

# Préparation aux oraux MP/MPI

## TD4 – Thermodynamique & Mécanique quantique

---

### 1 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°. 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.

### 2 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.

### 3 Résolution de problème **CMT** Charitat 2024 : Température au sein de la croûte terrestre

La croûte continentale terrestre a une épaisseur  $e \approx 35 \text{ km}$ , elle est équivalente à une couche homogène de conductivité thermique  $\lambda = 23 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Les éléments radioactifs dissipent une puissance volumique  $p_v = 3 \cdot 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}$ .

A la surface de la Terre, on sait que la température varie 2,3 K par mètre.

☞ Estimer la température à la profondeur  $e$ .

### 4 Exercice « académique » **CCINP** Vennat 2024 : Isolation thermique

On considère un cylindre de rayon  $R = 50 \text{ cm}$  et de hauteur  $h = 150 \text{ cm}$  assimilé à un thermostat de température  $T_0 = 300 \text{ K}$ .

Pour l'isoler thermiquement vis-à-vis de l'extérieur de température  $T_e = 200 \text{ K}$ , on entoure le cylindre avec un isolant de conductivité thermique  $\lambda = 0,035 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  et d'épaisseur  $e = 100 \text{ mm}$ .

- 1) Etablir l'équation de la diffusion thermique (en cylindriques).
- 2) En régime stationnaire, déterminer le profil de température.
- 3) Déterminer l'expression de la résistance thermique de l'isolant.
- 4) On ajoute un 2<sup>nd</sup> isolant de conductivité thermique  $\lambda'$  et d'épaisseur  $e'$ , étudier les conséquences.

## 5 Résolution de problème CMT Vennat 2024 : Glaçon dans une piscine

On plonge un glaçon de température  $-20^{\circ}\text{C}$  dans une piscine d'eau de température  $20^{\circ}\text{C}$ .

- 1) Calculer la variation d'enthalpie du glaçon entre l'état initial et l'état d'équilibre final.
- 2) Calculer sa variation d'entropie.

### Données :

Capacités thermiques massiques de l'eau liquide et de la glace :

$$c_l = 4,18 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \text{ et } c_s = 2,06 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Enthalpie massique de fusion à  $T_0 = 273 \text{ K}$  :  $l = 333,55 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

## 6 Exercice « académique » CCINP Charitat 2024 : Cycle de Stirling

Une mole de gaz diatomique supposé parfait est utilisé comme fluide caloporteur dans une machine de Stirling. Le gaz subit au cours d'un cycle les transformations suivantes :

- 1  $\rightarrow$  2 une compression isotherme réversible à la température  $T_1 = 300 \text{ K}$ , de la pression  $P_1 = 1 \text{ bar}$  à la pression  $P_2$  ;
- 2  $\rightarrow$  3 une compression isochore jusqu'à la pression  $P_3 = \beta P_1$  avec  $\beta = 10$  ;
- 3  $\rightarrow$  4 une détente isotherme réversible du volume  $V_2$  au volume  $V_1$ , à la température  $T_3 = 600 \text{ K}$  ;
- 4  $\rightarrow$  1 une détente isochore.

On prendra la constante des gaz parfaits  $R = 8,31 \text{ USI}$ .

- 1) Représenter les transformations du cycle dans un diagramme de Clapeyron. Commenter.
- 2) Déterminer les transferts thermiques reçus par le gaz à chaque étape du cycle.
- 3) Exprimer le travail  $W_{3 \rightarrow 4}$  reçu par le gaz lors de la transformation (3)  $\rightarrow$  (4). Déterminer l'expression puis la valeur du travail  $W$  reçu par le gaz au cours du cycle. Commenter.
- 4) Exprimer puis calculer le coefficient de performance  $COP$  de cette machine. Commenter.
- 5) Comparer  $Q_{2 \rightarrow 3}$  et  $Q_{4 \rightarrow 1}$ . En déduire une méthode pour améliorer le rendement.

## 7 CCS1 : Neige artificielle

La neige artificielle est obtenue en pulvérisant de fines gouttes d'eau liquide supposées sphériques de rayon  $R = 0,2 \text{ mm}$  d'eau liquide à  $T_i = 10^{\circ}\text{C}$  dans l'air ambiant à la température  $T_e = -15^{\circ}\text{C}$ .

À l'interface eau-air, le flux thermique  $d\phi$  à travers une surface  $dS$  dans le sens de la normale extérieure  $\vec{n}$  est donné par la loi

$$d\phi = h(T(t) - T_e) dS$$

1. Établir l'équation différentielle régissant l'évolution temporelle de la température de la goutte  $T(t)$ .
2. Déterminer le temps  $t_0$  mis par la goutte d'eau liquide pour atteindre la température de surfusion  $T(t_0) = -5^{\circ}\text{C}$ .
3. Lorsque la goutte a atteint la température de  $-5^{\circ}\text{C}$ , il y a rupture de la surfusion : la température remonte brutalement à  $0^{\circ}\text{C}$  et la goutte est partiellement solidifiée (phénomène également brutal). Moyennant des hypothèses que vous explicitez, calculer la fraction  $x$  de liquide restant à solidifier après la rupture de la surfusion.
4. Calculer le temps nécessaire à la solidification du reste de l'eau liquide.

### Données

Coefficient conducto-convectif	$h = 65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Chaleur latente de changement de phase solide-liquide	$\ell_f = 333 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Capacité thermique massique de l'eau liquide	$c_l = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Capacité thermique massique de l'eau solide	$c_s = 2,1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

*Vous introduirez au cours de l'exercice toutes les grandeurs qui vous semblent pertinentes et vous proposerez, si besoin, des ordres de grandeur pour les applications numériques.*

### 8 [MPI] Exercice « académique » : Bilan thermique d'un astéroïde

On étudie la température au sein d'un astéroïde modélisé par une sphère de rayon  $R$ , de conductivité thermique  $\lambda$ , en régime stationnaire. De l'énergie est libérée à l'intérieur de l'astéroïde par radioactivité : pendant une durée  $dt$ , chaque élément de volume  $d\tau$  de l'astéroïde reçoit une énergie  $\mathcal{P} \cdot dt$ ,  $\mathcal{P}$  étant une constante. On raisonne sur une sphère de rayon  $r < R$ , indéformable et au repos.

1. A l'aide d'un bilan thermique, déterminer l'équation différentielle vérifiée par la température  $T(r)$ .
2. Exprimer  $T(r)$  en fonction de  $\lambda$ ,  $\mathcal{P}$ ,  $r$  et  $T_0$  la température au centre de l'astéroïde.

L'astéroïde émet à sa surface par rayonnement une puissance surfacique  $\mathcal{P}_{\text{ray}} = \sigma T_s^4$ , avec  $\sigma$  une constante et  $T_s$  la température de surface.

3. Déterminer la température  $T_0$  au centre de l'astéroïde en fonction de  $R$ ,  $\lambda$ ,  $\sigma$  et  $\mathcal{P}$ .

**Données :**

<u>Coordonnées cylindriques</u>	<u>Coordonnées sphériques</u>
$\overrightarrow{\text{grad}}f = \frac{\partial f}{\partial r} \cdot \vec{u}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \cdot \vec{u}_\theta + \frac{\partial f}{\partial z} \cdot \vec{u}_z$	$\overrightarrow{\text{grad}}f = \frac{\partial f}{\partial r} \cdot \vec{u}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \cdot \vec{u}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \cdot \vec{u}_\varphi$

### 9 [MP] Exercice « académique » CCINP Neveu 2024 : Spins

On considère des particules indépendantes et discernables, dotées d'un spin (moment magnétique intrinsèque)  $\vec{\sigma}$ , en présence d'un champ  $\vec{B}$  magnétique.

Une particule a une énergie égale à  $+\sigma B$  si son spin est orienté dans le sens opposé à  $\vec{B}$ , on note alors l'état de la particule  $|\downarrow\rangle$  ;

Une particule a une énergie égale à  $-\sigma B$  si son spin est orienté dans le même sens que  $\vec{B}$ , on note alors l'état de la particule  $|\uparrow\rangle$ .

- 1) Dans le cas d'un système à une seule particule, donner la probabilité de chaque état.
- 2) Dénombrer les états possibles d'un système à 3 particules et donner les énergies correspondantes. On décrira les états sous la forme  $|\uparrow\uparrow\downarrow\rangle$  (chaque flèche étant associée à l'une des 3 particules).
- 3) Donner la probabilité de chaque énergie du système.
- 4) Donner l'énergie moyenne du système. Interpréter les résultats à basse et haute températures.

## 10 Exercice « académique » CCINP Peynon 2024 : Puits de potentiel infini

On étudie une molécule de diazote de masse  $m$  confinée dans une « boîte » unidimensionnelle de longueur  $a \approx 10 \text{ cm}$  modélisée par un puits de potentiel infini :  $V(x) = 0$  pour  $x \in ]0, a[$  et  $V(x) \rightarrow \infty$  en tout autre point de l'axe ( $Ox$ ).

- 1) Avec l'équation de Schrödinger indépendante du temps, retrouver l'expression des niveaux d'énergie  $E_n$  accessibles à la molécule.
- 2) Calculer la différence d'énergie entre les deux niveaux d'énergie les plus faibles.
- 3) [MP] En ne considérant que les deux plus bas niveaux d'énergie  $E_1$  et  $E_2$ , déterminer la probabilité qu'une molécule ait une énergie égale à  $E_2$  à  $300 \text{ K}$ .
- 4) [MP] Déterminer la valeur de l'entier  $p$  tel que  $E_p$  est égale à l'énergie thermique à  $300 \text{ K}$ .
- 5) [MP] Calculer la différence d'énergie entre les niveaux  $E_p$  et  $E_{p+1}$ .
- 6) [MP] Montrer que l'énergie moyenne d'une particule peut s'écrire  $\langle E_{particule} \rangle \approx \frac{1}{2} k_B T$ .

**Données :**

$$M_N = 14 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

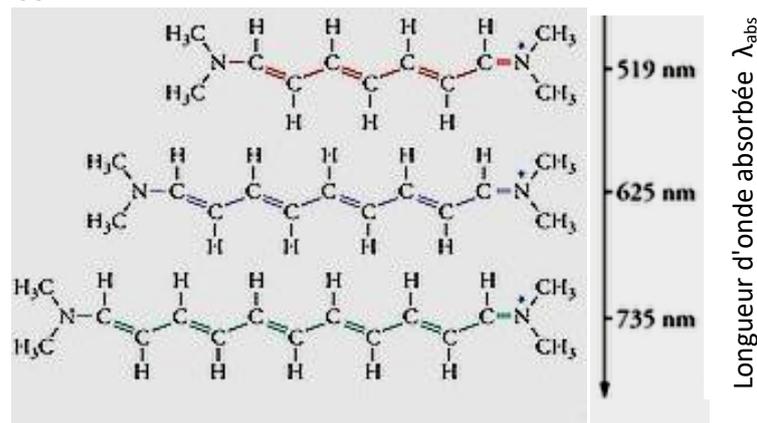
$$\int_0^\infty e^{-x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

## 11 CCS2 Montoloy 2022 : Couleurs des cyanines

Les cyanines sont des molécules organiques utilisées comme colorants. Le but de cet exercice est de montrer que leur couleur est liée à leur taille. En général, établir un lien entre la structure d'une molécule et les longueurs d'onde qu'elle absorbe est complexe. La particularité de la structure des cyanines en permet une modélisation simple.

Les cyanines sont des molécules formées d'une chaîne carbonée (cf figure ci-après). On observe une alternance de liaisons simples et de liaisons doubles (liaisons conjuguées). La figure précise aussi la longueur d'onde d'absorption de chaque molécule. Les électrons participant aux liaisons  $\pi$  (i.e. participant à la seconde liaison d'une liaison double) ne sont pas localisés entre deux atomes, mais répartis tout au long de la chaîne : on dit qu'ils sont "délocalisés". Pour ces électrons, la molécule est équivalente à un fil conducteur de longueur  $L$ .

D'après Pour la Science n° 403 :



On assimile une cyanine à un ion à  $N$  atomes qui a  $(N + 1)$  électrons.

On considère que chaque électron est piégé dans un puits de potentiel :

$$V(x) = \begin{cases} +\infty & \text{si } x < 0 \\ 0 & \text{si } x \in ]0, L[ \\ +\infty & \text{si } x > L \end{cases}$$

Avec  $L = N \cdot d$  avec  $d = 0,14 \text{ nm}$  la longueur d'une liaison covalente entre 2 atomes voisins.

- 1) Déterminer  $\varphi(x)$  telle que  $\psi(x, t) = \varphi(x) \cdot e^{-i\frac{E}{\hbar}t}$  est la fonction d'onde décrivant l'état quantique d'un électron, vous préciserez la constante d'intégration. Déterminer les niveaux d'énergie accessibles à l'électron.
- 2) On considère que chaque niveau d'énergie peut être au maximum peuplé de 2 électrons. Déterminer l'énergie fondamentale  $\mathcal{E}_0$  pour  $N$  pair puis pour  $N$  impair. Déterminer la différence d'énergie  $\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_0$  pour  $N$  pair puis pour  $N$  impair. Faire l'application numérique pour  $N = 9, 10, 11, 12, 13$  avec Python. En déduire les couleurs des ions pour  $N$  impair.

.....

Script Python pour ex 11 :

```
import numpy as np

h=6.63e-34 #J.s
hbarre=h/(2*np.pi) #J.s
m=9.1e-31 #kg
d=0.14e-9 #m
c=3e8 #m/s

def delta_E(N):
    cste=hbarre**2*np.pi**2/(2*m*d**2)
    if N%2==0:
        return(cste*(N+1)/N**2)
    else:
        return(cste*(N+2)/N**2)
```

## Rapports

### Thermodynamique

#### CCINP 2023/2024

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.

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, sans aucune idée du fonctionnement de la machine.

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**.

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** (cf EM).

[MP] Les systèmes en écoulement sont nécessairement traités par le **premier principe pour un système ouvert**. 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)**.

[MP] D'assez grosses difficultés sont constatées avec la **statistique de Boltzmann** pour passer du facteur de Boltzmann à la probabilité, même pour deux états seulement.

#### CCS 2022 / 2024

Quelques résultats classiques sont parfois mal maîtrisés (**théorème de Carnot, régimes d'écoulement stationnaire [MP]**) ; les **changements d'état** sont souvent cause de sérieuses difficultés, que ce soit pour l'interprétation des **diagrammes diphasés** ou pour l'expression des **variations des fonctions d'état**. La **modélisation en résistance thermique**, lorsqu'elle est **justifiée**, simplifie souvent les raisonnements.

Plus généralement, il n'est pas possible de faire une étude thermodynamique sans **définir pour commencer le système étudié et la transformation qu'il subit**. Il est aussi indispensable d'être soigneux avec les **algébrisations**, notamment des transferts thermiques.

Affirmer sans aucune **justification l'équation de diffusion** n'est pas une bonne idée. Sa résolution exige de toutes façons des précisions quant aux **conditions aux limites et/ou aux conditions initiales**.

[MP] Si les candidats ont bien souvent compris que, dans le cadre de la **distribution statistique de Boltzmann** la **limite basse température** est le peuplement majoritaire des niveaux les plus bas, certains pensent à tort que la **limite haute température** est le peuplement majoritaire des niveaux les plus hauts.

Il est par ailleurs nécessaire de **connaître** sans erreur ni hésitation la définition et les expressions des **capacités thermiques** d'un gaz parfait.

## CCMP 2024

De manière générale, toute utilisation d'un théorème ou d'un principe thermodynamique requiert la **définition rigoureuse d'un système : constitution, fermé ou ouvert, fixe ou mobile, . . .**

Dans ce domaine le candidat doit faire preuve de **rigueur** : choix des surfaces d'échange, conventions d'orientation des transferts, utilisation d'un vocabulaire adapté (on ne parle pas de transfert de température par exemple).

Les notions de **résistance thermique et d'ARQS** sont mal maîtrisées, parfois ignorées. Certains candidats ont du mal à interpréter si le flux se conserve ou s'il faut faire la somme des flux thermiques.

Le jury a noté des difficultés à manipuler les **systèmes ouverts en régime permanent à une entrée et une sortie [MP]**, ainsi que dans l'utilisation des **enthalpies massiques de transition de phase**.

Les **confusions** en thermodynamique sont nombreuses. Certains candidats affirment qu'une transformation **isotherme** est nécessairement **adiabatique**, ou encore que la puissance dissipée par effet Joule correspond à la puissance thermique traversant une vitre.

Sur l'ensemble des problèmes de **diffusion à une dimension**, travailler dans des **systèmes de coordonnées autres que cartésiennes** s'avère souvent délicat. L'expression de **volumes finis ou infinitésimaux** ainsi que l'utilisation des **opérateurs d'analyse vectorielle** sont de réels problèmes pour un nombre non négligeable de candidats. Il est d'ailleurs à rappeler qu'un **bilan local** permet, en plus d'obtenir des équations aux dérivées partielles, de dégager le sens physique du problème tout en évitant l'utilisation d'opérateurs.

Nombre de candidats ont tendance à utiliser des résultats de cours sans chercher à comprendre le problème proposé. En particulier, l'existence de **termes de source** doit requérir une attention particulière. Enfin, l'utilisation de la **loi de Newton comme condition aux limites** n'est que rarement maîtrisée (erreur de signe ou de surface).

Il est enfin rappelé qu'en diffusion thermique, **si les hypothèses sont vérifiées**, l'utilisation des **résistances thermiques** allège considérablement les calculs.

Les **ordres de grandeur des conductivités thermiques** des différents matériaux qui nous entourent sont trop souvent méconnus.

Pour les machines thermiques, le principe de la cogénération est très rarement présenté correctement.

**[MPI]** Les problèmes dont l'analyse repose sur une **approche descriptive du rayonnement thermique du corps noir** sont très mal traités.

## X 2024

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 des forces pressantes 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.

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. La considération d'un récipient calorifugé ne garantit pas que les transformations subies par le gaz à l'intérieur sont adiabatiques. Par ex., cela n'est pas le cas s'il y a une source de chaleur dans le récipient.

Si les candidats connaissent la loi des **gaz parfait**, 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 2023/2024

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.

Les candidats ne connaissent pas **l'équation de Schrödinger** pour la plupart.

**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 le cas échéant **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.

D'autre part, 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**.

### CCS 2022 / 2024

**L'interprétation physique** pose bien plus de problème que les calculs qui sont ici généralement bien menés. Les **applications numériques** sont parfois délicates, peut-être à cause des ordres de grandeur inhabituels ou des limites techniques de certaines calculatrices. Une **détermination d'ordre de grandeur** ou, le cas échéant, **l'emploi d'un script Python** permettraient pourtant de contourner ces difficultés.

Certains étudiants **confondent les relations de Planck-Einstein et De Broglie**.

Certains candidats semblent aussi découvrir au moment de l'oral que la **fonction d'onde possède une dimension**.

Il n'est pas raisonnable de se présenter à un oral de ce niveau sans être capable de traiter, rapidement et sans erreur, quelques situations qui relèvent de l'application directe des notions de base du programme.

On peut citer, sans être exhaustif, la **détermination justifiée**, au moins dans le cas **unidimensionnel** :

- de la **forme générale d'une fonction d'onde d'un état stationnaire** ;
- des **énergies quantifiées dans un puits de potentiel infini**.

### CCMP 2023

Les candidats savent en majorité résoudre l'équation de Schrödinger, mais certains méconnaissent le **lien entre fonction d'onde et densité de probabilité de présence**. La notion de **densité de courant de probabilité** n'est pas bien assimilée, en particulier son **analogie avec la densité de courant électrique**.