


Essentiel de physique






2023/2024

Victor Sarrazin

Optique :

 I Introduction à l'optique	2
 II Lentilles minces et miroir plan	2
 III L'oeil	2








Électricité :

 I Introduction à l'électricité	2
 II Circuits d'ordre 1	6
 III Circuits d'ordre 2, Oscillateurs	9
 IV Circuits en régime sinusoïdal forcé	11
 V Filtrage	15







Ondes :

 I Introduction aux ondes	15
 II Diffraction/Interférences	15
 III La lumière onde	15

Mécanique :

 I Cinématique du point	15
 II Dynamique du point	15
 III Énergétique du point	15
 IV Introduction à la dynamique des particules chargées	15
 V Loi du moment cinétique	15
 VI Mouvement dans un champ de force newtonien	15
 VII Mécanique du solide	15

Thermodynamique :

 I Introduction à la thermodynamique	15
 II Premier principe	17
 III Second principe	19
 IV Flux thermiques	21
 V Machines thermiques	22
 VI Changement de phase du corps pur	24

Annexe :

 I Analyse dimensionnelle	26
 II Incertitudes	26
 III Équations différentielles	26
 IV Numérique	26

I Introduction à l'optique

A faire

II Lentilles minces et miroir plan

A faire

III L'oeil

A faire

⚡ I Introduction à l'électricité

⚡ I.1 Généralités

⚡ I.1.a Charge électrique

La **charge** est une propriété intrinsèque d'une particule et s'exprime en Coulomb (C) et est de dimension IT , est algébrique, additive et conservative (un système fermé est de charge fixe).

La charge est portée par les électrons ($-e$) et les protons (e) avec $e = 1.6 \times 10^{-19} C$ la **charge élémentaire** (souvent notée q).

⚡ I.1.b Courant électrique

Le **courant électrique** est un déplacement d'ensemble de charges

⚡ I.1.c Dipôle, branche, maille, circuit

Un **dipôle** possède 2 pôles, lui permettant d'être traversé par un courant électrique. Une association de dipôles forme un **circuit**.

Un association de dipôles à la suite est appelée **association série** et forme une **branche**.

Un association de dipôles bouclant sur elle même est appelée **maille**.

⚡ I.1.d Intensité électrique

L'**intensité électrique** est un débit de charge noté I , avec $I = \frac{\delta Q}{dt}$ avec δQ la charge traversant la section pendant dt .

Pour mesurer une intensité on utilise un *ampèremètre* avec le $+$ sur le mA ou μA et le $-$ sur le COM (en série).

Loi des noeuds :

Dans une maille on a :

$$\sum_{\text{entrants}} I = \sum_{\text{sortants}} I$$

⚡ I.2 La tension électrique

La **tension électrique** U est une différence de potentiels en Volts (V) et est additive.

Expression de U_{AB} :

On a $U_{AB} = V_A - V_B$ avec V_A et V_B deux potentiels.

Loi des mailles :

Dans une maille, on a :

$$\sum_{\text{tension maille}} \varepsilon_i U_i$$

avec $\varepsilon_i = +1$ si U_i est dans le sens du parcours et $\varepsilon_i = -1$ sinon.

La loi des mailles et la loi des noeuds s'appellent les **lois de Kirchhoff**. Elles sont variables en régime continu et en régime lentement variable.

Pour mesurer une tension on utilise un *voltmètre* avec le + sur la borne Ω et le – sur la borne COM (en dérivation).

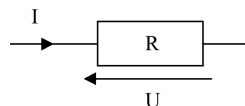
⚡ I.3 Approximation des régimes quasi stationnaires (ARQS)**Critère d'ARQS :**

Si $\tau \gg \frac{d}{c}$ avec τ le temps caractéristique, d la taille du circuit et c la longueur du vide alors on est dans l'approximation.

Si ce critère est vérifié, tous les points du circuit "voient" le changement en direct. Ce critère est tout le temps vérifié en série.

⚡ I.4 Résistors

Un **résistor** est une dipôle qui conduit + ou – bien l'électricité.



Une résistance est schématisée ainsi en convention récepteur

Loi d'Ohm :

On a $U = RI$ avec R la résistance en Ohm (Ω) en convention récepteur.

Attention, en convention générateur, on a $U = -RI$

On dit qu'un résistor est un dipôle passif (en l'absence de I , pas de U) et linéaire ($U = f(I)$).

On a $R = \frac{l}{\sigma S}$ avec l la longueur, σ la conductivité électrique et S la section.

On considère qu'un fil a une résistance négligeable.

Tension d'un fil :

La tension aux bornes d'un fil est nulle.

Le voltmètre ($\approx 10M\Omega$) est modélisée par un interrupteur ouvert, et l'ampèremètre ($\approx 0.1\Omega$) modélisée par un fil.

Puissance dissipée par un résistor :

On a $P = RI^2$

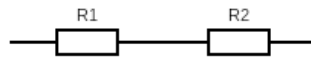
Preuve :

On a $P_{\text{reçue}} = UI = U_R I_R = RI_R I_R = RI_R^2$

On a la **masse**, un point d'un circuit de potentiel nul, $V = 0\text{ V}$ c'est l'origine des potentiels.

En théorie elle est choisie arbitrairement, mais en pratique elle est imposée par certains appareils reliés à la Terre.

⚡ 1.5 Associations des résistors

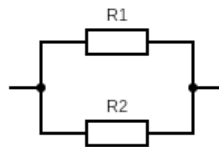


Association série de résistors :

Soit R_1 et R_2 deux résistances en série, on a $R_e = R_1 + R_2$ la résistance équivalente

Preuve :

On a $U_1 = R_1 I$ et $U_2 = R_2 I$ ainsi $U = U_1 + U_2 = R_1 I + R_2 I = (R_1 + R_2)I$ ainsi $R_e = R_1 + R_2$



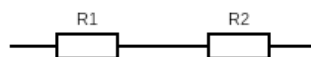
Association parallèle de résistors :

Soit R_1 et R_2 deux résistances en parallèle, on a $\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ la résistance équivalente

Preuve :

Par loi des mailles, $U = U_1 = U_2$, ainsi $U = R_1 I_1 = R_2 I_2$, d'après la loi des noeuds, $I = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$ ainsi $U = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} I$

⚡ 1.6 Ponts diviseurs

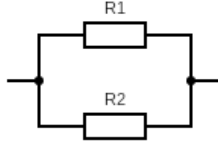


Pont diviseur tension :

Soit R_1 et R_2 deux résistances en série, $U = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$

Preuve :

On a $U_1 = R_1 I$ et $U = (R_1 + R_2) I$ d'où $\frac{U_1}{U} = \frac{R_1 I}{(R_1 + R_2) I}$



Pont diviseur courant :

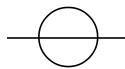
Soit R_1 et R_2 deux résistances en parallèle, $I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$

Preuve :

A faire :O

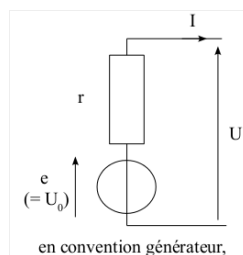
⚡ 1.7 Générateurs

⚡ 1.7.a Générateur de tension



Un **générateur de tension** est un dipôle qui impose une tension entre ses bornes. La tension imposée par un générateur est aussi appelée sa **force électromagnétique (f.e.m)**

U est donc indépendante, c'est une dipôle actif.



Un générateur réel est un générateur de Thévenin, on a :

Générateur de Thévenin :

On a $U = U_r + E = E - R_i I$ et $P_{\text{fournie}} = UI = (E - R_i I) I = EI - R_i I^2$, avec R_i la résistance interne et E la f.e.m

⚡ 1.7.b Générateurs de courant (HP)



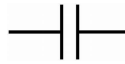
Il existe des **générateurs de courant** qui fixent une intensité dans le circuit.

⚡ II Circuits d'ordre 1

⚡ II.1 Le condensateur

⚡ II.1.a Généralités

Le **condensateur** est un dipôle linéaire composé de deux armatures séparées par un milieu isolant (*diélectrique*).



On a Q la charge algébrique par l'armature de gauche et $-Q$ par celle de droite : le condensateur est globalement neutre.

On a $Q = CU$ avec C la **capacité du condensateur** en Farad (F)

Intensité aux bornes d'un condensateur :

En convention récepteur, $I = C \frac{dU}{dt}$

Preuve :

On a $\frac{dQ}{dt} = \frac{\delta Q}{dt} = I$ et $Q = CU$ donc $I = \frac{dQ}{dt} = \frac{dCU}{dt} = C \frac{dU}{dt}$

Énergie stockée dans un condensateur :

En convention récepteur, on a $E = \frac{1}{2}CU^2$

Preuve :

On a $P_{\text{reçue}} = UI = U \times C \frac{dU}{dt} = \frac{d(\frac{1}{2}CU^2)}{dt}$ or $P_{\text{reçue}} = \frac{dE}{dt}$ d'où $E = \frac{1}{2}CU^2$

Continuité de U au bornes d'un condensateur :

Aux bornes d'un condensateur U est continue

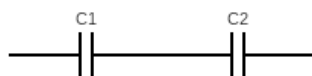
Preuve :

On suppose U discontinue donc E aussi, ainsi $P = \frac{dE}{dt}$ diverge donc $P_{\text{reçue}}$ infinie n'est pas possible

Comportement en régime permanent :

En régime permanent un condensateur est équivalent à un interrupteur ouvert ($I = 0$ A)

⚡ II.1.b Associations



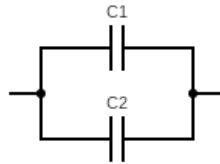
Association série de condensateurs :

Soit C_1 et C_2 deux condensateurs en parallèle, on a $\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ le condensateur équivalent

Preuve :

On a $U = U_1 + U_2$ avec $i = i_1 = i_2$ d'où $i = C_1 \frac{dU_1}{dt} = C_2 \frac{dU_2}{dt}$.

Ainsi on a $\frac{dU}{dt} = \frac{dU_1}{dt} + \frac{dU_2}{dt}$ soit $\frac{i}{C_e} = \frac{i}{C_1} + \frac{i}{C_2}$ d'où la relation cherchée.



Association parallèle de condensateurs :

Soit C_1 et C_2 deux condensateurs en série, on a $C_e = C_1 + C_2$ le condensateur équivalent

Preuve :

Loi des noeuds on a $i = i_1 + i_2$ d'où on a $i_1 = C_1 \frac{dU}{dt}$ et $i_2 = C_2 \frac{dU}{dt}$ d'où $i = (C_1 + C_2) \frac{dU}{dt}$

⚡ II.2 Charge d'un condensateur

On peut étudier la charge d'un condensateur (ou sa décharge) avec une équation d'ordre 1 dans un circuit RC

Équation différentielle RC :

On a

$$\frac{dU}{dt} + \frac{1}{RC}U = A$$

avec $\tau = RC$ le temps caractéristique

⚡ II.3 La bobine

⚡ II.3.a Généralités

La **bobine** est un dipôle linéaire composé d'un enroulement de fils sur lui même



On associe à une bobine une **inductance** L en Henry (H), dépendant du nombre de fils et la quantités de spires (tours)

Intensité aux bornes d'une bobine :

En convention récepteur, $U = L \frac{di}{dt}$

Énergie stockée dans une bobine :

En convention récepteur, on a $E = \frac{1}{2} L i^2$

Preuve :

On a $P_{\text{reçue}} = UI = L \frac{di}{dt} \times i = \frac{d(\frac{1}{2} L i^2)}{dt}$ or $P_{\text{reçue}} = \frac{dE}{dt}$ d'où $E = \frac{1}{2} L i^2$

Continuité de i au bornes d'une bobine :

Aux bornes d'une bobine i est continue

Preuve :

On suppose i discontinue donc E aussi, ainsi $P = \frac{dE}{dt}$ diverge donc $P_{\text{reçue}}$ infinie n'est pas possible

Comportement en régime permanent :

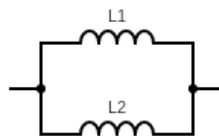
En régime permanent un condensateur est équivalent à un fil ($U = 0$ V)

⚡ II.3.b Associations**Association série de bobines :**

Soit L_1 et L_2 deux bobines en série, on a $L_e = L_1 + L_2$ la bobine équivalente

Preuve :

On a $U = U_1 + U_2 = L_1 \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} = (L_1 + L_2) \frac{di}{dt}$

**Association parallèle de bobines :**

Soit L_1 et L_2 deux bobines en parallèle, on a $\frac{1}{L_e} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$ la résistance équivalente

Preuve :

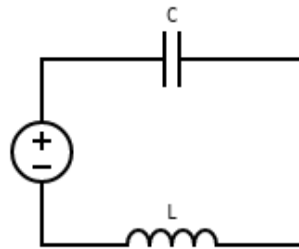
Par loi des mailles, $U = U_1 = U_2$, ainsi $U = L_1 \frac{di_1}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt}$.

D'après la loi des noeuds, $i = i_1 + i_2$ d'où $\frac{di}{dt} = \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt}$ soit $\frac{U}{L} = \frac{U}{L_1} + \frac{U}{L_2}$ d'où la relation recherchée

⚡ III Circuits d'ordre 2, Oscillateurs

Les oscillateurs sont présentés dans un cas électrique, mais on les retrouve aussi en mécanique ou encore en thermodynamique.

⚡ III.1 Oscillateur harmonique



On considère un circuit LC, on trouve $LC \frac{d^2 U}{dt^2} + U = E$ d'où en posant $\omega_0 = \frac{1}{LC}$ on retrouve :

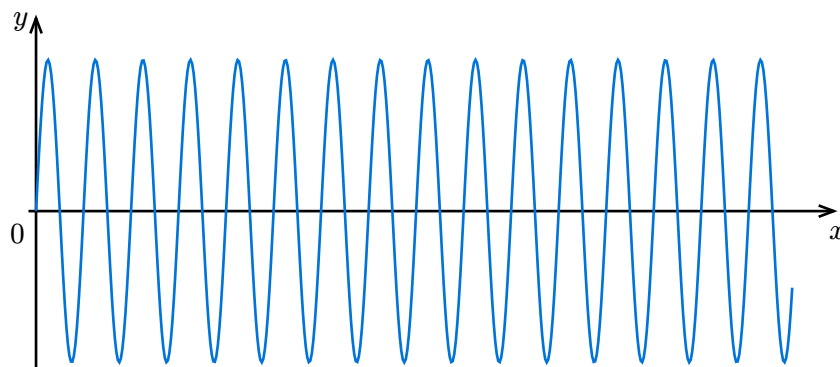
Oscillateur harmonique :

On a l'équation différentielle de l'oscillateur harmonique :

$$\ddot{\theta} + \omega_0^2 \theta = B$$

avec ω_0 la **pulsation caractéristique** homogène à un rad s^{-1} et B une constante

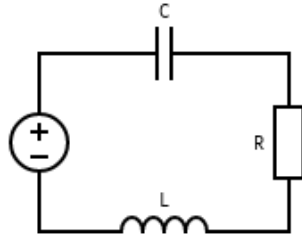
La forme générale est $sp + A \cos(\omega_0 t) + B \sin(\omega_0 t)$, la résolution étant détaillée en annexe III. Elle admet la courbe suivante.



Ainsi l'oscillateur possède un comportement oscillant avec $2\pi f = \omega_0$

⚡ III.2 Oscillateur amorti

⚡ III.2.a Généralités



On considère maintenant un circuit RLC, ainsi on trouve l'équation différentielle suivante $\frac{E}{LC} = \frac{d^2U}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dU}{dt} + \frac{1}{LC}U$, en posant $\omega_0 = \frac{1}{LC}$ et $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ on a :

Oscillateur amorti :

On a l'équation différentielle de l'oscillateur amorti :

$$\ddot{\theta} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{\theta} + \omega_0^2 \theta = \omega_0^2 B$$

avec ω_0 la **pulsation caractéristique** homogène à un rad s^{-1} , Q le **facteur de qualité** adimensionné et B une constante

Si on a beaucoup d'oscillations, Q correspond au nombre de périodes avant amortissement.

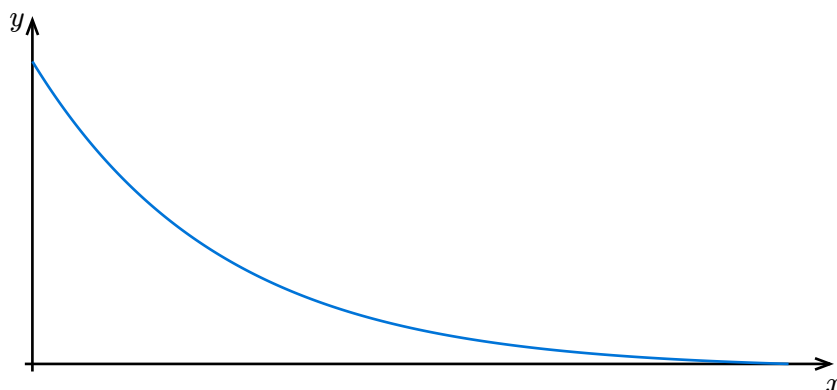
Selon la valeur de Q on a un des trois types d'oscillateurs suivants :

- Si $Q < \frac{1}{2}$, on est en régime aperiodique
- Si $Q = \frac{1}{2}$, on est en régime critique
- Si $Q > \frac{1}{2}$, on est en régime pseudo-périodique

⚡ III.2.b Régime aperiodique

Dans le cas aperiodique on a $\Delta > 0$ d'où $U(t) = sp + Ae^{-\frac{t}{\tau_1}} + Be^{-\frac{t}{\tau_2}}$, la résolution étant détaillée en annexe III.

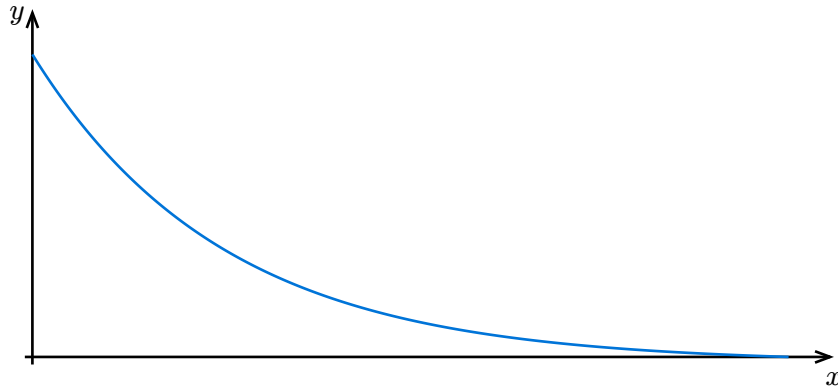
U s'amortit donc en quelques $\max(\tau_1, \tau_2)$.



⚡ III.2.c Régime critique

Dans le cas critique, on a $\Delta = 0$ d'où $U(t) = sp + (At + B)e^{-\frac{t}{\tau}}$, la résolution étant détaillée en annexe III.

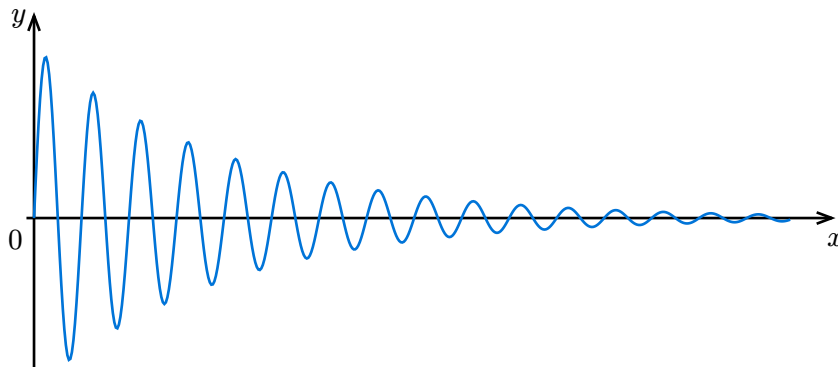
Le cas critique est très compliqué à réaliser expérimentalement.



⚡ III.2.d Régime pseudo-périodique

Dans le cas pseudo-périodique, on a $\Delta < 0$ d'où on a $U(t) = sp + (A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t))e^{-\frac{t}{\tau}}$ avec ω la **pseudo-pulsation**, la résolution étant détaillée en annexe III.

Ainsi dans ce cas les oscillateurs voient leur amplitude d'oscillations diminuer avec le temps.



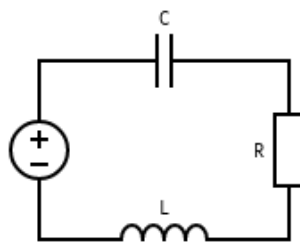
On définit le **décrément logarithmique** $\delta = \frac{T}{\tau}$, avec T la **pseudo-période**. Le décrément logarithmique s'obtient en prenant deux valeurs maximales et en faisant $\delta = \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$ avec $t_1 < t_2$.

La durée du transitoire est de quelques τ .

⚠ En régime pseudo-périodique il n'est pas possible de déterminer graphiquement τ comme dans les autres régimes.

⚡ IV Circuits en régime sinusoïdal forcé

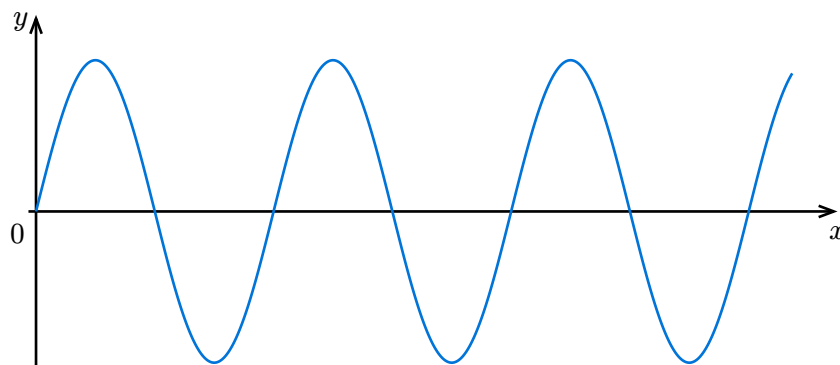
⚡ IV.1 Régime transitoire



Le circuit est en régime sinusoïdal forcé si le **générateur basse fréquence** (GBF) délivre une tension sinusoïdale. Ainsi on a l'apparition d'un déphasage aux temps longs, et l'amplitude du GBF n'est pas forcément la même que celle de U .

Ainsi le second terme dans les équations différentielles devient de la forme $A \cos(\omega t)$

⚡ IV.2 Vocabulaire des signaux périodiques



On définit :

- La **période** T en s correspondant à l'écart entre deux passages au même point
- La **fréquence** f en Hz correspondant au nombre de périodes en une seconde d'où $f = \frac{1}{T}$
- La **valeur moyenne** $\langle u \rangle = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(\tilde{t}) d\tilde{t}$
- L'**amplitude crête à crête** (peak to peak) $\Delta = u_{\max} - u_{\min}$
- La **valeur efficace**, $u_{\text{eff}} = \sqrt{\langle u^2 \rangle}$

Valeur efficace pour un signal sinusoïdal :

Dans le cas d'un signal de la forme $S_0 \cos(\omega t)$, on a $\langle S \rangle = 0$ et $S_{\text{eff}} = \frac{S_0}{\sqrt{2}}$

Preuve :

En effet en intégrant sur une période, on a $\langle S \rangle = 0$

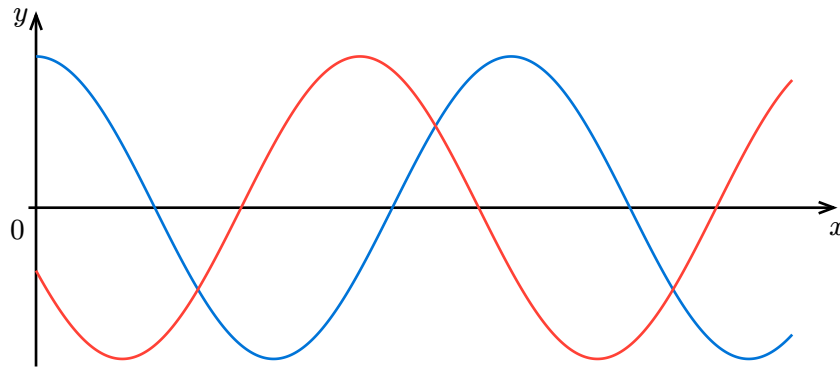
On a $\langle S^2 \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_t^{t+2\pi} (S_0 \cos(\omega \tilde{t}))^2 d\tilde{t} = \langle S^2 \rangle = \frac{S_0^2}{2\pi} \int_t^{t+2\pi} \frac{1 + \cos(2\omega \tilde{t})}{2} d\tilde{t} = \frac{S_0^2}{2\pi} \frac{2\pi}{2} = \frac{S_0^2}{2}$ d'où en passant à la racine, $S_{\text{eff}} = \frac{S_0}{\sqrt{2}}$

⚡ IV.3 Déphasage entre signaux

Soit $s_1(t) = s \cos(\omega t + \varphi_1)$ et $s_2(t) = s \cos(\omega t + \varphi_2)$, on définit le **déphasage** de s_2 par rapport à s_1 par $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$

Le déphasage est défini modulo 2π

- Si $\varphi_1 \equiv \varphi_2 \pmod{2\pi}$ alors les deux signaux sont en **accord de phase**
- Si $\Delta\varphi = \pm\pi$, alors les deux signaux sont en **opposition de phase**
- Si $\Delta\varphi = \pm\frac{\pi}{2}$, alors les deux signaux sont en **quadrature de phase**
- Si $\varphi_2 > \varphi_1$, s_2 est en **avance de phase** sur s_1
- Si $\varphi_2 < \varphi_1$, s_2 est en **retard de phase** sur s_1



Pour mesurer le déphasage, on mesure l'écart de temps entre 2 passages au même endroit et on obtient Δt_1 et Δt_2 , ainsi on doit choisir, en connaissance du système entre 1 et 2, et $|\Delta\varphi| = \frac{\Delta t_i}{T} \times 2\pi \bmod 2\pi$

⚡ IV.4 Représentation complexe d'un signal harmonique

Pour parler d'une représentation complexe en physique on utilise $\underline{s} = a + ib$, et le conjugué de \underline{s} est noté $\underline{s}^* = \bar{s} = a - ib$

⚠ Dans le contexte spécifique de l'électricité et pour éviter des confusions avec l'intensité i , on note j le nombre imaginaire tel que $j^2 = -1$ (définition différente des mathématiques)

En posant $u = U_0 \cos(\omega t + \varphi)$, on a $\underline{u} = U_0 e^{j(\omega t + \varphi)}$ d'où $\underline{u} = U_0 e^{j\varphi} e^{j\omega t}$ avec $U = U_0 e^{j\varphi}$ **l'amplitude complexe** et $U = |\underline{u}(t)|$

De plus on a $\varphi = \arg(U) = \arg(U_0 e^{j\varphi})$

Dériver en complexe revient à multiplier par $j\omega$

⚡ IV.5 Impédances complexes

⚡ IV.5.a Généralités

Impédance complexe :

En convention récepteur, on définit $\underline{z} = \frac{\underline{u}}{\underline{i}} = \frac{U_0}{I_0} e^{j(\varphi_u - \varphi_i)}$ **l'impédance complexe** homogène à une résistance

Cas d'une résistance :

Pour une résistance, on a $\underline{z}_R = R$, d'où $\underline{z} \in \mathbb{R}_+$, on dit que le dipôle est **résistif**

Cas d'une bobine :

Pour une bobine, on a $\underline{z}_L = j\omega L$, d'où $\underline{z} \in i\mathbb{R}$ et $\varphi_u - \varphi_i = \frac{\pi}{2}$, donc $u(t)$ est en quadrature de phase avance par rapport à $i(t)$, on dit que le dipôle est **inductif**.

Preuve :

On a $u_L = L \frac{di}{dt}$ d'où $\underline{u}_L = Lj\omega \underline{i}$ d'où $\underline{z}_L = j\omega L$

Cas d'un condensateur :

Pour un condensateur, on a $\underline{z}_C = \frac{1}{j\omega C}$, d'où $\underline{z} \in i\mathbb{R}$ et $\varphi_u - \varphi_i = -\frac{\pi}{2}$, donc $u(t)$ est en quadrature de phase retard par rapport à $i(t)$, on dit que le dipôle est **capacitif**.

Preuve :

On a $i = C \frac{du_C}{dt}$ d'où $\underline{i} = Lj\omega \underline{u}_C$ d'où $\underline{z}_C = \frac{1}{j\omega C}$

On définit aussi l'**admittance complexe** comme étant $\underline{y} = \frac{1}{\underline{z}}$

⚡ IV.5.b Comportement basse et haute tension

Comportement basse fréquence :

En basse fréquence :

- La bobine se comporte comme un **fil**
- Le condensateur se comporte comme un **interrupteur ouvert**

Comportement haute fréquence :

En haute fréquence :

- La bobine se comporte comme un **interrupteur ouvert**
- Le condensateur se comporte comme un **fil**

⚡ IV.6 Lois de l'électricité en RSF

Les lois de l'électricité restant valides dans l'ARQS, elles sont aussi valides si $\omega \ll \frac{2\pi c}{d}$.

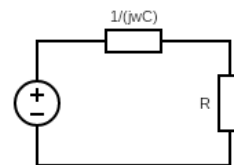
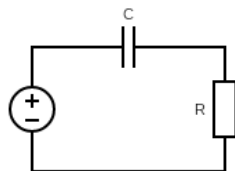
Les impédances s'associent en série et en parallèle comme des résistances, et les ponts diviseurs s'appliquent aussi aux impédances.

⚡ IV.7 Étude d'un circuit

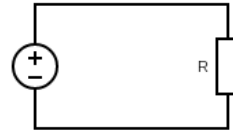
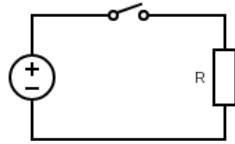
Pour étudier un circuit :

- On peut établir l'équation différentielle de u , puis passer dans \mathbb{C} et déterminer \underline{u} puis U et φ
- On peut utiliser la méthode des impédances complexes (voir ci dessous), valide uniquement en RSF

On considère le circuit suivant, qu'on peut remplacer avec des impédances :



Ainsi en basse et haute fréquence on a :



On peut donc appliquer la loi d'Ohm : $\underline{u} = \underline{z_C} + \underline{z_R} \underline{i}$

⚡ IV.8 Résonnance

A faire

⚡ V Filtrage

A faire

🎵 I Introduction aux ondes

A faire

🎵 II Diffraction/Interférences

A faire

🎵 III La lumière onde

🔑 I Cinématique du point

A faire

🔑 II Dynamique du point

A faire

🔑 III Énergétique du point

A faire

🔑 IV Introduction à la dynamique des particules chargées

A faire

🔑 V Loi du moment cinétique

A faire

🔑 VI Mouvement dans un champ de force newtonien

A faire

🔑 VII Mécanique du solide

💧 I Introduction à la thermodynamique

💧 I.1 Généralités

On a $\mathcal{N}_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ la constante d'Avogadro

Les 3 états de la matière :

- **Solide** : Particules assez ordonnées, proches et peu mobiles (incompressible et indéformable)
- **Liquide** : Particules très désordonnées, proches et très mobiles (incompressible et déformable)
- **Gaz** : Particules très désordonnées, éloignées et très mobiles (compressible et déformable)

On parle d'un **fluide** pour un gaz ou un liquide et d'une **phase condensée** pour un liquide ou un solide.

💧 1.2 Variables d'état

Une **variable d'état** est une grandeur permettant de décrire l'équilibre thermodynamique d'un système.

Une grandeur est dite **extensive** si elle dépend de la taille du système (volume par ex) et **intensive** si ce n'est pas le cas (pression par ex), à noter que le produit de 2 grandeurs extensives donne une grandeur intensive.

💧 1.2.a Pression

La **pression** est une variable d'état en Pascal (Pa) avec $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$, est intensive et est causée par des chocs particuliers sur la paroi

Force de pression :

On a $\vec{F} = PS\vec{u}$ avec \vec{u} orienté vers l'extérieur de fluide dans le cas d'une paroi plane

Si on a une paroi non plane on a $\vec{F} = \int P dS \vec{u}$ avec $\vec{F} = PS\vec{u}$ si la pression est uniforme

💧 1.2.b Température

La température s'exprime en Kelvin (K), avec $T > 0 \text{ K}$ et $0^\circ\text{C} = 273.15 \text{ K}$, est intensive et provient d'une agitation moléculaire.

On a $E_c = \frac{3}{2}k_B T$ l'énergie thermique moléculaire avec $k_B = \frac{R}{N_A}$ la constante de Boltzmann.

💧 1.3 Équilibre thermodynamique

On atteint un état d'équilibre thermodynamique quand les propriétés macroscopiques du système n'évoluent plus, ainsi on a :

- Équilibre mécanique avec l'extérieur
- Équilibre thermique
- Équilibre radiatif
- Équilibre chimique

A l'équilibre thermodynamique un système voit ses variables d'état liées par une relation d'état

💧 1.4 Modèle des gaz parfaits

Gaz parfait :

On parle d'un gaz parfait pour un gaz composé de particules ponctuelles sans interaction entre elles.

Équation des gaz parfaits :

On a à l'équilibre thermodynamique : $PV = nRT$ avec $R = 8.31 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ la constante des gaz parfaits.

II Premier principe

II.1 Énergie interne, capacité thermique à volume constant

On note U l'**énergie interne** d'un système thermique, c'est une fonction d'état additive et extensive s'exprimant en Joule.

1ère loi de Joule :

Dans le cas d'un gaz parfait, $U = A \times T$ avec A une constante

A noter qu'il y a énormément d'énergie stockée de manière interne.

On définit la **capacité thermique** à volume fixé par $C_v = \left. \frac{\partial U}{\partial T} \right|_V$ et dans le cas d'un GP on a $C_v = \frac{dU}{dT}$, et est additive, extensif et s'exprime en J K^{-1}

Expression de ΔU :

On a $\Delta U = \int_{T_i}^{T_f} C_v dT = C_v \Delta T$

II.2 Premier principe

Premier principe :

Dans un système fermé évoluant entre des états d'équilibre on a $\Delta(E_{m_{\text{macro}}} + U) = W + Q$ d'où dans la plupart des cas :

$$\Delta U = W + Q$$

Dans le cas infinitésimal on a $dU = \delta W + \delta Q$

Avec W le travail reçu par le système ($W > 0$ si récepteur et moteur sinon) et Q le transfert thermique ($Q > 0$ reçoit et fournit sinon).

Il faut bien penser à définir le système pour utiliser le premier principe

II.3 Types de transformations

- **Adiabatique** : Sans transfert thermique ($Q = 0$)
- **Monobare** : Au contact d'un système qui fixe la pression
- **Monotherme** : Au contact d'un système de température fixée (un thermostat)
- **Quasi statiques** : État d'équilibre au cours de toute la transformation
- **Système Calorifugé** : Limite les échanges de chaleur
- **Isochore** : V constant
- **Isotherme** : T constant
- **Isobare** : P constant

On a 3 types de transfert thermiques :

- Convection
- Conduction
- Rayonnement

💧 II.4 Travail des forces de pression

Travail des forces de pression :

On a $\delta W = -P_{\text{ext}} dV$ donc $W = \int -P_{\text{ext}} dV$

Preuve :

On a $\vec{F}_p = -P_{\text{ext}} S \vec{e}_x$ d'où on a $\delta W = \vec{F}_p \cdot d\vec{x} = -P_{\text{ext}} S dx = -P_{\text{ext}} dV$

💧 II.4.a Cas isochore

On a $dV = 0$ d'où $W = 0$

💧 II.4.b Cas isotherme

On a $\Delta U = 0$ d'où $W = -Q$

💧 II.4.c Mécanique réversible

On a $P_{\text{ext}} = P$ car on a toujours un état d'équilibre, d'où :

- Isobare : On a $W = -P\Delta V$
- Isotherme : On a $W = -nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$

Preuve :

En effet $W = \int -P_{\text{ext}} dV = \int -P dV = \int -nRT \frac{dV}{V} = -nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$

💧 II.5 Diagramme de Watt

On peut représenter l'évolution sur un graphe (V, P) , ainsi le travail correspond à l'aire sous le chemin parcouru.

Si un cycle est parcouru dans le sens trigonométrique, on a un récepteur et si il est parcouru dans le sens horaire on a un moteur

💧 II.6 Enthalpie

On a l'**enthalpie** une fonction d'état additive et extensive telle que $H = U + PV$

2e loi de Joule :

Dans le cas d'un gaz parfait, $H = A \times T$ avec A une constante

Ainsi on a le second principe :

Premier principe monobare :

Dans un système fermé évoluant entre des états d'équilibre avec une transformation monobare on a $\Delta(E_{m_{\text{macro}}} + H) = W_u + Q$ d'où dans la plupart des cas :

$$\Delta H = W_u + Q$$

Preuve :

On a $\Delta(E_{m_{\text{macro}}} + U) = W_u + W_{\text{pression}} + Q$ or $W_{\text{pression}} = -\Delta(PV) = 0$, ainsi on a la propriété recherchée

Avec W_u la puissance utile des autres forces (souvent nulles d'où $\Delta H = Q$ dans certains cas)

On définit la capacité thermique à pression fixée par $C_p = \left. \frac{\partial H}{\partial T} \right|_p$ et $C_v = \frac{dH}{dT}$ dans le cas d'un GP.

Expression de ΔH :

$$\text{On a } \Delta H = \int_{T_i}^{T_f} C_p dT = C_p \Delta T$$

Dans le cas des phases condensées on a $PV \ll U$ d'où $U = H$ ainsi $C_p = C_v = C$

Relation de Mayer :

Dans le cas d'un gaz parfait on a $C_p = C_v + nR$

Preuve :

On a $\Delta U + \Delta(PV) = C_v \Delta T + nR \Delta T$ d'où $C_p \Delta T = C_v \Delta T + nR \Delta T$ ce qui conclut

On pose $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$

Expression de C_v et C_p :

Dans le cas d'un gaz parfait on a $C_v = \frac{nR}{\gamma-1}$ et $C_p = \frac{\gamma nR}{\gamma-1}$

Preuve :

On a $C_p = \gamma C_v = C_v + nR$ d'où $C_v(\gamma - 1) = nR$ ainsi $C_v = \frac{nR}{\gamma-1}$ et $C_p = \frac{\gamma nR}{\gamma-1}$

III Second principe

III.1 Entropie et second principe

On considère un système fermé avec un ou plusieurs thermostats, ainsi il existe une fonction d'état appelée **entropie** notée S , additive et extensive en J K^{-1} qui est une mesure du désordre.

Second principe :

Dans un tel système, on a $\Delta S = S_{\text{créée}} + S_{\text{échangée}}$ avec $S_c \geq 0$

Dans le cas infinitésimal on a donc $dS = \delta S_c + \delta S_e$ et à l'équilibre on a $\delta S_c = \delta S_e = 0$

Expression de S_e :

$$\text{On a } S_e = \sum_{\text{thermostats}} \frac{Q_i}{T_i}$$

L'entropie d'un système isolé augmente nécessairement au cours d'une transformation thermodynamique

Preuve :

Isolé implique $\delta Q_i = 0$ d'où $S_e = 0$ ainsi $\Delta S = S_c \geq 0$

Une transformation adiabatique réversible ne modifie pas l'entropie

Preuve :

On a $\Delta S = \sum_{\text{thermostats}} \frac{Q_i}{T_i} + S_c$ car $Q_i = 0$ (adiabatique) et $S_c = 0$ pour ne pas contredire le caractère réversible

III.2 Irréversibilité d'une transformation thermodynamique

Une transformation est dite **irréversible** si elle n'a lieu que dans un sens.

Une transformation est **réversible** si on peut en inverser le sens par changement infinitésimal des contraintes extérieures. Ces transformations extérieures sont lentes (quasi statiques) et $S_c = 0$

On a irréversibilité si :

- Inhomogénéité de température
- Gradient de pression
- Réaction chimique
- Frottement

III.3 Identité thermodynamique (HP)

Identité thermodynamique (HP) :

Dans un système fermé avec uniquement des forces de pression on a $dU = TdS - PdV$

Preuve :

On a $dU = \delta Q + \delta W = \delta Q - P_{\text{ext}}dV \underset{(\text{rév})}{=} \delta Q - PdV$ et $dS = \delta S_{c(\text{rév})} + \delta S_e = \frac{\delta Q}{T_{\text{th}}}$ avec $T_{\text{th}} = T$ car réversible. D'où $\delta Q = TdS$ ainsi $dU = TdS - PdV$

III.4 Entropie des gaz parfaits, lois de Laplace

Variation d'entropie :

On a :

$$\Delta S = \frac{nR}{\gamma - 1} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + nR \ln\left(\frac{V}{V_0}\right)$$

$$\Delta S = \frac{nR}{\gamma - 1} \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) + \frac{\gamma nR}{\gamma - 1} \ln\left(\frac{V}{V_0}\right)$$

$$\Delta S = \frac{\gamma nR}{\gamma - 1} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - nR \ln\left(\frac{P}{P_0}\right)$$

Lois de Laplace :

Dans le cas d'une transformation adiabatique réversible d'un gaz parfait on a :

- $PV^\gamma = \text{cst}$
- $TV^{\gamma-1} = \text{cst}$
- $T^\gamma P^{1-\gamma} = \text{cst}$

Preuve :

On retient la première et on retrouve avec $PV = nRT$

Ainsi sur un diagramme de Watt, la courbe est plus marquée pour une transformation adiabatique

III.5 Entropie des phases condensées

Entropie des phases condensées :

On a $S(T) = S(T_0) + C \ln\left(\frac{T}{T_0}\right)$ d'où $\Delta S = C \ln\left(\frac{T}{T_0}\right)$

IV Flux thermiques

IV.1 Flux thermique, puissance

Flux thermique :

Un flux est un échange de chaleur par unité de temps algébrique, on a $\Phi = \frac{\delta Q}{dt}$, et on peut définir $\Phi_{\text{surf}} = \frac{\delta Q}{dt dS}$

On a Φ en W et Φ_{surf} en $W m^{-2}$

IV.2 Échanges conductifs

Flux conductif :

Dans le cas d'un échange convectif (c'est à dire via une paroi) entre 2 systèmes, on a $\Phi = \frac{1}{R} \Delta T$ avec R la résistance thermique

Résistance thermique :

Une résistance thermique est homogène à $K W^{-1}$, et on a $R = \frac{e}{S\lambda}$ avec e l'épaisseur, S la surface et λ la conductivité thermique

La conductivité thermique s'exprime en $W m^{-1} K^{-1}$, plus la conductivité est grande moins on isole.

On a $G = \frac{1}{R}$ la conductance.

Les résistances thermiques ont le même comportement qu'en électricité, ainsi en série on a $R_{AB} = R_A + R_B$ et en parallèle $\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B}$.

Preuve :

- Série : On a $\Phi = \Phi_A = \Phi_B$ avec $\Phi_A = \frac{T_A - T_*}{R_A}$ et $\Phi_B = \frac{T_* - T_B}{R_B}$
Ainsi on a $T_A - T_B = T_A - T_* + T_* - T_B = R_A \Phi_A + R_B \Phi_B = (R_A + R_B) \Phi$
- Parallèle : On a $\Phi_A = \frac{1}{R_A} \Delta T$ et $\Phi_B = \frac{1}{R_B} \Delta T$, et $\Phi = \Phi_A + \Phi_B = \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} \right) \Delta T$

IV.3 Échanges conductovectifs

On considère un fluide et un solide et leurs échanges thermiques

Loi thermique de Newton :

On a $\Phi_{\text{surf}} = h(T_{\text{surf}} - T_{\text{ext}})$ avec h le coefficient de transfert en $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$, h étant plus grand pour un liquide que pour un gaz.

De manière analogue on peut définir $\frac{1}{R} = Sh$

IV.4 Analogie électrique

On a l'analogie suivante :

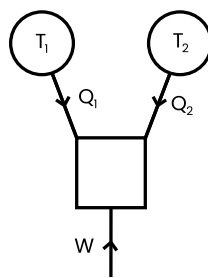
Thermodynamique	Électricité
ΔT	U ou ΔV
Φ	I
$\Delta T = R\Phi$	$U = RI$

Ainsi on peut représenter des problèmes thermodynamiques avec des circuits électriques

V Machines thermiques

V.1 Description générale d'une machine thermique cyclique

On parle d'un système **cyclique** si il décrit un cycle



On représente ainsi une machine cyclique, avec T_1, \dots, T_n les thermostats. Le système est en convention récepteur sur le schéma.

Inégalité de Carnot :

Pour un système au contact de plusieurs thermostats, on a $\sum_{\text{thermostats}} \frac{Q_i^{\text{cycle}}}{T_i} \leq 0$, et si il est réversible $\sum_{\text{thermostats}} \frac{Q_i^{\text{cycle}}}{T_i} = 0$

Preuve :

On a $\Delta S = S_c^{\text{cycle}} + S_e^{\text{cycle}} = 0$ (car S est une fonction d'état) d'où $\sum_{\text{thermostats}} \frac{Q_i^{\text{cycle}}}{T_i} = -S_c \leq 0$

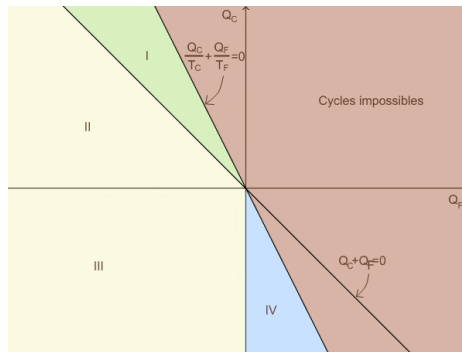
V.2 Les moteurs

Second principe selon Thomson :

Un système au contact avec une seule source de chaleur, ne peut au cours d'un cycle que recevoir du travail et fournir de la chaleur

Preuve :

On a moteur d'où $W < 0$, avec l'inégalité de Carnot on a $\frac{Q}{T} \leq 0$ et le premier principe nous dit que $0 = Q + W$ d'où $W = -Q \geq 0$ ce qui est contradictoire



Pour étudier un moteur on peut utiliser le diagramme de Raveau avec les zones suivantes :

- I : Fonctionnement moteur, $Q_c \geq 0$ et $Q_f \leq 0$ car on prélève de l'énergie à la source chaude
- II/III : Sans intérêt
- IV : Fonctionnement récepteur, $Q_f \geq 0$ et $Q_c \leq 0$ car on prélève de l'énergie à la source froide

V.3 Rendement, efficacité

Rendement ou efficacité :

On définit le rendement dans le cas d'un moteur et l'efficacité dans le cas d'un récepteur de la manière suivante :

$$\eta = \frac{\text{énergie valorisable}}{\text{énergie couteuse}}$$

Ainsi on a le tableau suivant :

Type de machine	Rendement/ Efficacité
Moteur	$\eta = \frac{Q_f}{Q_c}$
Réfrigérateur	$\eta = \frac{Q_f}{W}$
Pompe à chaleur	$\eta = -\frac{Q_c}{W}$

Rendement de Carnot :

Pour un moteur ditherme son rendement maximal est :

$$\eta_c = 1 - \frac{T_F}{T_C} \text{ avec } \eta \leq \eta_c$$

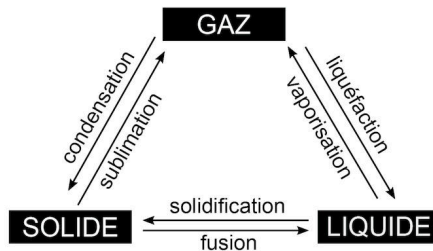
Preuve :

On a $Q_F + Q_C + W = 0$, $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0$ et $\eta = -\frac{W}{Q_C}$

D'où $\eta = \frac{Q_C + Q_F}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$ or $Q_F \leq -Q_C \frac{T_F}{T_C}$ d'où $\eta \leq 1 - \frac{T_F}{T_C}$

🔹 VI Changement de phase du corps pur

Une **phase** est une partie d'un système dont les variables intensives sont continues



🔹 VI.1 Échauffement isobare d'un corps pur

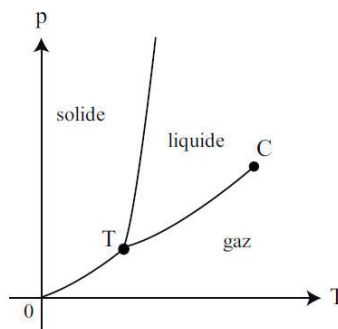
La **température d'ébullition** est la température d'équilibre liquide vapeur (ie les 2 coexistent)

La **température de fusion** est la température d'équilibre solide liquide (ie les 2 coexistent)

La **pression de vapeur saturante** est la pression d'équilibre liquide vapeur

Dans le cas des corps purs, on a $P_{\text{vap}} = f(T_{\text{ébul}})$

🔹 VI.2 Diagramme (P, T) , Clapeyron



T représente le **point triple**, c'est à dire le point où on a équilibre vapeur solide liquide

C représente le **point critique**, c'est à dire au delà duquel il n'y a plus de différence entre état liquide et gazeux (on parle de **fluide supercritique**)

En regardant le diagramme de Clapeyron on a des informations sur l'état du système considéré, et on peut se rendre compte que de l'eau se liquéfie sous l'effet de la compression

🔹 VI.3 Diagramme (P, v) , isotherme d'Andrews

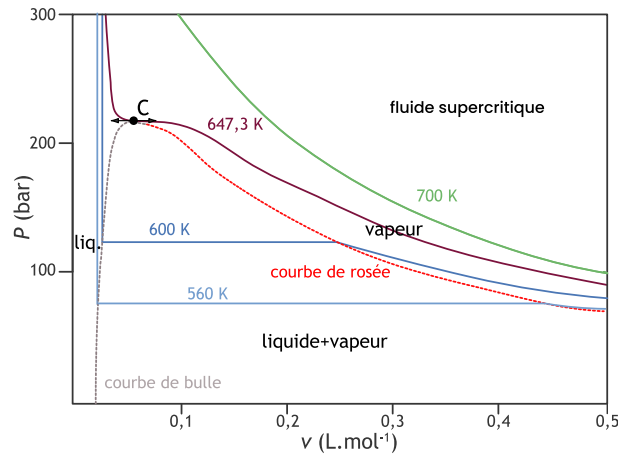


Figure 26: Un isotherme d'Andrews

On voit sur le diagramme qu'au dessus de C on ne passe pas par l'équilibre liquide vapeur. De plus on appelle la courbe noire l'**isotherme critique**.

Théorème des moments chimiques :

On peut retrouver x_{gaz} et x_{liq} les titres en vapeur et en liquide (ie les pourcentages en terme de quantité de matière).

$$\text{On a } x_{\text{gaz}} = \frac{n_{\text{gaz}}}{n_{\text{tot}}} = \frac{m_{\text{gaz}}}{m_{\text{tot}}} \text{ et } x_{\text{liq}} = \frac{n_{\text{liq}}}{n_{\text{tot}}} = \frac{m_{\text{liq}}}{m_{\text{tot}}}$$

De plus on a $x_{\text{gaz}} = \frac{v - v_{\text{liq}}}{v_{\text{gaz}} - v_{\text{liq}}}$ et $x_{\text{liq}} = \frac{v_{\text{gaz}} - v}{v_{\text{gaz}} - v_{\text{liq}}}$ d'où $x_{\text{gaz}} + x_{\text{liq}} = 1$ avec $v, v_{\text{gaz}}, v_{\text{liq}}$ les volumes massiques lus sur un isotherme d'Andrews

Preuve :

On a $V = V_g + V_l = m_{\text{tot}} v$ avec v le volume massique moyen, $V_g = m_g v_g$ et $V_l = m_l v_l$

D'où on a $x_l = \frac{m_l}{m_{\text{tot}}}$ ainsi on a $m_g v_g + m_l v_l = m_{\text{tot}} v$ d'où $v_l x_l m_{\text{tot}} + v_g (1 - x_l) m_{\text{tot}} = m_{\text{tot}} v$
d'où $x_l = \frac{v_{\text{gaz}} - v}{v_{\text{gaz}} - v_{\text{liq}}}$

Dans le cas d'un diagramme (P, H) on a aussi $x_l = \frac{h_{\text{gaz}} - h}{h_{\text{gaz}} - h_{\text{liq}}}$

VI.4 Enthalpie et entropie de changement d'état

Lors d'un changement d'état, l'enthalpie présente une discontinuité, ainsi on définit l'**enthalpie de changement d'état** (ou chaleur latente), de même il y a discontinuité de l'entropie.

Variations d'enthalpie/d'entropie :

Soit $\Delta_A h$ l'enthalpie de changement d'état A et $\Delta_A s$ l'entropie de changement d'état A .

On a $\Delta_A H = m \Delta_A h$ et $\Delta_A S = \frac{\Delta_A H}{T_A}$ avec T_A la température de changement d'état.

De plus on a $\Delta_{\text{sub}} h > 0$, $\Delta_{\text{vap}} h > 0$ et $\Delta_{\text{fus}} h > 0$ et $\Delta_{\text{con}} h = -\Delta_{\text{sub}} h$, $\Delta_{\text{liq}} h = -\Delta_{\text{vap}} h$ et $\Delta_{\text{sol}} h = -\Delta_{\text{fus}} h$

D'après l'expression des variations, on en déduit que $S_{\text{gaz}} > S_{\text{liq}} > S_{\text{sol}}$ ce qui est logique d'après la définition de l'entropie

I Analyse dimensionnelle

A faire

I.1 Système SI

I.2 Résoudre une équation de dimension

I.3 Homogénéité

Unité	Unités SI	Dimension	Relation
Volts (V)			

II Incertitudes

A faire

II.1 Incertitude type A

II.2 Incertitude type B

II.3 Chiffres significatifs

III Équations différentielles

A faire

III.1 Équations linéaires d'ordre 1

III.2 Équations linéaires d'ordre 2

III.3 Résolution avec les complexes

III.4 Temps caractéristique

IV Numérique












A faire

IV.1 Régression linéaire


















IV.2 Euler

IV.3 Monte-Carlo

Table des matières

 I Introduction à l'optique	2	 I.1.b Courant électrique	2
 II Lentilles minces et miroir plan	2	 I.1.c Dipôle, branche, maille, circuit	2
 III L'oeil	2	 I.1.d Intensité électrique	2
 I Introduction à l'électricité	2	 I.2 La tension électrique	2
 I.1 Généralités	2	 I.3 Approximation des régimes quasi	
 I.1.a Charge électrique	2	stationnaires (ARQS)	3

⚡ I.4 Résistors	3	🔗 VII Mécanique du solide	15
⚡ I.5 Associations des résistors	4	💧 I Introduction à la thermodynamique	15
⚡ I.6 Ponts diviseurs	4	💧 I.1 Généralités	15
⚡ I.7 Générateurs	5	💧 I.2 Variables d'état	16
⚡ I.7.a Générateur de tension	5	💧 I.2.a Pression	16
⚡ I.7.b Générateurs de courant (HP)	5	💧 I.2.b Température	16
⚡ II Circuits d'ordre 1	6	💧 I.3 Équilibre thermodynamique	16
⚡ II.1 Le condensateur	6	💧 I.4 Modèle des gaz parfaits	16
⚡ II.1.a Généralités	6	💧 II Premier principe	17
⚡ II.1.b Associations	6	💧 II.1 Énergie interne, capacité thermique	
⚡ II.2 Charge d'un condensateur	7	à volume constant	17
⚡ II.3 La bobine	7	💧 II.2 Premier principe	17
⚡ II.3.a Généralités	7	💧 II.3 Types de transformations	17
⚡ II.3.b Associations	8	💧 II.4 Travail des forces de pression	18
⚡ III Circuits d'ordre 2, Oscillateurs	9	💧 II.4.a Cas isochore	18
⚡ III.1 Oscillateur harmonique	9	💧 II.4.b Cas isotherme	18
⚡ III.2 Oscillateur amorti	9	💧 II.4.c Mécanique réversible	18
⚡ III.2.a Généralités	9	💧 II.5 Diagramme de Watt	18
⚡ III.2.b Régime apériodique	10	💧 II.6 Enthalpie	18
⚡ III.2.c Régime critique	10	💧 III Second principe	19
⚡ III.2.d Régime pseudo-périodique	11	💧 III.1 Entropie et second principe	19
⚡ IV Circuits en régime sinusoïdal forcé	11	💧 III.2 Irréversibilité d'une	
⚡ IV.1 Régime transitoire	11	transformation thermodynamique	20
⚡ IV.2 Vocabulaire des signaux		💧 III.3 Identité thermodynamique (HP)	
périodiques	12	20	
⚡ IV.3 Déphasage entre signaux	12	💧 III.4 Entropie des gaz parfaits, lois de	
⚡ IV.4 Représentation complexe d'un		Laplace	20
signal harmonique	13	💧 III.5 Entropie des phases condensées	
⚡ IV.5 Impédances complexes	13	21	
⚡ IV.5.a Généralités	13	💧 IV Flux thermiques	21
⚡ IV.5.b Comportement basse et haute		💧 IV.1 Flux thermique, puissance	21
tension	14	💧 IV.2 Échanges conductifs	21
⚡ IV.6 Lois de l'électricité en RSF	14	💧 IV.3 Échanges conductovectifs	22
⚡ IV.7 Étude d'un circuit	14	💧 IV.4 Analogie électrique	22
⚡ IV.8 Résonnance	15	💧 V Machines thermiques	22
⚡ V Filtrage	15	💧 V.1 Description générale d'une	
🎵 I Introduction aux ondes	15	machine thermique cyclique	22
🎵 II Diffraction/Interférences	15	💧 V.2 Les moteurs	23
🎵 III La lumière onde	15	💧 V.3 Rendement, efficacité	23
🔗 I Cinématique du point	15	💧 VI Changement de phase du corps pur	
🔗 II Dynamique du point	15	24	
🔗 III Énergétique du point	15	💧 VI.1 Échauffement isobare d'un corps	
🔗 IV Introduction à la dynamique des		pur	24
particules chargées	15	💧 VI.2 Diagramme (P, T) , Clapeyron	24
🔗 V Loi du moment cinétique	15	💧 VI.3 Diagramme (P, v) , isotherme	
🔗 VI Mouvement dans un champ de force		d'Andrews	24
newtonien	15	💧 VI.4 Enthalpie et entropie de	

changement d'état	25
 I Analyse dimensionnelle	26
 I.1 Système SI	26
 I.2 Résoudre une équation de	
dimension	26
 I.3 Homogénéité	26
 II Incertitudes	26
 II.1 Incertitude type A	26
 II.2 Incertitude type B	26
 II.3 Chiffres significatifs	26
 III Équations différentielles	26
 III.1 Équations linéaires d'ordre 1	26
 III.2 Équations linéaires d'ordre 2	26
 III.3 Résolution avec les complexes	26
 III.4 Temps caractéristique	26
 IV Numérique	26
 IV.1 Régression linéaire	26
 IV.2 Euler	26
 IV.3 Monte-Carlo	26
Table des matières	26