

# Préparation aux oraux MP/MPI

## TD4 – Thermodynamique & Mécanique quantique

### 1 Résolution de problème CMT Dossier 2025 / CCINP Bouchet 2025 : Surfusion

On a 20 g d'eau à l'état liquide initialement à  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  (état de surfusion). La température extérieure est de  $0^{\circ}\text{C}$ . La transformation se fait rapidement sous une pression de 1 bar.

- 1) Calculer la masse de glace formée.
- 2) Calculer la variation d'entropie
- 3) Citer une situation où on observe la solidification de l'eau depuis un état de surfusion.

#### Données

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

Enthalpie massique de fusion de l'eau :  $h_{fus} = 334\text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

Gaz parfait de quantité de matière  $n$ , de température  $T$ , de volume  $V$  et de pression  $P$  :

- $S(T, V) = \frac{nR}{\gamma-1} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + nR \ln\left(\frac{V}{V_0}\right) + S_0$
- $S(P, V) = \frac{nR}{\gamma-1} \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) + \frac{nR\gamma}{\gamma-1} \ln\left(\frac{V}{V_0}\right) + S_0$
- $S(T, P) = \frac{nR\gamma}{\gamma-1} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - nR \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) + S_0$

Phase condensée idéale de capacité thermique  $C$  et de température  $T$  :

$$S(T) = C \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + S_0$$

### 2 Exercice « académique » CCINP Galot 2023 : Ensemble de 2 enceintes



On considère 2 enceintes a et b, de volume total  $2V$ , séparées par une paroi bougeant sans frottement.

Chaque enceinte contient  $n$  mol d'un gaz supposé parfait, et les parois sont athermanes.

L'enceinte a contient une résistance chauffante.

A l'instant  $t=0$ , les deux enceintes ont même volume  $V$ , sont à la même pression  $P_0=1.0$  bar température  $T_0=300$  K.

On atteint un état d'équilibre après un instant  $\tau$ .

A  $t=\tau$ , l'enceinte est à l'état  $(P_{a2}, V_{a2}, T_{a2})$  (et l'enceinte b  $(P_{b2}, V_{b2}, T_{b2})$ ), où  $P_{a2}=2\cdot P_0$ . On considère la transformation lente.

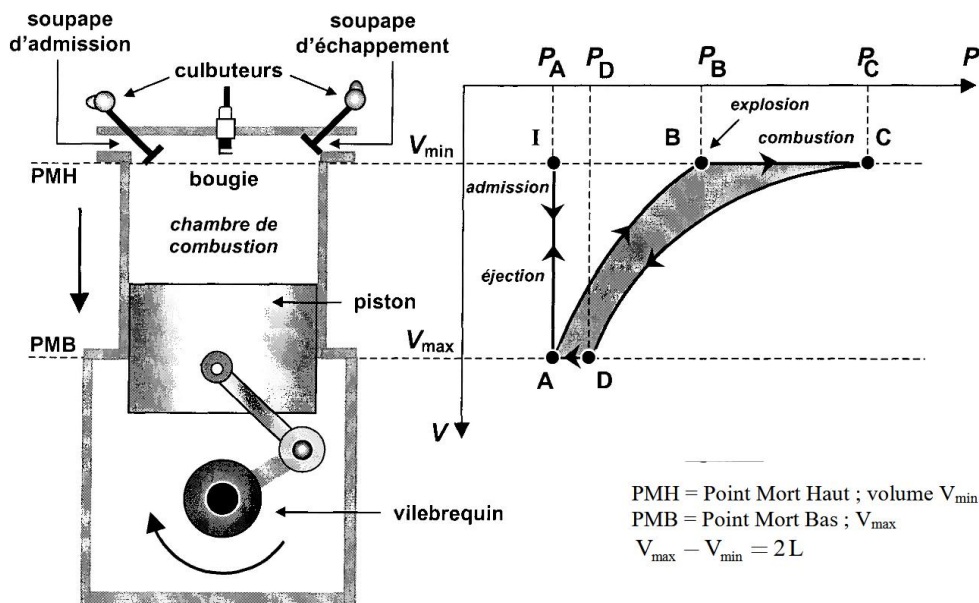
- a) Déterminez  $P_{b2}$ ,  $V_{b2}$  et  $T_{b2}$ .
- b) En déduire  $V_{a2}$  et  $T_{a2}$ .
- c) Déterminez  $\Delta U_a$  et  $\Delta U_b$ , variations d'énergie interne lors de la transformation des enceintes.
- d) En déduire les travaux  $W_a$  et  $W_b$  reçu respectivement par les enceintes.
- e) Déduisez  $\tau$ .

### 3 Exercice « académique » CCMP et CCS : Cycle de Beau de Rochas

Le fonctionnement d'un moteur d'automobile est schématisé sur le diagramme de Watt ci-dessous où  $V$  est le volume de la chambre du cylindre et  $P$  la pression du gaz contenu dans cette chambre. Les étapes successives du cycle sont :

- I→A : Admission du mélange air-essence à la température ambiante (300 K) et sous la pression atmosphérique (1 bar).
- A→B : Compression du mélange, adiabatique et réversible.
- B→C : En B une étincelle provoque l'explosion suivie d'une compression isochore.
- C→D : En C fin de combustion suivie d'une détente adiabatique et réversible du gaz brûlé.
- D→A : L'ouverture de la soupape ramène le gaz brûlé à pression atmosphérique.
- A→I : Ejection des gaz brûlés.

L'essence est de l'octane : masse volumique  $\rho = 720 \text{ kg.m}^{-3}$ , masse molaire  $M = 114 \text{ g.mol}^{-1}$ . Le mélange initial et le gaz brûlé sont assimilés à un même gaz parfait de coefficient isentropique  $\gamma$  égal à 1,35 et le nombre de moles présent dans la chambre est supposé inchangé par la combustion interne. On rappelle que le pourcentage molaire de dioxygène dans l'air est de 20,9% et que la constante des gaz parfaits vaut :  $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ .



- 1- Justifier les différents éléments de modélisation : adiabaticité ou caractère isochore de certaines étapes, hypothèses de réversibilité, approximation du gaz parfait et choix de la valeur 1,35 pour  $\gamma$  sans changement lors de la combustion. Expliquer également pourquoi il est possible d'étudier le moteur en raisonnant sur un fonctionnement selon des cycles fermés malgré les phases d'admission et d'éjection. A combien d'aller-retour du piston un cycle du moteur correspond-il ?
- 2- Définir puis exprimer le rendement thermique  $r$  du moteur en fonction du rapport volumétrique  $a = V_{\max} / V_{\min}$ . Commenter, calculer  $r$  pour  $a = 9$ , puis calculer le rendement global du moteur sachant que le rendement mécanique est de 75%.
- 3- Sachant que le mélange air-essence s'enflamme spontanément si sa température atteint  $430^\circ\text{C}$ , ce qui nuit au bon fonctionnement du moteur, montrer qu'il faut limiter  $a$  à une valeur  $a_{\max}$  que l'on déterminera.
- 4- Le gaz aspiré lors de l'étape d'admission est un mélange air-octane ( $\text{C}_8\text{H}_{18}$ ) dans les proportions stœchiométriques de la réaction de combustion qui a lieu lors de la phase B→C. Ecrire cette réaction de combustion et en déduire la masse d'octane injectée à chaque admission. Pourquoi choisit-on les proportions stœchiométriques ?
- 5- Sachant que la quantité d'énergie libérée par la combustion de l'octane est de 44700 kJ par kg, calculer la température et la pression atteintes en fin de combustion. Comment expliquer les valeurs anormalement élevées obtenues ?
- 6- L'automobile se déplace sur une autoroute et le tableau de bord indique 110 km/h et 3500 tours par minutes. En utilisant le modèle précédent, calculer la consommation de carburant aux 100 km et la puissance développée, que l'on donnera en chevaux (un cheval-vapeur = 736 W). Commenter.

#### 4 Résolution de problème **CMT** Peyretailade 2025 : Profil de température

On considère un cylindre de longueur  $L = 2,5 \text{ m}$ , d'axe  $(Oz)$ , calorifugé latéralement, parcouru par un courant d'intensité  $I$ .

La température extérieure vaut  $25^\circ\text{C}$ .

☞ En régime stationnaire, déterminer le profil de température au sein du cylindre :  $T(z)$ .

#### 5 Résolution de problème **CCINP** Dossier 2024 : Dauphin

Un grand dauphin pèse en moyenne 150 kg et mesure en moyenne 3 mètres de long. Il mange en moyenne 5 kg de poisson par jour, dont l'apport énergétique moyen est de 100 kcal pour 100 g de poisson (1 kcal = 4 kJ). Sa température interne est de  $36^\circ$ . Il est isolé de l'eau par une couche de graisse de conductivité thermique  $\lambda_g = 0,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

☞ Estimer l'épaisseur moyenne de la couche de graisse d'un grand dauphin.

#### 6 Exercice « académique » **CMT** Ramage 2024 : Ailette de refroidissement

Considérons une tige métallique cylindrique d'axe  $(Ox)$  utilisée pour dissiper la chaleur d'un composant électronique : on parle d'ailette de refroidissement.

La tige a une longueur  $L$  et un rayon  $a$  avec  $L \gg a$ .

Une des bases de la tige est en contact thermique parfait avec le composant électronique qu'on assimilera à un thermostat de température  $T_0$ . Le reste de la tige se trouve dans l'air ambiant de température  $T_e < T_0$ .

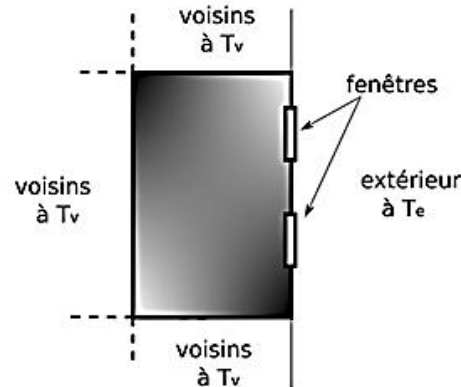
La conductivité thermique du métal est  $\lambda$  et le coefficient de transfert conducto-convectif entre la tige et l'air est noté  $h$ .

- 1) Exprimer le flux de chaleur surfacique cédé à l'air par la tige.
- 2) Déterminer l'équation différentielle vérifiée par  $T(x)$ .
- 3) Résoudre cette équation.
- 4) Calculer la puissance totale dissipée par l'ailette.
- 5) Comment optimiser la conception des ailettes de refroidissement pour optimiser l'efficacité de dissipation de chaleur.

## 7 Résolution de problème **CCMP** : Chauffage d'une chambre

Alexandre vit dans une chambre d'étudiant de  $18\text{ m}^2$  au 3<sup>e</sup> étage, entourée d'appartements voisins, sauf sur une façade donnant sur la rue, et percée de deux fenêtres sur balcon. Les caractéristiques physiques de son logement sont données ci-dessous.

- Proposer une méthode pour estimer sa facture annuelle de chauffage électrique.



### DONNÉES

Dimensions de la chambre :  $L \times D = 6 \times 3 = 18\text{ m}^2$ . Hauteur  $H = 3.5\text{ m}$ .

Murs : épaisseur  $e = 25\text{ cm}$ , conductivité  $k = 0.9\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ .

Enduit extérieur côté rue : épaisseur  $e' = 2\text{ cm}$ , conductivité  $k' = 0.1\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ .

Chaque fenêtre : surface  $S = 1.5\text{ m}^2$ , épaisseur effective  $e_f = 2\text{ cm}$ , conductivité effective  $k_f = 0.05\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ .

Coefficient de Newton (statique) :  $h = 5\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ .

Coefficient de Newton (ventilé) :  $h = 20\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ .

Capacité thermique de l'air :  $c = 1.3\text{ kJ m}^{-3}\text{ K}^{-1}$ .

Température intérieure (Alexandre présent) :  $T_i = 21^\circ\text{C}$ .

Température en cas d'absence (voisins) :  $T_v = 17^\circ\text{C}$ .

Température extérieure :  $T_e = 5^\circ\text{C}$ .

Coût de l'électricité :  $0.16\text{ euro/kWh}$ .

Puissance émise par un adulte :  $P_a = 50\text{ W}$ .

Pertes thermiques par ventilation :  $P_{vent} = 4\text{ W}$ .

---

## 8 Exercice « académique » CCINP Peyretailade 2025 : Puits de potentiel infini

On considère une particule quantique non relativiste de masse  $m$  placée dans un puits de potentiel infini unidimensionnel, défini par :

$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 \leq x \leq L \\ +\infty & \text{sinon} \end{cases}$$

On s'intéresse à un état stationnaire de la particule.

1) Montrer que l'énergie d'un tel état s'écrit  $E_n = \frac{n^2 h^2}{8mL^2}$ ,  $n \in \mathbb{N}^*$ .

2) A l'aide de l'inégalité de Heisenberg, donner une estimation de l'énergie fondamentale d'une particule dans ce puits.

On sait réaliser des puits quantiques de largeur  $L = 6 \text{ nm}$  constitués de couches de semi-conducteurs. On admet qu'à l'intérieur du puits, les électrons ont une masse effective  $m_e^* = 0,067 \cdot m_e$ .

3) Déterminer la valeur de la fréquence la plus faible du photon émis lors de la transition entre deux niveaux d'énergie. En déduire la longueur d'onde correspondante. Commenter.

## 9 Résolution de problème : Boîte à électron

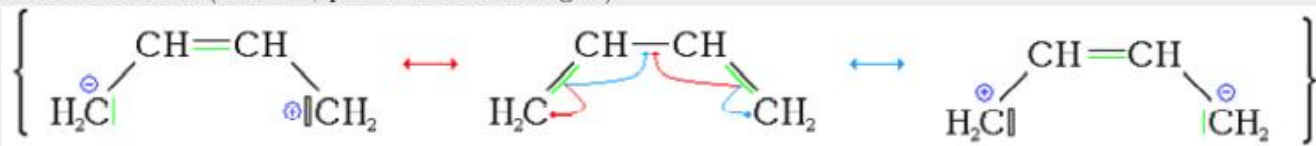
D'après les extraits de divers articles Wikipédia  
*Carotène, butadiène, mésomérie*

L'alternance liaison simple - doublet liant dans une molécule est une "boîte à électron" à une dimension

En chimie, la conjugaison désigne une délocalisation d'électrons dans les molécules, que l'on représente par une combinaison virtuelle de structures aux électrons localisés appelées mésomères, lorsqu'on a par exemple une alternance liaison simple - liaison double - liaison simple, comme dans un diène conjugué.

Le diène conjugué le plus simple est le buta-1,3-diène (en dessous : ses formules mésomères), un hydrocarbure de formule  $C_4H_6$  gazeux incolore et inflammable. C'est un important réactif qui est utilisé dans la synthèse de nombreux polymères.

La molécule de  $\beta$ -carotène  $C_{40}H_{56}$  possède onze doubles liaisons conjuguées. Elle peut absorber une lumière bleu-indigo et donne sa couleur orange à la carotte. La coloration des plumes du flamant rose est due à l'accumulation de carotène contenu dans son alimentation (à droite, photo de Aaron Logan).



Hypothèses :

- Le squelette carboné de la molécule est vu comme un puits de potentiel infini, i.e. une boîte quantique « 1 D » de longueur  $a$  ;
- Les électrons mobiles sont indépendants les uns des autres et sont libres de se déplacer sur le squelette carboné ;
- Chaque niveau d'énergie  $E_n$  peut être au maximum peuplé de 2 électrons mobiles.

L'état fondamental de la molécule de buta-1,3-diène peut être représenté ainsi :

- Un niveau d'énergie appelé « plus haut niveau occupé », en anglais HOMO pour Highest Occupied Molecular Orbital,
- Un niveau d'énergie appelé « plus bas niveau vacant », en anglais LUMO pour Lowest Unoccupied Molecular Orbital

☞ Estimer la longueur d'onde d'absorption du buta-1,3-diène.

**Donnée** : longueurs de liaison en pm

d(C-C)	d(C=C)	d(C≡C)
154	134	120

## 10 CCS1 : Effet photoélectrique

On souhaite déterminer la constante de Planck en utilisant l'effet photoélectrique. Pour cela, on réalise le montage représenté figure 1.

1. Rappeler en quelques mots en quoi consiste l'effet photoélectrique. En quelle année, Albert Einstein proposait-il une explication faisant intervenir la notion de particule de lumière ?
2. Montrer que le circuit électrique permet de faire varier la tension  $V$  de  $-E$  à  $+E$ . En considérant que la résistance équivalente au circuit électrique dans l'ampoule est très grande devant les autres résistances du circuit, exprimer  $V$  en fonction de  $x$ ,  $E$ .
3. Dans un premier temps, on constate que quelle que soit la valeur de  $V$ , l'intensité détectée est nulle si la fréquence du rayonnement incident,  $f$ , est inférieure à une certaine valeur, appelée pour la suite  $f_0$  et ce quelle que soit la puissance du rayonnement incident. En quoi ce résultat est-il incompatible avec une approche ondulatoire du phénomène ?
4. Dans un second temps, on constate que pour une fréquence donnée, il existe une valeur du potentiel  $V$ , dont la valeur absolue est notée  $V_{\text{arrêt}}$ , pour laquelle le courant détecté s'annule et ce quelle que soit la puissance de l'onde incidente. En quoi ce résultat est-il incompatible avec une approche ondulatoire du phénomène ?
5. La relation proposée par Einstein est

$$hf = K_{\text{max}} + \Phi \quad (1)$$

où  $K_{\text{max}}$  est l'énergie maximale d'un photo-électron et où  $\Phi$  est le travail d'extraction du métal.

- a. Interpréter physiquement l'équation 1 et notamment préciser pourquoi un électron peut être éjecté du métal avec une énergie cinétique inférieure à  $K_{\text{max}}$ .
  - b. Récrire l'équation 1 en faisant intervenir  $f_0$  et  $V_{\text{arrêt}}$ .
6. Afin de mesurer  $h$ , on détermine  $V_{\text{arrêt}}$  pour différente valeur de  $f$ . Le graphe obtenu est représenté figure 2. En déduire la valeur expérimentale de  $h$ . Conclure.

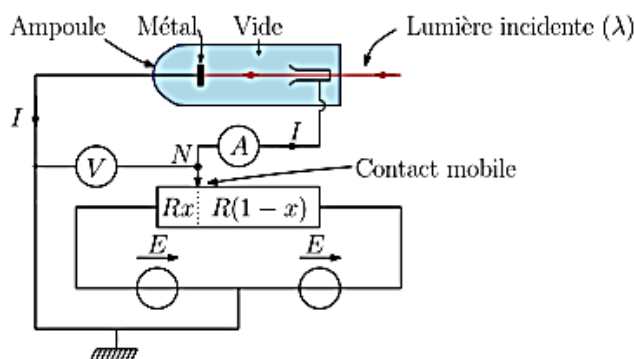
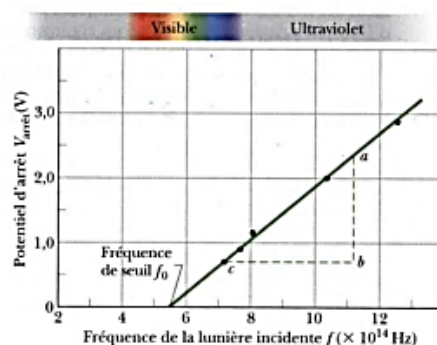


Figure 1 Dispositif expérimental



$$ab = 2,35 \text{ V} - 0,72 \text{ V}$$

$$bc = (11,2 - 7,2) \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Figure 2  $V_{\text{arrêt}}$  en fonction de  $f$

## Rapports

### Thermodynamique

#### CCINP

- Une analyse du problème est nécessaire. Les exercices démarrent en général directement sur des calculs, souvent des restitutions de la mémoire, non adaptées au dispositif proposé. Une étude rigoureuse doit être menée pour considérer l'état du système avant la transformation et à la fin de la transformation.
- La loi de Laplace continue d'être appliquée sans vérification des hypothèses associées.
- Les cycles ne sont pas toujours tracés correctement. Rappelons par exemple que lors d'une compression, la pression doit forcément augmenter et le volume baisser.
- Les changements d'état sont toujours aussi peu compris.
- Il est impératif de maîtriser parfaitement le fonctionnement des moteurs et récepteurs thermiques avec en particulier le signe des échanges énergétiques associés à la convention choisie, sans quoi aucun exercice ne peut démarrer. On voit cependant certains candidats faire preuve d'une certaine aisance dans le calcul des transferts thermiques étape par étape, alors qu'ils n'ont aucune idée du fonctionnement de la machine.
- Les machines thermiques avec pseudo-sources posent un problème insurmontable à la plupart des candidats qui n'ont en général pas la moindre idée de la méthode de résolution : soit en considérant toute la machine sur une durée infinitésimale, soit en considérant les cycles de la masse élémentaire de fluide caloporteur et le premier principe appliqué à la/les pseudo-source(s). Il est nécessaire d'avoir réfléchi à ce type de problématique somme toute assez courante avant de se présenter aux oraux.
- Les systèmes en écoulement sont nécessairement traités par le premier principe pour un système ouvert (programme MP). Il est regrettable que les candidats ne sachent pas passer de la version massique à la version en terme de puissance. Il est par ailleurs important de savoir lire un diagramme (P,h) et d'identifier les étapes de contact avec source froide et source chaude dans un cycle.
- La distinction entre les études « macroscopiques », où on considère la température uniforme et on cherche son évolution au cours du temps et les études « locales », où on est en régime permanent et on étudie son évolution spatiale, est parfois non maîtrisée, ce qui fait partir l'exercice dans des directions qui ne correspondent pas à l'énoncé.
- Pour la conduction thermique, comme en électromagnétisme, il faut tout d'abord s'intéresser aux symétries du système avant d'effectuer un bilan thermique. La direction du vecteur densité de courant thermique peut être donnée immédiatement dès qu'on a des informations sur les variables dont dépend le champ de température  $T(M)$ .
- Dans le cas où le sujet demande de réaliser un bilan (conduction en particulier), l'équation vérifiée par la température s'obtient par un bilan thermique sur un système dont la géométrie dépend de la symétrie du problème. Les candidats partent souvent d'une équation déjà « avancée », sans réussir à expliciter d'où vient cette équation. Peu ont assez de recul pour comprendre que tout part du premier principe. Il importe également de savoir expliquer « par des mots et des phrases » la signification des termes écrits.
- Lorsqu'on a établi la conservation d'un flux en régime stationnaire sans terme source, il faut introduire le flux comme constante et pas une constante quelconque non dimensionnée à un flux.
- Un échange conducto-convectif n'apparaît pas dans le bilan en volume mais seulement dans la condition aux limites.
- Il convient de savoir repérer les résistances thermiques en série et en parallèle, c'est un outil très puissant.

- Le terme de source de la puissance volumique de l'effet Joule doit être connu, en lien avec l'électromagnétisme.

## CCS

Il convient toujours de commencer par la définition spatiale du système pour lui appliquer un premier principe durant un intervalle de temps précisé. L'analyse physique du signe d'un éventuel terme de production ou d'un transfert conducto-convectif est valorisée.

L'obtention d'une résistance thermique se fait bien plus rapidement, quelle que soit la géométrie adoptée, en exploitant l'uniformité du flux en régime permanent (et en l'absence de source) et la méthode de séparation des variables.

L'établissement du rendement ou de l'efficacité de Carnot, bien que très classique, est parfois trop laborieuse, ce qui, même si le résultat est connu par cœur, peut être pénalisant.

### [MP]

La démonstration de cours du premier principe industriel (pour un fluide en écoulement entre une entrée et une sortie) est une question de cours dont le jury attend à minima les grandes étapes : définition d'un système fermé construit à  $t$  et à partir de la surface de contrôle et des masses entrante et sortante ; système fermé auquel est appliqué le premier principe pour l'énergie totale en exploitant l'hypothèse de régime stationnaire ; recenser les transferts énergétiques et en particulier justifier l'expression du travail des forces de pression.

En cas de cycle avec changement d'état (climatisation ou pompe à chaleur par exemple), la relation entre chaleur latente et variation d'entropie ainsi que l'analyse physique du signe des transferts thermiques engagés sont attendues.

## CCMP

Le premier principe de la thermodynamique n'est pas toujours clairement cité : certains candidats s'étonnent encore quand l'examinateur leur demandent quel postulat de la physique est utilisé quand ils parlent de « bilan de chaleur » ou de « bilan d'énergie ».

Quand on applique les principes de la thermodynamique, il est indispensable de définir le système et la transformation (état initial, état final) envisagés. En particulier, la démonstration du premier principe industriel a donné lieu à de nombreuses imprécisions sur ces points, ce qui la rendait inexploitable.

On trouve encore des utilisations inappropriées des notations en  $d$ ,  $\Delta$ ,  $\delta$  ce qui conduit à proposer des mélanges de grandeurs élémentaires et non élémentaires dans une même expression, parler de « variation de chaleur ou de travail » (si le travail d'une force variait, il présenterait une certaine valeur dans l'état initial avant toute évolution, ce qui bien sûr, n'aurait pas de sens !). Il faut accorder une attention particulière à la distinction entre fonctions d'état d'un système thermodynamique et grandeurs échangées lors d'une évolution, ainsi qu'aux notations qui s'y rattachent, sous peine de commettre des non-sens scientifiques très pénalisants.

Comme dans les autres branches de la physique, la manipulation des grandeurs algébriques pose problème à certains candidats, qui ne pensent pas à définir l'orientation de la mesure des quantités d'énergie échangées, ou mettent systématiquement des valeurs absolues autour des expressions des rendements ou de l'efficacité des machines thermiques, ce qui révèle une crainte d'erreur de signe, éludée par le « bouclier » de la valeur absolue.

L'utilisation des deux principes de la thermodynamique dans le cadre des changements d'état physiques de corps pur pose encore de grosses difficultés à certains candidats, ainsi que l'exploitation des diagrammes d'état. Ces parties du programme ne doivent pas être négligées.

L'étude des transferts thermiques en tant que phénomènes de transport est un domaine où le premier principe est insuffisamment cité dans les démonstrations, dont une bonne part démarre l'exposé par un parachutage de l'équation de la chaleur (*i.e.* de la diffusion thermique), sans aucune discussion physique préalable.

Les hypothèses de stationnarité et d'utilisation de la loi de Fourier ne sont pas suffisantes pour garantir  $\Delta T = 0$ . Il faut aussi qu'il n'y ait pas de sources d'énergie thermique dans la zone de conduction : cette hypothèse est souvent oubliée.

Dans le cas d'un régime de transferts thermiques stationnaire sans source, il est maladroit de redémontrer l'équation de la chaleur en toute généralité pour la simplifier ensuite : il est bien plus rapide d'utiliser ces hypothèses dès le début de la démonstration pour établir rapidement la conservation du flux thermique, puis exploiter la loi de Fourier.

Le concept de résistance thermique et les analogies avec l'électrocinétique permettent aussi de gagner du temps quand le problème s'y prête. Certains candidats semblent peu familiers des résistances thermiques, ont des difficultés à établir leur expression et à les utiliser correctement (par exemple reconnaître une association série ou parallèle de conducteurs thermiques, appliquer le « diviseur de tension thermique »...)

[Rapport MPI] : Il faut connaître la signification des signes  $d$ ,  $\delta$  et  $\Delta$  qui ne sont ni facultatifs ni interchangeables, et en particulier savoir distinguer les grandeurs, qui dépendent du chemin suivi dans une évolution, et les fonctions d'état.

Les conditions d'utilisation des résistances thermiques doivent être bien connues. On observe parfois une utilisation inappropriée en régime non quasi-stationnaire ou quand des sources d'énergie thermique sont présentes (effet Joule par exemple).

Les calculs d'entropie d'échange lorsque les sources sont de température variable, qu'il y a un changement d'état, ou qu'un solide n'est pas de température homogène posent des difficultés.

## CMT

La thermodynamique doit faire l'objet d'une approche minutieuse. Une modélisation des cycles ou transformations sous forme de schéma est pertinente. Ceci permet de limiter les erreurs de signe et les confusions dans les échanges.

En diffusion thermique, le bilan doit être adapté à la situation : géométrie, régime stationnaire ou non. On ne peut faire l'impasse sur cette étape en voulant utiliser directement des résultats du cours. Une réflexion doit être posée sur le choix d'une approche intégrée ou locale. Nombre de problèmes pouvant être résolus directement par des méthodes intégrées ont subi un traitement local puis une intégration.

La physique statistique donne souvent lieu à des calculs lourds dont le sens physique n'est pas mis en avant.

## ENS

— même, s'il peut être intéressant de connaître l'équation de diffusion, il faut surtout être capable de faire un bilan thermique associé au premier principe, notamment lorsque d'autres transferts thermiques apparaissent dans le problème : transfert conducto-convectif, effet Joule, système ouvert...

### [MP]

— un compresseur en régime permanent ne s'étudie pas comme un piston en système fermé. Le travail utile massique  $w_u$  ne s'obtient pas à l'aide de  $-\int Pdv$  mais par  $\int vdP$  (pour un fonctionnement supposé réversible, où l'on néglige les variations d'énergies cinétique et potentielle);

### [MP]

— sans même aborder son domaine de validité, le théorème d'équipartition de l'énergie est très rarement énoncé convenablement, ce qui conduit rapidement les candidats à des impasses (comment traiter la situation avec un terme de la forme  $ax^2 + bx$  ou de la forme  $ax \equiv ay^2$  en posant  $y = \sqrt{x}$ ...);

## X

Certains candidats n'ont pas compris la notion de « fonction d'état », et peinent donc à raisonner correctement sur un cycle.

Des imprécisions ont été constatées de manière récurrente sur l'énoncé et la compréhension du second principe de la thermodynamique. En particulier, la propriété d'extensivité de l'entropie est souvent oubliée.

Il convient de rappeler que le travail élémentaire implique par défaut la pression extérieure, celle-ci pouvant être prise égale à la pression du système si la transformation est réversible. Si cette simplification est adoptée, il demeure cependant essentiel de l'expliquer et de préciser, le cas échéant, pourquoi la transformation peut être considérée réversible. L'identification des étapes où un système est mis en contact avec la source froide ou chaude dans un cycle pose des problèmes à beaucoup de candidats.

Certains candidats éprouvent des difficultés à établir si une transformation peut être qualifiée d'isotherme ou d'adiabatique, laissant présager que la notion d'échanges de chaleur n'est pas bien assimilée.

Si les candidats connaissent la loi des gaz parfaits, peu connaissent la loi de Joule  $U=U(T)$ .

En thermodynamique statistique, la compréhension de la notion d'équipartition de l'énergie n'est souvent pas bien acquise. En particulier des candidats peinent à recenser convenablement le nombre de degrés de liberté du système.

Pour les exercices portant sur la conduction thermique, il est essentiel de savoir mener un bilan d'énergie, complet, sur un volume infinitésimal.

## Physique quantique

### CCINP

- Le modèle de Bohr ainsi que la notion de photon font partie des capacités exigibles du cours de MPSI. Peu de candidats cependant sont en capacité de relier les deux niveaux d'énergie d'une transition électronique et l'énergie du photon émis ou absorbé.
- L'équation de Schrödinger n'est pas systématiquement fournie par l'énoncé. Il importe donc de la connaître, en particulier sa forme indépendante du temps.
- Le principe d'indétermination de Heisenberg n'est pas encore maîtrisé. Son application dans l'étude de situations « simples » (énergie de confinement, diffraction) donne toujours lieu à des développements extrêmement maladroits.
- Confusion fréquente entre le photon et les particules matérielles. La relation de de Broglie sur la quantité de mouvement est souvent méconnue, voire souvent confondue avec la relation d'Einstein.
- Dans le cas des marches ou barrières de potentiel, les solutions de l'équation stationnaire de Schrödinger ne doivent pas être données sous la forme d'un  $A\cos(kx) + B\sin(kx)$ , mais sous la forme  $Ae^{ikx} + Be^{-ikx}$ , autrement dit sous la forme d'ondes progressive et régressive. Il est, entre autres, impossible de faire apparaître un coefficient de réflexion si l'on n'a pas opté pour le bon formalisme.
- L'analyse des ondes de de Broglie (incidente ou réfléchie) ne peut se faire sur la partie spatiale seule : le terme temporel est nécessaire pour comprendre le sens de propagation de l'onde de matière.
- Par ailleurs, les candidats confondent parfois exponentielle complexe ou réelle dans l'application de conditions aux limites « à l'infini » : une exponentielle complexe ne diverge jamais !
- Nombreux sont les candidats qui ignorent ce qu'est un électronvolt.
- D'assez grosses difficultés avec la statistique de Boltzmann (programme MP) pour passer du facteur de Boltzmann à la probabilité, même pour deux états seulement.

### CCS

Dans ces deux domaines, les calculs sont souvent bien menés, mais le jury regrette que l'analyse physique des résultats obtenus ne soient pas du même niveau. Il est donc conseillé aux futurs candidats de systématiquement chercher à faire sens aux différentes situations rencontrées.

### CCMP

Le passage de l'équation de Schrödinger dépendant du temps à l'équation différentielle vérifiée par la partie spatiale de la fonction d'onde dans le cas d'états stationnaires pose des difficultés à certains candidats.

On relève parfois des erreurs de signe dans la résolution de l'équation de Schrödinger, que des candidats ne remarquent pas, y compris dans les cas les plus classiques traités en cours : Par exemple, des solutions en exponentielles réelles sont manifestement non pertinentes dans le cas d'un puits de potentiel infini et cela devrait être remarqué sans l'aide de l'examineur.

Si le lien entre fonction d'onde et densité de probabilité est généralement connu, on relève malgré tout des difficultés à interpréter des graphes expérimentaux de densité de probabilité d'une particule en relation avec la fonction d'onde établie par résolution de l'équation de Schrödinger.

Les analogies entre la mécanique quantique et la physique des ondes dans d'autres domaines -cordes vibrantes par exemple- ne sont pas toujours bien perçues ni exploitées.

Certains candidats pensent qu'une combinaison linéaire d'états stationnaires décrit un nouvel état stationnaire. La notion de densité de courant de probabilité n'est pas toujours bien assimilée.

En thermodynamique statistique, le passage d'une particule à  $N$  particules indépendantes pose encore des difficultés, pour justifier à partir de l'écart quadratique énergétique, la négligeabilité des fluctuations relatives d'énergie dans la limite des systèmes à grand nombre de particules.

[Rapport MPI] : L'équation de Schrödinger, qui est souvent connue approximativement, fait partie des notions exigibles.

Les relations d'incertitude d'Heisenberg sont en général connues mais parfois sans être comprises.

## CMT

Il faut être attentif à la situation proposée. Il est possible de résoudre l'équation de Schrödinger même si le potentiel énergétique n'est pas constant par morceaux.

Il est regrettable que les expériences de physique quantique au programme de CPGE ne soient pas connues.

## X

Les candidats doivent savoir écrire l'équation de Schrödinger. Les techniques de résolution de cette équation en une dimension doivent être connues ; en particulier, les candidats doivent faire la différence entre les exercices où on recherche un état lié et ceux où on recherche un état libre. La justification physique des conditions de continuité ou des propriétés de symétrie de la fonction d'onde reste souvent confuse.

Lorsque le candidat recherche une solution sous la forme d'une combinaison d'exponentielle, il ne doit pas perdre de vue que les coefficients intervenant dans cette combinaison linéaire sont eux-mêmes des nombres complexes.

De nombreux candidats ont des difficultés pour représenter qualitativement, i.e. sans faire de calcul, l'allure de la fonction d'onde dans le cas de potentiels simples en une dimension, par exemple pour traduire des conditions aux limites, ou encore pour raccorder graphiquement des fonctions d'onde lorsque le potentiel est défini par morceaux. La notion de normalisation d'une fonction d'onde est généralement connue, mais ses implications sont souvent mal maîtrisées.