



BLAISE PASCAL  
PT 2020-2021

Fiche de révisions R7

# Principes de la thermodynamique

- 💡 Difficulté d'analyse et compréhension, initiative requise ;
- ✂ Difficulté technique et calculatoire ;
- ⊗ Exercice important.

Flasher ce code pour  
accéder aux corrigés



## Revoir le cours

Scanner ou cliquer sur les QR-code pour accéder aux ressources.

- **L'essentiel du cours sous forme de cartes mémo** : cartes réalisées par Christophe Cayssiols.



Cartes utilisables pour ce bloc de révisions : toutes celles du thème « thermodynamique » de première année, sauf celles sur les machines thermiques.

- **Qmax : QCM d'applications directes du cours**



Choisir d'abord le mode « j'apprends » puis éventuellement le mode « je révise ». Ces QCM correspondent au programme de PCSI, certaines notions peuvent donc vous être inconnues : me demander en cas de doute.

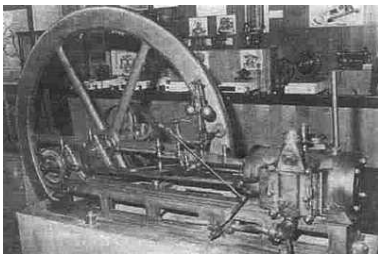
Thèmes abordés dans ce bloc de révisions : thème « thermodynamique », tout sauf les machines thermiques.

## Rappels de cours

### Exercice 1 : Cycle de Lenoir

💡 1 | ✂ 1 | ⊗

- ▶ Gaz parfait ;
- ▶ Premier principe.



Le cycle de Lenoir est un modèle idéalisé de cycle moteur à deux temps, proposé par Étienne Lenoir en 1860 pour décrire le fonctionnement du moteur à gaz qu'il avait mis au point l'année précédente. On raisonne sur le mélange air-carburant présent dans la chambre de combustion du moteur, modélisé par un gaz parfait d'exposant adiabatique  $\gamma$  formant un système fermé de quantité de matière  $n_0$ . Après l'admission d'air dans la chambre de combustion, l'état du mélange  $(P_1, V_1, T_1)$  est supposé connu. Le cycle qu'il subit se compose des étapes suivantes :

- ▶  $1 \rightarrow 2$  : explosion isochore jusqu'à la pression  $P_2$  ;
- ▶  $2 \rightarrow 3$  : détente isotherme jusqu'à un volume  $V_3 = 2V_1$  ;
- ▶  $3 \rightarrow 1$  : compression isobare modélisant le renouvellement du mélange (échappement, admission, injection de carburant, inflammation).

1 - Déterminer les caractéristiques des points ② et ③ du cycle en fonction uniquement de celles du point ①.

2 - Déterminer l'équation d'une isotherme d'un gaz parfait dans le diagramme de Watt  $(P, V)$ , c'est-à-dire une équation de la forme  $P = f(V)$ . En déduire la représentation du cycle.

3 - Calculer l'énergie  $Q_{\text{expl}}$  reçue par le mélange lors de l'explosion, à exprimer en fonction de  $P_1, V_1$  et  $\gamma$ . On rappelle

que la capacité thermique molaire isochore d'un gaz parfait vaut  $C_{V,m} = R/(\gamma - 1)$ .

4 - Calculer le travail moteur  $W_m$  fourni au cours du cycle complet, à exprimer également en fonction de  $P_1$  et  $V_1$ .

5 - En déduire le rendement du cycle  $\eta = W_m/Q_{\text{expl}}$ .

**Remarque culturelle :** Un défaut majeur de ce modèle de cycle historique est la modélisation de la deuxième étape. Considérer la détente isotherme n'est pas l'hypothèse la plus pertinente, une modélisation adiabatique est plus conforme à la réalité.

## Exercice 2 : Mesure calorimétrique de l'enthalpie de fusion de l'eau



- ▷ Calorimétrie;
- ▷ Changement d'état.

Cet exercice propose d'analyser une expérience permettant de mesurer l'enthalpie massique de fusion de l'eau. Les opérations suivantes sont réalisées dans un calorimètre :

- ▷ Mélanger une masse  $m_0 = 50$  g d'eau chaude ( $T_{\text{ch}} = 50$  °C) avec la même masse  $m_0$  d'eau à température ambiante ( $T_{\text{amb}} = 20$  °C).
- ▷ Après quelques minutes, la température de l'eau ne varie plus et vaut  $T_1 = 32$  °C.
- ▷ Ajouter un glaçon partiellement fondu et séché. Le glaçon est pesé après séchage et juste avant d'être ajouté au calorimètre : on mesure  $m = 15$  g.
- ▷ Après quelques minutes, le glaçon a totalement fondu, la température de l'eau ne varie plus et vaut  $T_2 = 20$  °C.

*Donnée :* capacité thermique massique de l'eau liquide  $c = 4,2 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

- 1 - Rappeler ce qu'est un calorimètre et les caractéristiques des transformations qui y ont lieu.
- 2 - Déterminer la température théorique  $T_{1,\text{th}}$  qui serait mesurée en fin de première étape si la capacité thermique du calorimètre était négligeable.
- 3 - En reprenant le raisonnement, déterminer la valeur en eau  $\mu$  du calorimètre, c'est-à-dire la masse d'eau équivalente qui aurait la même capacité thermique que le calorimètre.
- 4 - Justifier que faire fondre partiellement le glaçon et le sécher permet de considérer qu'il est formé uniquement de glace à température  $T_{\text{fus}} = 0$  °C.
- 5 - En déduire l'enthalpie massique de fusion de l'eau.

## Exercice 3 : Comparaison de deux vaporisations



- ▷ Bilan d'enthalpie;
- ▷ Bilan d'entropie;
- ▷ Changement d'état;
- ▷ Propriétés des fonctions d'état.

Cet exercice, purement théorique mais conceptuellement important, a pour but de comparer deux transformations de vaporisation de 1 kg d'eau, schématisées figure 1. L'eau est supposée initialement à  $T_{\text{vap}} = 100$  °C sous forme entièrement liquide, et elle est mise au contact d'un thermostat de température  $T_{\text{ext}} = T_{\text{vap}} + \varepsilon$  qui impose la vaporisation de la masse d'eau. On suppose  $\varepsilon \ll T_{\text{vap}}$ , ce qui permet de faire l'approximation que la température finale est égale à  $T_{\text{vap}}$ .

*Donnée :*  $\Delta_{\text{vap}}h = 2,3 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $M = 18 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

### A - Vaporisation quasi-statique monobare

L'eau est placée dans une enceinte fermée par un piston pouvant se déplacer sans frottement. Le volume initial est tel que l'eau occupe tout l'espace, supposé négligeable devant le volume final. L'eau se vaporise lentement, conduisant à une augmentation progressive de volume.

- 1 - Déterminer la pression  $P_F$  et le volume final  $V_F$ .
- 2 - En déduire le travail  $W$  reçu par l'eau au cours de la transformation. Commenter son signe.
- 3 - Procéder au bilan d'enthalpie de la transformation. En déduire le transfert thermique  $Q$  reçu par l'eau au cours

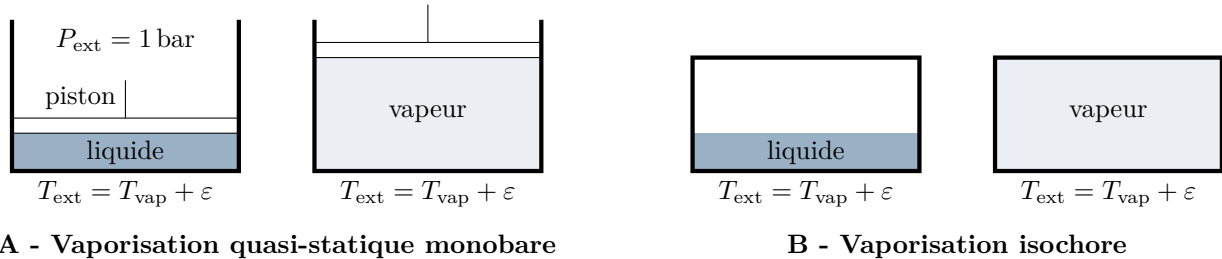


Figure 1 – Deux façons de vaporiser de l'eau.

de la transformation. Commenter son signe.

4 - Procéder au bilan d'énergie de la transformation.

5 - Procéder au bilan d'entropie de la transformation. En déduire l'entropie créée  $S_c$ .

## B - Vaporisation isochore

L'eau est cette fois placée dans une enceinte indéformable de volume  $V_0$  constant égal au volume  $V_F$  déterminé précédemment. L'eau s'y vaporise très rapidement. Les grandeurs relatives à cette seconde transformation seront repérées d'un « prime ».

6 - Déterminer  $P'_F$  sans aucun calcul.

7 - Que vaut le travail  $W'$  reçu par l'eau au cours de la transformation ?

8 - En utilisant astucieusement les résultats de la première partie, calculer le transfert thermique  $Q'$ . Comparer  $Q$  et  $Q'$ .

9 - Procéder au bilan d'entropie de la transformation. En déduire l'entropie créée  $S'_c$ .

10 - Identifier une relation entre l'entropie créée  $S'_c$  dans la seconde transformation et le travail  $W$  échangé dans la première. Interpréter physiquement.

## Questions de cours

**R7.1** - Définir le vocabulaire usuel des transformations : isochore, isotherme, isobare, monobare, monotherme, quasi-statique, adiabatique, réversible.

**R7.2** - Énoncer **complètement** le premier principe en termes d'énergie interne et/ou d'enthalpie, c'est-à-dire non seulement le bilan énergétique mais aussi les propriétés de  $U$  et/ou  $H$ .

**R7.3** - Énoncer **complètement** le second principe, c'est-à-dire non seulement le bilan d'entropie mais aussi les propriétés de  $S$ .

**R7.4** - Rappeler les lois de Laplace et leurs hypothèses d'application. En déduire le travail  $W$  reçu au cours d'une compression d'un volume  $V_I$  à un volume  $V_F$  au cours de laquelle les lois de Laplace s'appliquent. On introduira pour le calcul une constante  $K$  caractéristique de l'expression de Laplace.

*Il est attendu que l'étudiant connaisse au strict minimum l'expression en  $PV^\gamma$  et sache retrouver très, très vite les deux autres ... mais c'est encore mieux si les trois sont connues par cœur !*

*Au cours de la compression on a  $PV^\gamma = K = cte$ , d'où*

$$W = - \int_{V_I}^{V_F} P dV = -K \int_{V_I}^{V_F} \frac{dV}{V^\gamma} = -K \int_{V_I}^{V_F} V^{-\gamma} dV = -K \left[ \frac{V^{-\gamma+1}}{-\gamma+1} \right]_{V_I}^{V_F} = \frac{K}{\gamma-1} \left( V_F^{1-\gamma} - V_I^{1-\gamma} \right).$$

*La dernière étape du calcul utilise la primitive d'une fonction de type  $x \mapsto x^n$  qui, en cas de doute, se retrouve immédiatement sur l'exemple de  $x \mapsto x^2$  qui s'intègre en  $x^3/3$ .*

**R7.5** - L'évaporateur est l'élément d'un frigo dans lequel le fluide frigorigène prélève de l'énergie au compartiment réfrigéré en se vaporisant, ce qui a pour effet de refroidir les aliments qui y sont stockés. Le fluide entre dans l'évaporateur à une température  $T_e < T_{\text{vap}}$  et en ressort à la température  $T_s > T_{\text{vap}}$ . Le passage dans l'évaporateur est isobare, et le fluide n'y reçoit pas d'autre travail que celui des forces de pression qui assurent l'écoulement. Déterminer le transfert thermique  $Q$  reçu par une masse  $m$  fluide frigorigène lors de son passage dans l'évaporateur. Le résultat sera donné en fonction de l'enthalpie de vaporisation  $\Delta_{\text{vap}}h$  du fluide et des capacités thermiques massiques  $c_{\text{vap}}$  et  $c_{\text{liq}}$ .

La transformation réelle se décompose comme la succession de trois transformations élémentaires :

- ▷ d'abord, le fluide est liquide et sa température passe de  $T_e$  à  $T_{\text{vap}}$  ;
- ▷ ensuite, le fluide se vaporise totalement de manière isobare isotherme ;
- ▷ enfin, le fluide est gazeux et sa température passe de  $T_{\text{vap}}$  à  $T_s$ .

Le bilan d'enthalpie s'écrit ainsi :

$$\Delta H = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{1er P}}}{0} + Q = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{transf}}}{m c_{\text{liq}} (T_{\text{vap}} - T_e)} + m \Delta_{\text{vap}} h + m c_{\text{vap}} (T_s - T_{\text{vap}}).$$

**R7.6** - Un glaçon, de masse  $m_1$  et température  $T_1$ , est sorti du congélateur pour être mis dans un verre contenant une boisson au choix de l'étudiant, de masse  $m_2$  et température  $T_2$  (la boisson, pas l'étudiant). On suppose que le glaçon fond totalement et rapidement, ce qui permet de négliger les transferts thermiques avec l'air. Déterminer la température finale  $T_F$  du breuvage. Comment déterminer la masse minimale du glaçon pour qu'il ne fonde pas totalement ? Le résultat sera donné en fonction de l'enthalpie de fusion  $\Delta_{\text{fus}} h$  de l'eau et des capacités thermiques massiques  $c_{\text{sol}}$  et  $c_{\text{liq}}$ , supposées égales pour le glaçon et la boisson.

On utilise l'additivité de l'enthalpie pour sommer les contributions du glaçon et de la boisson.

- ▷ la boisson est liquide et sa température passe de  $T_2$  à  $T_F$  ;
- ▷ le glaçon se réchauffe et fond, ce que l'on décompose comme la succession de trois transformations élémentaires :

- d'abord, le glaçon est solide et sa température passe de  $T_1$  à  $T_{\text{fus}}$  ;
- ensuite, le glaçon fond totalement de manière isobare isotherme ;
- enfin, le glaçon est liquide et sa température passe de  $T_{\text{fus}}$  à  $T_F$ .

Le bilan d'enthalpie s'écrit donc :

$$\Delta H = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{1er P}}}{0} + 0 = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{transf}}}{m_2 c_{\text{liq}} (T_F - T_2)} + \underbrace{m_1 c_{\text{sol}} (T_{\text{fus}} - T_1) + m_1 \Delta_{\text{fus}} h + m_1 c_{\text{liq}} (T_F - T_{\text{fus}})}_{\text{glaçon}}$$

Il reste alors à isoler  $T_F$  dans cette équation.

Pour déterminer la masse minimale à partir de laquelle le glaçon ne fond pas complètement, il faut être conscient que le calcul ci-dessus repose sur l'hypothèse que l'état final est complètement liquide, ce qui impose au final d'avoir  $T_F > T_{\text{fus}}$ . Si jamais le calcul numérique donne  $T_F < T_{\text{fus}}$ , alors il y a contradiction entre l'hypothèse initiale et le résultat final. Cela signifie que l'hypothèse initiale est fautive et que le résultat final n'a pas de sens. La masse limite est donc celle qui donne  $T_F = T_{\text{fus}}$ . Attention, la vraie température finale ne sera pas le  $T_F$  calculé de cette façon.

**R7.7** - Le même étudiant qu'à la question précédente souhaite toujours refroidir la même boisson de masse  $m_2$  et température  $T_2$  en y ajoutant des glaçons de masse  $m_1$  et température  $T_1$ . Sauf que cette fois ... il en met trop, si bien qu'à l'état final il reste de la glace dans sa boisson. Déterminer la masse  $m_f$  de glace qui a fondu en fonction des mêmes paramètres qu'à la question précédente. On négligera toujours les transferts thermiques avec l'air. Comment déterminer la masse minimale du glaçon pour qu'il ne fonde pas totalement ?

Cette fois, on sait que le mélange est diphasé à l'état final, ce qui nous donne sa température : la coexistence n'est possible que si  $T_F = T_{\text{fus}}$ . Le bilan d'enthalpie s'écrit comme à la question précédente, sauf que :

- ▷ seule la masse  $m_f$  fond ;
- ▷ comme  $T_F = T_{\text{fus}}$ , la glace fondue ne change pas de température.

Le bilan d'enthalpie s'écrit donc :

$$\Delta H = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{1er P}}}{0} + 0 = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{transf}}}{m_2 c_{\text{liq}} (T_{\text{fus}} - T_2)} + \underbrace{m_1 c_{\text{sol}} (T_{\text{fus}} - T_1) + m_f \Delta_{\text{fus}} h}_{\text{glaçon}}$$


Il reste alors à isoler  $m_f$  dans cette équation.

Cette fois, l'hypothèse est que l'état final est une coexistence solide-liquide, qui permet de calculer la masse de glace fondue. Or la masse de glace fondue ne peut évidemment pas être supérieure à la masse initiale du glaçon : si jamais le calcul numérique donne  $m_f > m_1$ , alors le résultat final n'a pas de sens, ce qui indique que l'hypothèse initiale est fautive. La masse limite est donc celle qui donne  $m_f = m_1$ . On retrouve la même masse limite qu'à la question précédente, ce qui est logique.

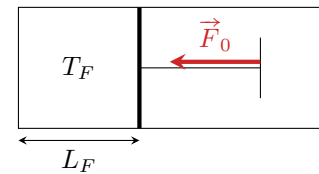
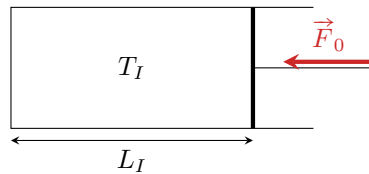
## S'entraîner

### Exercice 4 : Échauffement adiabatique d'un gaz par compression

💡 1 | ✂️ 0

- 
 ▷ Travail d'une force ;  
 ▷ Premier principe.


Considérons un gaz parfait dans une seringue fermée. Un opérateur appuie brusquement sur le piston de la seringue en exerçant une force  $\vec{F}_0$  constante, comme dans la vidéo vers laquelle pointe le QR-code.



- 1 - Justifier que la transformation peut être considérée comme adiabatique.
- 2 - Dédire du premier principe la température finale. Commenter.

### Exercice 5 : Capacité thermique massique du cuivre

💡 1 | ✂️ 0


- 
 ▷ Calorimétrie.

Dans un calorimètre dont la valeur en eau<sup>1</sup> vaut  $\mu = 41$  g, on verse 100 g d'eau. Une fois l'équilibre thermique atteint, la température mesurée est de 20 °C. On plonge alors un barreau métallique de cuivre de masse 200 g à une température initiale de 60 °C. À l'équilibre final, la température est de 30 °C. Déterminer la capacité thermique massique du métal.

La capacité thermique massique de l'eau vaut  $c_{\text{eau}} = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ . On suppose que toutes les capacités thermiques sont constantes dans le domaine de température considéré.

### Exercice 6 : De la glace qui fond

💡 2 | ✂️ 1 | Ⓞ

- 
 ▷ Changement d'état ;  
 ▷ Validation d'hypothèses.


Dans un calorimètre aux parois calorifugées et de capacité thermique négligeable, on introduit une masse  $m_{\text{liq}} = 1,00$  kg d'eau liquide initialement à  $T_1 = 20$  °C. On y ajoute une masse  $m_{\text{gl}} = 0,50$  kg de glace à  $T_2 = 0$  °C. On suppose que la transformation se fait à pression constante  $P_{\text{atm}} = 1$  bar.

*Données :* enthalpie massique de fusion de l'eau  $\Delta_{\text{fus}}h = 3,3 \cdot 10^2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  et capacité thermique massique de l'eau liquide  $c = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

- 1 - On suppose qu'à l'état final l'eau est entièrement sous forme liquide. Déterminer sa température  $T_F$ . Conclure.
- 2 - On suppose maintenant qu'à l'état final l'eau est présente sous forme d'un mélange solide et liquide. Que peut-on dire sans calcul sur l'état final? Déterminer la composition du mélange, c'est-à-dire la masse de chaque phase.

### Exercice 7 : Équilibre d'une enceinte à deux compartiments

💡 2 | ✂️ 2

- 
 ▷ Système composé ;  
 ▷ Second principe.

1. Rappel : la valeur en eau d'un calorimètre renseigne sur sa capacité thermique, un calorimètre de valeur en eau  $\mu$  a par définition la même capacité thermique qu'une masse d'eau liquide  $\mu$ .

Une enceinte indéformable aux parois calorifugées est séparée en deux compartiments par une cloison d'air  $S$  étanche, diatherme et mobile sans frottement. Les deux compartiments contiennent un même gaz parfait. Dans l'état initial, la cloison est maintenue au milieu de l'enceinte. Le gaz du compartiment 1 est dans l'état  $(T_0, P_0, V_0)$  et le gaz du compartiment 2 dans l'état  $(T_0, 2P_0, V_0)$ . On laisse alors la cloison bouger librement jusqu'à ce que le système atteigne un état d'équilibre.

1 - Déterminer l'état final.

2 - Calculer l'entropie créée.

Donnée : variation d'entropie molaire d'un gaz parfait entre deux états d'équilibre :

$$S'_m - S_m = \frac{R}{\gamma - 1} \ln \frac{T'}{T} + R \ln \frac{V'}{V}.$$

### Exercice 8 : Bilan d'entropie

oral banque PT | 💡 2 | ✂ 2



▷ *Changement d'état ;*

▷ *Second principe.*

On dispose d'un litre d'eau à  $20^\circ\text{C}$  que l'on met en contact avec un thermostat à  $100^\circ\text{C}$  pour le vaporiser. Le thermostat est idéal et évolue de façon réversible.

1 - Calculer la variation d'entropie de l'eau et du thermostat et l'entropie créée.

2 - Reprendre la question si l'opération est réalisée en deux temps en commençant par un thermostat intermédiaire à  $60^\circ\text{C}$ . Comparer les résultats obtenus pour les deux transformations.

Données :

▷ au cours d'une transformation  $1 \rightarrow 2$ , l'entropie d'un liquide de capacité thermique  $C$  varie de

$$\Delta S = C \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

▷ capacité thermique massique de l'eau liquide :  $c = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  ;

▷ enthalpie de vaporisation de l'eau :  $\Delta_{\text{vap}}h = 2,26 \cdot 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ .