























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

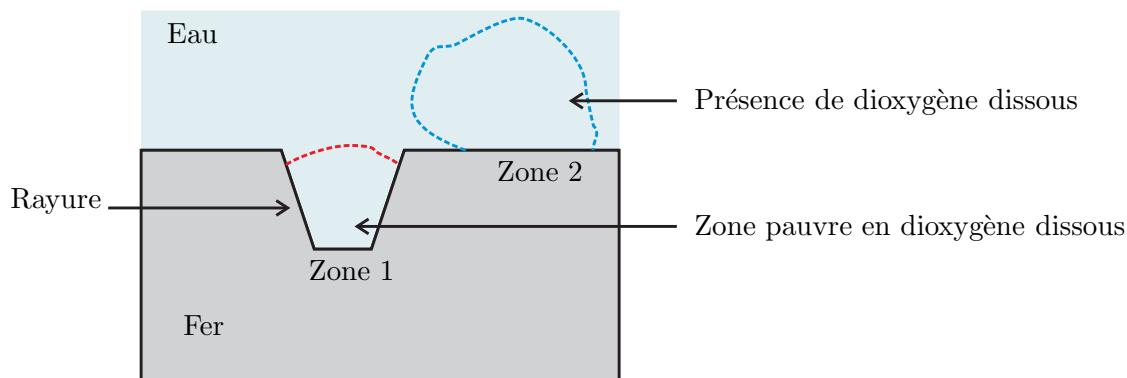


Figure 13 – Corrosion du fer

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 électrode-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  $E_{cor}$ .

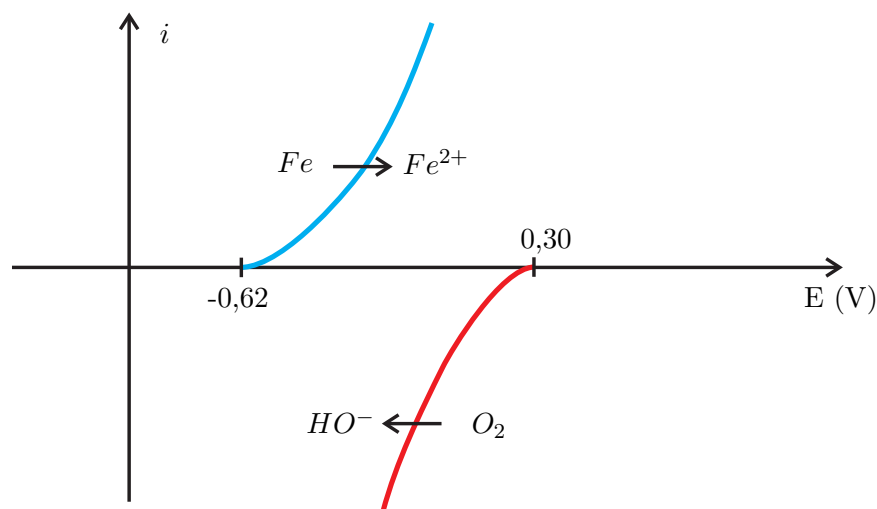


Figure 14 – Courbe intensité potentiel

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  $j_{cor} = 30 \mu\text{A/cm}^2$ . 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.

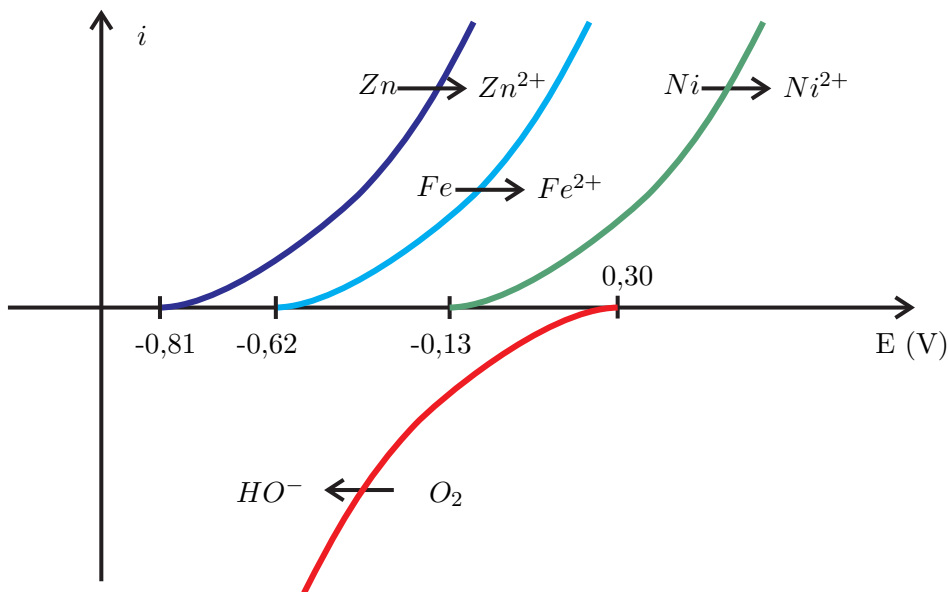


Figure 15 – Courbes intensité potentiel de différents métaux

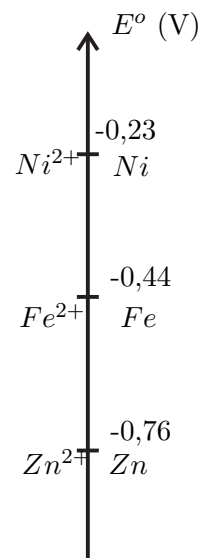


Figure 16 – Potentiels Standard

## 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 liée 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 :

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

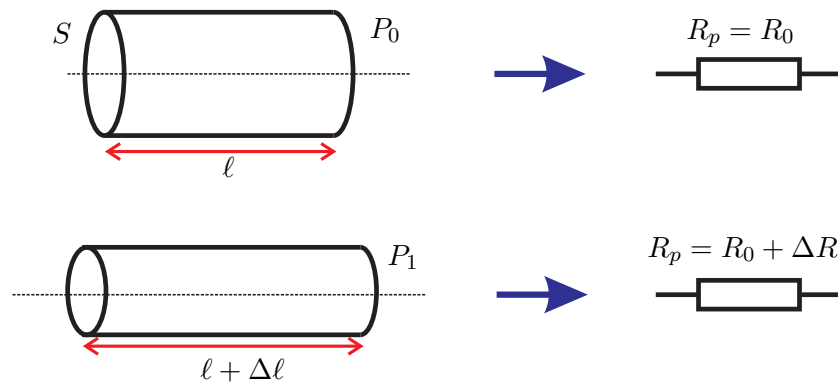


Figure 18 – Jauge d’extensométrie

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.

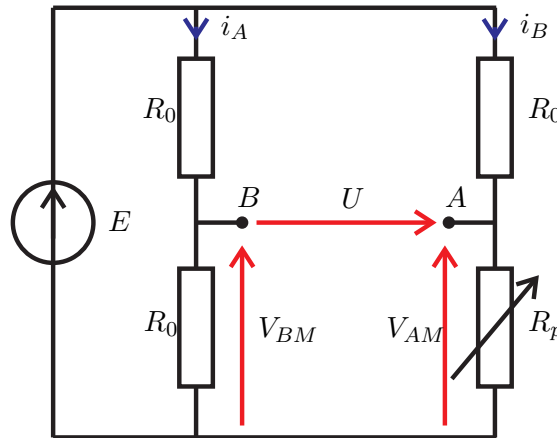


Figure 19 – Capteur de pression : pont de Wheatstone

**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 jauges 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 terme 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).

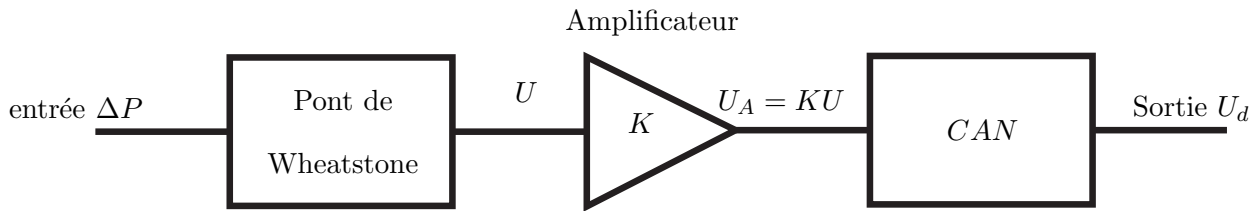


Figure 20 – Chaîne de mesure

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

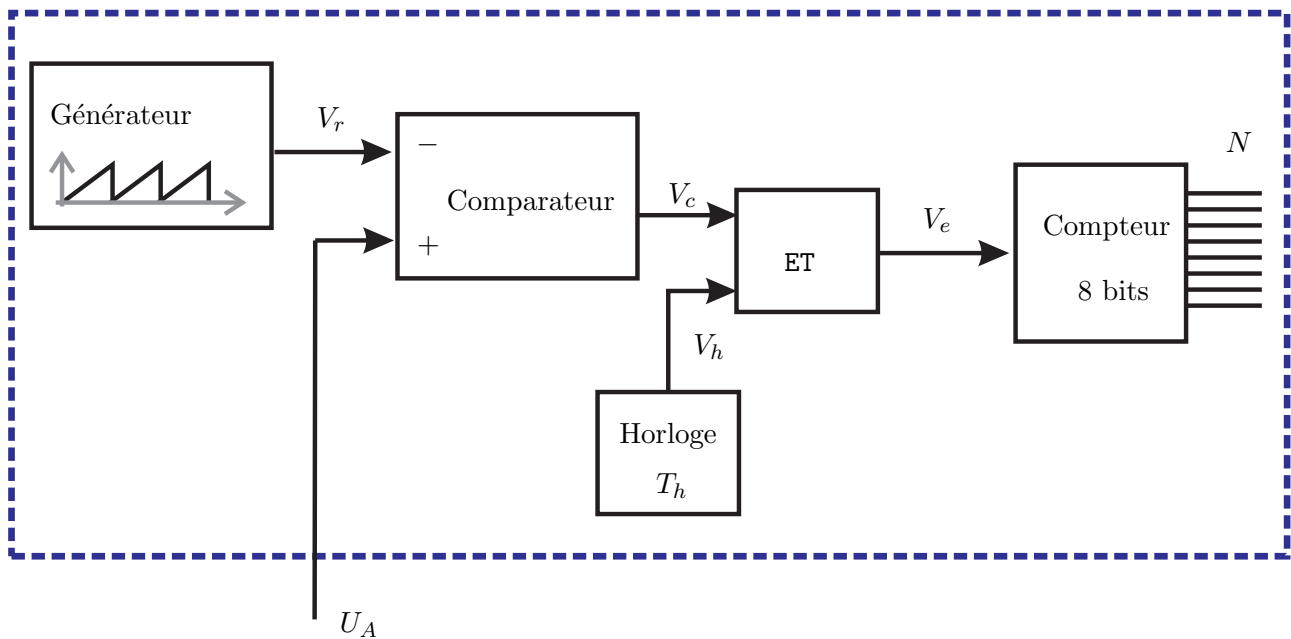


Figure 21 – Convertisseur Analogique Numérique

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.

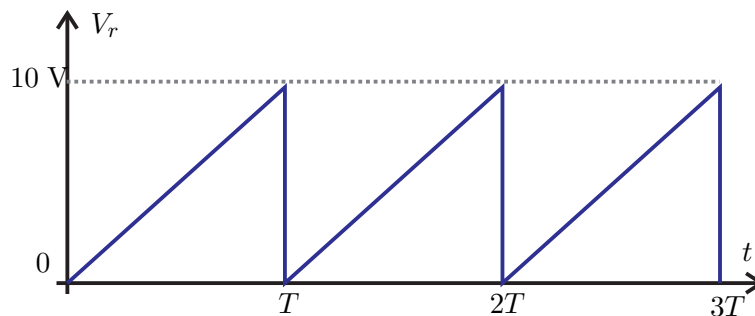


Figure 22 – Signal délivré par le générateur de rampe

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

- ◇ Si  $U_A \geq V_r$ , alors  $V_c = 5 \text{ V}$ .
- ◇ Si  $U_A < V_r$ , alors  $V_c = 0 \text{ V}$ .

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

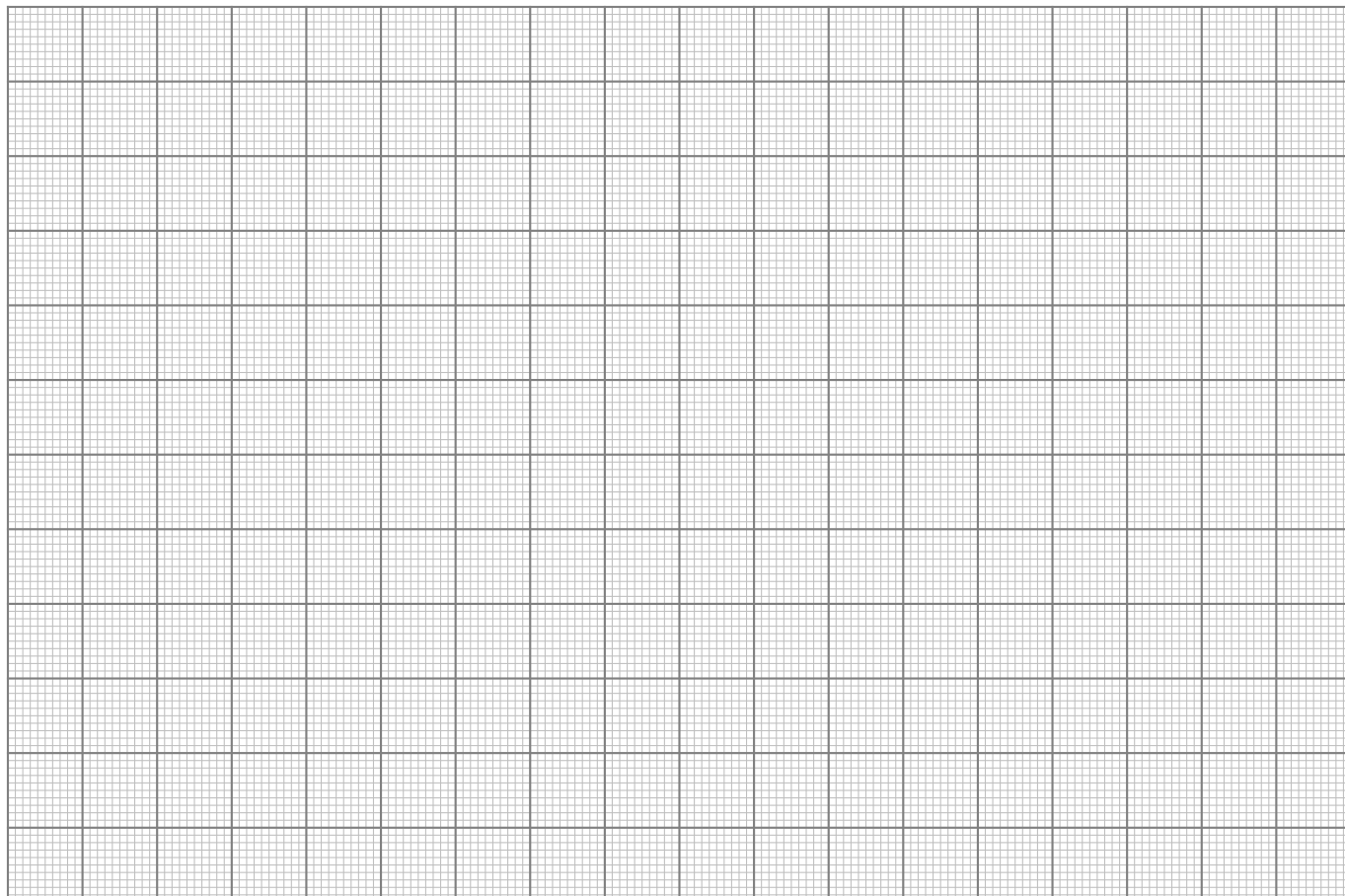
- 43.** Sur le document réponse 3, représenter l'évolution temporelle  $V_c(t)$  et  $V_e(t)$ .
- 44.** Le compteur travaille sur 8 bits et compte le nombre d'états hauts durant une période  $T$ . Quel est le nombre maximum  $N_{max}$  en sortie du compteur ?
- 45.** On souhaite que ce nombre  $N_{max}$  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.

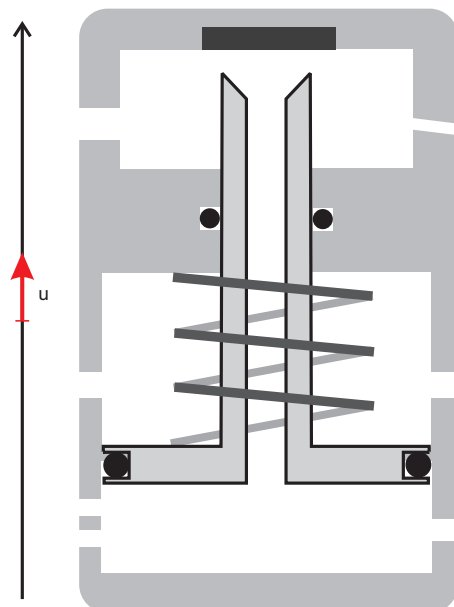


Courbe masse volumique  $\rho$  en fonction de la pression  $P$   
**Echelle :** 1 carreau  $\rightarrow$  50 bar **et** 1 carreau  $\rightarrow$  1 kg/m<sup>3</sup>

# Document réponse 2

## à rendre avec la copie

Question 15.



Question 34.

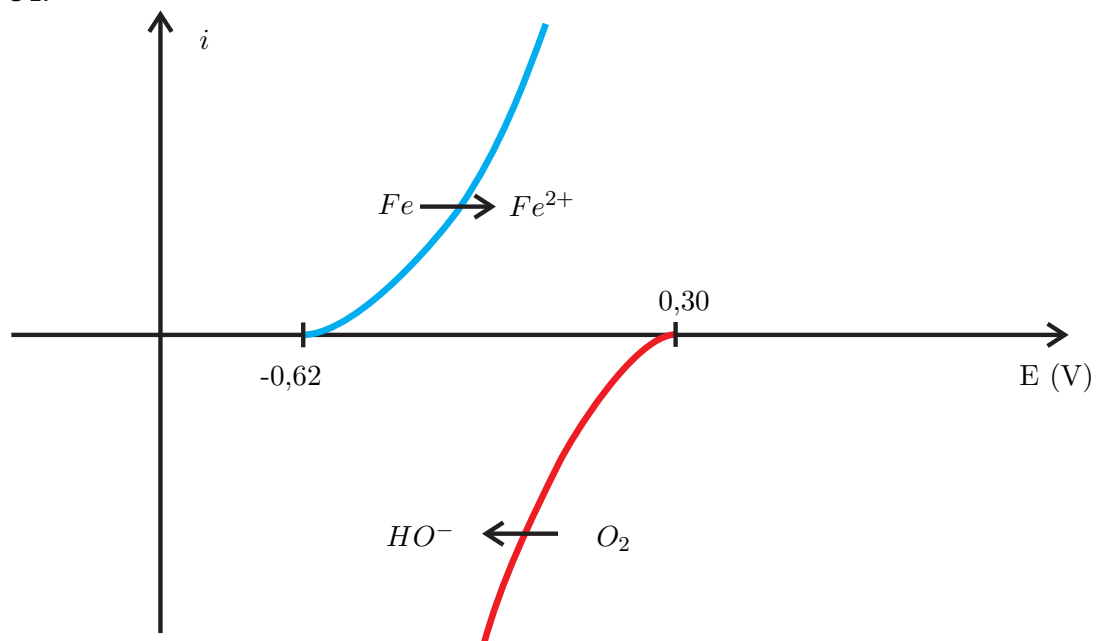


Figure 14 – Courbe intensité potentiel

# Document réponse 3

à rendre avec la copie

Question 43.

