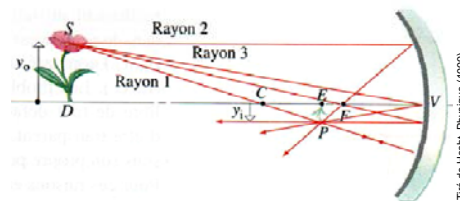
PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II – Chapitre 7

Optique géométrique: réflexion interne totale (RIT)
Application: la fibre optique

- La réflexion interne totale est la base de fonctionnement de la fibre optique;
- Le coeur de la fibre optique (verre) présente un indice de réfraction plus élevé que celui de la gaine (plastique);
- La propagation de la lumière dans la fibre se fait par des RIT successivement sans perte (réflexions à 100 %) en autant que l'angle d'incidence soit plus grand que l'angle critique;
- Le transport de la lumière peut ainsi se faire sur un chemin qui n'est pas nécessaire rectiligne sur une longue distance.



Optique géométrique: les miroirs sphériques



l'équation des miroirs

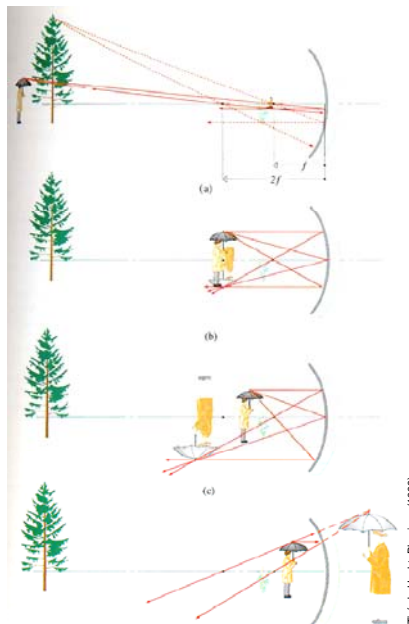
$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R_2}$$

l'équation de Gauss

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}; \quad G_T = \frac{y_i}{y_o} = -\frac{S_i}{S_o}$$

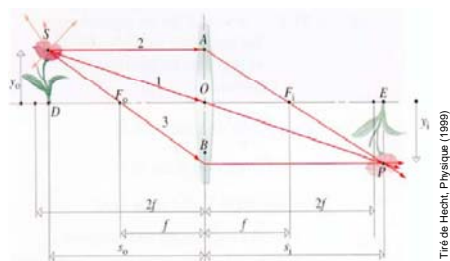
Optique géométrique: les miroirs sphériques

Miroirs concaves					Signe		
Objet		Image			Quantité	+	-
Position	Type	Position	Orientation	Taille relative			
$\infty > s_o > 2f$	réelle	$f < s_i < 2f$	renversée	réduite	s_o	Objet réel à gauche de V	Objet virtuel à droite de V
$s_o = 2f$	réelle	$s_i = 2f$	renversée	égale	s_i	Image réelle à gauche de V	Image virtuelle à droite de V
$2f > s_o > f$	réelle	$2f < s_i < \infty$	renversée	agrandie	R	Miroir convexe, C à droite de V	Miroir concave, C à gauche de V
$s_o = f$		$\pm \infty$			f	Miroirs concaves	Miroirs convexes
$f > s_o > 0$	virtuelle	$ s_i > s_o $	droite	agrandie	y_o	Objet droit	Objet renversé
Miroirs convexes					y_i	Image droite	Image renversée
Objet	Image				G_T	Image droite	Image inversée
Position	Type	Position	Orientation	Taille relative			
partout	virtuelle	$ s_i < f, s_o > f$	droite	réduite			



Titre de Hecht, Physique (1999)

L'équation des lentilles minces; l'équation de Gauss, 1841)



l'équation des lentilles minces

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = (n_1 - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

l'équation de Gauss

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}; \quad G_T = \frac{y_i}{y_o} = -\frac{S_i}{S_o}$$

Optique géométrique: les lentilles minces sphériques

Lentilles convergentes

Objet	Image			
	Type	Position	Orienteation	Taille relative
$\infty > s_o > 2f$	réelle	s_i	renversée	réduite
$s_o = 2f$	réelle	s_i	renversée	égale
$2f > s_o > f$	réelle	s_i	renversée	agrandie
$s_o = f$		$\pm \infty$		
$f > s_o > 0$	virtuelle	$ s_i $	droite	agrandie

Lentilles divergentes

Objet	Image			
	Type	Position	Orienteation	Taille relative
partout	virtuelle	$ s_i < f, s_o > f$	droite	réduite

Signe

Quantité	Signe	
	+	-
s_o	Objet réel	Objet virtuel
s_i	Image réelle	Image virtuelle
f	Lentille convergente	Lentille divergente
y_o	Objet vers le bas	Objet vers le haut
y_i	Image vers le haut	Image vers le bas
G_T	Image droite	Image inversée

Une lentille de glace ou comment allumer un feu en hiver...



Optique physique et ondes

- La lumière est une onde électromagnétique (\mathbf{E} et \mathbf{B} croisés) dont le champ \mathbf{E} est exprimé par:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(kx - \omega t + \phi); \quad \vec{B} = \vec{B}_0 \sin(kx - \omega t + \phi);$$

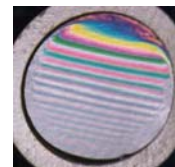
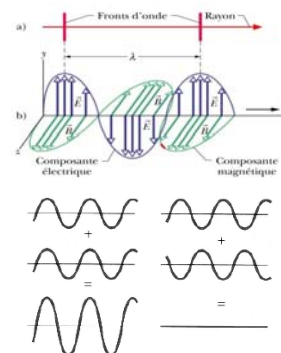
$$\text{avec } k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ et } \omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$$

- Les champs de différentes ondes électromagnétiques s'additionnent à un point donné de l'espace (le principe de superposition). Par exemple, pour les champs $E_1 + E_2$;

$$\vec{E}_{total} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \vec{E}_{10} \sin(k_1 x - \omega_1 t + \phi_1) + \vec{E}_{20} \sin(k_2 x - \omega_2 t + \phi_2)$$

- Dépendamment de la phase relative (différence de phase) entre deux ondes électromagnétiques, la superposition peut donner lieu à une *interférence de la lumière* destructive ou constructive.
- L'intensité de la lumière est proportionnelle au carré du champ \mathbf{E} :

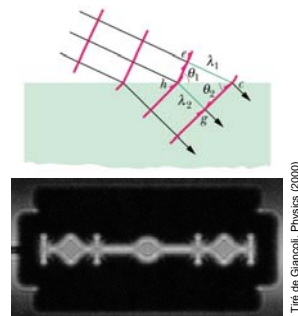
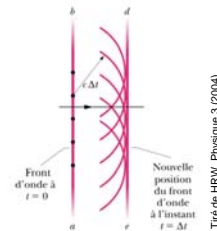
$$I = |\vec{E}_{total}|^2 = |\vec{E}_0|^2 \sin^2(kx - \omega t + \phi)$$



Tiré de Giancoli, Physique (2000)

Optique physique: Principe de Huygens et l'interférence

- Le *principe de Huygens*: tout point d'un front d'onde peut être considéré comme un source d'ondelettes qui se propage vers l'avant de l'onde avec la même fréquence;
- Le principe de Huygens explique la loi de la réfraction;
- Le principe de Huygens est particulièrement utile pour expliquer le phénomène de diffraction de la lumière par des objets et des ouvertures;



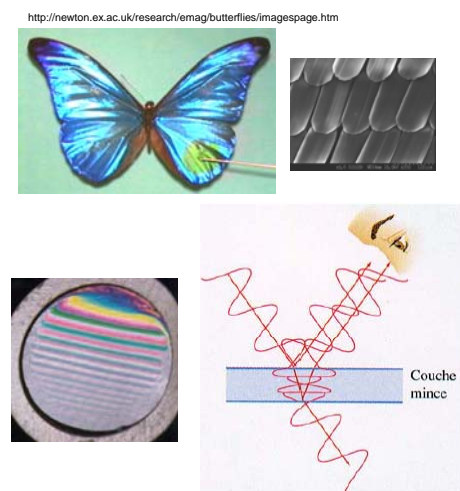
PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II – Chapitre 7

119

Optique physique: l'interférence

- L'iridescence, observée sur les ailes de certains papillons, est expliquée par l'interférence de la lumière;
- Les micro écailles alignées des ailes réfléchissent la lumière; le changement d'angle d'observation de la surface, change la longueur d'onde réfléchie.
- On observe aussi le phénomène d'interférence par réflexion sur une couche mince;
- Les maxima d'intensité de la lumière réfléchie se produisent là où l'épaisseur de la couche est un multiple entier de la demi-longueur d'onde et le minima produisent là où l'épaisseur de la couche est un multiple entier impair du quart de longueur d'onde ;

$$e = \frac{m\lambda_0}{2n_c} = \frac{m\lambda_c}{2}, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

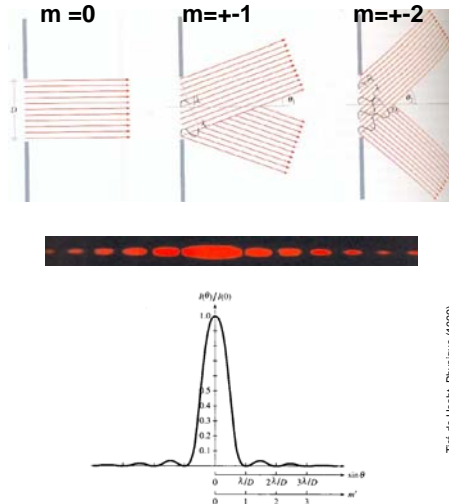


PHY1522 – Principes fondamentaux de physique II – Chapitre 7

120

Optique physique: diffraction de la lumière par une fente

- Chaque point éclairé par une onde électromagnétique de l'ouverture (fente) émet des rayons dans toutes les directions (principe de Huygens);
- Les rayons interfèrent entre eux pour donner de la diffraction;
- Si la fente devient plus étroite, la figure de diffraction s'élargit; la tache lumineuse centrale devient plus étendue
- L'intensité lumineuse est nulle pour: $\sin\theta_1 = m\lambda/D$, avec $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$
- Toute ouverture diffracte la lumière;
- La diffraction se manifeste surtout pour des ouvertures dont la dimension correspond à la longueur de l'onde de la lumière diffractée.



Tiré de Hecht, Physique (1999)

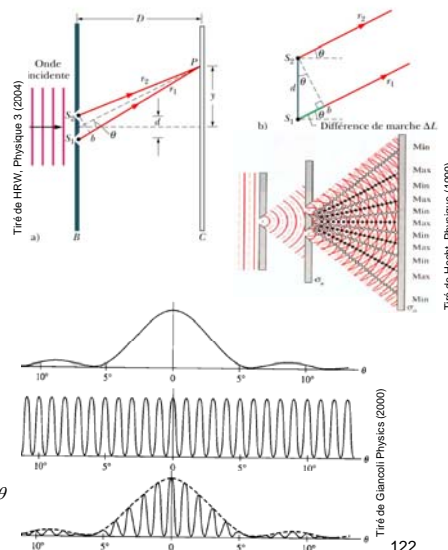
Diffraction de la lumière: la double fente de Young

- Deux sources lumineuses *cohérentes* produisent des rayons qui interfèrent entre eux;
- Seule la différence de parcours optiques suivis par les rayons donnent lieu à une variation d'intensité lumineuse observée sur un écran;
- Une double fente illuminée par une même source agit comme deux sources de lumière cohérentes;
- La position des maxima d'intensité, y_m , est donnée par:

$$y_m = \frac{d}{a} m\lambda$$

- L'intensité de diffraction est:

$$I_\theta = I_0 \left(\frac{\sin \beta / 2}{\beta / 2} \right)^2 (\cos \delta / 2)^2, \text{ avec } \frac{\beta}{2} = \frac{\pi}{\lambda} a \sin \theta \text{ et } \frac{\delta}{2} = \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta$$



Tiré de Hecht, Physique (1999)

Tiré de Giancoli Physics (2000)

Le pouvoir de résolution

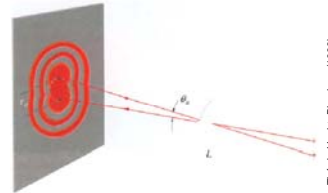
- Le passage de la lumière par toute ouverture engendre de la diffraction;
- On peut montrer qu'une ouverture circulaire de diamètre D suivie d'une lentille de distance focale f engendre, sur un écran placée au plan focal de la lentille, une figure de diffraction avec une tache de rayon r_a (rayon d'Airy) ou le pouvoir de résolution:

$$r_a = \frac{1,22 f \lambda}{D}$$

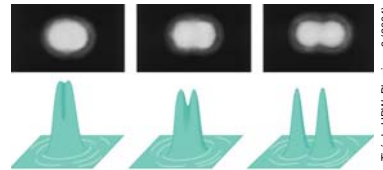
- Nous pouvons exprimer la taille de la tache centrale lumineuse en fonction du demi-angle d'ouverture θ_a (en radians):

$$\text{avec } \theta_a \approx \sin \theta_a = \frac{r_a}{f}, \text{ on a}$$

$$\text{le critère de Rayleigh: } \theta_a = \frac{1,22 \lambda}{D}$$



Calcul de la limite de résolution de l'oeil:

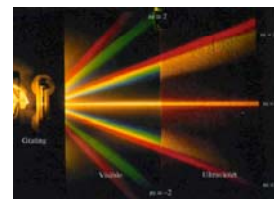
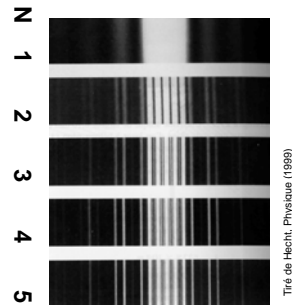
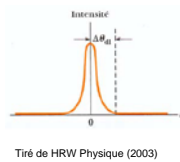
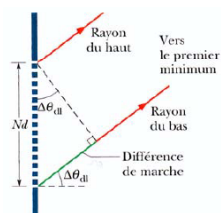




Optique physique:
diffraction de la lumière par un réseau de N fentes

- La capacité d'un réseau à séparer les raies de différentes λ dépend de la largeur angulaire des raies;
- La demi-largeur angulaire des raies est donnée par:

$$\Delta\theta_{dl} = \frac{\lambda}{Nd \cos \theta}$$



Application: le spectroscopie

Un laboratoire d'optique de poche: le billet de banque!



Un billet difficile à contrefaire!

- Réflexion / transmission
- Interférence
- Absorption
- Émission
- Diffraction (hologramme)

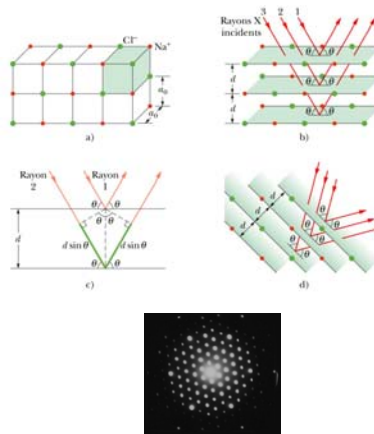


Un laboratoire d'optique de poche: le billet de banque!

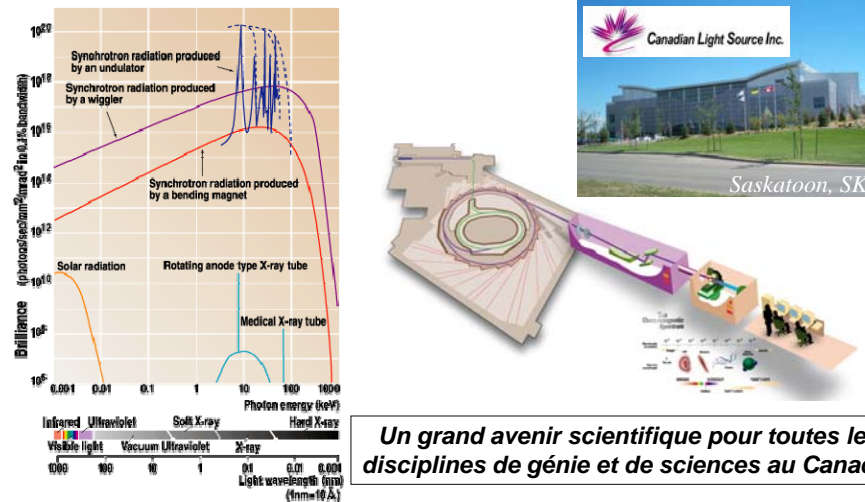


La diffraction des rayons X:
étude de la structure de la matière condensée

- Le rayonnement électromagnétique de la gamme des rayons X permet d'observer la diffraction par des solides;
- On choisit λ de l'ordre de grandeur de la distance interatomique i.e. 1 Å (100 pm), ce qui correspond à une énergie approximative de 12 keV;
- Le réseau tridimensionnel périodique formé par les atomes du solide crée une figure de diffraction qui permet de reconstruire la structure diffractante (les espèces atomiques et leurs positions);
- La diffraction des rayons est une technique très puissante qui est utilisée dans beaucoup de domaines scientifiques et techniques;



Le centre canadien de rayonnement synchrotron (CLS, SK)



<http://www.lightsource.ca>
<http://www.lightsources.org>

PHY1522/PHY1502 - Électrostatique

$$\vec{F}_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_C}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_1}{r^2} \hat{r}$$

$$\vec{E} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{p}{z^3} \hat{z}$$

$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}; \vec{p} = Q\vec{d}$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 A}{s}$$

$$\Delta U = U_b - U_a = -W$$

$$\Delta V = V_b - V_a = -\frac{W}{q} = \frac{\Delta U}{q}$$

$$\Delta U = U_b - U_a = \int_a^b dU = -\int_a^b q_0 \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$\Delta V = V_b - V_a = \frac{\Delta U}{q_0} = -\int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$V_{ponctuelle} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V$$

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = nqAv_d$$

$$E_x = \frac{kQx}{(x^2+a^2)^{3/2}}$$

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^3} r$$

$$dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$$\phi = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \int_S \vec{E} \cdot \hat{n} dA$$

$$\phi_{total} = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{1}{\epsilon_0} q_{int} = 4\pi k q_{int}$$

$$V = IR = I \left(\frac{L}{\sigma A} \right) = I \left(\frac{\rho L}{A} \right)$$

$$V = -2k\lambda \ln \frac{r}{a}$$

$$R = \frac{L}{\sigma A} = \frac{\rho L}{A}$$

$$V = IR$$

$$C_{eq} = \sum C_j, \quad n \text{ condensateurs en parallèle}$$

$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum \frac{1}{C_j}, \quad n \text{ condensateurs en série}$$

$$R_{eq} = \sum R_j, \quad n \text{ résistances en série}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum \frac{1}{R_j}, \quad n \text{ résistances en parallèle}$$

$$C = Q/V$$

$$U = \frac{1}{2} \frac{Q_0^2}{C}$$

$$u = 1/2 \epsilon_0 E^2$$

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

$$C = 2\pi\epsilon_0 \frac{L}{\ln(b/a)}$$

$$C = 4\pi\epsilon_0 \left(\frac{ab}{b-a} \right)$$

$$C = 4\pi\epsilon_0 R$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$R = \frac{\Delta x}{kA}$$

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$P = VI = RI^2$$

$$Q(t) = Q_0 \exp(-t/RC); \text{ constante de temps} = RC$$

$$I(t) = \frac{dQ}{dt} = \pm \frac{V}{R} \exp(-t/RC)$$

PHY1522/PHY1502 - Hydrostatique, thermodynamique et optique

$$\rho = \frac{dm}{dV}$$

$$P_{fluide} = \rho_{fluide} gh$$

$$\frac{dP}{dy} = \rho g; -\int dP = -\int \rho g dy$$

$$P_f = P_i; F_f = F_i \frac{S_f}{S_i}$$

$$F_A = m_{fluide} g$$

$$\rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2$$

$$P + 1/2 \rho v^2 + \rho gh = \text{constante}$$

$$\Delta L = L \alpha \Delta T \quad \Delta V = V \beta \Delta T$$

$$Q = C(T_f - T_i)$$

$$W = \int dW = \int_V p dV$$

$$dE_{int} = dQ - dW$$

$$pV = nRT = Nk_B T$$

$$W = nRT \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right)$$

$$\bar{K} = 3/2 k_B T$$

$$C_V = 3/2 R$$

$$\Delta S = S_f - S_i = \int_i^f \frac{dQ}{T}$$

$$\Delta S \geq 0$$

$$\omega/2\pi = \nu/(2\pi r)$$

$$E = hc/\lambda = h\nu$$

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

$$\theta_c = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

$$\theta_B = \arctan \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} = \frac{2}{r}$$

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{r}$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

$$m = G_T = -\frac{p}{h}$$

$$|m| = G_T = \frac{h'}{h}$$

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n}$$

$$d\sin(\theta) = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

$$d\sin(\theta) = (m' + 1/2)\lambda, \quad m' = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

$$I = 4I_0 \cos^2(\phi/2), \quad \phi = \frac{2\pi d}{\lambda}$$

$$r_a = \frac{1,22 f \lambda}{D}$$

$$A = \frac{F_0}{\sqrt{m^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + b^2 \omega^2}}$$

$$\omega' = \omega_0 \sqrt{1 - \left(\frac{b}{2m\omega_0} \right)^2} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$$

$$y(x, t) = A \sin[k(x - vt)]$$

$$\phi = \frac{\Delta L}{\lambda} 2\pi$$

$$\phi = m 2\pi, \quad m = 0, 1, 2 \dots$$

$$\phi = (m + 1/2) 2\pi, \quad m = 0, 1, 2 \dots$$

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \frac{I}{I_0}$$

PHY1522/PHY1502 - Autres formules de physique

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

PHY1522/PHY1502 - Mathématiques

$$(1+x)^n \approx 1 + nx, \quad x \ll 1;$$

$$\rho = 2\pi r; A_{sphere} = 4\pi r^2; V_{sphere} = \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1}; \quad n \neq -1; \int x^{-1} dx = \ln(x); \int e^{ax} dx = \frac{1}{a} e^{ax}$$

$$\int \cos x dx = \sin x; \int \sin x dx = -\cos x$$

$$\int \frac{dx}{x+a} = \ln|x+a|; \int \frac{dx}{\sqrt{a^2+x^2}} = \ln|x + \sqrt{a^2+x^2}|$$

$$\int \frac{dx}{(a+bx)^2} dx = -\frac{1}{b(a+bx)}; \int \frac{dx}{\sqrt{(x^2 \pm a^2)}} = \sqrt{x^2 \pm a^2}$$

PHY1522/PHY1502 - Données et constantes

$$e = 1,602 \times 10^{-19} C; \quad g = 9,807 \text{ m/s}^2$$

$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} C^2/(N \cdot m^2); \quad k = 8,899 \times 10^9 N \cdot m^2/C^2$$

$$R = 8,314 \text{ J/(K} \cdot \text{mole)}$$

$$N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mole}^{-1}$$

$$m_e = 9,101 \times 10^{-31} \text{ kg}; \quad m_p = 1,672 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$k_B = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}; \quad c = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$1 \text{ atm} = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\text{Vitesse du son dans l'air} = 343,4 \text{ m/s}$$

$$T(K) = 273,15 + T(^{\circ}C)$$

$$R_{Terre} = 6,371 \times 10^6 \text{ m}$$

$$\rho_{air} \text{ (à } 20^{\circ}C \text{ et } 1 \text{ atm)} = 1,21 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{eau} = 10^3 \text{ kg/m}^3; \quad \rho_{Terre} = 4,3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$