LYCÉE D'EXCELLENCE
MOHAMMED VI
LEM6 - CASABLANCA

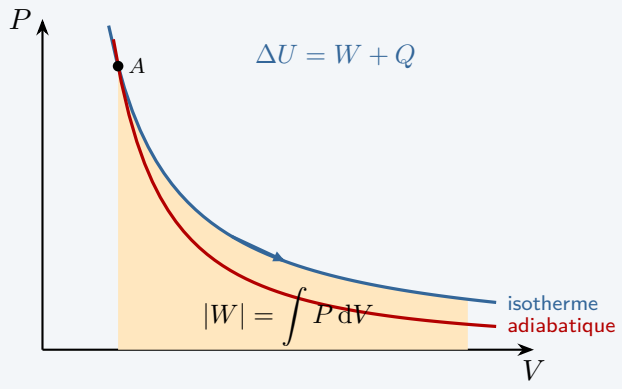
Classes préparatoires aux grandes écoles
MPSI — Physique-chimie
Année 2026-2027

FICHE RÉSUMÉ

T3 THERMODYNAMIQUE

Premier principe pour un système fermé

Transformations — Travail des forces de pression — Transfert thermique — Énergie interne et enthalpie — Capacités thermiques — Détentes



« *C'est la seule théorie physique de portée universelle dont je suis convaincu que, dans le cadre où ses concepts fondamentaux s'appliquent, elle ne sera jamais renversée.*

— Albert Einstein, à propos de la thermodynamique, *Notes autobiographiques* (1949)

physionova
physionova.academy

Pr. CHARIFI
professeurcharifi@gmail.com

Simulation associée sur **PhysioNova**
« Transformations d'un gaz parfait »

T3 — Fiche résumé

L'essentiel en trois phrases

Le premier principe est un principe de **conservation de l'énergie** : la variation de l'énergie (interne et mécanique) d'un système fermé est égale à ce qu'il reçoit sous forme de travail W et de transfert thermique Q. U et $H = U + PV$ sont des **fonctions d'état** (leurs variations ne dépendent que des états initial et final), alors que W et Q dépendent du chemin suivi. Pour le gaz parfait, U et H ne dépendent que de T (lois de Joule), ce qui rend les bilans immédiats.

I Transformations d'un système fermé

★ À retenir

Transformation	Définition
Isochore	$V = \text{cste}$
Isobare / **monobare**	P du système défini et constant tout au long / seule P_{ext} est constante ($P_I = P_F = P_{\text{ext}}$ si paroi mobile)
Isotherme / **monotherme**	T du système défini et constant / échange thermique avec un seul thermostat T_0 ($T_F = T_0$ si parois diathermes)
Adiabatique	aucun transfert thermique (parois calorifugées, ou transformation rapide)
Quasi-statique	suffisamment lente : suite continue d'états d'équilibre interne, variables d'état définies à chaque instant
Réversible	quasi-statique et renversable par inversion infinitésimale des contraintes : $P = P_{\text{ext}}$, $T = T_{\text{ext}}$ à chaque instant

Un **thermostat** est un système de capacité thermique très grande, de température constante (atmosphère, océan). « Brutalement », « on lâche le piston » : irréversible ; « très lentement » sans frottement : réversible ; « calorifugé » ou « rapide » : adiabatique.

II Travail des forces de pression et transfert thermique

Travail des forces de pression R D

Piston de section S soumis à P_{ext}, déplacement $\mathrm{d}x$: $\delta W = -P_{\text{ext}} S\,\mathrm{d}x$, soit

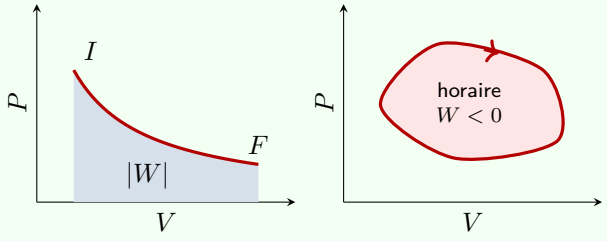
$$\delta W = -P_{\text{ext}}\,\mathrm{d}V \qquad W_{I\to F} = -\int_I^F P_{\text{ext}}\,\mathrm{d}V$$

- isochore : $W = 0$; monobare : $W = -P_{\text{ext}}(V_F - V_I)$;
- quasi-statique (mécaniquement réversible, $P_{\text{ext}} = P$) : $W = -\int_I^F P\,\mathrm{d}V$;
- isotherme quasi-statique d'un GP : $W = -nRT\ln\dfrac{V_F}{V_I} = nRT\ln\dfrac{P_F}{P_I}$.

Diagramme de Clapeyron (V, P) R

Pour une transformation quasi-statique, $|W|$ est l'**aire sous la courbe** ($W < 0$ si V augmente). Pour un cycle, $|W_{\text{cycle}}|$ est l'**aire du cycle** :

- sens horaire : $W < 0$, cycle **moteur** ;
- sens trigonométrique : $W > 0$, cycle **récepteur**.



Définition — Transfert thermique Q R

Transfert d'énergie microscopique désordonné (« chaleur »). Trois modes : **conduction** (de proche en proche, sans mouvement de matière), **convection** (mouvement macroscopique d'un fluide), **rayonnement** (ondes électromagnétiques, même dans le vide). Convention : W et Q sont **reçus** (> 0 si réellement reçus, < 0 si réellement cédés).

III Premier principe, enthalpie, capacités thermiques

Premier principe (système fermé) R

Énergie totale $E = \underbrace{E_{c,\text{mic}} + E_{p,\text{int}}}_{U} + E_{c,\text{mac}} + E_{p,\text{ext}}$; l'**énergie interne** U est une fonction d'état extensive (additive) :

$$\Delta U + \Delta E_m = W + Q \qquad \mathrm{d}U + \mathrm{d}E_m = \delta W + \delta Q$$

Système macroscopiquement au repos ($\Delta E_m = 0$) : $\Delta U = W + Q$. Sur un cycle, $\Delta U_{\text{cycle}} = 0$.

Enthalpie et capacités thermiques R

$$H = U + PV \qquad C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V \qquad C_P = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P \qquad \gamma = \frac{C_P}{C_V}$$

- Isochore ($W = 0$) : $\Delta U = Q_V$. Monobare avec $P_I = P_F = P_{\text{ext}}$ (seules les forces de pression travaillent) : $\Delta H = Q_P$.
- Capacités molaires $C_{V,m}$, $C_{P,m}$ ($\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}}$) et massiques c_V, c_P ($\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}}$).

Gaz parfait : lois de Joule et relation de Mayer R D

U et H ne dépendent que de T : $\mathrm{d}U = C_V\,\mathrm{d}T$ et $\mathrm{d}H = C_P\,\mathrm{d}T$ pour **toute** transformation, et

$$C_{P,m} - C_{V,m} = R \qquad C_{V,m} = \frac{R}{\gamma - 1} \qquad C_{P,m} = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}$$

Monoatomique : $C_{V,m} = \frac{3}{2}R$, $\gamma = \frac{5}{3}$; diatomique (air) : $C_{V,m} = \frac{5}{2}R$, $\gamma = \frac{7}{5} = 1{,}4$.

IV Transformations usuelles du gaz parfait

★ À retenir

Gaz parfait, quasi-statique	W	Q	ΔU
Isochore	0	$nC_{V,m}\Delta T$	$nC_{V,m}\Delta T$
Isobare	$-P\Delta V = -nR\Delta T$	$\Delta H = nC_{P,m}\Delta T$	$nC_{V,m}\Delta T$
Isotherme	$-nRT\ln\frac{V_F}{V_I}$	$-W = nRT\ln\frac{V_F}{V_I}$	0
Adiabatique	$\Delta U = \frac{P_FV_F - P_IV_I}{\gamma-1}$	0	$\frac{nR\,\Delta T}{\gamma-1}$

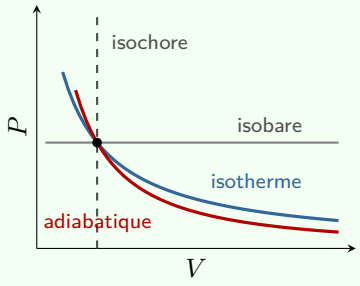
Loi de Laplace R D

Gaz parfait, transformation **adiabatique** et **quasi-statique** (réversible), γ constant :

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

Preuve : $\mathrm{d}U = -P\,\mathrm{d}V$ et $nR\,\mathrm{d}T = P\,\mathrm{d}V + V\,\mathrm{d}P$ donnent $\gamma\frac{\mathrm{d}V}{V} + \frac{\mathrm{d}P}{P} = 0$.

Reech : en un même point, pente de l'isotherme $-\frac{P}{V}$, de l'adiabatique $-\gamma\frac{P}{V}$: l'adiabatique est **plus raide** ($\gamma = \chi_T/\chi_S$). Polytropique $PV^k = \text{cste}$: $W = \frac{P_FV_F - P_IV_I}{k-1}$.



V Phases condensées, calorimétrie et détentes

Phase condensée indilatable et incompressible R

$$\mathrm{d}U \approx \mathrm{d}H \approx C\,\mathrm{d}T \qquad C_P \approx C_V = C$$

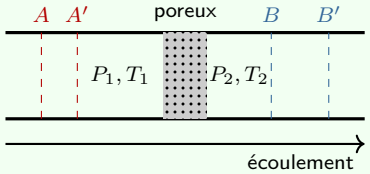
Calorimètre (calorifugé, à l'air libre) : transformation adiabatique et monobare de l'ensemble, donc $\Delta H = 0 = \sum_i m_i c_i (T_F - T_i)$ (+changements d'état). Valeur en eau μ : $C_{\text{cal}} = \mu\, c_{\text{eau}}$.

Les deux détentes R D

Joule–Gay-Lussac : détente dans le vide, enceinte rigide et calorifugée : $W = 0$, $Q = 0$, donc $\boxed{\Delta U = 0}$ (isoénergétique).

Joule–Thomson : écoulement lent et permanent à travers un poreux, conduite calorifugée ; le travail de transvasement $P_1V_1 - P_2V_2$ donne $U_2 - U_1 = P_1V_1 - P_2V_2$:

$$\Delta H = 0 \text{ (isenthalpique)}$$



Système fermé : gaz entre A et B à t, entre A' et B' à $t + \mathrm{d}t$.

Gaz parfait : T inchangée dans les deux cas ; gaz réel : refroidissement (liquéfaction, procédé Linde).

Ordres de grandeur

$c_{\text{eau}} = 4{,}18\,\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ (valeur exceptionnellement élevée) ; glace $2{,}1$, aluminium $0{,}90$, fer $0{,}45$, cuivre $0{,}39\,\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$; solides (Dulong et Petit) : $C_m \approx 3R \approx 25\,\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$; air : $\gamma = 1{,}4$, $c_V \approx 0{,}72\,\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$, $c_P \approx 1{,}0\,\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$; compression adiabatique réversible de l'air (V divisé par 10, depuis $300\,\text{K}$) : $T \approx 750\,\text{K}$.

VI Méthodes et pièges

☞ Méthode — Bilan énergétique d'une transformation M

1. Définir le système (fermé !) et ses états initial et final ; repérer les contraintes (parois, P_{ext}, thermostat).
2. Calculer ΔU (ou ΔH) avec la fonction d'état, sur un chemin quelconque : $\Delta U = C_V \Delta T$ pour un GP ou une phase condensée.
3. Calculer W avec la pression **extérieure** réelle ; en déduire $Q = \Delta U - W$ (ou $Q = \Delta H$ si monobare).
4. Transformation brutale : P_{ext} constante donne $W = -P_{\text{ext}}(V_F - V_I)$; l'état final s'obtient par $\Delta U = W + Q$ et l'équation d'état.

✗ Attention, erreurs fréquentes

- W et Q ne sont pas des fonctions d'état : on écrit δW, δQ et jamais ΔW, ΔQ.
- Adiabatique n'est pas isotherme ! Et isotherme ne signifie pas $Q = 0$ (au contraire, $Q = -W$ pour un GP).
- $W = -\int P\,\text{d}V$ suppose la transformation quasi-statique ; sinon, utiliser P_{ext}.
- Laplace exige **gaz parfait + adiabatique + quasi-statique** ; inapplicable à une détente brutale.
- $\Delta H = Q$ vaut pour une monobare (ou isobare) ; $\Delta U = C_V \Delta T$ vaut pour toute transformation d'un GP.

Savoir-faire : je coche quand je sais

- ☐ Je sais reconnaître le type de transformation à partir de l'énoncé.
- ☐ Je sais calculer le travail des forces de pression et l'interpréter dans le diagramme de Clapeyron.
- ☐ Je sais écrire le premier principe et distinguer fonctions d'état et grandeurs d'échange.
- ☐ J'utilise $\Delta H = Q_P$ (monobare) et $\Delta U = Q_V$ (isochore).
- ☐ J'exploite les lois de Joule, la relation de Mayer et le tableau des transformations du GP.
- ☐ Je sais établir la loi de Laplace et comparer les pentes isotherme/adiabatique.
- ☐ Je sais mener un bilan calorimétrique et traiter les détentes de Joule.