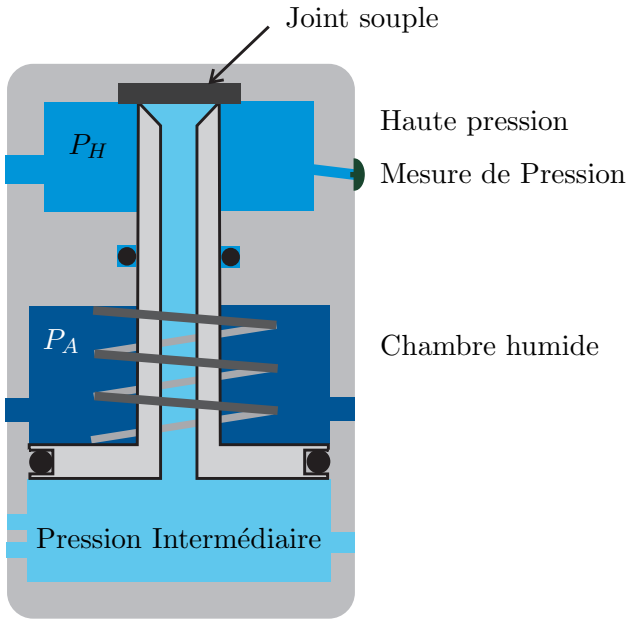


Figure 7 – Premier étage d'un détendeur

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.

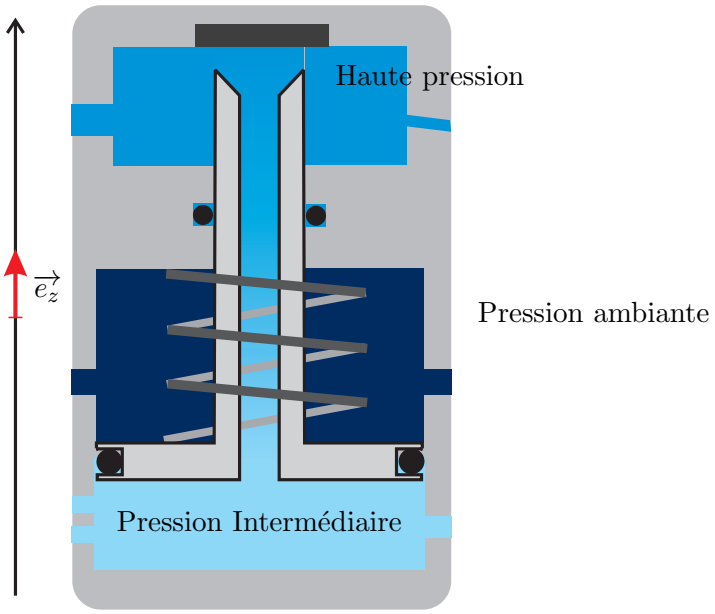


Figure 8 – Premier étage d'un détendeur - Position ouverte

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 $\overrightarrow{e_z}$ (voir figure 8).

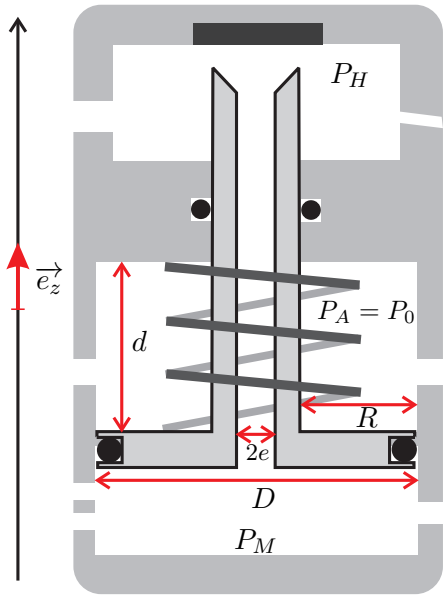


Figure 9 – Premier étage d'un détendeur à l'air libre

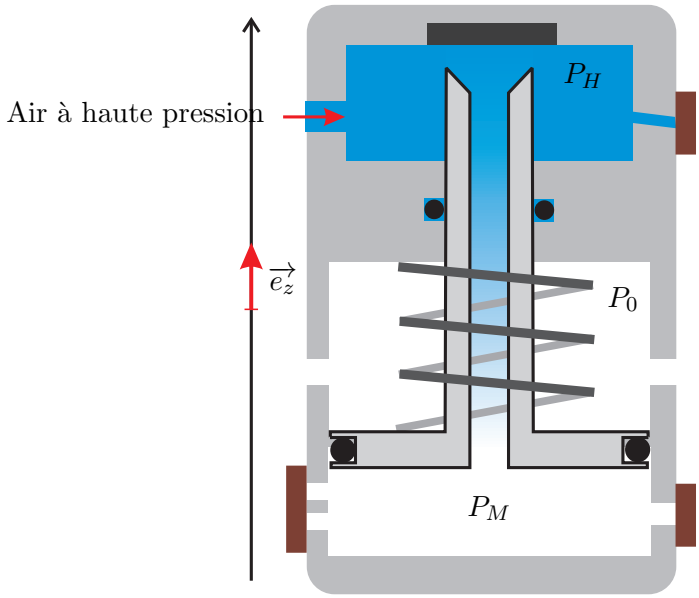


Figure 10 – Premier étage d'un détendeur raccordé à une bouteille à haute pression P_H

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 Φ_A en fonction de D et R. En déduire la force de pression $\overrightarrow{F_A}$ 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 Φ_M en fonction de D et e. En déduire la force de pression $\overrightarrow{F_M}$ 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 $\overrightarrow{F_v}$ de ces forces.

12.2. On s'intéresse maintenant aux forces de pression appliquées sur les surfaces obliques. Exprimer la somme des vecteurs unitaires $\overrightarrow{n_1} + \overrightarrow{n_2}$ en fonction de $\overrightarrow{e_z}$ et de l'angle α. 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 $-\overrightarrow{e_z}$. Etablir la relation entre l'angle α et les longueurs ℓ et δ. En déduire que la résultante de ces forces, notée $\overrightarrow{F_o}$, 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 Φ_C en fonction de e, R et D, et exprimer F_o en fonction de P_H et Φ_C puis de P_H, D, R et e.

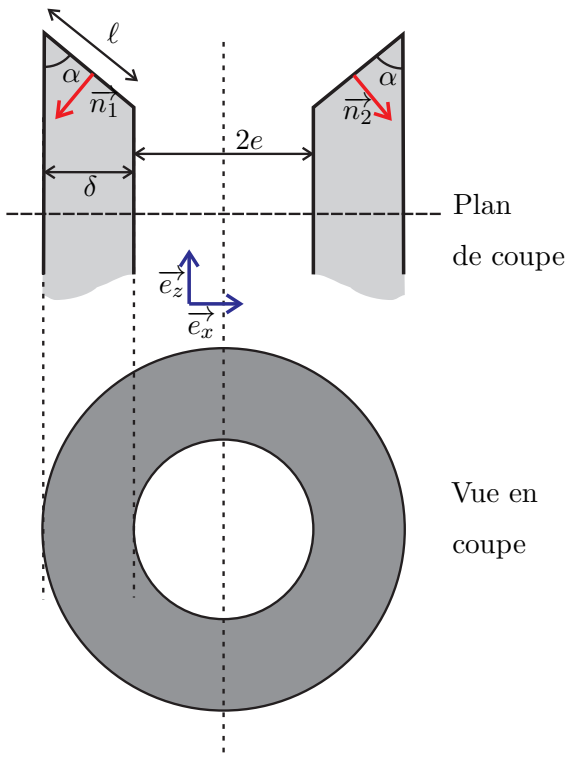


Figure 11 – Force de pression équivalente exercée sur le piston par l'étage à haute pression

13. Etablir la relation entre les surfaces Φ_M, Φ_A et Φ_C.

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 ℓ_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 $\overrightarrow{R}$ 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 :

$$P_M \geq \frac{k\Delta\ell}{\Phi_A} + P_0 \tag{3}$$

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.

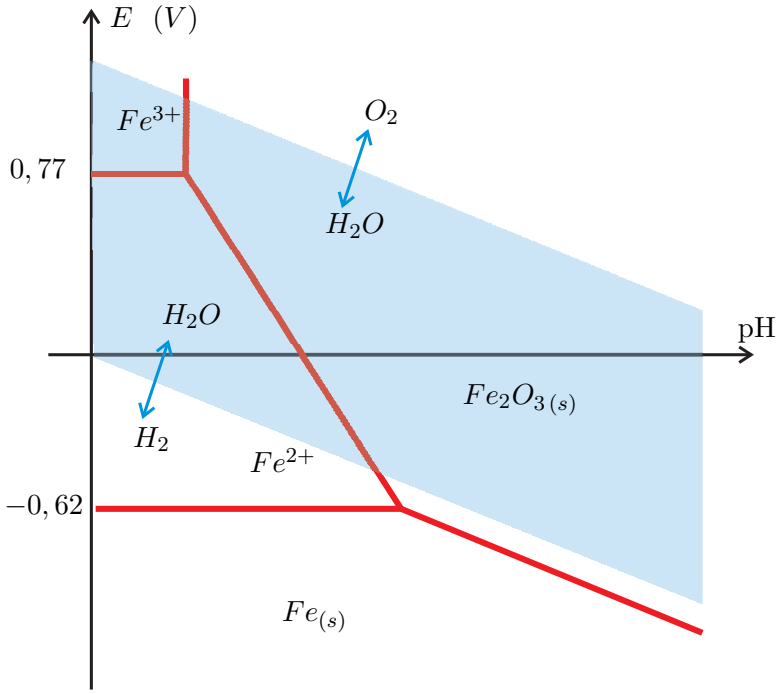


Figure 12 – Diagramme de stabilité du Fer dans l'eau $C = 10^{-6}$ mol/L

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).

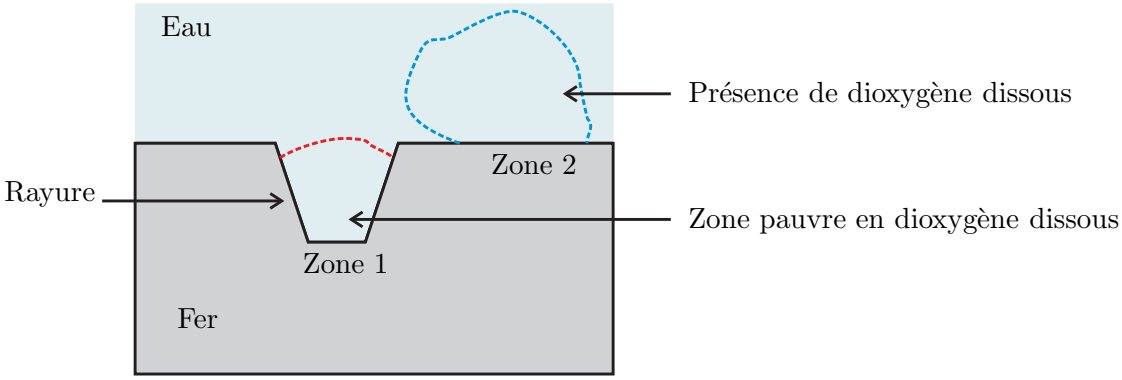


Figure 13 – Corrosion du fer

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 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 $v = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$ et l'intensité du courant électrique à l'anode par $i_a = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}$ où q représente la charge échangée à l'anode.
On note $e = 1,60.10^{-19}$ 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}.

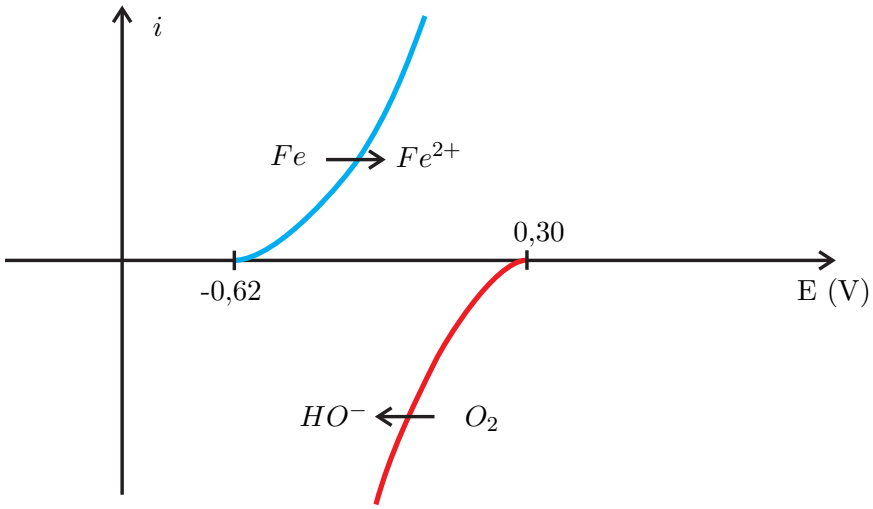


Figure 14 – Courbe intensité potentiel

Données :

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

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

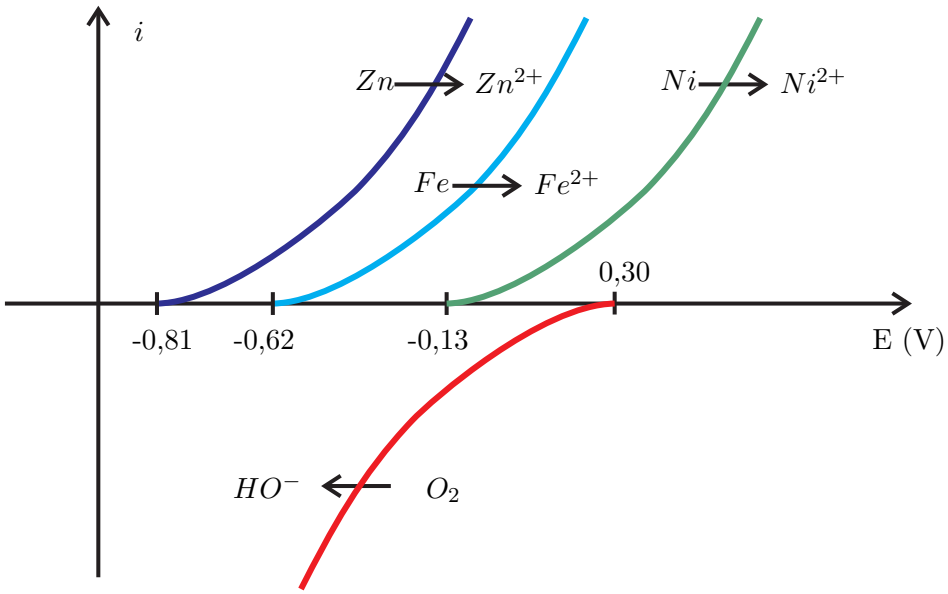


Figure 15 – Courbes intensité potentiel de différents métaux

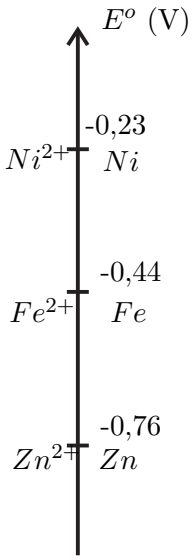


Figure 16 – Potentiels Standard

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 ℓ 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 :

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

où γ est la conductivité du matériau utilisé.
Ainsi, lorsque la pression varie, ℓ 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 :

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

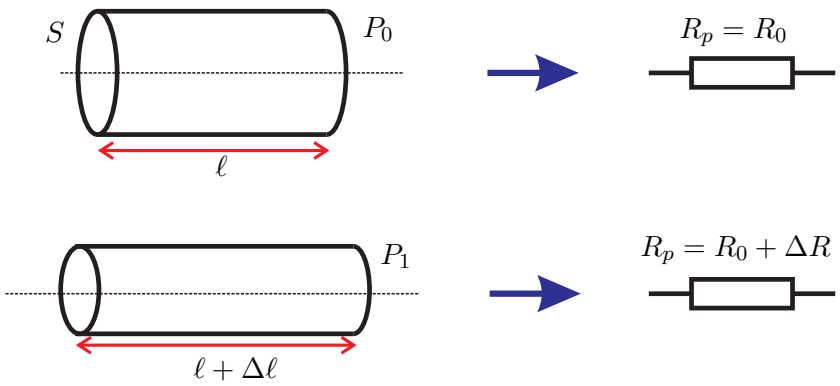


Figure 18 – Jauge d'extensométrie

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.

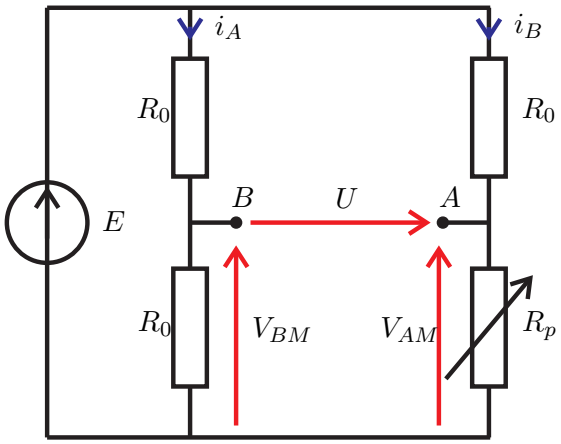


Figure 19 – Capteur de pression : pont de Wheatstone

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 ΔR. En déduire une expression de la tension U.

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

40. Exprimer la tension U en fonction de ε 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 ε et en négligeant les termes proportionnels à ε^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 ΔP et la tension U.

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

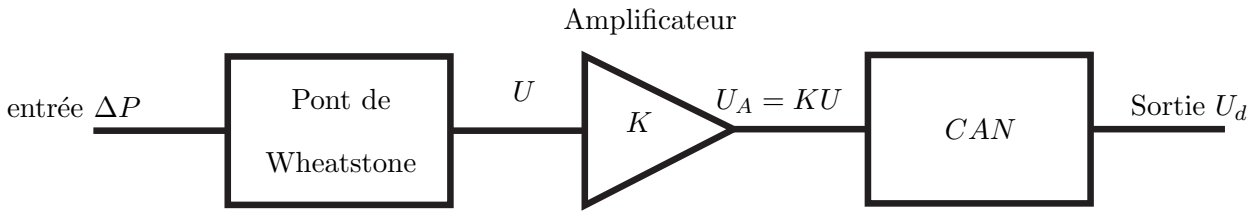


Figure 20 – Chaîne de mesure

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

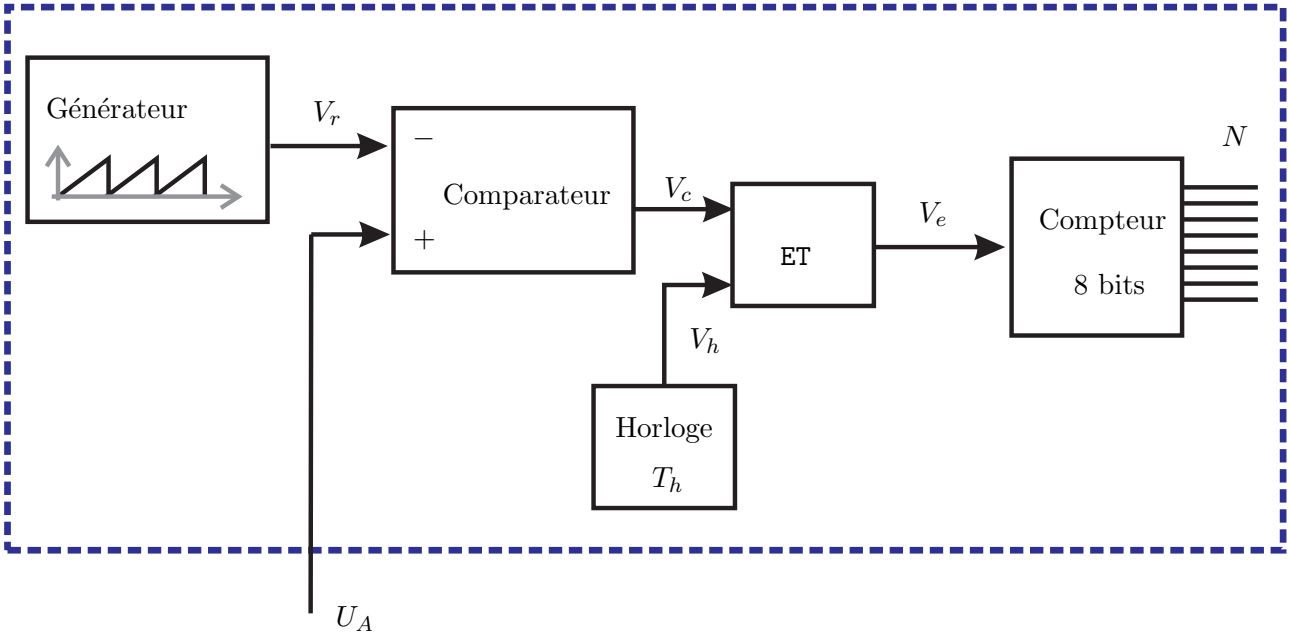


Figure 21 – Convertisseur Analogique Numérique

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 ΔP.
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.

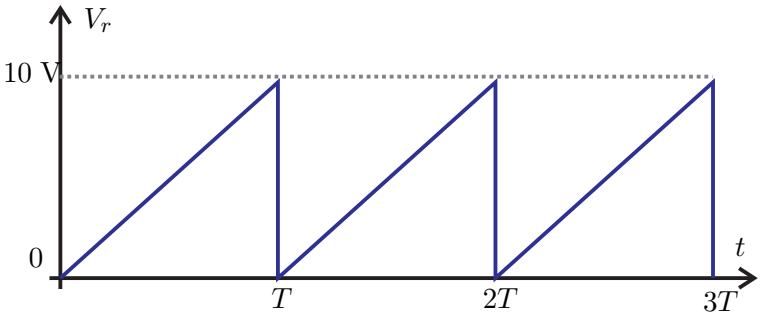


Figure 22 – Signal délivré par le générateur de rampe

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 le variation de tension ΔU_A provoquant une incrémentation du compteur.

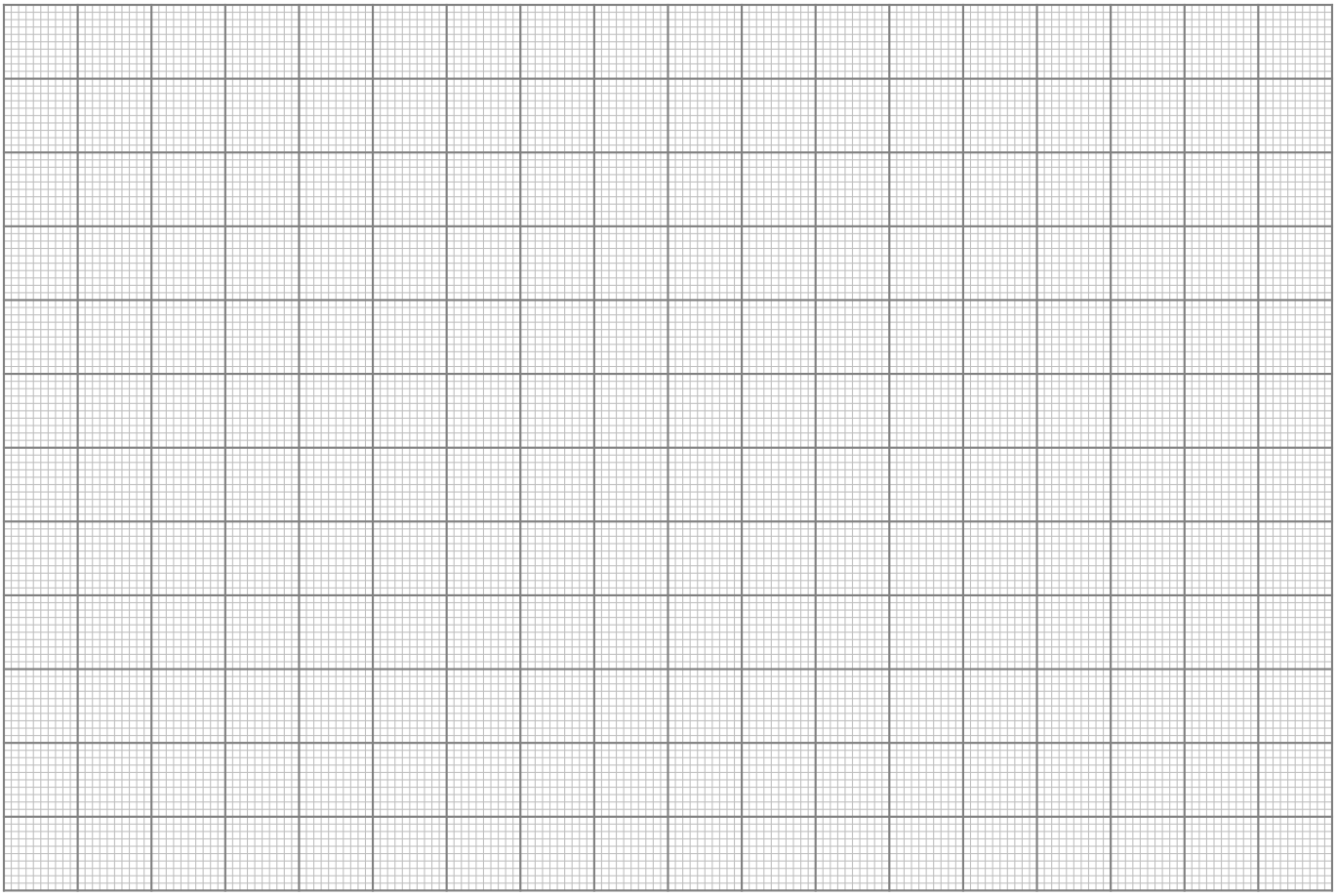
46. Comment peut-on améliorer la résolution d'un tel convertisseur ?

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.

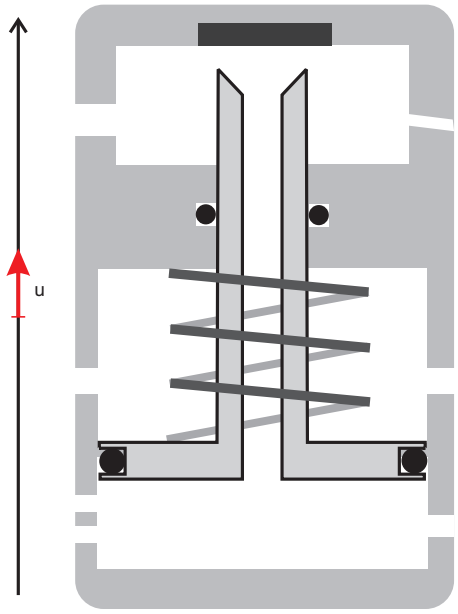


Courbe masse volumique ρ en fonction de la pression P
Echelle : 1 carreau $\rightarrow$ 50 bar **et** 1 carreau $\rightarrow$ 1 kg/m^3

Document réponse 2

à rendre avec la copie

Question 15.



Question 34.

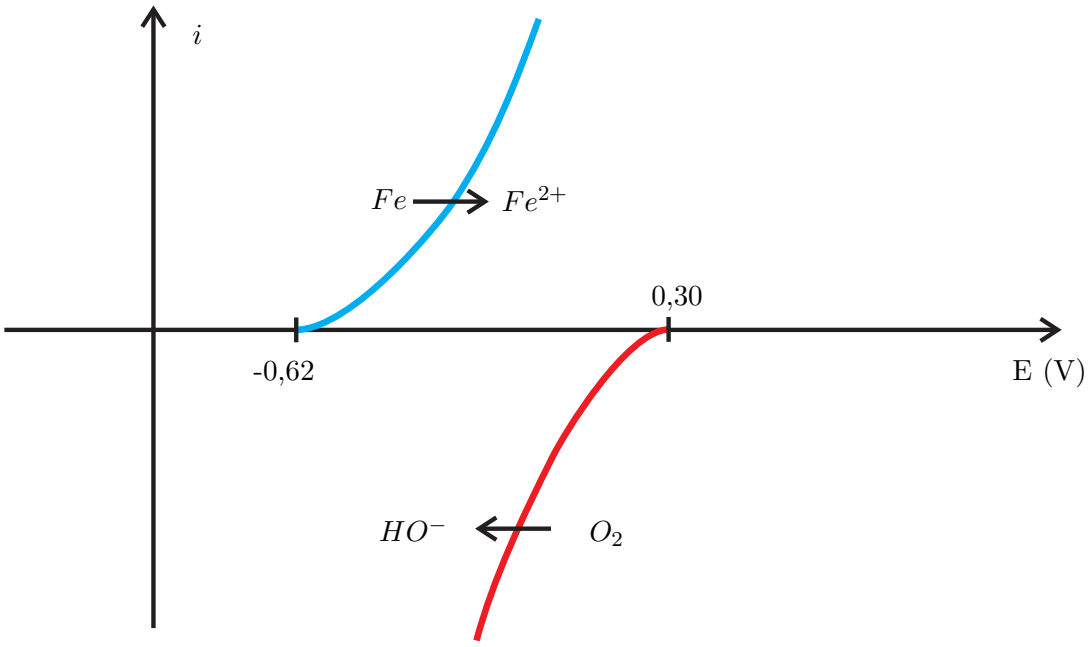
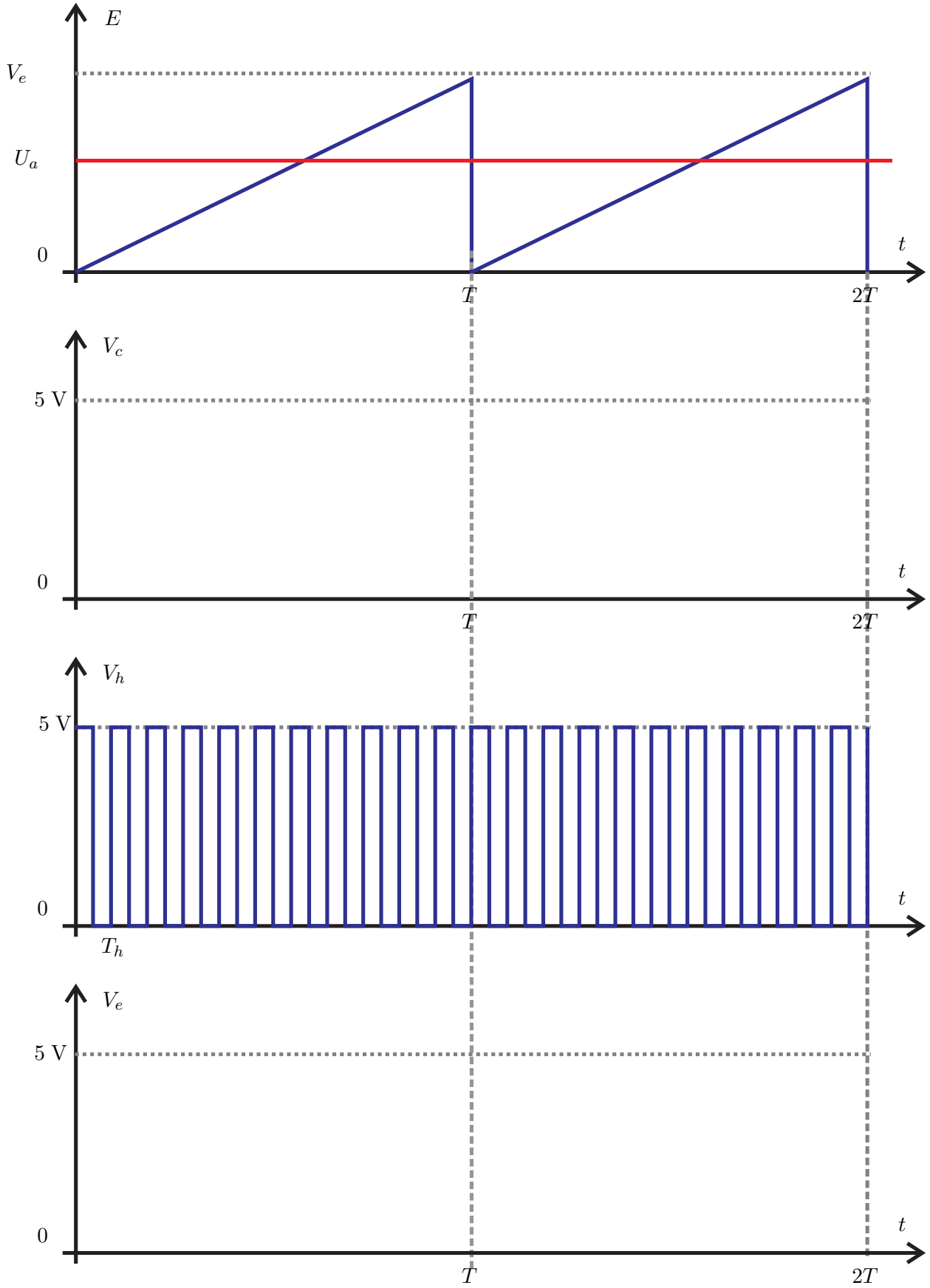


Figure 14 – Courbe intensité potentiel

Document réponse 3

à rendre avec la copie

Question 43.