

Physique-chimie – DS 5

Les cinq parties sont indépendantes. Elles comptent pour environ, dans l'ordre, 20%, 20%, 30%, 25% et 5% du barème.

Comme d'habitude : soigner les justifications, ne pas oublier d'hypothèses lors de l'application des théorèmes, penser aux unités des A.N.

Certaines questions peuvent sembler difficiles et requièrent des développements un peu long de votre part. Ces questions sont cependant valorisées en terme de points.

La calculatrice est interdite

Les applications numériques seront effectuées avec un ou deux chiffres significatifs. On utilisera les résultats suivants :

- $0.84 \times 4.177 = 3.5$, $65 \times 18 = 1.2 \times 10^3$, $105 \times 32 = 3.4 \times 10^3$, $72.5 \times 44 = 3.2 \times 10^3$
- $\ln 5 \simeq 1.6$, $1/\sqrt{0.3} \simeq 2$

I Plongée sous-marine

La plongée sous-marine est une activité dont la pratique s'appuie sur des lois physiques simples, mais qui doivent être connues et scrupuleusement prises en compte.

I.1 La pression du gaz en immersion

L'océan est supposé isotherme et considéré comme un fluide incompressible et homogène de masse volumique $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

L'axe z est dirigé vers le bas.

À la profondeur $z = 0$, l'océan est en contact avec l'atmosphère à la pression $p_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$.

On prendra $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ pour l'accélération de la pesanteur.

- 1 - a - Rappeler l'équation de la statique des fluides reliant le gradient de pression aux données du problème.
- b - Déterminer l'expression de la pression p en fonction de la profondeur z . Représenter l'évolution de $p(z)$. Justifier la phrase souvent citée par les plongeurs : "en plongée, on rencontre un bar tous les dix mètres."

I.2 L'équipement de plongée**Les stabs**

Outre sa bouteille de plongée, le plongeur est aussi équipé d'un gilet gonflant dit *stabilizing jacket* ou stabs, relié à la bouteille, permettant ainsi en le gonflant et en le dégonflant de monter et de descendre sous l'eau comme bon lui semble (il permet aussi pour le plongeur de garder une position horizontale).



Soient :

- $V_s(z)$ le volume du stabs ;
- $V_p(z)$ le volume de la cage thoracique du plongeur (celui-ci varie à cause des forces de pression) ;

- V_0 le volume restant du plongeur, de la bouteille, et du reste de son équipement (supposé constant).

En immersion, l'air respiré par le plongeur et injecté dans le stabs est issu d'une bouteille d'air comprimé. Cet air comprimé est détendu via un dispositif appelé "détendeur" et arrive dans les poumons du plongeur et dans le stabs (si besoin) à la pression extérieure du milieu, c'est-à-dire la pression de la profondeur à laquelle se trouve le plongeur $p(z)$.

Les températures du plongeur, du stabs et de la bouteille sont supposées constantes.

Soit m_i la masse de l'ensemble du système (plongeur, bouteille remplie, stabs, reste de l'équipement) avant immersion.

Pour les applications numériques, on prendra $V_0 = 80 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, $V_p(z = 0) = 7.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, et $m_i = 100 \text{ kg}$.

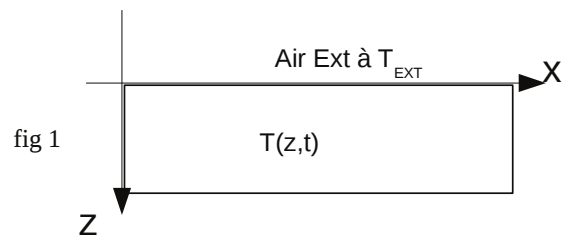
- 2 - a - Calculer le volume du stabs $V_s(z = 0)$ afin que le plongeur reste en équilibre à la surface de l'eau.
- b - Pour sa descente, le plongeur attache une ceinture de plomb à sa taille de masse $m_{pb} = 2 \text{ kg}$ et de volume négligeable. En supposant que le plongeur ait pris une grande inspiration à la surface et qu'il ne relâche pas d'air lors de la descente, quel doit être le volume du stabs afin que le plongeur se stabilise à 3 m de profondeur ? On ne fera pas l'application numérique.

II Transfert thermique

On étudie ici l'évolution de la température dans le sol en fonction de la profondeur. Cette température varie en effet journalièrement et annuellement, mais on s'attend à ce qu'en profondeur, l'amplitude des variations soit moindre. On souhaite quantifier ceci à l'aide d'un modèle simple.

Quelques données pour le sol:

$\lambda = 0,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ conductivité thermique du sol
 $\rho = 1500 \text{ kg.m}^{-3}$ masse volumique du sol
 $c = 1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ capacité thermique massique du sol



- 3 - a - Rappeler la loi de Fourier pour la température $T(z, t)$.
- b - En appliquant le premier principe de la thermodynamique version monobare sur une tranche comprise entre z et $z + dz$, démontrer l'équation de diffusion thermique dans le sol (fig 1) ($z > 0$) vérifiée par la température $T(z, t)$ pour un flux thermique vertical :

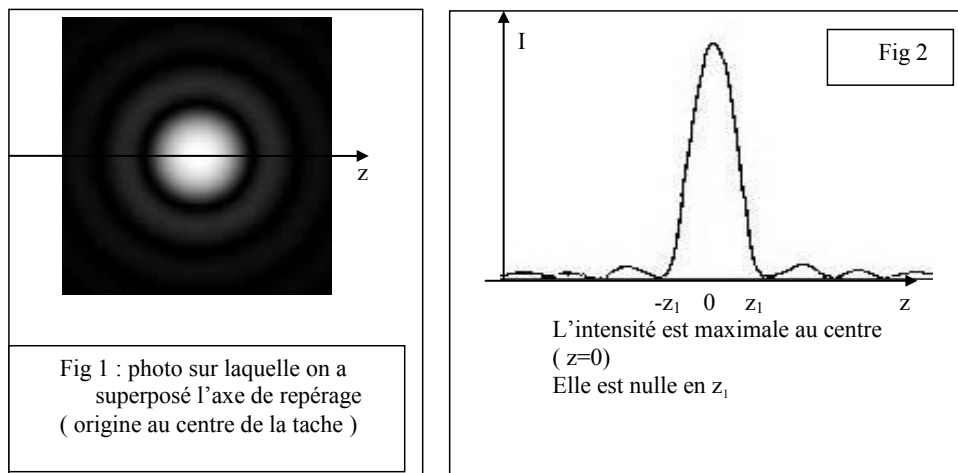
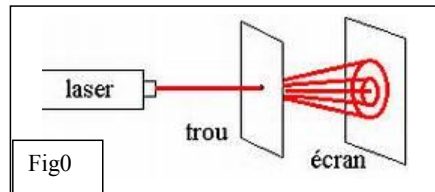
$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_z = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)_t.$$

- c - La température du sol est excitée par des variations périodiques de la température de l'air extérieur. On modélise la température au niveau de la surface par $T(0, t) = T_0 + a \cos(\omega t + \varphi)$. "a" représente l'amplitude de la variation de température à la surface du sol. On pourrait prendre les pulsation $\omega_A = 2\pi \text{ rad/an} \simeq 2 \times 10^{-7} \text{ rad/s}$ et $\omega_J = 2\pi \text{ rad/jour} \simeq 7 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$. À quels phénomènes correspondent-elles ?
- d - La variation de température se transmet de proche en proche. On prend une solution de la forme $T(z, t) = T_0 + \alpha e^{-z/\delta} \cos(\omega t + \varphi - z/\delta)$. Montrer que $\delta = \sqrt{\frac{2\lambda}{\rho c \omega}}$.
- e - Que représente physiquement δ ?
- f - Calculer δ pour ω_J et ω_A . Commenter.
- g - Donner en fonction de δ la profondeur pour que l'amplitude de la variation soit divisée par un facteur 5. Faire l'application numérique pour une pulsation de $\omega_A = 2.0 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

III Optique

III.1 Trou d'Young

Un Laser envoie, sur un trou circulaire de faible diamètre d percé dans un plan Π_0 , un faisceau de lumière parallèle monochromatique, de longueur d'onde dans le vide λ_0 (Fig 0). On observe la figure 1 sur un écran Π_E placé à la distance D de Π_0 (Π_0 et Π_E sont parallèles). Le faisceau incident se propage dans l'air (indice absolu n_a) dans la direction $X'X$ perpendiculaire aux plans. On associe au plan Π_E un repère $(Y'Y, Z'Z)$. La figure 2 donne, en fonction de z , l'intensité lumineuse I observée sur Π_E .



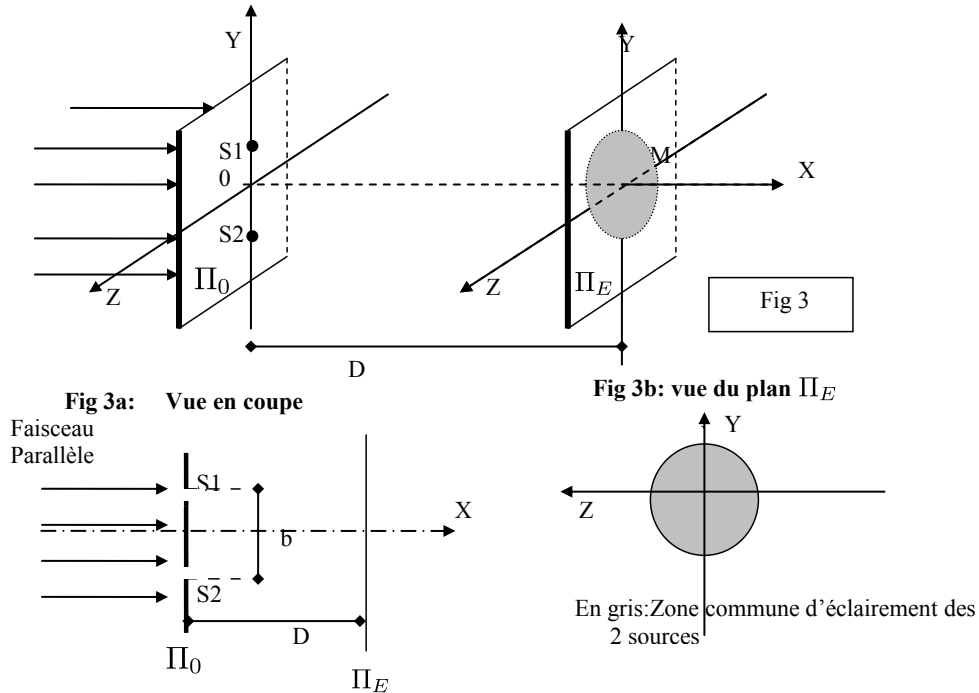
- 4 - a - Quel est le phénomène physique mis en jeu ?
- b - Le rayon R de la tache centrale, supposé égal à z_1 , est donné par une des relations suivantes :
 $\kappa \frac{\lambda_0 D}{n_a d}$, ou $\kappa \frac{\lambda_0 D}{n_a d^2}$, ou $\kappa \frac{\lambda_0 d}{n_a D}$.
- Ecrire la bonne réponse en justifiant brièvement les raisons de votre choix (κ est une constante sans dimension dépendant de la géométrie et dont la valeur approchée est $\kappa = 1.2$ pour un trou circulaire).
- 5 - On peut considérer que le trou d'Young se comporte comme une source lumineuse, notée S , quasi ponctuelle, émettant de la lumière dans un cône d'ouverture correspondant à la tache centrale de la figure 1.
- a - Evaluer θ littéralement.
- b - Tracer, en fonction de z , le profil de l'intensité lumineuse sur Π_E en supposant que la zone éclairée l'est uniformément.
- c - Comparer ce profil et la figure 2. Conclure en 5 lignes maximum sur la validité de ce modèle.

Dans toute la suite, les trous d'Young seront assimilés à une telle source ponctuelle.

III.2 Dispositif interférentiel à deux trous d'Young

Le dispositif est le même que dans la partie précédente, mais le faisceau arrive sur deux trous d'Young percés dans le plan Π_0 (fig 3). Ces trous d'Young, éclairés par un faisceau incident parallèle se propageant dans la direction OX , se comportent comme deux sources lumineuses S_1, S_2 , ponctuelles, monochromatiques, synchrones, cohérentes, distantes de b (fig 3a); ces deux sources émettent une même lumière de longueur d'onde dans le vide λ_0 . Elles sont symétriques par rapport à l'axe OX . Ces ondes se propagent dans l'air d'indice optique absolu n_a . On utilise le repère $OXYZ$, l'origine O étant au milieu de $S_1 S_2$ (fig 3). On observe des interférences dans la zone commune d'éclairement du

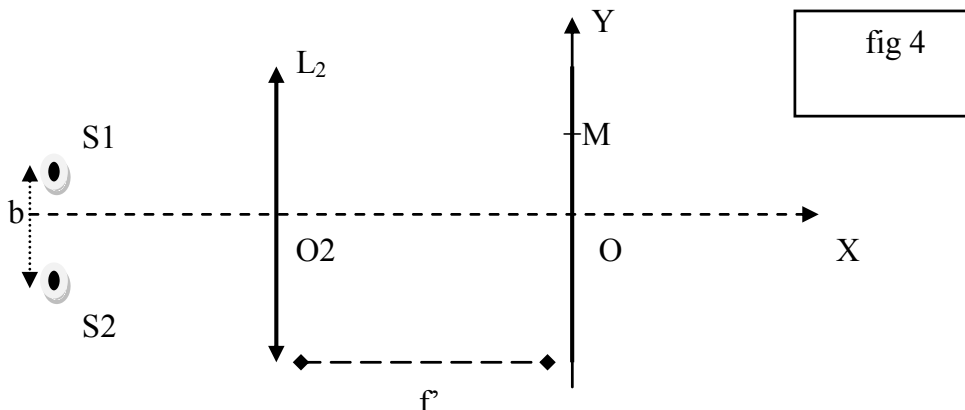
plan Π_E . Cette zone est sensiblement un disque de rayon $R = 1$ cm (fig 3 et 3b). On s'intéresse aux phénomènes en un point $M(x = D, y, z)$ du plan Π_E .



- 6 - a - Préciser la signification des termes synchrone et cohérent.
- b - Évaluer les distances S_1M et S_2M en fonction de y , z , D , et b .
- c - En déduire la différence de marche $\delta_M = (S_1M) - (S_2M)$ lorsque y , z et b sont très petits devant D .
- d - En déduire l'expression de l'intensité lumineuse en un point M de l'écran en fonction de I_0 (intensité produite par chacun des trous), de y , z , b , et autres constantes utiles.
- e - Reproduire et compléter la figure 3b en dessinant l'allure géométrique des franges d'intensité maximale.
- f - Évaluer approximativement le nombre de franges d'intensité maximale observables avec $\lambda_0 = 500$ nm, $b = 5$ mm, $n_a = 1$, $D = 2$ m.

III.3 Montage expérimental

On reprend le montage précédent, mais on observe, à présent, les phénomènes sur un écran Π situé dans le plan focal image d'une lentille convergente (L_2). Cette lentille, fonctionnant dans les conditions de Gauss, sera considérée comme parfaitement stigmatique pour ses points conjugués. Les trous d'Young sont symétriques par rapport à l'axe optique OX de la lentille L_2 .



On regarde ce qui se passe en un point M d'ordonnée y du plan Π . On suppose que S_1 et S_2 sont en phase.

- 7 - a - Démontrer que la différence de chemin optique δ_M entre l'onde arrivant en M issue de S_2 et celle issue de S_1 est : $\delta_M = \frac{n_a b y}{f'}$. On justifiera de manière précise, à l'aide de schémas, les raisonnements utilisés.
- b - Donner l'expression de l'interfrange.

IV Combustion du gazole

Lire le texte fourni en ANNEXE 1 et intitulé "la combustion des carburants" puis répondre aux questions suivantes. On donne en plus la masse molaire du gazole : $M = 100 \text{ g/mol}$.

- 8 - a - Écrire la réaction de combustion complète du gazole dans l'air.
Les affirmations des lignes 15 à 19 sont-elles valides ? Pour répondre il faut entre autre passer par un tableau d'avancement avec des réactifs introduits en proportions stœchiométriques (dire pourquoi).
- b - Comment faire pour vérifier que le taux d'émission de CO_2 (indiqué sur le document 2 en ANNEXE 1) est en accord avec la consommation du véhicule ? On écrira le calcul à effectuer sans faire l'application numérique.
- c - Quel est le nombre d'oxydation du carbone dans la molécule de gazole, et dans CO_2 ?
Justifier alors que la réaction de combustion est une réaction d'oxydation. Le gazole est-il oxydé ou réduit ?
- d - Déterminer l'expression de l'enthalpie standard de réaction associée à cette transformation chimique. (À partir d'une équation de réaction écrite pour un coefficient de 1 pour le gazole.)
On donne le résultat numérique : $-4.177 \times 10^3 \text{ kJ/mol}$.
Les affirmations des lignes 21 à 25 sont-elles valides ?
- e - On admet que la réaction est totale aux températures considérées. Les réactifs sont introduits à $T_0 = 298 \text{ K}$.
Déterminer l'expression de la température de flamme adiabatique maximale T_f liée à cette transformation.
- f - L'application numérique donne $T_f = 2.91 \times 10^3 \text{ K}$. La température de flamme réellement atteinte est en général plus faible. Proposer des explications.

V Titrage d'une solution d'acide chlorhydrique

On réalise ici le titrage d'une solution d'acide chlorhydrique par une solution de soude.

Protocole : Un volume $V_0 = 20 \text{ mL}$ d'une solution d'acide chlorhydrique ($\text{H}_3\text{O}^+_{(\text{aq})}, \text{Cl}^-_{(\text{aq})}$) de concentration molaire C_1 est titré par une solution de soude ($\text{Na}^+_{(\text{aq})}, \text{HO}^-_{(\text{aq})}$) de concentration $C = 1.0 \times 10^{-1} \text{ mol/L}$. Le titrage est suivi par pH-métrie. La courbe est donnée sur le document réponse (annexe 2), à rendre avec la copie.

- 9 - a - Écrire l'équation de réaction mise en jeu lors de ce titrage et calculer la constante d'équilibre associée.
- b - À l'aide d'une construction graphique, à faire apparaître sur l'annexe 2, déterminer le volume équivalent V_e .
- c - En déduire la valeur de la concentration molaire C_1 de la solution d'acide chlorhydrique.

ANNEXE 1 :

DOCUMENT 1 : Texte extrait du site de l'association adilca : www.adilca.com ©

Association pour la Diffusion d'Informations sur les Lois physiques de l'Automobile.

Association à but non lucratif créée en mai 2000 à l'initiative d'anciens élèves des sections scientifiques du Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris.

LA COMBUSTION DES CARBURANTS

Les carburants

C'est la proportion des composants qui permet de distinguer les carburants.

5 L'analyse en laboratoire d'un échantillon de gazole pur non additivé montre que celui-ci est constitué (en masse) de 87 % de carbone (symbole chimique C) et 13 % d'hydrogène (symbole chimique H) [...]

Ces proportions permettent d'établir les formules chimiques fictives de chacun de ces carburants, formules qui seront utilisées par la suite pour calculer tous les autres paramètres de la combustion. Ainsi, le gazole a pour formule chimique fictive $C_{7,25}H_{13}$, l'essence C_7H_{16} , le GPL
10 $C_{3,5}H_9$.

La combustion des hydrocarbures

La *stœchiométrie* désigne l'étude des proportions idéales d'éléments qui autorisent une réaction chimique complète, "propre" et sans gaspillage.

15 Les lois de la stœchiométrie appliquées à la combustion des hydrocarbures nous montrent que pour brûler 1 kg de gazole, il faut disposer de 14,3 kg d'air (soit, étant donné la composition de l'air, 10,9 kg de diazote et 3,4 kg de dioxygène) ; la réaction produit 10,9 kg de diazote (ce gaz étant chimiquement neutre, il n'a pas participé à la combustion), 3,2 kg de dioxyde de carbone (CO_2) et 1,2 kg d'eau (H_2O). [...]

20

L'énergie libérée par la combustion

Connaissant la composition massique d'un hydrocarbure, il est alors facile d'en déduire l'énergie qu'il peut libérer lors de sa combustion la combustion d'un kg de gazole de formule $C_{7,25}H_{13}$ libère une énergie nette d'environ 42 millions de joules, soit, compte tenu de la masse volumique du produit (840 kg.m^{-3}), environ 35 millions de joules par litre [...]

25

La combustion en conditions réelles

S'agissant de la combustion des carburants dans le cadre du fonctionnement d'un moteur d'automobile, une stœchiométrie parfaite est toujours difficile à garantir.

30 En effet, non seulement le carburant peut présenter des différences de composition selon les pays et les distributeurs, mais en plus, la masse d'air introduite dans le moteur, jamais parfaitement pure, varie en permanence en fonction de la température ambiante et de la pression atmosphérique.

DOCUMENT 2 : Fiche technique partielle d'une voiture diesel :

Réservoir : 45 L

Consommation moyenne : 4,5 L aux 100 kms

Emission de CO₂ : 121 g / km

DOCUMENT 3 :

Eléments chimiques :

Elément	H	C	N	O
Masse molaire atomique (g.mol ⁻¹)	1,0	12,0	14,0	16,0
Numéro atomique	1	6	7	8
Electronégativité (échelle de Pauling)	2,20	2,55	3,04	3,44

Formule chimique de l'air : 3,7 mol de N₂ pour 1,0 mol de O₂

Données thermodynamiques : constante thermodynamique R = 8,314 J.mol⁻¹.K⁻¹

composé	gazole (liq)	O ₂ (vap)	CO ₂ (vap)	H ₂ O (vap)	N ₂ (vap)
$\Delta_f H^0$ (kJ.mol ⁻¹)	- 245	0	- 393	- 242	0
C_{Pm}^0 (J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)	224,6	29,4	44,2	30,0	27,9
S_m^0 (J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)	329	205	214	189	192

où $\Delta_f H^0$, C_{Pm}^0 et S_m^0 sont respectivement l'enthalpies standard de formation, la capacité thermique molaire standard (à pression constante) et l'entropie molaire standard des espèces à 298 K (ces grandeurs sont supposées constantes).

VII Annexe 2

Evolution du pH lors du titrage d'une solution d'acide chlorhydrique (C₁) par de la soude (C)

