

# CONCOURS GENERAL DES LYCEES

SESSION 2013

## COMPOSITION DE SCIENCES PHYSIQUES

Classe de Terminale S

Durée : 5 heures

Calculatrice autorisée

### **La plongée sous-marine**

Cet énoncé comporte cinq parties indépendantes.

Sur la copie, il est souhaitable de faire apparaître le numéro de la partie traitée et indispensable de préciser le numéro de la question. La longueur de l'épreuve ne doit pas dérouter le candidat. La diversité des questions posées doit lui permettre, au contraire, de tirer le meilleur profit de ses connaissances et de sa capacité d'analyse. Si un résultat donné par l'énoncé est non démontré, il pourra néanmoins être admis pour les questions suivantes. Si, au cours de l'épreuve, le candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre. La plus grande importance sera donnée à la qualité de la rédaction et de la présentation des résultats obtenus. Il est rappelé en particulier qu'une application numérique sans unité est sans valeur et que le nombre de chiffres significatifs doit être sélectionné avec bon sens.

**Les documents réponses (pages 16 à 18) sont à rendre avec la copie.**

# La plongée sous-marine

## Données

- ◊ Accélération de la pesanteur :  $g = |\vec{g}| = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .
- ◊ Constante des gaz parfaits :  $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ .
- ◊ Nombre d'Avogadro :  $\mathcal{N}_a = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .
- ◊ Masse molaire de l'oxygène :  $M_O = 16,0 \text{ g/mol}$ .
- ◊ Masse molaire de l'azote :  $M_N = 14,0 \text{ g/mol}$ .
- ◊ Force de rappel d'un ressort :  $\vec{F} = -k(\ell - \ell_0)\vec{u}$  où  $k$  est la constante de raideur du ressort,  $\ell$  est la longueur physique du ressort,  $\ell_0$  sa longueur à vide (c'est-à-dire sa longueur libre lorsque le ressort est horizontal et au repos).
- ◊ Si  $|x| \ll 1$  alors  $\frac{1}{1+x} \simeq 1-x$ .

La plongée sous-marine est une activité qui peut se pratiquer à différents niveaux : activité professionnelle pour certains pêcheurs, sport extrême ou encore passe-temps et découverte d'un milieu naturel. Nous allons au cours de ce sujet aborder différents problèmes physiques nécessaires à une bonne compréhension et à une pratique en toute sécurité de ce sport.

La plongée en apnée consiste à séjourner sous l'eau en retenant son souffle. La durée de l'apnée dépend des caractéristiques morphologiques du plongeur, mais aussi de facteurs extérieurs qui augmentent la consommation d'oxygène.

1. Citer trois facteurs qui peuvent modifier la durée de l'apnée.

## Partie n°1: L'eau et l'air

### Les lois de l'hydrostatique

On s'intéresse dans cette partie à l'évolution de la pression en fonction de la profondeur. On repère la surface de l'eau par son ordonnée  $z = 0$ . L'axe est orienté vers le bas (voir figure 1).

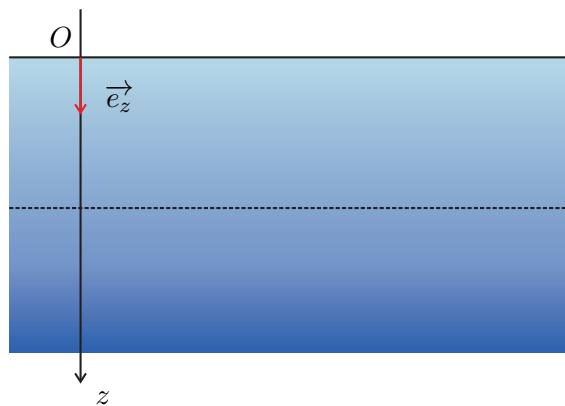


Figure 1 – Océan

On suppose que le champ de pesanteur  $\vec{g}$  est uniforme. L'axe  $(O, \vec{e}_z)$  étant descendant (Figure 1), la pression dans un fluide de masse volumique  $\rho$  vérifie la relation de la statique de fluides :

$$\frac{dP}{dz} = \rho g \quad (1)$$

**2.** Donner la valeur de la masse volumique  $\rho_e$  de l'eau sous pression atmosphérique  $P_0$  (c'est-à-dire pour  $z = 0$ ).

**3.** On suppose que l'eau est un liquide homogène et incompressible en équilibre dans le champ de pesanteur  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . La masse volumique de l'eau est donc supposée constante et égale à  $\rho_e$ .

**3.1.** Montrer que la pression évolue avec la cote  $z$  selon la loi suivante :

$$P = P_0 + \rho_e g z \quad (2)$$

où  $P_0$  est la pression atmosphérique,  $\rho_e$  la masse volumique de l'eau, et  $z$  la cote du point considéré.

**3.2.** Représenter sur une figure similaire à la figure 1 les isobares suivantes :  $P = P_0$ ,  $P = 2P_0$  et  $P(z)$  ( $z > 0$ ).

### Composition de l'air et équation d'état

La durée de l'apnée dépend de la capacité de chaque pratiquant à économiser l'oxygène contenu dans son organisme et ses poumons. En dehors des capacités génétiques et de l'état de forme du sujet, certains facteurs peuvent accentuer cette consommation d'oxygène. Il est alors important de comprendre le comportement de l'air inspiré en fonction de la profondeur.

Nous allons, dans un premier temps et pour décrire certains phénomènes physiques assimiler l'air à un gaz parfait :

$$PV = nRT$$

où  $P$  est la pression,  $V$  le volume,  $n$  la quantité de matière en mol,  $R$  la constante des gaz parfaits  $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ , et  $T$  la température en kelvin (K). On définit la température en kelvin de la manière suivante :

$$T(K) = 273 + \theta(\text{ }^\circ\text{C}).$$

**4.** Rappeler les unités dans le système international de la pression  $P$  et du volume  $V$ .

**5.** On suppose que l'air que l'on inspire est constitué de 79% de diazote et de 21% de dioxygène.

**5.1.** Citer deux autres gaz présents dans l'air sous forme de trace. Dans la suite, on négligera la présence des gaz autres que le diazote et le dioxygène.

**5.2.** Calculer la masse molaire de l'air.

**5.3.** L'air étant à la température  $T_0 = 288 \text{ K}$  et à la pression  $P_0 = 1,00 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ , exprimer puis calculer le volume molaire de l'air, noté  $V_{m0}$ .

**5.4.** Toujours dans ces conditions, exprimer puis calculer la masse volumique de l'air. En déduire la masse d'air contenu dans un volume  $V = 1 \text{ L}$ .

La pression partielle d'un gaz dans un mélange de volume  $V_T$  est égale à la pression de ce gaz s'il occupait à lui seul le volume total  $V_T$ .

**5.5.** Exprimer les pressions partielles de dioxygène  $P_{O_2}$  et de diazote  $P_{N_2}$  en fonction de  $P_0$ . Calculer  $P_{O_2}$  et  $P_{N_2}$  en bar.

**6.** Pour étudier les effets de l'apnée sur nos poumons, des scientifiques ont réalisé différentes expériences au début du vingtième siècle. L'une de ces expériences a été menée grâce à un bathyscaphe.

Un bathyscaphe est un sous-marin conçu pour se déplacer principalement verticalement. Un ballon aux parois souples contenant le volume  $V_0 = 1 \text{ L}$  d'air à la pression atmosphérique ( $P_0 = 1,00 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ) est attaché à un sous-marin initialement à la surface de l'eau. Des mesures ont permis de relever l'évolution du volume, et de la densité de l'air contenu dans le ballon lors de la descente du sous-marin en fonction de la profondeur  $z$ .

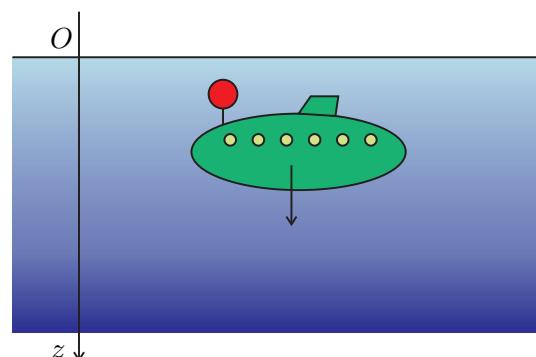


Figure 2 – Bathyscaphe

Dans la suite de cette question, l'air est assimilé à un gaz parfait et l'eau à un fluide incompressible. La température de l'océan est supposée homogène et égale à  $\theta_0 = 15^\circ\text{C}$ .

**6.1.** Calculer la quantité de matière  $n_b$  et la masse  $m_b$  d'air contenu dans le ballon.

**6.2.** Représenter en fonction de  $z$  l'évolution de la pression au sein du ballon. On pourra s'aider de la loi donnée équation (2).

**6.3.** Exprimer le volume  $V_b$  du ballon en fonction de  $z$ .

**6.4.** Calculer le volume occupé par l'air de ce ballon dans la fosse des Mariannes située à une profondeur  $z = 11000$  m. Calculer  $\rho_b$  la masse volumique de l'air à une telle profondeur. Comparer à la masse volumique de l'eau.

**6.5.** On imagine qu'à cette profondeur, la ballon se perce. Que devrait-on observer ? On réalise l'expérience et on observe que des bulles d'air remontent à la surface. Quelle est l'hypothèse à remettre en cause ?

Les scientifiques ont réalisé différentes mesures lors de la descente. Ils se sont intéressés au rapport  $\alpha = \frac{PV_m}{RT_0}$ , où  $V_m$  représente le volume molaire et où la température est constante et égale à  $\theta_0 = 15^\circ\text{C}$  :

P (bar)	1,00	100	150	200	250	300	350	400	500	600	700
$\alpha$	0,945	0,981	0,997	1,025	1,064	1,109	1,157	1,212	1,333	1,452	1,575

Tableau 3 – Mesures expérimentales : caractéristiques de l'air.

**6.6.** Exprimer la masse volumique  $\rho_{air}$  de l'air contenu dans le ballon en fonction d'abord du volume molaire  $V_m$  et de la masse molaire  $M_{air}$  de l'air. En déduire l'expression de la masse volumique  $\rho_{air}$  en fonction de la pression  $P$ , du coefficient  $\alpha$ , de la température  $T_0$ , de la masse molaire  $M_{air}$  et de la constante des gaz parfaits  $R$ .

**6.7.** La mesure du coefficient  $\alpha$  à la pression  $P = 1$  bar est-elle conforme à la valeur attendue ? En quoi est-ce surprenant ?

**6.8.** Représenter sur le document réponse 1 en utilisant les données du tableau 3 la courbe représentant la masse volumique en fonction de la pression. Représenter la courbe obtenue en appliquant le modèle du gaz parfait. On prendra soin de respecter les échelles demandées. Conclure.

**6.9.** Donner un ordre de grandeur de la pression maximale permettant de travailler dans l'hypothèse des gaz parfaits. Exprimer la profondeur correspondante. Est-ce restrictif ?

Dans la suite de l'épreuve, la profondeur maximale permettra de travailler en considérant que l'air se comporte comme un gaz parfait.

La plongée avec bouteille permet une plus grande liberté d'action du plongeur dans l'eau que l'apnée. Désormais, nous allons nous intéresser à la plongée avec bouteille.

On appelle capacité pulmonaire le volume d'air pouvant être inspiré. Dans la suite, nous allons assimiler cette capacité pulmonaire au volume  $V_p$  des poumons. Nous supposons que le plongeur est en équilibre avec le milieu extérieur : en particulier la pression de l'air à l'intérieur des poumons est supposée égale à la pression extérieure. On note  $V_{pM}$  le volume maximal des poumons, et  $V_{pm}$  le volume minimal.

On donne  $V_{pM} = 5$  L et  $V_{pm} = 1$  L.

**7.** On suppose que le plongeur est à la profondeur  $z_1 = 20$  m. L'air de ses poumons occupe le volume  $V_{p1} = 3$  L (assimilé au volume de ses poumons). Le plongeur bloque sa respiration et en particulier n'expire pas. En reprenant la relation démontrée **question 3.1**, exprimer le volume  $V_p(z)$  des poumons du plongeur à la profondeur  $z$  en fonction de  $z$ ,  $z_1$ ,  $V_{p1}$ ,  $\rho_e$ ,  $g$  et  $P_0$ . Quel est le risque encouru par un plongeur qui se déplace verticalement ? Exprimer puis calculer les profondeurs limites au-delà desquelles il peut subir des lésions (sa respiration étant toujours bloquée). Conclure sur le comportement à adopter lors de la remontée à la surface.

## **Partie n°2: Une source de traumatisme : le placage du masque**

L'accident barotraumatique le plus fréquemment rencontré (chez le plongeur débutant) correspond au placage du masque.

Lors de la descente, la pression hydrostatique extérieure augmente et vient comprimer la jupe du masque qui, dans un premier temps, se comporte comme un ressort. Le volume intérieur du masque diminue, jusqu'à ce que la déformation de la jupe ne soit plus possible. Le masque est alors plaqué sur le visage du plongeur. On considère qu'un masque ainsi plaqué (en limite d'élasticité de la jupe) a perdu environ un tiers de son volume intérieur. Au-delà, la pression extérieure continue à augmenter. Ainsi une dépression est créée dans le masque (effet ventouse). La pression sanguine du plongeur (égale à la pression hydrostatique ambiante) est supérieure à la pression de l'air contenu dans le masque. Lorsque cette dépression devient supérieure à 0,4 bar, il y a rupture des capillaires de la membrane superficielle de l'œil et de la muqueuse nasale, ce qui entraîne l'apparition d'hématomes sur le visage ou de saignement de nez. Ces troubles sont en général sans gravité, et peuvent être évités simplement en soufflant par le nez régulièrement durant la descente pour rééquilibrer la pression à l'intérieur du masque.

**8.** Calculer la profondeur avant laquelle il est indispensable de souffler par le nez pour éviter ces troubles (la réponse finale attendue est une valeur numérique).

*Pour répondre à cette question il vous appartient de modéliser la situation physique et de mettre cette situation en équation.*

*Il est par exemple attendu que :*

- ◊ *vous représentiez par un (ou plusieurs) schéma(s) la situation physique étudiée,*
- ◊ *vous choisissiez les notations que vous utilisez en attribuant un nom à chacune des grandeurs physiques que vous êtes amené à introduire,*
- ◊ *que vous précisiez les lois physiques que vous appliquez et les éventuelles hypothèses et approximations que vous utilisez,*
- ◊ *que les éventuels calculs soient menés sous forme littérale, avec pour objectif final d'obtenir une valeur numérique.*

*Il est conseillé de ne pas consacrer plus d'une heure et demie à cette partie.*



Figure 4 – Masque de plongée

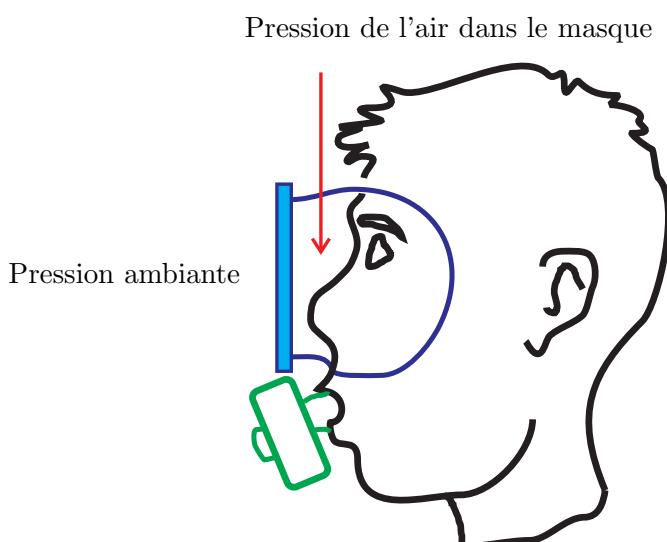


Figure 5 – Plongeur en situation normale

### Partie n°3: La plongée avec bouteille

Les bouteilles de plongée sont en général fabriquées en acier permettant de tolérer des pressions importantes. Elles constituent ainsi une réserve d'air (ou de gaz) à haute pression. Lorsqu'il est immergé, le plongeur peut alors inspirer les quantités d'air qui lui sont nécessaires à pression ambiante via le détendeur. La pression ambiante correspond à la pression à laquelle se trouve le plongeur et dépend donc de la profondeur suivant la loi donnée par l'équation (2).

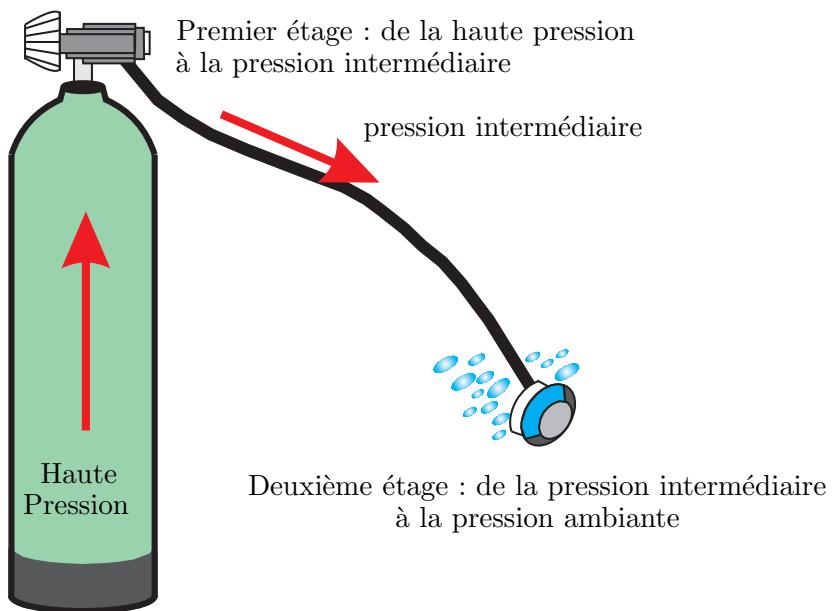


Figure 6 – Principe d'une bouteille de plongée

On considère une bouteille de volume  $V_B = 15 \text{ L}$  remplie d'air à la pression  $P_{H0} = 200 \text{ bar}$ . On suppose qu'un plongeur inspire le volume  $\Delta V_p = 1 \text{ L}$  toutes les 6 secondes.

9. Quel est le volume d'air disponible pour ce plongeur en surface, puis aux profondeurs  $z_1 = 20 \text{ m}$ ,  $z_2 = 40 \text{ m}$ , et  $z_3 = 80 \text{ m}$ . Combien de temps le plongeur peut-il respirer à ces différentes profondeurs ?

Le détendeur assure l'interface entre le plongeur et l'air à haute pression contenu dans la bouteille. Le détendeur remplit deux fonctions :

- ◊ fournir au plongeur la quantité d'air correspondant à ses besoins. Quand le plongeur expire, l'arrivée d'air est coupée.
- ◊ fournir cet air à pression ambiante, c'est-à-dire à la pression à laquelle est soumis le plongeur.

Les détendeurs sont aujourd'hui constitués de deux étages. Le premier étage permet de ramener l'air de la bouteille (pression  $P_H$ ) à une moyenne pression ou pression intermédiaire ( $P_M$ ). Ce premier étage est la partie du détendeur fixée à la robinetterie. Le deuxième étage permet de diminuer à nouveau la pression, de la pression intermédiaire  $P_M$  jusqu'à la pression ambiante  $P_A$ . Le deuxième étage du détendeur correspond à l'embout buccal.

Le principe de chacun de ces deux étages est le même. Les détendeurs sont en général constitués de clapets à ressort. Nous allons étudier leur fonctionnement.

Ce détendeur représenté figure 7 est composé d'une chambre humide remplie d'eau. Dans cette chambre, règne la pression ambiante  $P_A$ . Cette chambre est séparée du compartiment à la pression intermédiaire par un piston mobile de section  $S$ . Nous allons, dans la suite, négliger le poids de ce piston mobile et supposer qu'il isole parfaitement l'air contenu dans le compartiment moyenne pression de la chambre humide. Au-dessus, nous avons le compartiment haute pression.

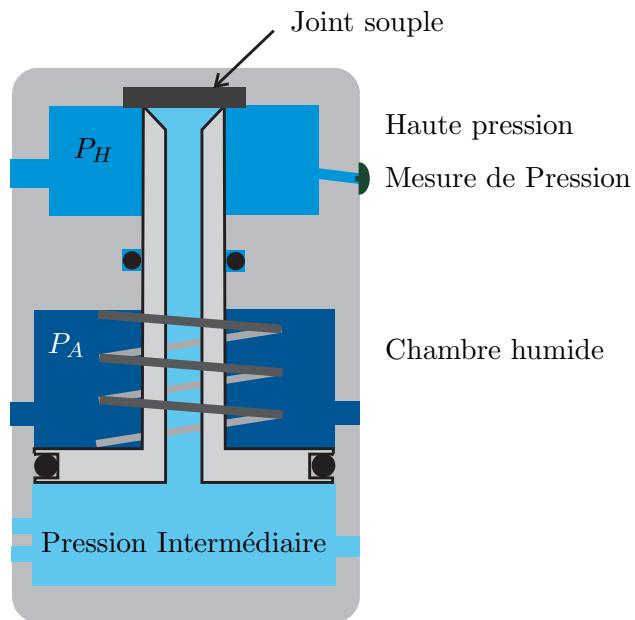


Figure 7 – Premier étage d'un détendeur

Suivant la position du piston, l'air peut circuler ou non du compartiment haute pression vers le compartiment pression intermédiaire. La figure 7 représente le détendeur à l'équilibre : le piston est en position haute et l'air ne circule pas. Sur la figure 8, le détendeur est représenté en position ouverte. L'air à haute pression passe alors du compartiment haute pression au compartiment à la pression intermédiaire.

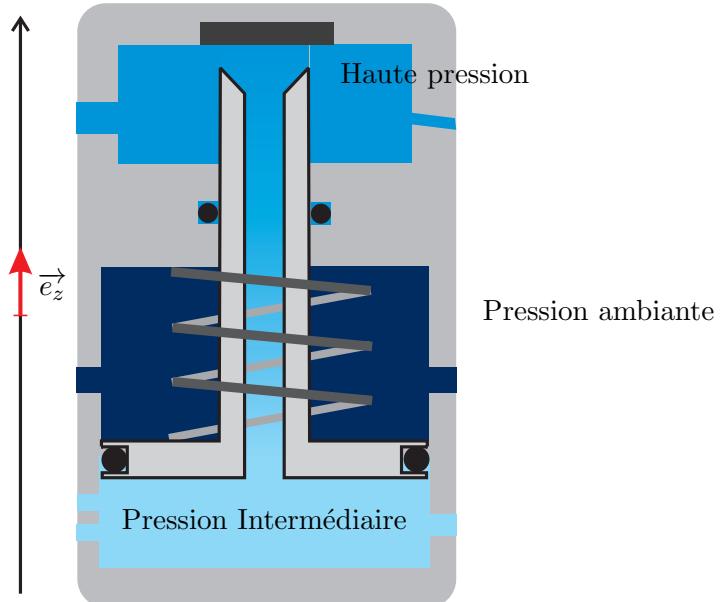


Figure 8 – Premier étage d'un détendeur - Position ouverte

Lorsque cet étage est placé à l'air libre et que toutes les pressions ( $P_A$ ,  $P_H$  et  $P_M$ ) sont égales à la pression atmosphérique  $P_0$ , le clapet reste ouvert (voir figure 9). La chambre humide est à symétrie cylindrique et est caractérisée par sa couronne d'épaisseur  $R$ , et sa hauteur  $d$ . On travaille dans une base cartésienne où l'axe vertical est ascendant et est représenté par son vecteur unitaire  $\vec{e}_z$  (voir figure 8).

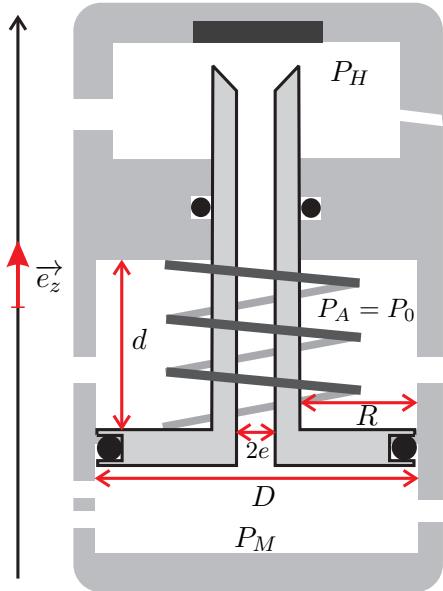


Figure 9 – Premier étage d'un détendeur à l'air libre

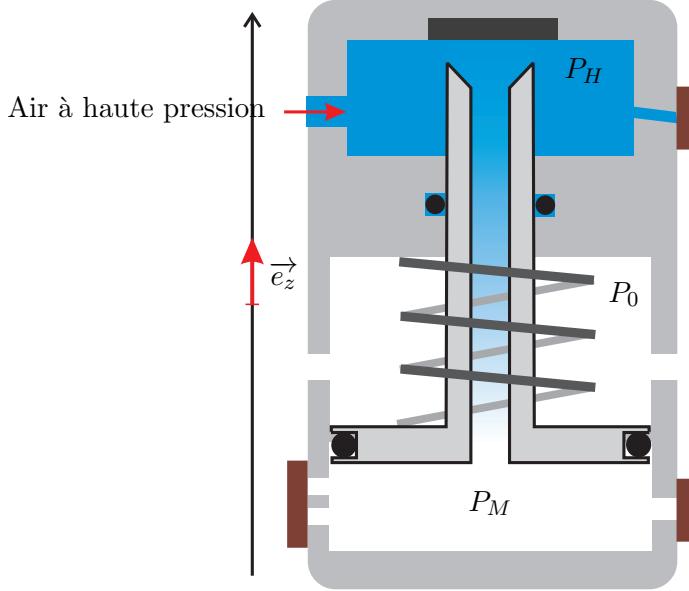


Figure 10 – Premier étage d'un détendeur raccordé à une bouteille à haute pression  $P_H$

**10.** Représenter la surface du piston sur laquelle s'exerce la force de pression de la chambre humide dans laquelle règne la pression  $P_A$ . Exprimer cette surface notée  $\Phi_A$  en fonction de  $D$  et  $R$ . En déduire la force de pression  $\vec{F}_A$  exercée sur le piston.

**11.** Représenter la surface du piston sur laquelle s'exerce la force de pression de la chambre intermédiaire à la pression  $P_M$ . Exprimer cette surface notée  $\Phi_M$  en fonction de  $D$  et  $e$ . En déduire la force de pression  $\vec{F}_M$  exercée sur le piston.

**12.** Force de pression exercée sur le piston dans le compartiment haute pression :

Dans le compartiment haute pression, les forces de pression qui s'exercent sur le piston s'appliquent suivant les différentes surfaces du piston en trait noir sur la figure 11. On suppose, pour étudier la résultante de ces forces, que le piston est plongé dans une zone où règne une pression uniforme notée  $P_H$ .

**12.1.** On s'intéresse d'abord aux forces de pression qui s'appliquent sur les portions verticales du piston. Exprimer la résultante  $\vec{F}_v$  de ces forces.

**12.2.** On s'intéresse maintenant aux forces de pression appliquées sur les surfaces obliques. Exprimer la somme des vecteurs unitaires  $\vec{n}_1 + \vec{n}_2$  en fonction de  $\vec{e}_z$  et de l'angle  $\alpha$ . Montrer que la résultante des forces de pression élémentaires exercées sur des éléments de surface diamétralement opposés est dirigée vers le bas suivant le vecteur  $-\vec{e}_z$ . Etablir la relation entre l'angle  $\alpha$  et les longueurs  $\ell$  et  $\delta$ . En déduire que la résultante de ces forces, notée  $\vec{F}_o$ , est verticale et équivalente à la force de pression qui serait exercée par la pression  $P_H$  sur la couronne représentée sur la figure 11. Calculer la surface de cette couronne  $\Phi_C$  en fonction de  $e$ ,  $R$  et  $D$ , et exprimer  $F_o$  en fonction de  $P_H$  et  $\Phi_C$  puis de  $P_H$ ,  $D$ ,  $R$  et  $e$ .

**13.** Etablir la relation entre les surfaces  $\Phi_M$ ,  $\Phi_A$  et  $\Phi_C$ .

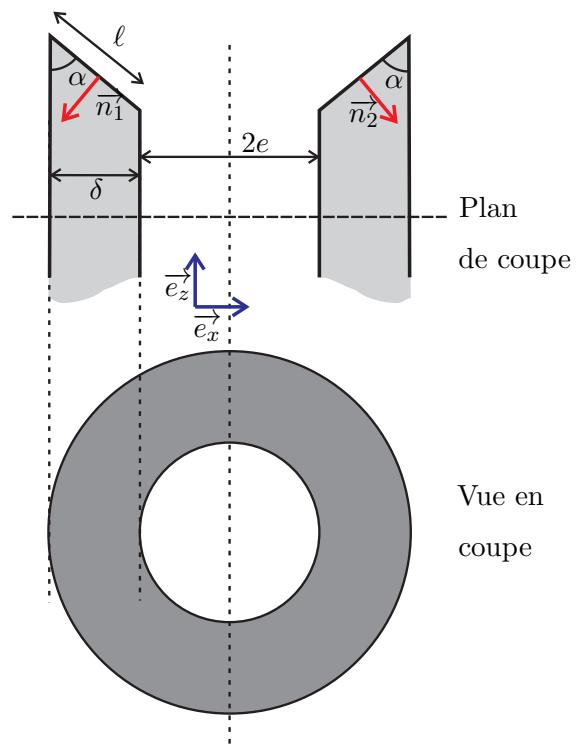


Figure 11 – Force de pression équivalente exercée sur le piston par l'étage à haute pression

**14.** Le piston est à l'air libre, et le clapet est ouvert. Toutes les pressions sont égales à la pression atmosphérique  $P_0$ . Exprimer la résultante de toutes les forces qui s'exercent sur le piston. Enoncer la condition d'équilibre. En déduire l'expression de la longueur  $d$  en fonction de  $\ell_0$ , la longueur à vide du ressort.

On monte maintenant le détendeur sur une bouteille remplie d'air à la pression  $P_H$  (voir figure 10).

**15.** Représenter sur le document réponse 2 le trajet de l'air. Comment évolue la pression  $P_M$  dans le compartiment moyenne pression ?

**16.** Quelles sont les forces appliquées au piston mobile ? On négligera toujours son poids.

**17.** Lorsque le clapet est fermé, le joint souple interdit une circulation d'air du compartiment haute pression à l'étage intermédiaire (voir figure 7). Le piston est alors soumis à une force supplémentaire notée  $\vec{R}$  représentant l'action du joint sur le piston et dirigée vers le bas. Lorsque le clapet est fermé, cette force est non nulle. Montrer que lorsque le clapet est fermé, la pression intermédiaire vérifie la relation suivante :

$$P_M \geq \frac{k\Delta\ell}{\Phi_A} + P_0 \quad (3)$$

où  $\Delta\ell$  représente la distance parcourue par le piston entre sa position à l'équilibre et sa position une fois le clapet fermé.

On immerge maintenant le détendeur. La chambre humide se remplit d'eau. On maintient la sortie du compartiment moyenne pression fermée, et on atteint ainsi la profondeur  $z_1 = 20$  m.

**18.** Expliquer le comportement du détendeur durant la descente. Calculer la pression intermédiaire  $P_A$  à la profondeur  $z_1$ . Comment évolue la pression  $P_M$  avec la pression ambiante et donc avec la profondeur ? Quelles sont les conséquences pour le plongeur ?

**19.** Le plongeur est toujours situé à la profondeur  $z_1$ . Expliquer le fonctionnement du détendeur lorsque le plongeur respire. Le fonctionnement de ce détendeur dépend-il de la haute pression dans la bouteille ? Le plongeur doit-il toujours exercer le même effort pour inspirer ? Conclure sur les avantages ou inconvénients d'un tel détendeur.

Ce détendeur à chambre humide présente un inconvénient : lors de la détente d'un gaz, celui-ci se refroidit et peut atteindre des températures de l'ordre de  $-80$  °C à  $-100$  °C. L'eau contenue dans la chambre humide peut se refroidir jusqu'à geler, pouvant bloquer le piston en position ouverte ou fermée. Nous allons étudier dans cette partie si, compte-tenu de la capacité thermique de l'eau, le risque de givrage doit être pris en compte.

On ne considère que les échanges thermiques entre la masse  $M_e$  d'eau contenue dans la chambre humide et le milieu extérieur. Ces échanges correspondent :

- ◊ à la chaleur perdue lors de la détente : la puissance cédée par l'eau au gaz s'écrit  $\mathcal{P} = K(T - T_0)$  où  $T$  est la température de l'eau contenue dans la chambre humide, et  $T_0$  celle de l'air circulant de la bouteille haute pression vers l'étage moyenne pression  $P_M$ . En régime stationnaire, cette température sera considérée comme constante et égale à sa valeur moyenne :  $T_0 = 173$  K.
- ◊ à la chaleur reçue lors des échanges avec l'eau extérieure à la chambre humide. En effet au cours de chaque cycle, une masse d'eau  $m_e$  sort de la chambre humide (compression du ressort) et une autre masse d'eau  $m_e$  à la température  $T_A$  entre dans la chambre humide. La puissance reçue par l'eau de la chambre humide s'écrit  $\mathcal{P}_A = K_A(T_A - T)$ .

$T_A$  correspond à la température du milieu extérieur (température de l'eau de mer). On donne  $K/K_A = 0,071$ .

Pour évaluer la température de l'eau contenue dans la chambre humide, nous allons nous placer en régime stationnaire et faire un bilan de puissance.

**20.** Ecrire le bilan de puissance c'est-à-dire la relation entre  $\mathcal{P}$  et  $\mathcal{P}_A$ .

**21.** Exprimer la température  $T$  dans la chambre humide.

**22.** A partir de quelle température ambiante l'eau dans la chambre humide risque-t-elle de geler ? Ce problème est-il fréquemment rencontré en plongée ? De quels autres facteurs dépend ce problème de givrage ? Proposer des solutions pour palier ce problème.

## Partie n°4: Corrosion en milieu marin

Les bouteilles de plongée sont fabriquées majoritairement en acier (alliage fer-carbone) ou en aluminium (plus léger que l'acier).

En milieu marin, elles sont soumises à un environnement difficile et peuvent souffrir de corrosion due à la présence de dioxygène dissous. La corrosion correspond à l'oxydation d'un métal par le dioxygène dissous. Il peut donc y avoir formation d'oxydes de fer (rouille) ou encore de cations Fer II ou Fer III.

Le diagramme potentiel-pH (E/pH) d'une espèce indique les domaines de prédominance des phases condensées, et des espèces dissoutes pour les différents états d'oxydation de l'espèce considérée en fonction du pH. Ce diagramme nous donne donc des informations sur les espèces thermodynamiquement stables à pH donné.

Le diagramme potentiel-pH de la figure 12 représente le diagramme du fer superposé à celui de l'eau.

**23.** Nommer les couples relatifs à l'eau mis en jeu dans ce diagramme. Repérer, dans chacun de ces couples, l'oxydant et le réducteur.

**24.** Relever les couples relatifs au fer en indiquant de la même manière pour chaque couple l'oxydant et le réducteur.

**25.** La superposition de ces deux diagrammes permet de repérer quels sont les dérivés du fer susceptibles de coexister en phase aqueuse. Existe-t-il un domaine où le fer solide ( $Fe_{(s)}$ ) est thermodynamiquement stable en présence d'eau ?

**26.** Ecrire la réaction pouvant avoir lieu entre le fer et l'eau en milieu acide. Cette réaction peut-elle être qualifiée de lente ou rapide ? Quels sont les produits formés et que devrait-on observer lors de cette réaction ?

**27.** Ecrire la réaction entre le fer et le dioxygène dissous dans l'eau. Cette réaction risque-t-elle d'être plus rapide ou moins rapide que celle du fer avec l'eau ? Justifier.

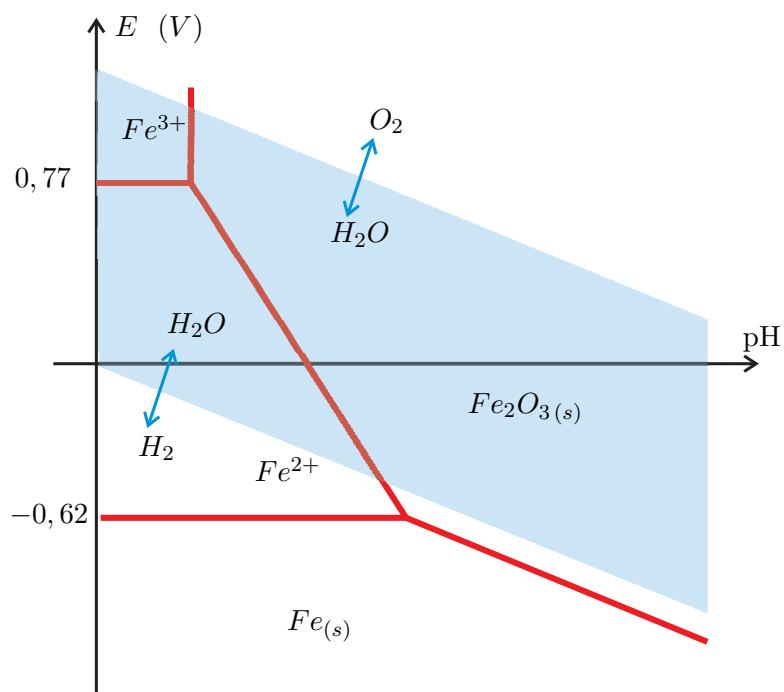


Figure 12 – Diagramme de stabilité du Fer dans l'eau  $C = 10^{-6}$  mol/L

Ce type de diagramme permet d'obtenir des informations thermodynamiques sur des réactions d'oxydo-réduction, mais il ne permet pas d'étudier la cinétique, c'est-à-dire la vitesse de ces réactions.

Le phénomène qui vient d'être mis en évidence correspond à la corrosion du fer.

La corrosion est particulièrement présente dans les zones qui présentent une hétérogénéité de surface (rayure, contrainte, défaut), une hétérogénéité de composition (alliages, impuretés, soudures), ou encore une hétérogénéité de la concentration du milieu. Une quelconque de ces hétérogénéités provoque ce qu'on appelle une corrosion différentielle : l'oxydation et la réduction se produisent en deux zones différentes du

métal immergé, le métal assurant la circulation des électrons (voir figure 13).

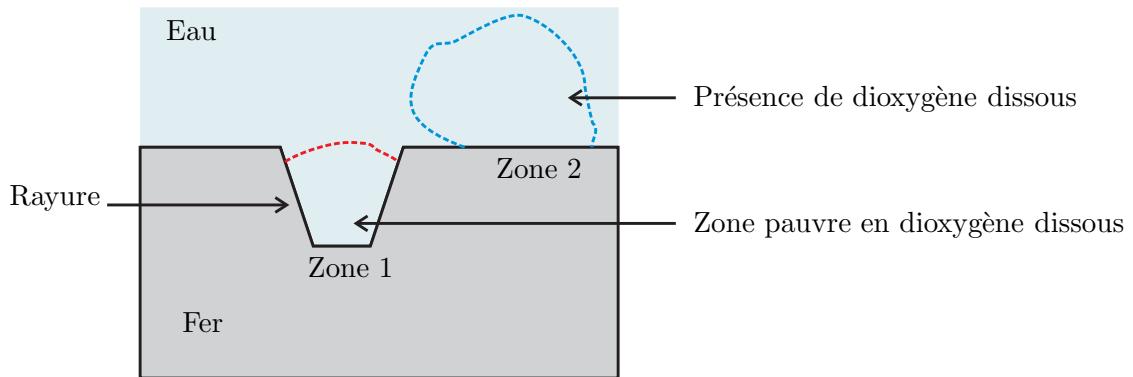


Figure 13 – Corrosion du fer

Les couples mis en jeu dans la corrosion du fer sont :  $Fe^{2+}/Fe$  et  $O_2/OH^-$ .

**28.** Ecrire les demi-équations électroniques correspondant à ces deux couples en considérant l'oxygène dissous en milieu aqueux. En déduire l'équation bilan liée au phénomène de corrosion du fer.

**29.** Repérer, à l'aide de la figure 13, la zone correspondant à la réduction et celle correspondant à l'oxydation. Identifier alors l'anode et la cathode et indiquer sur un schéma le déplacement des électrons dans le métal.

L'association de l'anode et de la cathode constitue une micropile en court-circuit. Le déplacement des ions dans l'eau vient fermer le circuit électrique. La pièce métallique étant plongée dans l'eau salée, le déplacement des ions est facilité par la présence des ions  $Na^+$  et  $Cl^-$ .

La vitesse de cette réaction est liée au nombre d'électrons échangés entre les électrodes. Nous allons établir le lien entre la vitesse de la réaction et l'intensité du courant électrique de cette micropile.

**30.** On note les potentiels d'électrode à l'anode et à la cathode  $V_a$  et  $V_c$ . Dessiner le schéma équivalent de cette micropile en court-circuit.

Par convention, le courant est orienté dans le sens electrode-solution. On note  $i_a$  et  $i_c$  l'intensité du courant respectivement à l'anode et à la cathode.

**31.** Etablir la relation entre les potentiels d'électrode  $V_a$  et  $V_c$  ainsi que la relation entre les courants  $i_a$  et  $i_c$ .

**32.** On note  $n_1$  la quantité initiale de fer,  $n_2$  la quantité initiale de dioxygène et  $x$  l'avancement de la réaction (en mole), c'est-à-dire la quantité de dioxygène consommé. Etablir le lien entre l'avancement  $x$  de la réaction de corrosion et le nombre de moles d'électrons échangés à l'anode  $n_e$ .

La vitesse de réaction est définie grâce à l'avancement de la réaction par  $v = \frac{dx}{dt}$  et l'intensité du courant électrique à l'anode par  $i_a = \frac{dq}{dt}$  où  $q$  représente la charge échangée à l'anode.

On note  $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$  C la charge élémentaire et on introduit la constante de Faraday  $\mathcal{F}$ . Cette constante représente la charge d'une mole de charges élémentaires.

**33.** Exprimer la constante  $\mathcal{F}$  et la calculer en précisant l'unité.

Etablir la relation entre l'intensité du courant, la vitesse de réaction, et la constante de Faraday  $\mathcal{F}$ . Comment évaluer la vitesse du phénomène de corrosion ?

**34.** En s'aidant de la figure 14, indiquer graphiquement sur le document réponse 2 associé le point de fonctionnement de cette micropile. On notera  $i_{cor}$  le courant de court-circuit correspondant au courant de corrosion, et  $E_{cor}$  le potentiel de corrosion. Evaluer le potentiel de corrosion  $E_{cor}$ .

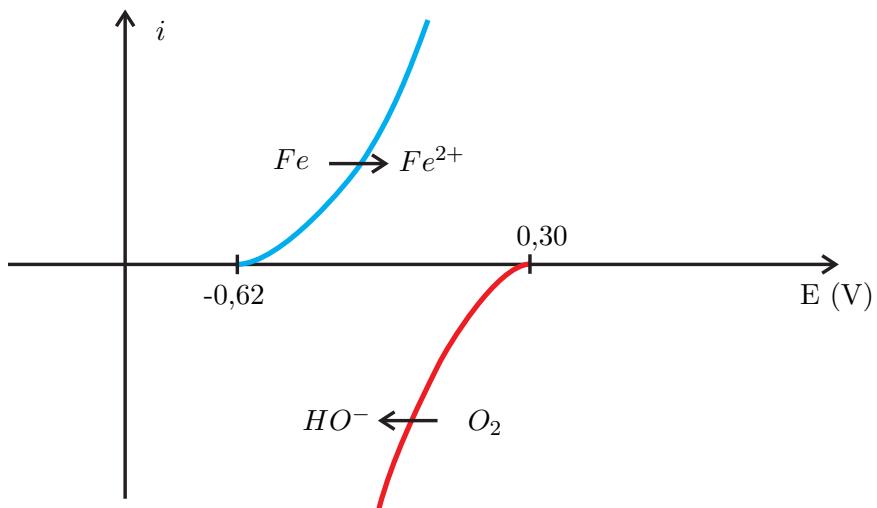


Figure 14 – Courbe intensité potentiel

Données :

- ◊ masse molaire du fer :  $M_{Fe} = 56 \text{ g/mol}$ ,
- ◊ masse molaire de l'aluminium :  $M_{Al} = 27 \text{ g/mol}$ ,
- ◊ masse volumique du fer :  $\rho_{Fe} = 7,8 \text{ g/cm}^3$ ,
- ◊ masse volumique de l'aluminium :  $\rho_{Al} = 2,7 \text{ g/cm}^3$ .

**35.** Des mesures électrochimiques ont permis de mesurer l'ordre de grandeur du courant surfacique de corrosion  $j_{cor} = 30 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Evaluer l'épaisseur du métal consommé lors d'une plongée d'une durée de 2 h pour une rayure de profondeur  $p = 1 \text{ mm}$  de surface  $S_r = 0,5 \text{ cm}^2$  sur une bouteille de plongée en acier.

**36.** Les bouteilles de plongée doivent présenter une bonne tenue en pression et sont donc fabriquées à partir de plaques d'acier d'épaisseur 8 mm. Cette épaisseur ne doit pas être inférieure à 6 mm. Sachant que les plongeurs utilisent leurs bouteilles durant plusieurs années, conclure quant au danger de la corrosion.

Il existe différents types de protection pour éviter la corrosion. L'oxydation de certains métaux comme le zinc ou l'aluminium forme une couche superficielle et imperméable d'oxyde. Ainsi le métal se retrouve isolé de l'eau et du dioxygène dissous. La corrosion est stoppée. Il s'agit d'une protection par passivation. Dans le cas du fer, la couche d'oxyde qui se forme n'est pas assez imperméable et ne protège pas efficacement le métal. La corrosion se poursuit.

Le métal peut aussi être protégé par une couche physique (peinture, film plastique, émail...) interdisant ainsi le contact métal/eau. Cette protection est efficace tant que la couche protectrice n'est pas altérée. Cette protection ne résiste pas toujours aux rayures ou aux chocs.

Le dépôt d'une couche d'un autre métal résiste mieux à la corrosion. Ce dépôt est réalisé soit par électrolyse, soit par galvanisation (immersion dans un bain de métal fondu). Lorsqu'il se produit une rayure, une micropile se forme.

**37.** En analysant les figures 15 et 16, expliquer ce qu'il se passe en présence d'une rayure sur une bouteille de plongée recouverte de nickel ou de zinc. Choisir le métal permettant d'assurer la protection de la bouteille de plongée.

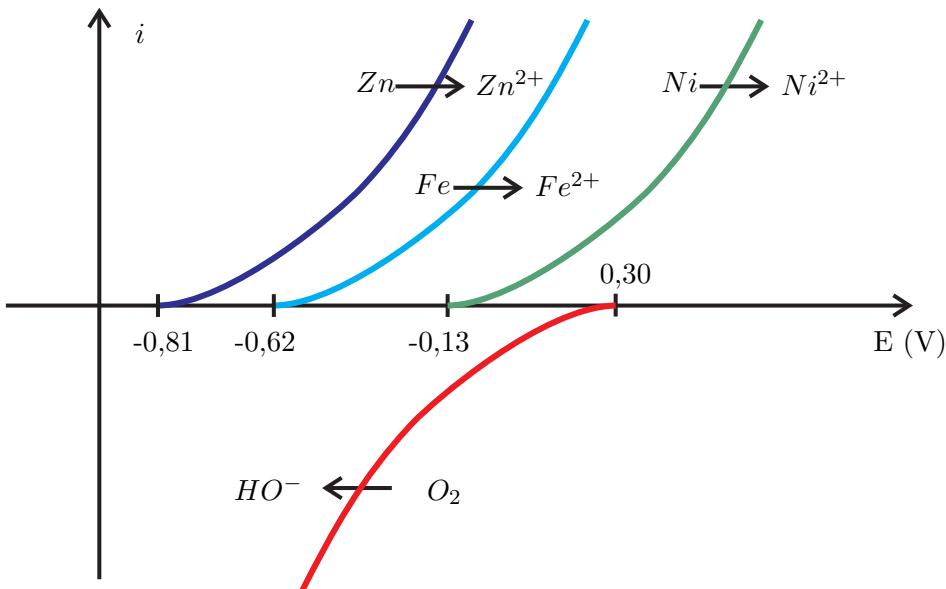


Figure 15 – Courbes intensité potentiel de différents métaux

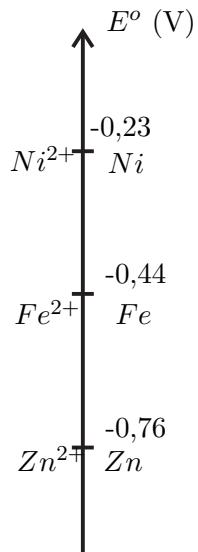


Figure 16 – Potentiels Standard

## Partie n°5: Mesure de Pression

Pour contrôler son autonomie et le déroulement de sa plongée, le plongeur dispose d'un ordinateur de bord. Cet ordinateur permet de contrôler un grand nombre de paramètres comme la profondeur, la température, la durée de la plongée et la pression de la bouteille... Ces paramètres sont relevés grâce à différents capteurs qui transmettent sans fil les données disponibles sur l'afficheur ci-contre à disposition du plongeur (voir figure 17).



Figure 17 – Ordinateur de bord

La quantité de gaz restant dans la bouteille du plongeur est directement reliée à la pression régnant dans sa bouteille. Différents procédés permettent d'avoir accès à cette grandeur. Les capteurs les plus simples sont des manomètres : dispositifs mécaniques qui permettent de mesurer la pression relative, c'est-à-dire la pression de la bouteille par rapport à la pression ambiante. Des mesures de pression électroniques sont aujourd'hui couramment utilisées. Elles nécessitent en général une alimentation (pile), mais se révèlent être plus précises et permettent un relevé des caractéristiques de la plongée par un ordinateur de bord.

Dans cette partie, nous allons étudier un capteur de pression réalisé à partir d'une jauge d'extensométrie plongée dans le compartiment haute pression.

Une jauge d'extensométrie est un capteur résistif dont la résistance dépend des caractéristiques extérieures, ici de la pression. Cette jauge de longueur  $\ell$  et de section  $S$  est immergée dans le compartiment haute pression. Ces caractéristiques géométriques (longueur et section) dépendent de la pression extérieure.

La résistance électrique d'un barreau cylindrique s'écrit :

$$R_p = \frac{\ell}{\gamma \cdot S}$$

où  $\gamma$  est la conductivité du matériau utilisé.

Ainsi, lorsque la pression varie,  $\ell$  et  $S$  varient aussi entraînant une modification de la résistance  $R_p$ . La mesure de cette résistance  $R_p$  donne donc une image de la pression. Le matériau utilisé est tel que, lorsque la pression augmente, le cylindre s'allonge de la quantité  $\Delta\ell$ , alors que son rayon se contracte. La résistance augmente alors linéairement, de la quantité :

$$\Delta R = \alpha \cdot R_0 \cdot \Delta P.$$

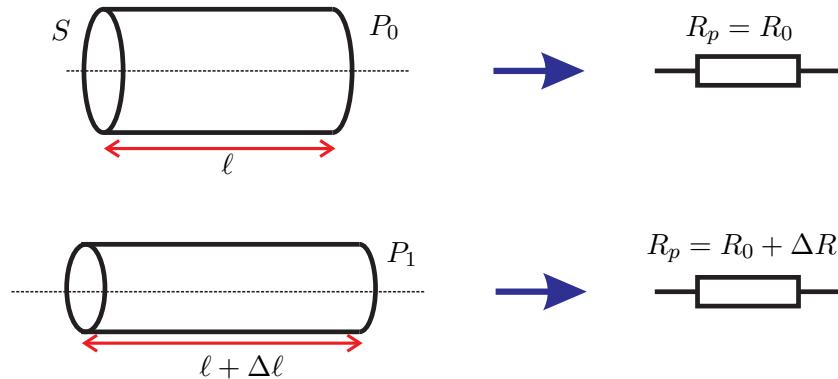


Figure 18 – Jauge d'extensométrie

Le pont de Wheatstone est le circuit le mieux adapté pour la mesure de petites variations de résistances électriques telles que celles rencontrées lors de l'utilisation de jauge de déformation. Cette résistance  $R_p$  est alors insérée dans un pont de Wheatstone (voir figure 19) alimenté par une tension continue  $E$ . La tension  $U$  est l'image de la résistance  $R_p$  et donc de la pression.

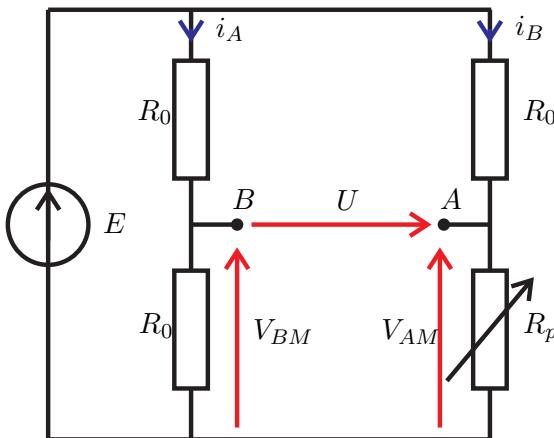


Figure 19 – Capteur de pression : pont de Wheatstone

**38.** Calculer la valeur de la tension  $U$  lorsque toutes les résistances sont égales, en particulier lorsque  $R_p = R_0$ . Dans cette configuration, le pont est dit équilibré.

**39.** On suppose maintenant que la jauge est soumise à une variation de pression telle que la résistance  $R_p$  s'exprime par  $R_p = R_0 + \Delta R$ .

Exprimer la tension  $V_{BM}$  en fonction de la tension continue  $E$ . Exprimer la tension  $V_{AM}$  en fonction de la tension continue  $E$  et des résistances  $R_0$  et  $\Delta R$ . En déduire une expression de la tension  $U$ .

On pose  $\varepsilon = \frac{\Delta R}{R_0}$ . Dans le cas des jauge d'extensométrie, la variation  $\Delta R$  de la résistance  $R_p$  est très petite devant sa valeur moyenne  $R_0$ , c'est-à-dire  $\varepsilon = \frac{\Delta R}{R_0} \ll 1$ .

**40.** Exprimer la tension  $U$  en fonction de  $\varepsilon$  et de  $E$ .

**41.** En utilisant les approximations données au début du sujet, et en travaillant à l'ordre 1 (c'est-à-dire en ne gardant que les termes proportionnels à  $\varepsilon$  et en négligeant les termes proportionnels à  $\varepsilon^2$ ), montrer que la tension  $U$  peut s'exprimer de la manière suivante :

$$U = \frac{E}{4} \varepsilon$$

**42.** En déduire la relation entre la variation de pression  $\Delta P$  et la tension  $U$ .

Pour pouvoir être exploitée, la tension de sortie du pont doit être mesurée, amplifiée puis numérisée (voir figure 20).

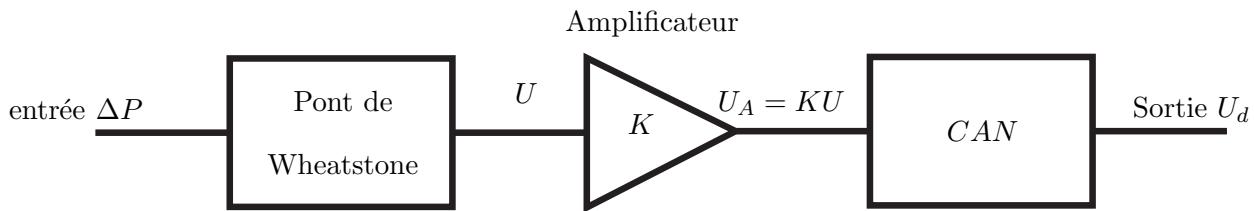


Figure 20 – Chaîne de mesure

La numérisation se fait par un convertisseur analogique-numérique (CAN) sur  $n = 8$  bits.

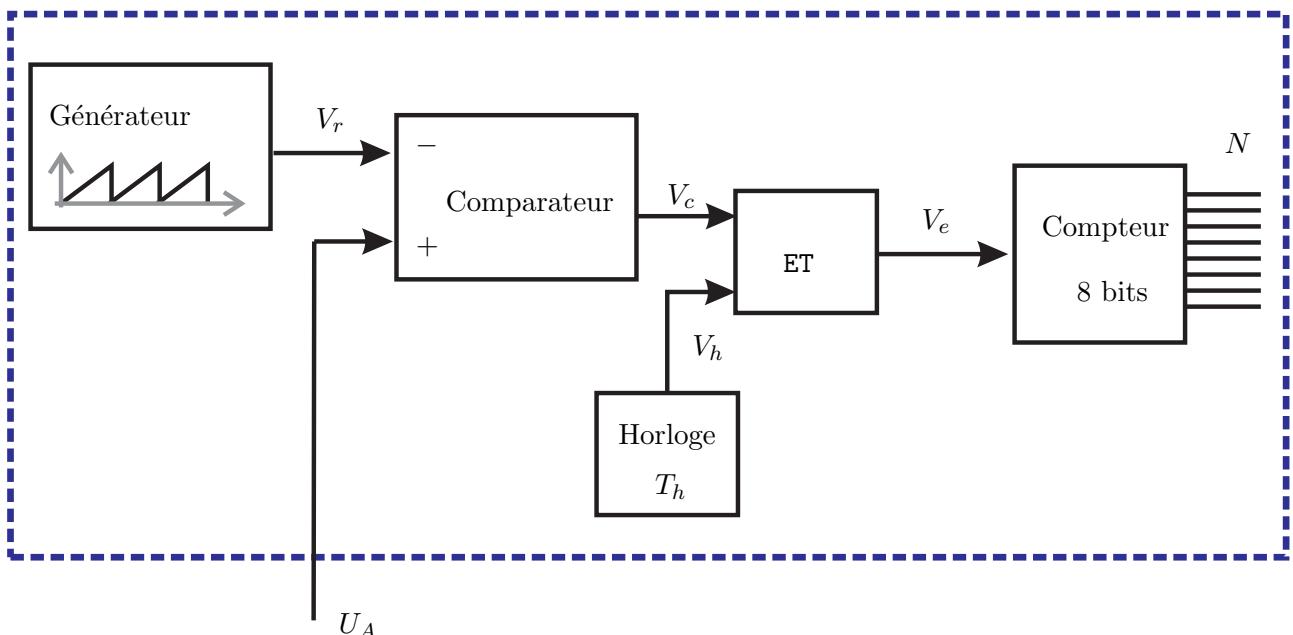


Figure 21 – Convertisseur Analogique Numérique

On réalise une conversion analogique numérique de la tension  $U_A$  tension image de la pression. Cette tension a été mise en forme et varie de 0 à 10 V. On obtient un nombre  $N$  proportionnel à la pression  $\Delta P$ .

La figure 21 représente la conversion analogique-numérique. On suppose que lors de la conversion, la tension  $U_A$  est constante. Le générateur de rampe fournit un signal  $V_r$  représenté sur la figure 22 et appelé "dent de scie". On note  $T$  sa période.

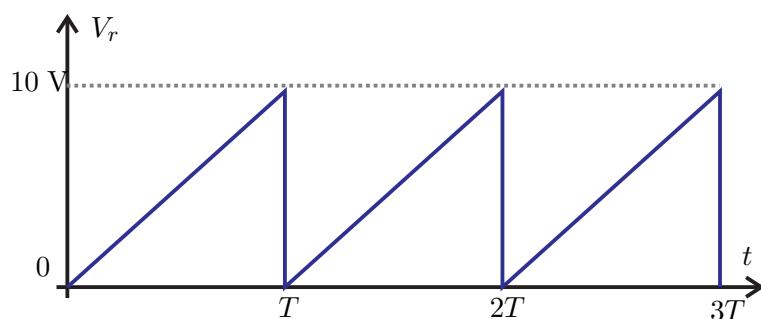


Figure 22 – Signal délivré par le générateur de rampe

Le comparateur compare la tension  $U_A$  à celle délivrée par le générateur de rampe. Ainsi

- ◊ Si  $U_A \geq V_r$ , alors  $V_c = 5$  V.
- ◊ Si  $U_A < V_r$ , alors  $V_c = 0$  V.

Le bloc "ET" assure une opération logique ET. La table entrées/sortie est donnée ci-dessous :

$V_c$ (V)	$V_h$ (V)	$V_e$ (V)
0	0	0
5	0	0
0	5	0
5	5	5

**43.** Sur le document réponse 3, représenter l'évolution temporelle  $V_c(t)$  et  $V_e(t)$ .

**44.** Le compteur travaille sur 8 bits et compte le nombre d'états hauts durant une période  $T$ . Quel est le nombre maximum  $N_{max}$  en sortie du compteur ?

**45.** On souhaite que ce nombre  $N_{max}$  corresponde à la fin de la rampe. Exprimer la période d'horloge  $T_h$  en fonction de  $n$  le nombre de bits, et de  $T$ . Exprimer la résolution numérique de ce convertisseur, c'est-à-dire la variation de tension  $\Delta U_A$  provoquant une incrémentation du compteur.

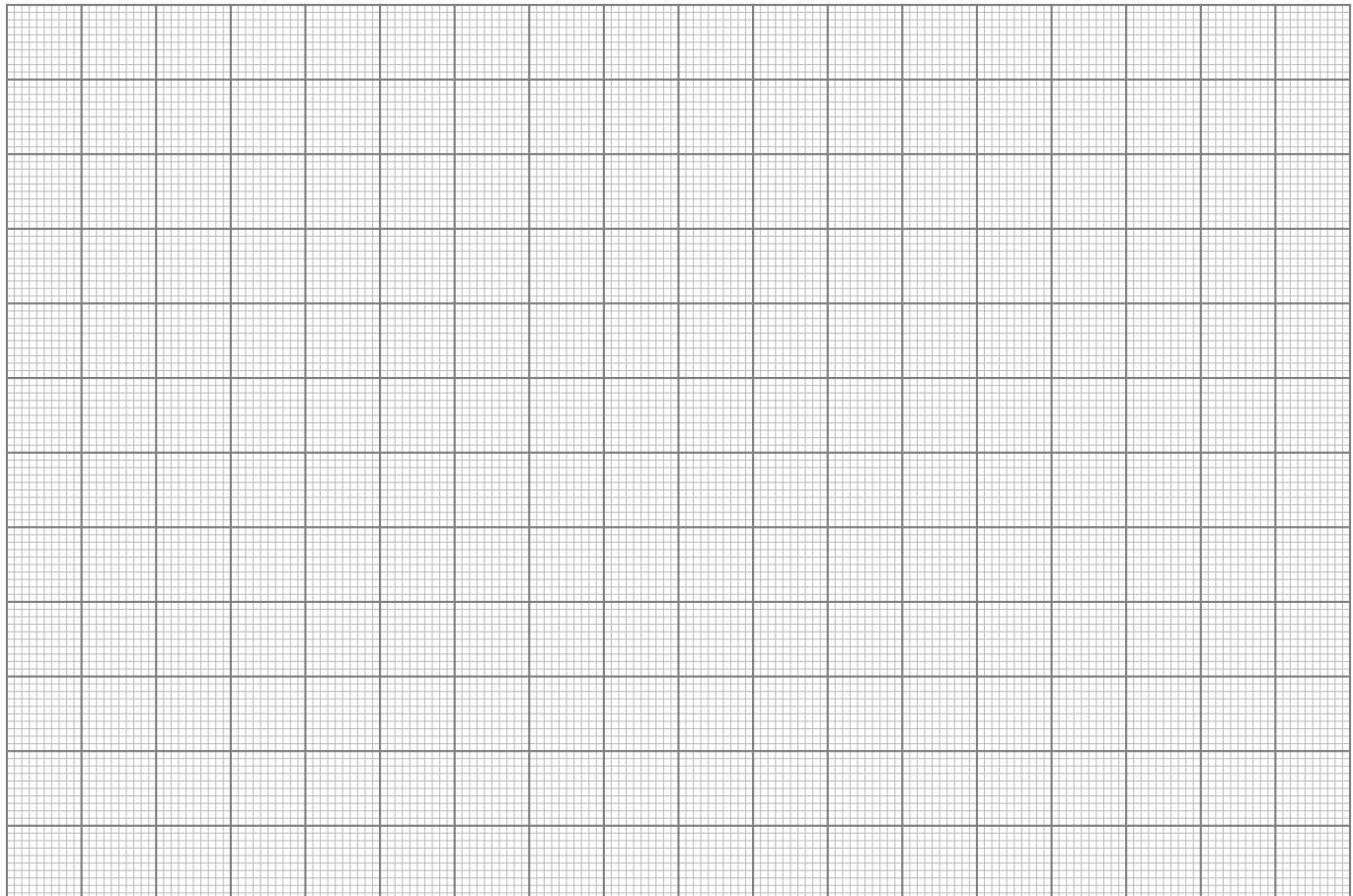
**46.** Comment peut-on améliorer la résolution d'un tel convertisseur ?

**47.** On souhaite faire un relevé de pression par seconde lors d'une plongée de 60 min. Quelle mémoire faut-il prévoir ? Conclusion.

# Document réponse 1

## à rendre avec la copie

### Question 6.8.

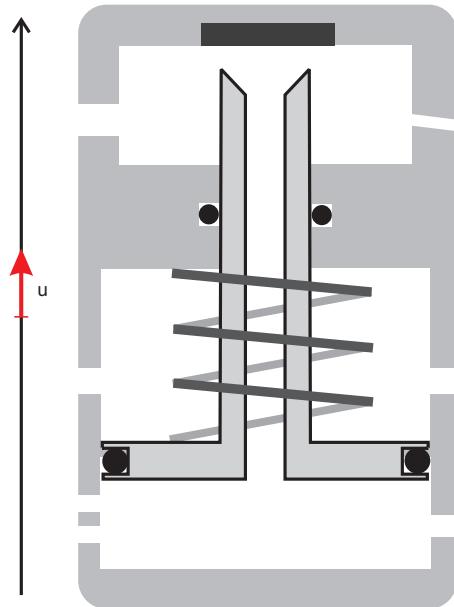


Courbe masse volumique  $\rho$  en fonction de la pression  $P$   
**Echelle :** 1 carreau  $\rightarrow$  50 bar **et** 1 carreau  $\rightarrow$  1 kg/m<sup>3</sup>

## Document réponse 2

à rendre avec la copie

Question 15.



Question 34.

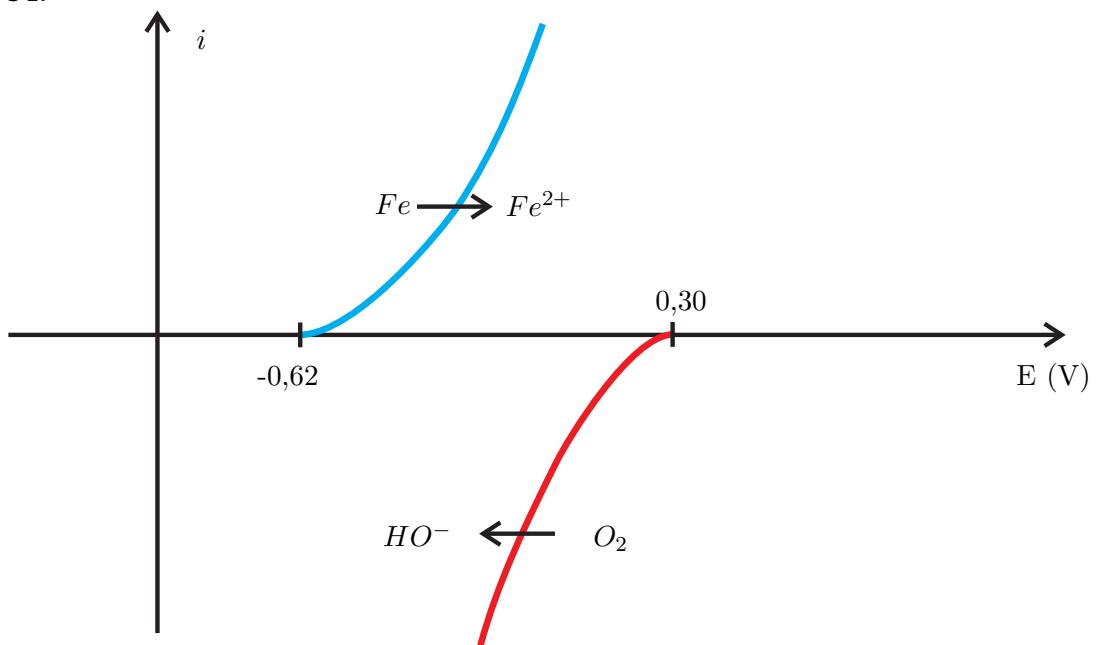


Figure 14 – Courbe intensité potentiel

# Document réponse 3

à rendre avec la copie

## Question 43.

