






BLAISE PASCAL  
PT 2020-2021

Préparation à l'oral

# Thermodynamique

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

Flasher ce code pour  
accéder aux corrigés



## Rapports du jury

**2019 :** Tout comme l'an passé, nous notons une importante baisse en ce domaine. Confusion entre travail et travail indiqué, premier principe pour un système fermé ou pour un système ouvert, lois de Joule appliquées à des phases condensées, etc. La plupart des exercices classiques (machine thermique ditherme, échangeur thermique, turbine ...) ont été malmenés, ce qui est surprenant en PT. Les candidats savent établir « l'équation de la chaleur » même s'ils ont souvent du mal à interpréter les flux en terme de puissance.


**2018 :** Nous avons noté des efforts les années précédentes. Cette année les prestations ont été catastrophiques : confusion entre système fermé et ouvert, entre  $U$  et  $H$ , système non défini, transformation non définie. La variation d'enthalpie est irrémédiablement  $C \Delta T$  même s'il y a changement d'état. « L'équation de la chaleur » est connue mais que de difficultés pour l'établir : système non défini, transformation non définie, variation d'enthalpie confondue avec le transfert thermique, ... Cette question de cours devrait être traitée sans difficulté.

**2017 :** La thermodynamique pose de grandes difficultés. À peu près aucun candidat ne sait établir correctement le « premier principe industriel ». Il est surprenant que pour une transformation isobare les candidats utilisent l'énergie interne. Rappelons qu'il est généralement plus clair d'utiliser le premier principe sous forme globale alors que la quasi-totalité des candidats cherchent à utiliser la forme différentielle. Lorsque les courbes d'état ou des tables sont fournies de nombreux candidats tentent de faire des calculs a priori sans utiliser les valeurs numériques fournies. Les lois de la conduction thermique sont en général connues mais mal comprises d'où des difficultés à expliquer la démarche ou à prendre en compte un élément non habituel comme une source.

**2016 :** La thermodynamique pose de grandes difficultés. Les candidats ne savent pas discerner les systèmes ouverts des systèmes fermés. Il est surprenant que pour une transformation isobare les candidats utilisent l'énergie interne. Rappelons qu'il est généralement plus clair d'utiliser le premier principe sous forme globale alors que la quasi-totalité des candidats cherchent à utiliser la forme différentielle. Il est surprenant que de nombreux candidats soit en difficulté lors de l'étude d'un cycle moteur ou frigorifique et qu'ils éprouvent de grandes difficultés à traiter un détenteur un compresseur ou une turbine. Les lois de la conduction thermique sont en général connues mais mal comprises d'où des difficultés à expliquer la démarche ou à prendre en compte un élément non habituel comme une source.

## Exercice 1 : Expérience de Rüchard

oral banque PT |  3 |  2

-  ▷ Thermodynamique différentielle ;
- ▷ Lien entre thermodynamique et mécanique.

Un flacon de volume  $V_0$  contenant de l'air, modélisé comme un gaz parfait, est fermé par un tube de faible section  $S$ . On lâche dans le tube, sans vitesse initiale, une bille de masse  $m$  de même diamètre que le tube. À l'intérieur du flacon, on dispose un capteur de pression qui délivre une tension proportionnelle à la pression. L'évolution de la tension au cours du temps est reproduite figure 1.

- 1 - Expliquer l'allure de la courbe. Justifier que les frottements sont faibles. Calculer le coefficient d'étalonnage du capteur.
- 2 - Retrouver par le calcul la valeur finale  $P_{\text{éq}}$  de la pression à l'équilibre.
- 3 - Calculer le temps caractéristique de la diffusion thermique au travers des parois du flacon. Justifier que l'on peut considérer l'évolution du gaz comme isentropique.
- 4 - Montrer que  $P - P_{\text{éq}}$  varie linéairement en fonction de la position  $z$  de la bille dans le tube. Exprimer le coefficient

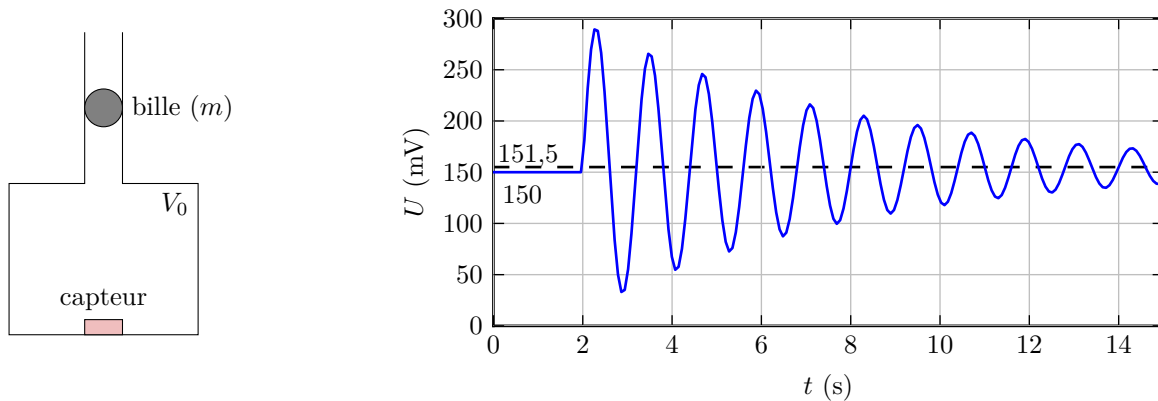


Figure 1 – Expérience de Rüchardt.

de linéarité en fonction de  $P_{\text{éq}}$ ,  $V_0$ ,  $\gamma$  et  $S$ .

5 - Établir l'équation différentielle vérifiée par  $z$  et ensuite celle vérifiée par  $P$ .

6 - Quelles sont les solutions possibles pour  $P$ ? En déduire la valeur de  $\gamma$ .

Données :

- ▷ Volume du flacon  $V_0 = 10 \text{ L}$ ;
- ▷ Section du tube  $S = 2 \text{ cm}^2$ ;
- ▷ Épaisseur du flacon  $e = 15 \text{ mm}$ ;
- ▷ Masse de la bille  $m = 20 \text{ g}$ ;
- ▷ Coefficient de diffusion thermique dans le verre :  $D = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

### Exercice 2 : Masse posée sur un piston

oral banque PT | 💡 2 | ✂ 3



- ▷ Bilan d'entropie;
- ▷ Approche de la réversibilité.

Considérons une enceinte hermétique, diatherme, fermée par un piston de masse négligeable pouvant coulisser sans frottement. Cette enceinte contient un gaz supposé parfait. Elle est placée dans l'air, à température  $T_0$  et pression  $P_0$ .

1 - On place une masse  $m$  sur le piston. Déterminer les caractéristiques du gaz une fois l'équilibre thermique et mécanique atteint.

2 - Déterminer le transfert thermique échangé  $Q$  et l'entropie créée.

3 - On réalise la même expérience, mais en  $N$  étapes successives, par exemple en ajoutant du sable « grain à grain ». Déterminer l'entropie créée dans la limite  $N \rightarrow \infty$ .

### Exercice 3 : Surfusion

oral banque PT | 💡 2 | ✂ 2 | Ⓢ



- ▷ Tables thermodynamiques;
- ▷ Changement d'état;
- ▷ Bilan d'entropie.

Une bouteille remplie de 500 mL d'eau liquide est refroidie très lentement jusqu'à  $-6^\circ\text{C}$  sans qu'elle ne gèle. Un léger coup est donné dans la bouteille, dont le contenu change d'état instantanément. On donne figure 2 des données thermodynamiques pour l'eau.

1 - Déterminer l'enthalpie de fusion de l'eau sous 1 bar ainsi que les capacités thermiques massiques des phases solide et liquide.

2 - Quels sont, intuitivement, les états finaux possibles ?

3 - Par le calcul, lequel est-il ?

4 - Quelle est l'entropie créée lors de la transformation ?

État solide :		État liquide :	
$T$ (°C)	$h$ (kJ · kg <sup>-1</sup> )	$T$ (°C)	$h$ (kJ · kg <sup>-1</sup> )
-10	-354,6	0	0
-9	-352,5	1	4,2
-8	-350,5	2	8,4
-7	-348,4	3	12,6
-6	-346,4	4	16,7
-5	-344,3	5	20,9
-4	-342,2	6	25,1
-3	-340,2	7	29,3
-2	-338,1	8	33,5
-1	-336,1	9	37,7
0	-334,0	10	41,9

Figure 2 – Table thermodynamique pour l'eau.

**Exercice 4 : Congélation d'une bouteille d'eau**

oral banque PT | 💡 2 | ✂ 2



- ▷ Transitoire thermique ;
- ▷ Changement d'état ;
- ▷ Efficacité d'un congélateur.

On place une bouteille de 1,5 L d'eau au congélateur. La température du congélateur est de  $-18^\circ\text{C}$ , celle de la pièce dans laquelle il se trouve de  $20^\circ\text{C}$ . On note  $\mathcal{P} = 250\text{ W}$  la puissance électrique consommée par le congélateur.

Données :

- ▷ capacité thermique massique de l'eau solide et liquide :  $c_s = 2,1\text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  et  $c_l = 4,2\text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  ;
- ▷ chaleur latente de fusion :  $\ell_{\text{fus}} = 3,3 \cdot 10^2\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

- 1 - En supposant que le congélateur évolue à 70 % de son efficacité maximale, déterminer la puissance  $\mathcal{P}_{\text{th}}$  qu'il prélève à l'eau.
- 2 - Représenter la courbe de la température dans la bouteille au cours du temps.
- 3 - Déterminer la durée nécessaire pour que la température de l'eau dans la bouteille atteigne celle du congélateur.

**Exercice 5 : Température d'un mammifère**

oral banque PT | 💡 3 | ✂ 2 | Ⓞ



- ▷ Bilan mésoscopique ;
- ▷ Source thermique ;
- ▷ Coordonnées sphériques.

Un mammifère est modélisé par une sphère de rayon  $R$ . À l'intérieur de son corps, il produit une puissance thermique volumique  $\varphi_0$ . Ce mammifère vit dans un fluide de conductivité thermique  $\lambda$  qui peut être de l'air ou de l'eau. La température loin de la sphère est  $T_0 = 283\text{ K}$ .

On se place en régime stationnaire. On suppose le courant thermique radial à l'intérieur du mammifère,

$$\vec{j}_{\text{th}} = j_{\text{th}}(r) \vec{u}_r.$$

- 1 - Rappeler la loi de Fourier. Interpréter le signe. Quel est l'unité du système international de la conductivité thermique ?
- 2 - Exprimer le flux thermique  $\phi$  entre le mammifère et le fluide environnant en fonction de  $\varphi_0$  et  $R$ . En déduire  $j_{\text{th}}(R)$ .
- 3 - Montrer que pour  $r > R$ ,  $4\pi r^2 j_{\text{th}}(r) = A = \text{cte}$ . Expliciter  $A$ .
- 4 - En déduire l'équation vérifiée par  $T(r)$  dans le fluide et l'intégrer pour montrer que pour  $r > R$ ,  $T(r) = T_0 + \frac{a}{r}$ . Exprimer  $a$ .
- 5 - Déterminer la température cutanée du mammifère  $T_c$ .
- 6 - On donne  $\lambda_{\text{air}} = 5\text{ USI}$  et  $\lambda_{\text{eau}} = 500\text{ USI}$ . Calculer la puissance volumique  $\varphi_0$  pour un mammifère de rayon  $R = 25\text{ cm}$  et de température cutanée  $T_c = 303\text{ K}$ . Pourquoi n'existe-t-il pas de petits mammifères marins alors qu'il existe des petits mammifères terrestres ?

**Exercice 6 : Four industriel**

oral banque PT | 💡 2 | ✂️ 2



- ▷ *Transitoire thermique ;*
- ▷ *Temps caractéristique de diffusion.*

Cet exercice s'intéresse au chauffage d'une pièce dans un four industriel. La pièce est cubique de côté  $a$ , faite d'un matériau de capacité thermique massique  $c_p$ , de conductivité thermique  $\lambda$  et de masse volumique  $\rho$ . La pièce est posée sur un tapis roulant de longueur  $L$  reliant les deux extrémités du four avançant à vitesse constante  $V_0$ . La température de l'air à l'intérieur du four est uniformément égale à  $T_a$ . Dans le four, la pièce reçoit un flux surfacique  $P_s = h(T_a - T)$  avec  $h$  une constante positive. L'objectif est de déterminer la vitesse  $V_0$  du tapis pour que la pièce atteigne la température de consigne  $T_c$ .

- 1 - On suppose que la température de la pièce est uniforme. Déterminer  $T(t)$ .
- 2 - En déduire le temps nécessaire pour atteindre la température de consigne puis la vitesse  $V_0$  en fonction de  $a$ .
- 3 - Établir l'équation de la chaleur à une dimension. En déduire un temps caractéristique de diffusion.
- 4 - En déduire une condition sur  $a$  impliquant  $\lambda$ ,  $h$  et les températures pour que la température dans la pièce soit uniforme en sortie du four.

**Exercice 7 : Ballon d'eau chaude**

oral banque PT | 💡 2 | ✂️ 3 | 🚫



- ▷ *Bilan mésoscopique ;*
- ▷ *Résistance thermique ;*
- ▷ *Coordonnées cylindriques.*

Deux variantes de cet exercice ont été données ... sachant que dans la première variante les deux questions font un exercice entier à elles seules !

Le but de l'exercice est d'étudier l'isolation thermique d'un ballon d'eau chaude. Le ballon est modélisé par un cylindre creux en acier d'épaisseur  $e = 30$  mm, de hauteur  $h = 157$  cm et de rayon  $\ell = 57$  cm dont les parois planes sont parfaitement calorifugées.

*Première version :*

- 1 - Établir l'équation de diffusion dans la paroi du cylindre.
- 2 - En déduire le profil de température en régime permanent.

*Deuxième version :*

- 3 - À partir du premier principe, montrer que le flux thermique sortant d'un cylindre de rayon  $r$  ( $\ell < r < \ell + e$ ) ne dépend pas de  $r$  en régime permanent.

*Questions communes aux deux versions :*

- 4 - Par une analogie à préciser, en déduire la résistance thermique du ballon. La calculer numériquement.

On décide d'isoler le dispositif. Une première solution consiste à utiliser de la laine de verre d'épaisseur  $e' = 300$  mm. Une autre possibilité est de choisir du polyester d'épaisseur  $e'' = 50$  mm.

- 5 - Calculer la nouvelle résistance thermique.
- 6 - Quel est le meilleur choix ?

*Données :* conductivités thermiques

- ▷ Acier :  $\lambda = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ;
- ▷ Laine de verre :  $\lambda' = 0,035 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ;
- ▷ Polyester :  $\lambda'' = 0,022 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

**Exercice 8 : Effet de cave**

exemple officiel banque PT | 💡 2 | ✂️ 3



- ▷ Régime sinusoïdal forcé ;
- ▷ Effet de peau.

Une cave a été creusée en sous-sol d'une vieille propriété du XIX<sup>e</sup> s, dans la vallée de la Loire. Une couche de tuffeau la sépare de la surface terrestre. Cette cave permettait historiquement de conserver les aliments et boissons à l'abri du gel.

Le tuffeau est une pierre tendre dont la masse volumique vaut 1.31 kg/L, sa conductivité thermique 0.41 W/m/K et sa capacité thermique massique est de 1.0 kJ/kg/K.

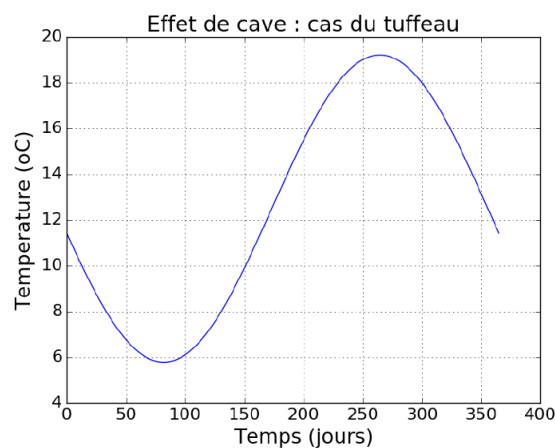
On suppose que la température en surface varie entre -15 ° C au premier janvier ( $t = 0$ ) et 40 ° C au premier juillet sinusoïdalement.

1. Déterminer l'équation différentielle dite de la *chaleur* pour le champ de température  $T(x, t)$ ,  $x > 0$  repérant un point dans le sol pris sur un axe descendant. On fera apparaître la diffusivité du tuffeau et on effectuera l'application numérique.
2. Proposer une expression pour  $T(x = 0, t)$ .
3. En régime forcé, on pose :

$$T(x, t) = T_0 + u(x, t) ; \underline{u}(x, t) = \underline{f}(x)e^{i\omega t}$$

Déterminer l'expression de  $u(x, t)$  et par suite de  $T(x, t)$ , compte tenu des conditions aux limites. On fera apparaître le paramètre  $\delta = \sqrt{\frac{2\lambda}{\rho c \omega}}$  dont on calculera la valeur.

4. On fournit ci-dessous un relevé de la température dans la cave. Déterminer de deux façons différentes l'épaisseur du sol en tuffeau.



5. Quel phénomène similaire rencontre-t-on dans un autre domaine de la physique ? Expliquer pourquoi certaines caves à Champagne sont enterrées à plusieurs dizaines de mètres.

**Exercice 9 : Centrale à vapeur**

oral banque PT | 💡 2 | ✂ 2 | Ⓜ

- Cycle moteur ;
- Exploitation d'une table thermodynamique ;
- Tracé qualitatif d'un diagramme de Mollier.

L'eau d'une centrale à vapeur suit le cycle modèle schématisé figure 3 :

- Chauffage isobare dans le bouilleur jusqu'à l'état de vapeur saturante ;
- Détente adiabatique réversible dans la turbine ;
- Condensation totale jusqu'à l'état de liquide saturant ;
- Compression adiabatique réversible dans la pompe.

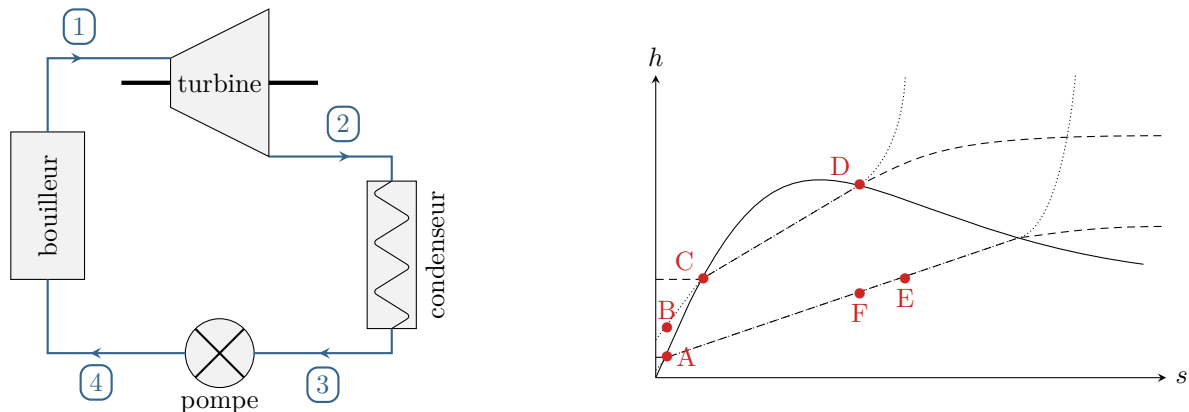


Figure 3 – Cycle d'une centrale à vapeur.

	$p_1 = 65 \text{ bar}$	$p_2 = 0,05 \text{ bar}$
Température de saturation ( $^{\circ}\text{C}$ )	281	33
Enthalpie du liquide saturant ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	1242	138
Enthalpie de la vapeur saturante ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	2778	2561
Entropie du liquide saturant ( $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	3077	476
Entropie de la vapeur saturante ( $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	5849	8392

Figure 4 – Table thermodynamique pour l'eau.

- 1 - Faire correspondre les différents points du cycle (1 à 4) et ceux représentés sur le diagramme de Mollier (A à F). Identifier les deux isobares  $p_1$  et  $p_2$ .
- 2 - En utilisant la table thermodynamique donnée figure 4, déterminer les fonctions thermodynamiques et le titre en vapeur dans l'état 2.
- 3 - Montrer que si l'on néglige la variation de température lors de l'étape 3-4 alors cette étape est isenthalpique. Montrer que le travail indiqué est nul.
- 4 - Calculer le rendement du cycle.

**Exercice 10 : Cycle de Hirn**

exemple officiel banque PT | 💡 2 | ✂ 2 | Ⓜ

- Cycle moteur ;
- Exploitation d'un diagramme entropique.

En sortie d'une chaudière de centrale thermique (point A du diagramme ( $T, s$ ) à compléter en annexe), on fait traverser la vapeur d'eau saturante seule dans un surchauffeur isobare permettant de produire de la vapeur sèche avec un débit massique de  $85 \text{ kg/s}$  à  $100 \text{ bar}$  et  $550^{\circ}\text{C}$  (B). Cette vapeur est ensuite détendue dans une turbine adiabatique idéale jusqu'à la pression atmosphérique (C).

1. Placer les points A, B et C sur le diagramme.
2. Rappeler et démontrer le premier principe industriel.
3. Calculer la puissance mécanique fournie par la turbine.

- On mesure en réalité une fraction massique de vapeur en sortie de 0.95 ( $C'$ ). En déduire le taux d'entropie créée par unité de temps dans la vapeur et la puissance mécanique extraite. A quoi est due cette entropie créée? Quel est le *rendement isentropique* défini comme le rapport entre les puissances mécaniques extraites réelle et idéale?

Historiquement, la vapeur était ensuite directement libérée dans l'atmosphère, créant d'impressionnantes panaches de fumée blanche. Aujourd'hui, on récupère une puissance thermique en condensant le fluide en sortie du condenseur réel ( $C'$ ) dans un condenseur isobare ( $D$ ) refroidi par le fluide extérieur que l'on souhaite chauffer, composant par exemple un circuit de chauffage.

- Quel est le débit volumique en sortie du condenseur? Calculer la puissance thermique ainsi générée. Déterminer le coefficient de cogénération, rapport de la puissance mécanique et de la puissance thermique récupérées.

