

■ Petit formulaire pour les calculs en physique

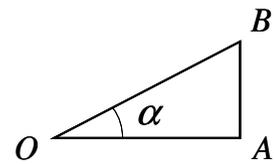
■ Équation du second degré

Avant de chercher les solutions d'une équation $ax^2 + bx + c = 0$, il est impératif d'obtenir des renseignements sur le signe des racines (ou de leur partie réelle); pour cela il suffit de voir le signe de leur somme $S = -b/a$ et de leur produit $P = c/a$.

■ Formules de trigonométrie

$$\sin \alpha = \frac{\text{côté opposé}}{\text{hypoténuse}} = \frac{AB}{OB}, \quad \cos \alpha = \frac{\text{côté adjacent}}{\text{hypoténuse}} = \frac{OA}{OB}$$

$$\tan \alpha = \frac{\text{côté opposé}}{\text{côté adjacent}} = \frac{AB}{OA}$$



Il faut connaître les formules de trigonométrie, en particulier : $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$

$$\cos^2 x = \frac{1 + \cos 2x}{2}; \quad \sin^2 x = \frac{1 - \cos 2x}{2}; \quad \sin 2x = 2 \sin x \cos x$$

■ Projection d'un vecteur

Il faut particulièrement veiller aux signes des projections.

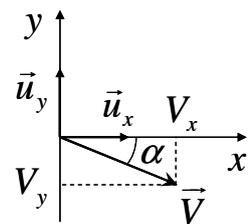
$$\text{sur la figure : } V_x = \vec{V} \cdot \vec{u}_x > 0 \quad \text{et} \quad V_y = \vec{V} \cdot \vec{u}_y < 0$$

$$\text{avec } \vec{V} = V_x \vec{u}_x + V_y \vec{u}_y$$

Théorème de Pythagore : $V^2 = V_x^2 + V_y^2$ car $V^2 = \vec{V} \cdot \vec{V} = \|\vec{V}\|^2$

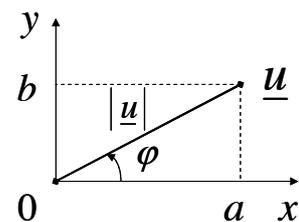
Avec l'angle α (pris positif), $V_x = V \cos \alpha > 0$ et $V_y = -V \sin \alpha < 0$

Le théorème de Pythagore redonne $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$.



■ Les nombres complexes

– dans l'écriture mathématique $\underline{u} = a + ib$ apparaissent les parties réelle $a = |\underline{u}| \cos \varphi$ et imaginaire $b = |\underline{u}| \sin \varphi$, avec $|\underline{u}| = \sqrt{a^2 + b^2}$ et $\varphi = \arg \underline{u} = \arctan(b/a)$ (à π près, il faut en plus préciser $\sin \varphi$ ou $\cos \varphi$) soit $\tan \varphi = \frac{b}{a}$.



– en physique, on préfère souvent écrire $\underline{u} = |\underline{u}| \exp(i\varphi)$ en faisant apparaître directement le module $|\underline{u}|$ et la phase (ou argument) φ .

$$\text{Rappel : } \left| \frac{\underline{u}_2}{\underline{u}_1} \right| = \frac{|\underline{u}_2|}{|\underline{u}_1|} \quad \text{et} \quad \arg \frac{\underline{u}_2}{\underline{u}_1} = \arg \underline{u}_2 - \arg \underline{u}_1$$

■ Moyenne de fonctions temporelles

Si $u(t) = u_0 \cos(\omega t + \varphi)$, alors sur une période $T = \frac{2\pi}{\omega}$, $\langle u \rangle = 0$ et $\langle u^2 \rangle = \frac{1}{2} u_0^2$

Si $f(t) = f_0 \cos(\omega t)$ et $g(t) = g_0 \cos(\omega t + \varphi)$, alors $\langle fg \rangle = \frac{1}{2} f_0 g_0 \cos \varphi$

■ Formule de Taylor à l'ordre 1

Il faut savoir faire le lien entre :

– l'écriture mathématique : $f(x_0 + h) = f(x_0) + h \frac{df}{dx}(x_0) + \dots$

– et l'écriture physique : $u(x_0 + dx) - u(x_0) = du = \left. \frac{du}{dx} \right|_{x=x_0} dx + \dots$

Pour x , $|x| \ll 1$, on a $\sin x \approx x$, $\cos x \approx 1 - x^2/2$, $\tan x \approx x$, $\ln(1+x) \approx x$, $e^x \approx 1+x$,

$(1+x)^\alpha \approx 1 + \alpha x$, $\frac{1}{1+x} \approx 1 - x$; $\frac{1}{1-x} \approx 1 + x$; $\sqrt{1 \pm x} \approx 1 \pm \frac{x}{2}, \dots$

Et si $u(x, y)$ est une fonction de deux variables, à l'ordre 1 : $du = \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy$

Le théorème de Schwarz indique que $\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x}$

■ Une grandeur petite ne doit être prise nulle

De la même manière qu'en mathématique une fonction n'est pas « équivalente à zéro », en physique non plus une grandeur petite ne doit être prise nulle ; si elle intervient dans une fonction, il suffit (en général) de prendre le premier terme non nul du développement limité de cette fonction.

En revanche, à l'ordre un en ε , on a simplement $\varepsilon \cdot f(\varepsilon) = \varepsilon [f(0) + f'(0)\varepsilon + \dots] \approx \varepsilon \cdot f(0)$.

■ Disque, cylindre et sphère

Disque : périmètre $2\pi r$; surface πr^2 ; élément de surface d'une couronne circulaire entre r et $r + dr$: $2\pi r dr$.

Cylindre : surface latérale $2\pi r h$; volume $\pi r^2 h$; élément de volume d'une coquille circulaire entre r et $r + dr$: $2\pi r dr h$.

Sphère : surface $4\pi r^2$; volume $4\pi r^3 / 3$; élément de volume d'une coquille sphérique entre r et $r + dr$: $4\pi r^2 dr$.

■ Équation différentielle du premier ordre

$$\text{du type : } \tau \frac{dx}{dt} + x = x_0 \cos \omega t$$

L'équation étant linéaire, la solution générale est la superposition d'une solution générale de l'équation sans second membre (régime transitoire) et d'une solution particulière de l'équation générale (régime forcé).

– **le régime transitoire** (ou libre en l'absence d'excitation $x_0 \cos \omega t$) est solution de

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{x}{\tau} \text{ soit } x_t(t) = A \exp(-t/\tau) ; \text{ ce régime transitoire tend vers zéro.}$$

– **le régime forcé** (par l'excitation) est une solution particulière recherchée sous la forme d'une fonction de même pulsation ω , mais déphasée (retard φ),

$x_f(t) = X \cos(\omega t - \varphi)$, soit en passant en notation complexe :

$$(i\omega\tau + 1)\underline{x} = x_0 \Rightarrow \underline{x} = X e^{-i\varphi} = \frac{x_0}{1 + i\omega\tau} \text{ d'où } X = \frac{x_0}{\sqrt{1 + \omega^2\tau^2}} \text{ et } \tan \varphi = \omega\tau$$

NB : La détermination des constantes d'intégration doit se faire sur la solution générale $x_t(t) + x_f(t)$!

■ Équation différentielle classique du second ordre

$\ddot{x} + \omega^2 x = 0$ admet comme solution : $x(t) = a \cos \omega t + b \sin \omega t$ ou $x(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$

$\ddot{x} - \omega^2 x = 0$ admet comme solution : $x(t) = a e^{\omega t} + b e^{-\omega t}$ ou $x(t) = A \cosh \omega t + B \sinh \omega t$

■ Équation différentielle du second ordre à coefficients constants

$$\text{du type : } a\ddot{x} + b\dot{x} + cx = e \cos(\omega t) \text{ où } \dot{x} = \frac{dx}{dt} \text{ et } \ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

L'équation étant linéaire, la solution générale est la superposition d'une solution générale de l'équation sans second membre (régime transitoire) et d'une solution particulière de l'équation générale (régime forcé).

– **le régime libre** (car l'excitation $e \cos(\omega t)$ disparaît) est solution de $a\ddot{x} + b\dot{x} + c = 0$

L'équation caractéristique $ar^2 + br + c = 0$ avec en physique les trois constantes a , b et c positives, conduit à $S = -b/a \leq 0$ et $P = c/a \geq 0$ d'où les deux cas :

- si $\Delta = b^2 - 4ac > 0$ (ce qui suppose un fort coefficient de frottement b), les deux racines sont réelles négatives, notées $-r_1$ et $-r_2$, d'où une solution en exponentielles décroissantes : $x(t) = A \exp(-r_1 t) + B \exp(-r_2 t)$ appelé régime transitoire (car il tend vers zéro) apériodique

- si $\Delta = b^2 - 4ac < 0$ (ce qui suppose un faible coefficient de frottement b), les deux racines sont complexes conjuguées à partie réelle négative, notées $-r \pm i\Omega$, d'où une solution (somme des 2 exponentielles complexes) oscillatoire d'amplitude en exponentielle décroissante :

$$x(t) = \exp(-rt) \cdot (A \cos \Omega t + B \sin \Omega t) \quad \text{ou} \quad x(t) = \alpha \exp(-rt) \cdot \cos(\Omega t + \varphi)$$

$$\text{ou} \quad x(t) = \beta \exp(r_1 t) + \gamma \exp(r_2 t) \quad (r_1 \text{ et } r_2 \text{ racines complexes})$$

appelé régime transitoire pseudopériodique

À noter que dans tous les cas, le régime transitoire disparaît (tend vers zéro). Le régime critique est celui (un peu théorique) où $\Delta = 0$.

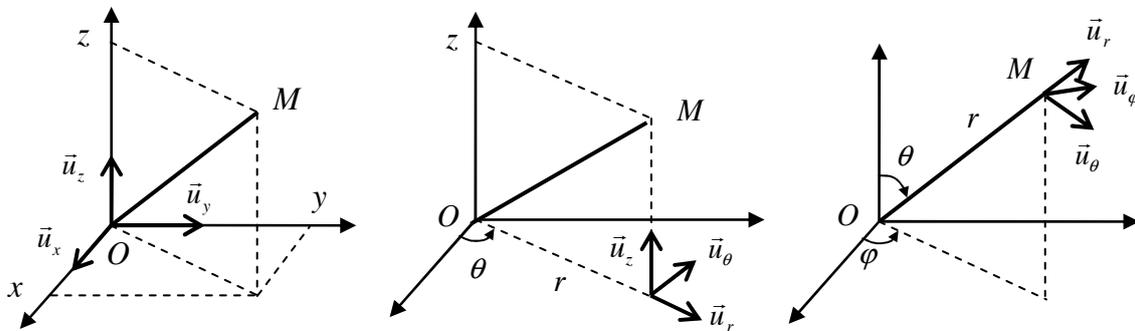
– le **régime forcé** (par l'excitation) est solution particulière de $a\ddot{x} + b\dot{x} + c = e \cos(\omega t)$; elle se cherche sous la forme d'une fonction de même pulsation, mais déphasée (retard φ) : $x(t) = X \cos(\omega t - \varphi)$, soit en passant en notation complexe :

$$(-a\omega^2 + bi\omega + c)\underline{x} = e \quad \Rightarrow \quad \underline{x} = X e^{-i\varphi} = \frac{e}{c - a\omega^2 + ib\omega} \quad \text{d'où par module et argument :}$$

$$X = \frac{e}{\sqrt{(c - a\omega^2)^2 + b^2\omega^2}} \quad \text{et} \quad \tan \varphi = \frac{b\omega}{c - a\omega^2} \quad (\text{à préciser par le signe de } \sin \varphi)$$

NB : la détermination des constantes d'intégration doit se faire sur la solution générale !

■ Systèmes de coordonnées et vecteur gradient



$$\text{en coordonnées cartésiennes } (x, y, z) : \overrightarrow{\text{grad}} V = \frac{\partial V}{\partial x} \vec{u}_x + \frac{\partial V}{\partial y} \vec{u}_y + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{u}_z$$

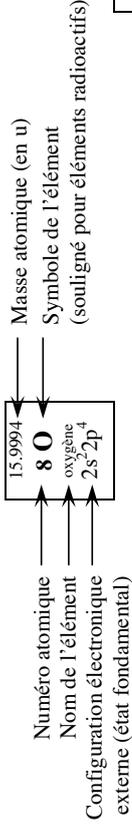
$$\text{en coordonnées cylindriques } (r, \theta, z) : \overrightarrow{\text{grad}} V = \frac{\partial V}{\partial r} \vec{u}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \vec{u}_\theta + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{u}_z$$

$$\text{à symétrie cylindrique } (r \text{ distance de } M \text{ à } Oz) : V(r) \Rightarrow \overrightarrow{\text{grad}} V = \frac{dV}{dr} \vec{u}_r$$

en coordonnées sphériques, à symétrie sphérique (r distance de M à O) :

$$V(r) \Rightarrow \overrightarrow{\text{grad}} V = \frac{dV}{dr} \vec{u}_r$$

Bloc s			Bloc d					Bloc p									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Alcalins	Alcalino-terreux													Chalcogènes	Halogènes	Gaz nobles	
1.0079 1 H hydrogène 1s ¹	9.0122 4 Be béryllium 2s ²						15.9994 8 O oxygène 2s ² 2p ⁴										4.0026 2 He hélium 1s ²
6.941 3 Li lithium 2s ¹															15.9994 8 O oxygène 2s ² 2p ⁴	18.9984 9 F fluor 2s ² 2p ⁵	20.179 10 Ne néon 2s ² 2p ⁶
22.9898 11 Na sodium 3s ¹	24.305 12 Mg magnésium 3s ²														32.066 16 S soufre 3s ² 3p ⁴	35.453 17 Cl chlore 3s ² 3p ⁵	39.948 18 Ar argon 3s ² 3p ⁶
39.0983 19 K potassium 4s ¹	40.076 20 Ca calcium 4s ²	44.9559 21 Sc scandium 3d ¹ 4s ²	47.90 22 Ti titane 3d ² 4s ²	50.9415 23 V vanadium 3d ³ 4s ²	51.9961 24 Cr chrome 3d ⁵ 4s ¹	54.938 25 Mn manganèse 3d ⁵ 4s ²	55.847 26 Fe fer 3d ⁶ 4s ²	58.9332 27 Co cobalt 3d ⁷ 4s ²	58.71 28 Ni nickel 3d ⁸ 4s ²	63.546 29 Cu cuivre 3d ¹⁰ 4s ¹	65.39 30 Zn zinc 3d ¹⁰ 4s ²	69.723 31 Ga gallium 4s ² 4p ¹	72.59 32 Ge germanium 4s ² 4p ²	74.9216 33 As arsenic 4s ² 4p ³	78.96 34 Se sélénium 4s ² 4p ⁴	79.904 35 Br brome 4s ² 4p ⁵	83.80 36 Kr krypton 4s ² 4p ⁶
85.4678 37 Rb rubidium 5s ¹	87.62 38 Sr strontium 5s ²	88.9059 39 Y yttrium 4d ¹ 5s ²	91.224 40 Zr zirconium 4d ² 5s ²	92.9064 41 Nb niobium 4d ⁴ 5s ¹	95.94 42 Mo molybdène 4d ⁵ 5s ¹	98.9062 43 Tc technétium 4d ⁵ 5s ⁰	101.07 44 Ru ruthénium 4d ⁷ 5s ¹	106.4 46 Pd palladium 4d ¹⁰ 5s ⁰	107.868 47 Ag argent 4d ¹⁰ 5s ¹	112.41 48 Cd cadmium 4d ¹⁰ 5s ²	114.82 49 In indium 5s ² 5p ¹	118.71 50 Sn étain 5s ² 5p ²	121.75 51 Sb antimoine 5s ² 5p ³	126.9045 52 Te tellure 5s ² 5p ⁴	127.60 53 I iode 5s ² 5p ⁵	131.30 54 Xe xénon 5s ² 5p ⁶	
132.9054 55 Cs césium 6s ¹	137.33 56 Ba baryum 6s ²	136.9055 57 La lanthane 5d ¹ 6s ²	178.49 72 Hf hafnium 5d ² 6s ²	180.9479 73 Ta tantalum 5d ³ 6s ²	183.85 74 W tungstène 5d ⁴ 6s ²	186.207 75 Re rénéium 5d ⁵ 6s ²	190.2 76 Os osmium 5d ⁶ 6s ²	192.22 77 Ir iridium 5d ⁷ 6s ²	195.09 78 Pt platine 5d ⁹ 6s ¹	200.59 80 Hg mercure 5d ¹⁰ 6s ²	204.37 81 Tl thallium 6s ² 6p ¹	207.2 82 Pb plomb 6s ² 6p ²	208.9804 83 Bi bismuth 6s ² 6p ³	209 84 Po polonium 6s ² 6p ⁴	210 85 At astate 6s ² 6p ⁵	222 86 Rn radon 6s ² 6p ⁶	
223 87 Fr francium 7s ¹	226.0254 88 Ra radium 7s ²	227.0278 89 Ac actinium 6d ¹ 7s ²	104 Unq	105 Unp	106 Unh	107 Uns	108 Uno	109 Une									



Classification périodique des éléments

Bloc f												
Lanthanides												
140.12 58 Ce cérium 4f ² 6s ²	140.9077 59 Pr praseodyme 4f ³ 6s ²	144.24 60 Nd néodyme 4f ⁴ 6s ²	145 61 Pm prométhium 4f ⁵ 6s ²	150.4 62 Sm samarium 4f ⁶ 6s ²	151.96 63 Eu europium 4f ⁷ 6s ²	157.25 64 Gd gadolinium 4f ⁷ 5d ¹ 6s ²	162.50 66 Dy dysprosium 4f ¹⁰ 6s ²	164.9304 67 Ho holmium 4f ¹¹ 6s ²	167.26 68 Er erbium 4f ¹² 6s ²	168.9342 69 Tm thulium 4f ¹³ 6s ²	173.04 70 Yb ytterbium 4f ¹⁴ 6s ²	174.967 71 Lu lutécium 4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ²
Actinides												
232.0381 90 Th thorium 6d ² 7s ²	231.0359 91 Pa protactinium 5f ² 6d ¹ 7s ²	238.029 92 U uranium 5f ³ 6d ¹ 7s ²	237.0482 93 Np néptunium 5f ⁴ 7s ²	244 94 Pu plutonium 5f ⁶ 7s ²	243 95 Am américium 5f ⁷ 7s ²	247 96 Cm curium 5f ⁷ 6d ¹ 7s ²	247 97 Bk berkélium 5f ⁷ 7s ²	251 98 Cf californium 5f ¹⁰ 7s ²	257 100 Fm fermium 5f ¹² 7s ²	258 101 Md mendélévium 5f ¹³ 7s ²	259 102 No nobélium 5f ¹⁴ 7s ²	260 103 Lr lawrencium 5f ¹⁴ 6d ¹ 7s ²

Chapitre 1

■ Thermodynamique ■

Les ordres de grandeur utiles

Constantes

constante des gaz parfaits	$R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
constante d'Avogadro	$N_A = 6,02.10^{23} \text{ mol}^{-1}$
constante de Boltzmann	$k_B = R / N_A = 1,38.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

L'air (modèle gaz parfait diatomique)

masse molaire	$M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$
masse volumique (à 20°C sous 1 bar)	$\rho = MP / RT \approx 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$
volume molaire (à 20°C sous 1 bar)	$V_m = RT / P \approx 24 \text{ L.mol}^{-1}$
densité particulaire (à 20°C sous 1 bar)	$n^* = P / k_B T \approx 2,5.10^{25} \text{ m}^{-3}$
capacité thermique molaire à volume constant	$C_{V_m} = 5R / 2 = 21 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
capacité thermique molaire à pression constante	$C_{P_m} = 7R / 2 = 29 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
capacité thermique massique à pression constante	$c_p = 1,0 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$
rapport des capacités thermiques	$\gamma = C_p / C_v = c_p / c_v \approx 1,4$

L'eau

masse molaire	$M = 18 \text{ g.mol}^{-1}$
masse volumique (liquide)	$\rho_l = 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$
capacité thermique de l'eau liquide	$c = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
densité moléculaire (liquide)	$n^* = \rho N_A / M \approx 10^{28} \text{ m}^{-3}$
masse volumique de la glace	$\rho_g = 0,92. 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$
capacité thermique de la glace	$c = 2,1 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
enthalpie massique de fusion de la glace à 0°C	$l_f = \Delta h_f = 334 \text{ kJ.kg}^{-1}$
enthalpie massique de vaporisation de l'eau à 100°C	$l_v = \Delta h_v = 2260 \text{ kJ.kg}^{-1}$
vapeur : masse volumique capacité thermique (100 °C, 1bar)	$\rho_v = 0,59 \text{ kg.m}^{-3}$ $c_p = 2,0 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
point triple	$T_T = 273,16 \text{ K} = 0,01 \text{ °C} ; P_T \approx 6.10^{-3} \text{ bar}$
point critique	$T_C \approx 374 \text{ °C} ; P_C \approx 220 \text{ atm}$

Le cours d'abord

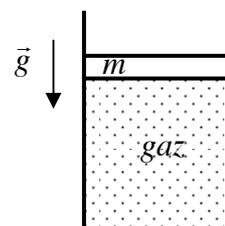
Il est indispensable d'avoir revu les chapitres 4 « Les états de la matière » et 5 « Thermodynamique des systèmes » du livre de première année avant d'aborder celui-ci avec succès.

■ Écriture différentielle des principes de la thermodynamique

1. Comment définit-on l'énergie interne U d'un système immobile dans le référentiel d'étude ?
2. Énoncer le premier principe de la thermodynamique pour une transformation élémentaire d'un système fermé ; commentaires.
3. Pourquoi le premier principe est-il insuffisant ? Donner un exemple.
4. Énoncer le second principe de la thermodynamique pour une transformation élémentaire d'un système fermé et commenter les notions d'entropie échangée et d'entropie créée.

■ Travail des forces pressantes

5. Un gaz est contenu dans un récipient fermé par un piston horizontal de masse m , de surface S , et mobile sans frottement ; la pression du gaz est P , celle de l'atmosphère extérieure $P_{ext.}$.
 - a) Appliquer la relation fondamentale de la dynamique au piston mobile et la projeter sur un axe Oz dirigé suivant la verticale ascendante.
 - b) Traduire et interpréter la condition d'équilibre mécanique en donnant P en fonction de $P_{ext.}$, mg et S .
 - c) AN : Calculer, à l'équilibre, la pression P du gaz sachant que $P_{ext.} = 10^5$ Pa (la pression atmosphérique normale) dans le cas d'un « piston lourd » en or massif : masse volumique $\rho = 19,3$ g.cm⁻³ et épaisseur $h = 5$ cm. En déduire une condition simplifiée d'équilibre mécanique.
6. Établir l'expression $\delta W = -P_{ext.} dV$ du travail des forces de pression où $P_{ext.}$ est la pression extérieure (atmosphère, poids, opérateur,...) s'exerçant par exemple sur le piston mobile (le prendre vertical ici avec un déplacement suivant Ox) d'une enceinte contenant un gaz. Par quel système ce travail est-il reçu ?
7. Comment en déduit-on le travail reçu par le gaz et sous quelles conditions à préciser peut-on affirmer que ce dernier vaut $\delta W = -PdV$ où P est la pression du gaz ?
8. Donner le travail des forces de pression lors d'une transformation isochore, puis monobare, puis isobare (mécaniquement réversible), puis isotherme (mécaniquement réversible) d'un gaz parfait.



9. Pour un système décrivant un cycle mécaniquement réversible, représenté dans un diagramme de Clapeyron, interpréter graphiquement le travail des forces de pression reçu par ce système.

■ Énergie interne et enthalpie ; capacités thermiques

10. Vu la définition de l'énergie interne, de quelles variables thermodynamiques dépend-elle ? Définir la capacité thermique à volume constant pour un corps quelconque.
11. Décrire le dispositif de la détente de Joule Gay-Lussac. Quelle grandeur se conserve ? Quel est l'effet thermique expérimental sur les gaz réels ? Que constate-t-on pour un gaz parfait ?
12. Dans cette question, le seul travail reçu est celui des forces de pression. Que donne le premier principe pour une transformation isochore ? Pour une transformation monobare entre deux états d'équilibre ? En déduire la notion d'enthalpie. Quelle est la variation de la fonction d'état la plus adaptée pour déterminer un transfert thermique ?
13. Donner la définition de la capacité thermique à pression constante d'un fluide réel, puis des capacités thermiques à pression constante molaire et massique.
14. Comment s'exprime simplement la notion d'énergie interne pour une phase condensée indilatable ? La notion d'enthalpie pour une phase condensée incompressible ? Que peut-on dire des capacités thermiques à volume constant et à pression constante dans le cas d'une phase condensée incompressible et indilatable ?

■ Identités thermodynamiques et variations d'entropie

15. Qu'appelle-t-on identité thermodynamique pour U ? Comment se simplifie-t-elle dans le cas d'une phase condensée ? Donner alors l'expression de la variation d'entropie $\Delta S = S_2 - S_1$ entre deux états 1 et 2 et commenter. Comment trouver l'entropie créée lors d'une transformation ?
16. Déduire de l'identité thermodynamique pour U celle pour H ? Comment trouver l'entropie créée lors d'une transformation ?

■ Le gaz parfait

17. Reprendre le dispositif de la détente de Joule Gay-Lussac vu à la question 11. Que constate-t-on pour un gaz parfait ? En déduire la 1^{ère} loi de Joule.
18. Montrer que pour un gaz parfait, l'enthalpie H ne dépend que de la température (2^e loi de Joule).
19. Établir la relation de Mayer existant entre les capacités thermiques à volume constant et à pression constante pour un gaz parfait.