Concours e3a-Polytech, France

Session 2026, filière PSI

Physique-chimie

Durée : 4 heures

Ce que traite le sujet

- Partie I.1 : une retenue d'eau
- Partie I.2 : remplissage d'un bassin et contrôle du niveau
- Partie I.3 : couple hydraulique et puissance utile
- Partie II : transport de l'énergie électrique
- Partie III.1 : corrosion des conduites forcées
- Partie III.2 : réduction des oxydes de fer par le monoxyde de carbone

Sujet reproduit sans retouche à partir de la page suivante.

Résumé des parties, chapitres de cours liés et autres années :
prepahelp.com/annales/e3a/psi/2026/physique-chimie

Prepa Help ne revendique aucun droit sur le sujet, propriété de l'organisateur du concours.

e3a POLYTECH

ÉPREUVE SPÉCIFIQUE - FILIÈRE PSI

PHYSIQUE-CHIMIE

Durée : 4 heures

N.B. : le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

RAPPEL DES CONSIGNES

- *Utiliser uniquement un stylo noir ou bleu foncé non effaçable pour la rédaction de votre composition ; d'autres couleurs, excepté le vert, bleu clair ou turquoise, peuvent être utilisées, mais exclusivement pour les schémas et la mise en évidence des résultats.*
- *Ne pas utiliser de correcteur.*
- *Écrire le mot FIN à la fin de votre composition.*

Les calculatrices sont interdites.

Le sujet est constitué de trois parties indépendantes.

Remarques préliminaires importantes

1. Il est rappelé aux candidat(e)s que les explications des phénomènes étudiés interviennent dans la notation au même titre que les développements analytiques et les applications numériques.
2. Tout résultat fourni par l'énoncé peut être admis et utilisé par la suite.
3. Les questions comportant le verbe « calculer » demandent une application numérique. Les résultats des applications numériques seront donnés **avec deux chiffres significatifs au maximum**. Les résultats exprimés sans unité ne seront pas comptabilisés.
4. Les questions libellées par une astérisque $(\star)$ demandent de l'initiative de la part des candidats. Le barème valorise cette prise d'initiative et tient compte du temps nécessaire à la résolution de ces questions.

Les **documents 1 et 2 en pages 12 et 13** regroupent les données utiles à la résolution de ce problème. Une annexe figure également en **page 13**.

L'énergie hydraulique, première énergie renouvelable en région PACA

L'énergie hydraulique est une source d'énergie renouvelable qui exploite la force de l'eau pour produire de l'électricité. Elle est l'une des plus anciennes et des plus répandues dans le monde, contribuant de manière significative à la production d'énergie décarbonée. On distingue deux principales filières d'énergie hydraulique : la grande hydraulique (centrale de grande et moyenne chute) et la petite hydraulique (usine au fil de l'eau). Les énergies marines (usines marémotrices, hydroliennes, houlomotrices) utilisent aussi la force motrice de l'eau pour produire de l'énergie.

EDF affirme dans un récent rapport :

- l'hydroélectricité est la première des énergies renouvelables en France [1] et dans le monde [2] ;
- EDF exploite 425 centrales hydrauliques et plus de 600 barrages en France [3] ;
- en 2022, les centrales hydroélectriques françaises ont produit $49,6\ \mathrm{TW}\cdot\mathrm{h}$ (terawatt-heure), soit 11 % de la production métropolitaine [4]. L'hydroélectricité représente ainsi plus de la moitié (53 %) de la production d'électricité renouvelable en France.
- la puissance installée de l'hydroélectricité en France métropolitaine est de $25,9\ \mathrm{GW}$. Elle représente 18 % du parc de production d'électricité et est exploitée à près de 80 % par EDF, soit $20,7\ \mathrm{GW}$.

La première partie du sujet aborde la conversion d'énergie hydraulique en énergie électrique. La deuxième partie évoque le transport de l'énergie électrique. La troisième partie s'intéresse à l'une des étapes clés dans la fabrication des aciers des conduites forcées ainsi qu'au phénomène de corrosion.

Q1. Sachant que EDF recense environ 40 millions de clients utilisant l'électricité, évaluer l'ordre de grandeur de la puissance électrique moyenne produite par les centrales hydroélectriques françaises par client électricité en 2022.
Aide au calcul : $1/365 \approx 3\cdot 10^{-3}$

Partie I - Convertir l'énergie hydraulique en énergie électrique

I.1 - Une retenue d'eau

La Terre est assimilée à un astre sphérique de rayon R_T et de masse M_T. On considère en première approximation sa masse volumique μ_T uniforme.

Q2. Rappeler l'expression vectorielle de la force d'interaction électrostatique s'exerçant dans le vide entre deux charges électriques ponctuelles q_1 et q_2 distantes d'une longueur r et celle de la force d'interaction gravitationnelle s'exerçant entre deux masses ponctuelles m_1 et m_2 également distantes d'une longueur r. Par analogie, énoncer le théorème de Gauss gravitationnel et en déduire l'expression du champ gravitationnel $\overrightarrow{G}(M)$ créé par la Terre en un point M extérieur à cette dernière.

Q3. En assimilant champ de pesanteur et champ de gravitation, exprimer la valeur du champ de pesanteur g_T au niveau du sol en fonction notamment de la masse de la Terre M_T et de son rayon R_T. En considérant une altitude h comptée à partir du sol terrestre négligeable devant R_T et en utilisant un développement limité, exprimer ensuite le champ de pesanteur $g(h)$ en fonction de g_T, h et de R_T. En déduire alors l'altitude $h_{\max}$ en-deçà de laquelle la variation relative du champ de pesanteur est inférieure à 0,1 %.

Q4. Que penser du champ de pesanteur terrestre $\overrightarrow{g}$ à l'échelle d'un barrage ou d'une retenue d'eau de hauteur de l'ordre de quelques dizaines de mètres ? On rappelle que les grandeurs utiles et leurs notations sont dans le **document 2 page 13**.

1. **Source :** Panorama de l'électricité renouvelable 2021
2. **Source :** IEA, septembre 2022 - Hydropower report
3. **Source :** EDF - URD 2022
4. **Source :** RTE - Bilan électrique 2022

Les barrages en béton sont des ouvrages robustes dont les principales fonctions sont la retenue d'eau et la production d'énergie électrique. L'intérêt est de produire de l'énergie électrique lorsque le besoin s'en ressent, grâce à la libération d'eau de la retenue qui fait tourner la turbine. Le barrage poids d'Isola 2000 a été mis en service en 2006. Ses caractéristiques sont :

- longueur du barrage selon $\overrightarrow{u_y}$: $L = 605\,\mathrm{m}$;
- hauteur du barrage : $H = 15\,\mathrm{m}$;
- volume de la retenue d'eau : $V_{\text{retenue}} = 130 \cdot 10^3\,\mathrm{m}^3$.

On envisage un barrage poids de forme trapézoïdale décrite sur la **figure 1**.

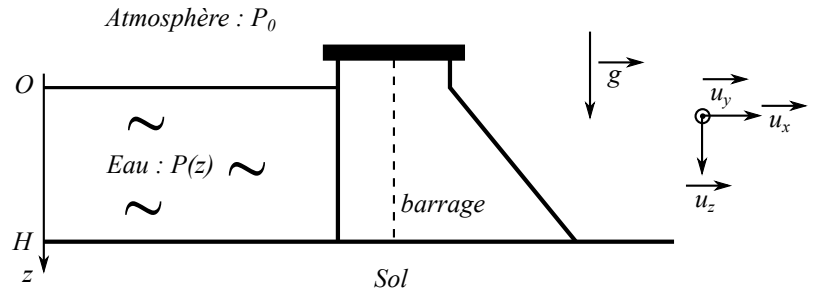


FIGURE 1 – Un barrage poids de forme trapézoïdale

L'interface air/eau affleure la partie supérieure du barrage. L'axe vertical (Oz) est orienté vers le bas et possède son origine au niveau de cet interface. L'eau est considérée comme un fluide incompressible de masse volumique μ_e. La pression de l'air P_0 est supposée uniforme à l'échelle du barrage. On suppose le champ de pesanteur $\overrightarrow{g}$ uniforme.

Q5. Établir la loi d'évolution du champ de pression $P(z)$ dans l'eau en fonction de la profondeur z.

Q6. Déterminer l'expression de la résultante des forces pressantes exercée par l'eau sur le barrage. Évaluer l'ordre de grandeur de sa norme dans le cas du barrage poids étudié possédant les caractéristiques de celui d'Isola 2000. **Aide au calcul :** $6,05 \times 15 \sim 9 \cdot 10^1$

I.2 - Remplissage d'un bassin et contrôle du niveau

La Tinée est une rivière prenant sa source à proximité de la cime de la Bonette et alimente trois centrales hydroélectriques : Valabres, Bancairon et Courbaisse, avant de se jeter dans le Var. Les aménagements qui équipent la Tinée, compris entre le village d'Isola et son confluent avec le Var, turbinent le débit naturel de la rivière qui fluctue au cours des saisons. Les différents écoulements sont dérivés par des prises d'eau, prolongées par des galeries souterraines, puis des conduites forcées qui amènent l'eau jusqu'aux turbines. Avant d'être turbinée, une fraction de l'eau de la Tinée est stockée dans des bassins de dessablage.

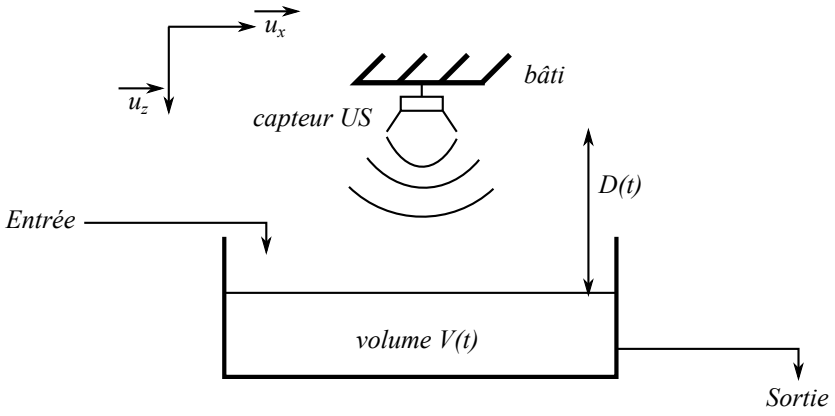


FIGURE 2 – Bassin et capteur à ultrasons

Afin de suivre l'évolution temporelle de la hauteur d'eau dans le bassin, des capteurs à ultrasons ont été installés. Ces derniers émettent des trains d'ondes ultrasonores qui se réfléchissent à l'interface air/eau et sont détectés.

L'air est caractérisé au repos par sa masse volumique ϱ_0, la pression P_0 et la température T_0. Le passage d'une onde ultrasonore perturbe ces différents champs. On considère la propagation d'une onde ultrasonore dans la direction $\overrightarrow{u_z}$. Les champs perturbés sont désignés par des grandeurs surmontées d'un tilde : $\tilde{u}$.

On pose donc $\begin{cases} P(z\,,\,t) = P_0 + \tilde{p}(z\,,\,t) \\ \varrho(z\,,\,t) = \varrho_0 + \tilde{\varrho}(z\,,\,t) \\ \overrightarrow{v}(z\,,\,t) = \tilde{v}(z\,,\,t)\,\overrightarrow{u_z} \end{cases}$ où $\overrightarrow{v}$ est le champ eulérien des vitesses.

L'étude de la propagation de telles ondes s'effectue dans le cadre de l'approximation acoustique.

Q7. Rappeler en quoi consiste l'approximation acoustique.

Q8. Rappeler l'équation unidimensionnelle de conservation de la masse et la simplifier dans le cadre de l'approximation acoustique.

Le principe fondamental de la dynamique appliqué à une particule de fluide et projeté orthogonalement sur un axe dirigé par $\overrightarrow{u_z}$, direction de propagation de l'onde ultrasonore, conduit dans le cadre de cette étude à :

$$\varrho \cdot \left[\frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \right] = -\frac{\partial P}{\partial z}\,. \tag{1}$$

Q9. Que représentent les différents termes de cette équation ? En déduire une simplification de cette dernière dans le cadre de l'approximation acoustique.

L'évolution thermodynamique d'une particule de fluide suite au passage de l'onde est isentropique.

Le coefficient de compressibilité isentropique de l'air est défini par $\chi_s = \dfrac{1}{\varrho}\left(\dfrac{\partial \varrho}{\partial P}\right)_S$.

Q10. Établir l'équation de couplage liant $\tilde{\varrho}$ et $\tilde{p}$ au voisinage de l'état de repos de l'air caractérisé par le triplet $\Big(\varrho_0\,,\,P_0\,,\,T_0\Big)$.

Q11. À l'aide des trois équations précédentes, montrer que $\tilde{p}$ satisfait l'équation aux dérivées partielles :

$$\frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial z^2} = \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial t^2}\,. \tag{2}$$

Q12. Comment appelle-t-on cette équation ? Quelle est l'expression de c_s ? Quelle est sa dimension et que représente-t-elle ?

L'air est assimilé à un gaz parfait.

Q13. Donner l'expression de la masse volumique au repos ϱ_0 en fonction de la pression P_0 et de la température T_0. Quelle relation existe-t-il entre P et ϱ pour une quantité de gaz parfait subissant une évolution isentropique ?

Q14. En déduire que $c_s = \sqrt{\dfrac{\gamma R T_0}{\mathcal{M}_{\text{air}}}}$, où γ est le coefficient isentropique de l'air et $\mathcal{M}_{\text{air}}$ la masse molaire moyenne que l'on exprimera en fonction des masses molaires des principaux constituants de l'air ainsi que des fractions molaires respectives.

Q15. Les conditions sont $P_0 = 1,0\ \text{bar}$ et $T_0 = 3,0 \cdot 10^2\ \text{K}$. Calculer la masse volumique ϱ_0 de l'air ainsi que c_s. **Aide au calcul :** $1/8,3 \approx 0,12 \quad ; \quad \sqrt{10} \approx 3,2 \quad ; \quad 1,4 \times 8,3 \approx 10$

Le capteur à ultrasons utilisé pour la mesure de la hauteur d'eau dans le bassin est constitué d'un émetteur de salves d'ondes ultrasonores et d'un récepteur d'ondes ultrasonores, placés côte à côte. La **figure 3** représente l'évolution temporelle d'une salve d'ondes ultrasonores émise par l'émetteur et réceptionnée par le récepteur. L'acquisition a été réalisée à la température $T_1 = 2,9 \cdot 10^2$ K sous la pression P_0. L'origine des temps est arbitraire. Le capteur à ultrasons a été placé à une hauteur $H_{\text{capteur}} = 8,5$ m du fond du bassin. Dans ces conditions, la célérité des ondes ultrasonores dans l'air est $c_s = 3,4 \cdot 10^2$ m $\cdot$ s^{-1}.

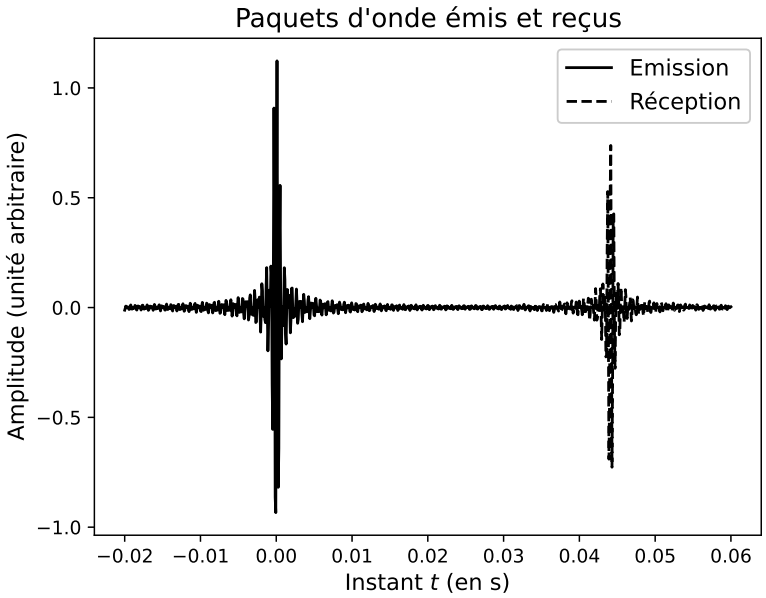


FIGURE 3 – Acquisition

Q16. Quelle est la hauteur d'eau $h(t_{\text{mes}})$ présente dans le bassin à l'instant t_{mes} de la mesure ? L'air est considéré être un milieu faiblement dispersif.

Afin de maintenir un niveau d'eau constant dans le bassin, des vannes de décharge au niveau du canal d'amenée de l'eau sont plus ou moins ouvertes ou fermées.

I.3 - Couple hydraulique et puissance utile

Les conduites amenant l'eau d'une retenue vers la turbine possèdent un certain dénivelé permettant à l'eau d'acquérir de l'énergie cinétique pour être ensuite turbinée (**cf. figure 12 en annexe en fin de sujet**).

Q17. En supposant, pour simplifier, que le bassin de rétention d'eau à Isola est de forme parallélépipédique, dont le sol de section S est situé à une hauteur H de l'entrée de la turbine et que la conduite forcée amont est vide, évaluer l'énergie maximale susceptible d'être convertie en énergie électrique en fonction de H et de h_0. Pourquoi s'agit-il d'une énergie maximale ?

Les turbines utilisées sont des turbines à réaction où l'énergie cinétique et l'énergie de pression du fluide sont partiellement transformées en énergie cinétique de rotation de la roue mobile de la turbine.

Une turbine Francis, dans sa forme moderne, est composée des éléments suivants :

- une **bâche spirale** recevant l'eau sous pression de la conduite forcée amont et la distribuant vers l'intérieur de l'anneau qu'elle forme.
- le **distributeur** placé au milieu de l'anneau de la bâche spirale. Ses aubes orientables permettent d'ajuster le débit volumique d'eau turbinée.
- une **roue** (appelée roue Francis) à admission radiale et à sortie axiale forme le cœur de la turbine. C'est la seule pièce tournante. Elle possède des aubes non orientables. Les aubes de la roue reçoivent l'écoulement en rotation en sortie du diffuseur et le dévient pour ne lui laisser qu'un mou-

vement de rotation minime. Le moment cinétique ainsi absorbé produit le couple scalaire utile Γ_i transmis à l'arbre de la turbine.

- le **diffuseur** reçoit l'eau à la sortie de la roue et la conduit à la sortie de la turbine. Cet élément permet d'abaisser la pression en sortie de roue grâce à une augmentation progressive de sa section droite.

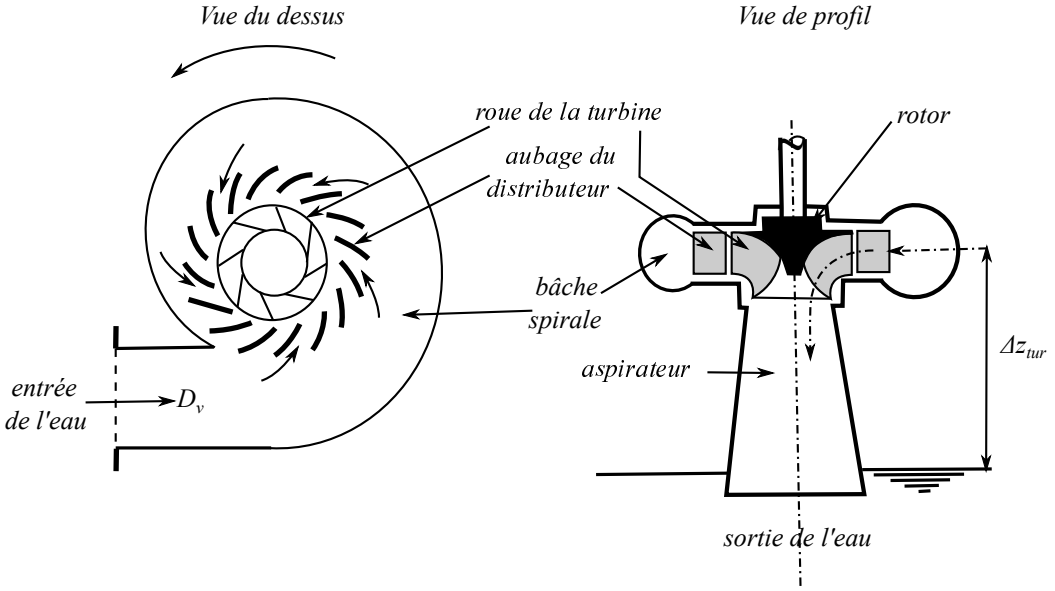


FIGURE 4 – Vue schématique d'une turbine à réaction de type Francis

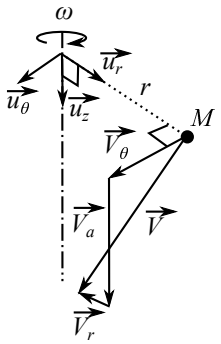
L'objet des questions suivantes est d'obtenir l'expression du couple scalaire utile Γ_i exercé par l'eau sur le rotor d'une telle turbine. L'eau, de masse volumique μ_e, est considérée être en écoulement stationnaire, parfait et incompressible à travers la roue de la turbine et dans le référentiel lié à la roue Francis. Elle pénètre dans la turbine avec un débit volumique D_v. Le rotor de la turbine possède une vitesse angulaire de rotation ω. Afin de modéliser l'écoulement de l'eau à travers cette roue Francis, deux décompositions possibles de la vitesse absolue du fluide $\overrightarrow{V}$ sont adoptées.

- La première donne la décomposition du vecteur vitesse $\overrightarrow{V}(M)$ dans la base cylindrique $\left(\overrightarrow{u_r}\,,\,\overrightarrow{u_\theta}\,,\,\overrightarrow{u_z}\right)$ liée à la roue Francis. $V_a(M)$ désignera la coordonnée axiale, $V_r(M)$, la coordonnée radiale et $V_\theta(M)$ la coordonnée périphérique (ou orthoradiale) :

$$\overrightarrow{V}(M) = V_r(M)\,\overrightarrow{u_r} + V_\theta(M)\,\overrightarrow{u_\theta} + V_a(M)\,\overrightarrow{u_z}\,.$$



Roue d'une turbine Francis et profil tridimensionnel des aubes



Décomposition cylindrique

FIGURE 5 – Roue Francis et décomposition de la vitesse absolue du fluide $\vec{V}$

- La seconde, permettant de raisonner plus facilement sur l'interaction entre le fluide et les aubes de la roue Francis en mouvement, décompose le vecteur vitesse $\overrightarrow{V}(M)$ dans un plan normal à l'axe de rotation du rotor. $\overrightarrow{V_{//}}(M)$ désignera la composante de la vitesse dans ce plan au point considéré, $\overrightarrow{W_{//}}(M)$ la composante de la vitesse relative au point considéré dans ce plan et $\overrightarrow{U}(M)$ la vitesse d'entraînement du fluide au point considéré. La vitesse relative du fluide par rapport à l'aube de la roue Francis est donnée par la loi de composition des vitesses :

$$\overrightarrow{V}(M) = \overrightarrow{U}(M) + \overrightarrow{W}(M)\,.$$

- Les angles non orientés α et β sont respectivement les angles entre la composante $\overrightarrow{V_{//}}(M)$ et le vecteur vitesse d'entraînement $\overrightarrow{U}(M)$ d'une part et entre la composante $\overrightarrow{W_{//}}(M)$ et le vecteur vitesse d'entraînement $\overrightarrow{U}(M)$ d'autre part. Ces deux angles figurent sur le triangle des vitesses.

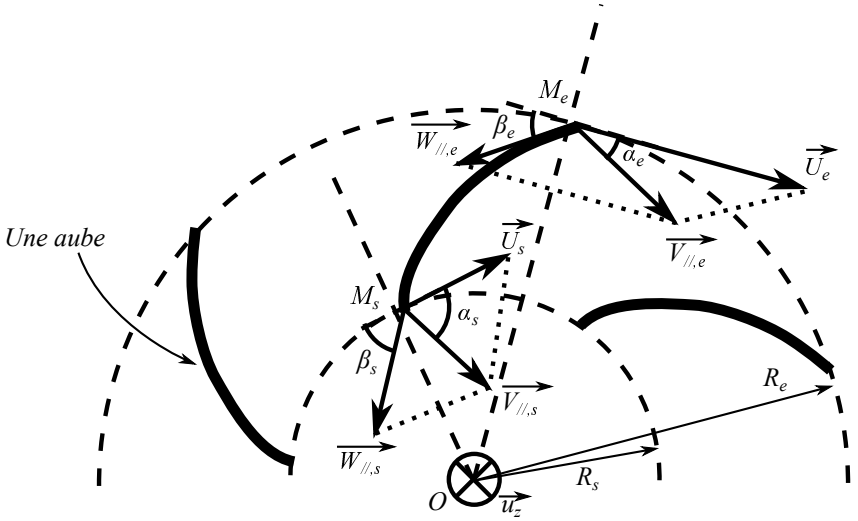


FIGURE 6 – Triangles des vitesses en entrée et en sortie de la roue Francis

On adopte également les hypothèses simplificatrices suivantes.

- L'épaisseur des aubes est négligée.
- La veine de fluide à l'intérieur de la roue possède une hauteur e_e en entrée et une hauteur e_s en sortie.
- Le fluide pénètre et est éjecté sur toute la périphérie de la roue (absence de composante axiale dans la roue Francis).
- Le triangle des vitesses dans le fluide en un point M' situé entre deux aubes est le même qu'en un point M situé sur une aube si $\left\|\overrightarrow{\mathrm{OM}}\right\| = \left\|\overrightarrow{\mathrm{OM'}}\right\|$. Ceci n'est pas exact en réalité en raison du profil des aubes présentant un intrados et un extrados et en raison du caractère visqueux de l'écoulement dans la couche limite.

Q18. Dans le cadre des hypothèses simplificatrices précédentes, donner les expressions du débit volumique au niveau de l'entrée et de la sortie de la roue Francis en fonction de $V_{r,e}$, $V_{r,s}$ et des paramètres géométriques de la roue.

Q19. Justifier que le référentiel lié à la roue Francis est non galiléen.

Dans ce référentiel non galiléen, on peut montrer qu'on peut mener l'étude en ajoutant le moment des forces dites d'inertie et dont on admet que le moment scalaire de ces forces par rapport à l'axe de rotation du rotor est : $\Gamma_{\text{inertie}} = -\mu_e \mathcal{D}_v \omega \left(R_s^2 - R_e^2\right)$.

Q20. En définissant rigoureusement le volume de contrôle, effectuer un bilan de moment cinétique du fluide en écoulement à travers la roue Francis par rapport à l'axe de rotation et montrer que le couple utile Γ_i possède l'expression :

$$\Gamma_i = 2\pi\,\mu_e \cdot \left(R_e^2 V_{r,e} V_{\theta,e} e_e - R_s^2 V_{r,s} V_{\theta,s} e_s\right) . \tag{3}$$

Q21. Exprimer $\overrightarrow{U}(M)$ et montrer, à l'aide du triangle des vitesses, que :

$$V_\theta = U + \frac{V_r}{\tan\beta} . \tag{4}$$

Q22. En déduire l'expression de Γ_i et de la puissance indiquée $\mathcal{P}_i$ en fonction notamment de D_v, ω, R_e, R_s, β_e et de β_s. En sortie d'arbre, le couple disponible Γ est inférieur à Γ_i. Pour quelle raison ?

Les puissances en sortie d'arbre de telles turbines peuvent avoir pour ordre de grandeur $10\ \mathrm{kW}$ à $15\ \mathrm{MW}$. En couplant l'axe de la turbine au rotor d'un alternateur, la puissance mécanique disponible en sortie d'arbre de la turbine est convertie en puissance électrique à distribuer aux différents consommateurs via le réseau électrique.

Partie II - Transport de l'énergie électrique

Le transformateur est un convertisseur statique présent dans toutes les centrales hydrauliques. Il constitue un élément important de la chaîne de distribution de l'énergie électrique du lieu de production vers le lieu de consommation.

II.1 - Transformateur de tension

Un transformateur monophasé est modélisé comme suit. Il est constitué d'un circuit magnétique et de deux enroulements de cuivre, l'un relié à la source et appelé le primaire, l'autre relié au récepteur et appelé le secondaire. Ils possèdent respectivement N_1 et N_2 spires. On considère le circuit magnétique comme linéaire, homogène et isotrope. Sa perméabilité magnétique relative μ_r est supposée être suffisamment grande pour ne pas considérer les fuites magnétiques et sa conductivité électrique est nulle. Ce circuit magnétique est un tore de rayon moyen a et de section droite S telle que $a \gg \sqrt{S}$. Les enroulements des circuits primaires et secondaires sont supposés parfaits, c'est-à-dire de résistivité électrique nulle. On note $B(t)$ la valeur du champ magnétique.

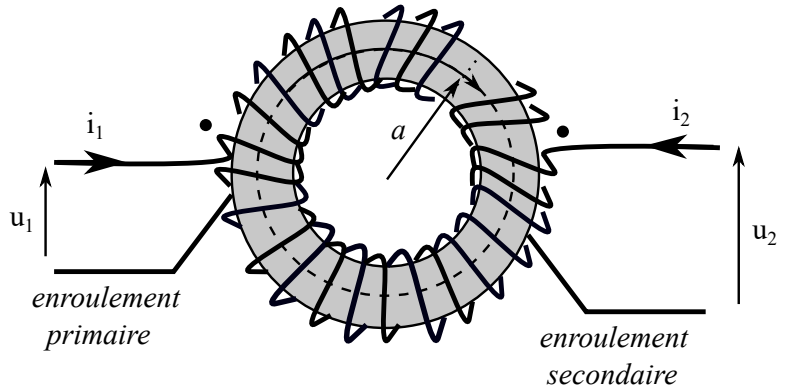


FIGURE 7 – Transformateur

Q23. Un transformateur peut-il fonctionner en régime continu ? Pourquoi ?

Q24. Rappeler l'équation de Maxwell-Thomson (ou Maxwell-flux). Compte-tenu des hypothèses, que peut-on dire du flux magnétique à travers chaque section droite du circuit magnétique ?

Q25. Rappeler l'équation de Maxwell-Faraday. En déduire l'expression de la tension $u_2(t)$ aux bornes du secondaire en fonction de $u_1(t)$ ainsi que N_1 et N_2 et qu'on désignera par le nom de loi de transformation des tensions.

Le circuit secondaire débite un courant électrique dans une charge.

Q26. Citer le théorème d'Ampère dans un tel milieu magnétique idéalisé et dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires magnétiques. En déduire l'expression de l'intensité $i_2(t)$ du courant circulant dans le secondaire en fonction de $i_1(t)$ ainsi que N_1 et N_2 et qu'on désignera par le nom de loi de transformation des intensités.

Q27. Quel est le rendement de conversion de puissance d'un tel transformateur idéal ? Nommer les pertes susceptibles de dégrader ce rendement. Citer un ordre de grandeur des rendements de transformateurs réels.

II.2 - Tracé d'un cycle d'hystérésis

Cette sous-partie aborde le tracé d'un cycle d'hystérésis en séance de travaux pratiques.

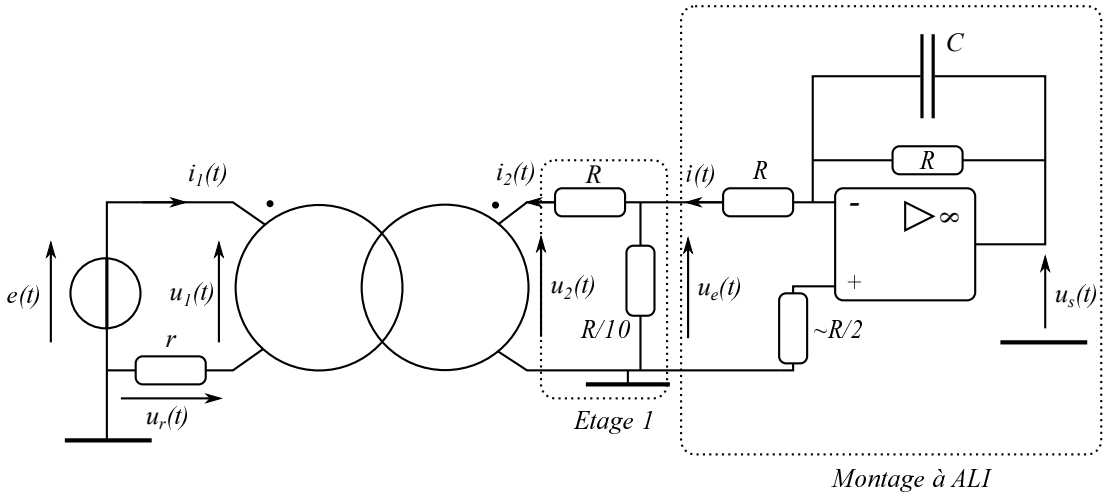


FIGURE 8 – Schéma du montage réalisé

Le montage proposé pour réaliser le tracé du cycle d'hystérésis d'un milieu ferromagnétique doux figure en **figure 8**.

Le générateur de tension alimente le circuit primaire du transformateur réalisé à l'aide d'une tension sinusoïdale $u_e(t)$ de fréquence $f = 50$ Hz. On enregistre la tension $u_r(t)$ aux bornes du conducteur ohmique de résistance r ainsi que la tension $u_s(t)$ en sortie d'un amplificateur linéaire intégré (ALI) supposé idéal en régime de fonctionnement linéaire. Le transformateur utilisé est caractérisé par N_1 spires au primaire et N_2 spires au secondaire avec N_1 proche de N_2.

Q28. Quelles sont les propriétés d'un milieu ferromagnétique doux ? Tracer l'allure du cycle d'hystérésis associé et y indiquer l'excitation coercitive H_c et le champ magnétique rémanent B_r. Donner un ordre de grandeur plausible pour H_c.

Le secondaire du transformateur ainsi réalisé est chargé par l'étage 1 mis en cascade avec un montage à ALI. Les composants ont pour valeurs $R = 470\ \mathrm{k\Omega}$ et $C = 47\ \mathrm{nF}$.

Q29. Établir l'expression de l'impédance d'entrée $\underline{Z}_e = -\dfrac{\underline{u}_e}{\underline{i}}$ du montage à ALI. Quelle hypothèse raisonnable est-il possible d'émettre concernant l'intensité $i_2(t)$? Montrer alors que la tension $u_r(t)$ est proportionnelle à l'excitation magnétique $H(t)$: $u_r(t) = K \cdot H(t)$ et donner l'expression de K en précisant les hypothèses de travail.

Q30. Établir l'expression de la fonction de transfert $\underline{H}(\jmath\omega) = \dfrac{\underline{u_s}}{\underline{u_e}}$ du montage à ALI. La mettre sous la forme canonique suivante, en précisant les expressions de H_0 et ω_0 :

$$\underline{H}(\jmath\omega) = \frac{H_0}{1 + \jmath\,\dfrac{\omega}{\omega_0}}\,. \tag{5}$$

Q31. Quelle fonction ce montage réalise-t-il dans ces conditions d'utilisation ? Montrer alors que la tension $u_s(t)$ est proportionnelle au champ magnétique $B(t)$: $u_s(t) = K' \cdot B(t)$ avec le coefficient K' à exprimer en fonction de N_2, S, R et de C. Quel peut être l'intérêt de l'étage 1 ?

II.3 - Couplage de la centrale hydraulique au réseau EDF

L'énergie électrique est transportée à l'aide de lignes électriques aériennes. En particulier, une ligne aérienne de $400\ \mathrm{kV}$ permet d'alimenter une partie des clients EDF habitant le département des Alpes-Maritimes.

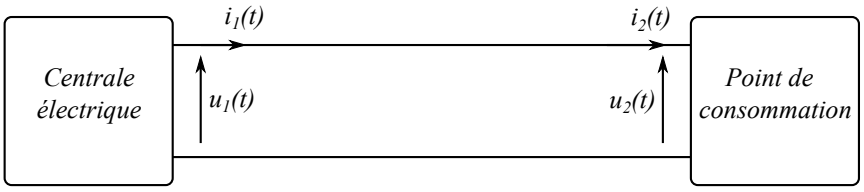


FIGURE 9 – Distribution de l'énergie électrique

Q32. Rappeler l'ordre de grandeur de la célérité des ondes électrocinétiques dans un câble coaxial. En considérant que cet ordre de grandeur est valable dans le cas étudié ici, l'approximation des régimes quasi-stationnaires est-elle valable ? Vous illustrerez votre propos par un calcul d'ordre de grandeur.

La tension $u_{\mathrm{EDF}}(t)$ aux bornes de l'installation d'un utilisateur domestique et l'intensité du courant électrique $i_{\mathrm{EDF}}(t)$ possèdent les expressions respectives suivantes :

$$u_{\mathrm{EDF}}(t) = \sqrt{2}\,U_{\mathrm{e,\ eff}} \cdot \cos\left(2\pi\, f t\right) \qquad \text{et} \qquad i_{\mathrm{EDF}}(t) = \sqrt{2}\,I_{\mathrm{e,\ eff}} \cdot \cos\left(2\pi\, f t + \varphi\right)\,. \tag{6}$$

Q33. Quelle est la valeur efficace $U_{\mathrm{e,\ eff}}$ de la tension $u_{\mathrm{E.D.F}}$ aux bornes d'une prise électrique standard ? Exprimer la puissance moyenne (ou active) $\mathscr{P}$ en fonction de φ notamment. Pourquoi EDF impose-t-il un facteur de puissance proche de 1 ? Pourquoi EDF réalise-t-il le transport de l'énergie électrique sous très haute tension ?

Partie III - L'acier des conduites forcées

III.1 - Corrosion des conduites forcées et protection

L'acier est un alliage fer-carbone à faible teneur en élément carbone. Pour simplifier l'étude, on assimilera l'acier des conduites forcées à du fer pur.

Le diagramme potentiel-pH de l'élément fer est fourni sur la **figure 10** en page suivante.

Q34. Le fer métallique est-il thermodynamiquement stable au contact de l'eau ? Recopier, « en ne gardant que le nécessaire », ce diagramme et indiquer les domaines d'immunité, de passivation et de corrosion du fer.

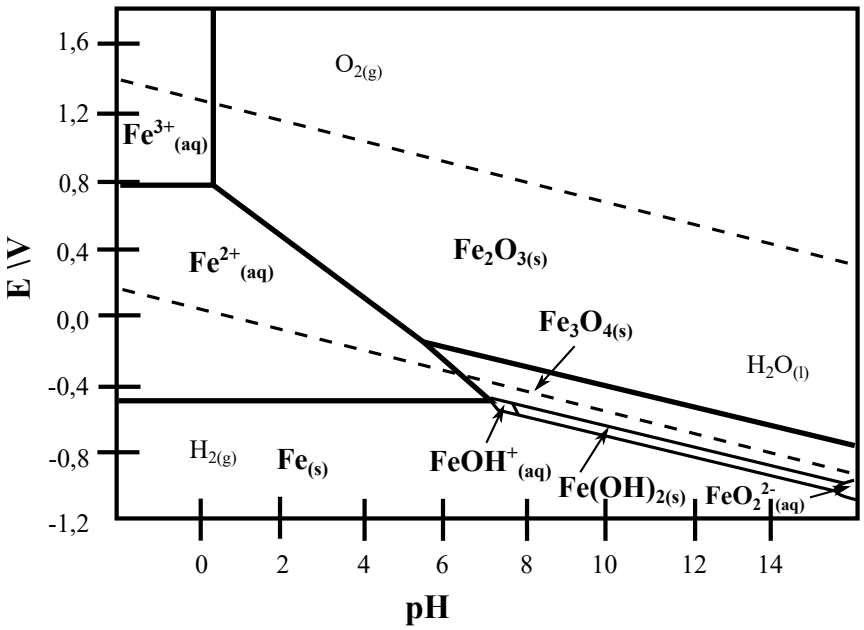


FIGURE 10 – Diagramme $E = f(\mathrm{p}H)$ du fer pour une concentration de tracé notée $C_{\mathrm{tr}} = 1,0\ \mathrm{mol \cdot L^{-1}}$. À la frontière entre les espèces dissoutes (aq) : les concentrations des espèces sont égales et leur somme est égale à C_{tr}. À la frontière entre une espèce dissoute et un solide, la concentration de l'espèce dissoute vaut C_{tr} ($\theta = 25^{\circ}\mathrm{C}$).

La **figure 11** indique le positionnement relatif des courbes anodiques et/ou cathodiques à $\mathrm{p}H = 0$ en milieu désaéré relatives au couple $Mg^{2+}_{(aq)}/Mg_{(s)}$, $Fe^{2+}_{(aq)}/Fe_{(s)}$ et $H^{+}_{(aq)}/H_{2(g)}$ sur électrode de fer.

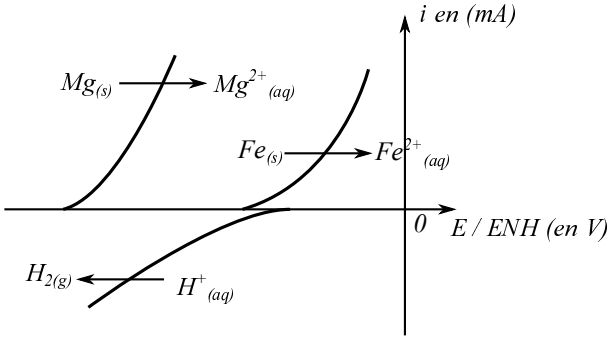


FIGURE 11 – Courbes intensité - potentiel

Q35. Est-il envisageable de protéger le fer de la corrosion en utilisant les blocs de magnésium solide ? Vous argumenterez en vous appuyant sur les courbes courant - potentiel à l'aide d'une construction graphique à réaliser sur la copie.

On souhaite évaluer le nombre d'anodes nécessaires pour protéger, pendant une durée $\Delta t = 5\ \mathrm{ans}$, une conduite forcée en fer de longueur $\ell = 100\ \mathrm{m}$ et de diamètre $D = 30\ \mathrm{cm}$ enterrée. Les électrodes de magnésium possèdent une masse $m_{\mathrm{electrode}} = 5,0\ \mathrm{kg}$ pouvant transférer une charge électrique valant $Q_m = 1,1 \cdot 10^3\ \mathrm{A \cdot h \cdot kg^{-1}}$ de magnésium.

Le milieu dans lequel est enfouie la conduite possède une résistivité $\varrho_{\mathrm{sol}} = 1,5 \cdot 10^3\ \Omega \cdot \mathrm{m}$ et la densité de courant nécessaire pour protéger le fer de la corrosion dans un tel milieu est $j = 11\ \mathrm{mA \cdot m^{-2}}$.

Q36. $(\star)$ Quelle est l'intensité du courant nécessaire pour protéger une telle conduite ? Quel est alors le nombre de blocs de magnésium à disposer tout au long de la conduite ? Cette question est une résolution de problème. Vous indiquerez notamment toutes les hypothèses effectuées et préciserez toutes les grandeurs introduites.

III.2 - Réduction des oxydes de fer par le monoxyde de carbone gazeux

Une étape de la fabrication des aciers est la réduction des oxydes de fer $Fe_2O_{3(s)}$ et $Fe_3O_{4(s)}$ dans les hauts fourneaux des aciéries. Dans ces hauts fourneaux où la température n'est pas homogène, différentes réactions de réduction des oxydes de fer par le monoxyde de carbone se déroulent parallèlement.

L'objet de cette dernière sous-partie est d'étudier quelques propriétés thermodynamiques de ces réactions.

On fournit ci-dessous les expressions des enthalpies libres molaires standards $\Delta_r G_i^\circ$ (en $\mathrm{kJ \cdot mol^{-1}}$) associées aux équations chimiques $[i]$ dans le domaine de températures comprises entre $500\ \mathrm{K}$ et $1\,500\ \mathrm{K}$.

$$[1] \quad Fe_{(s)} + \frac{1}{2}\,O_{2(g)} \quad \rightleftharpoons \quad FeO_{(s)} \qquad \Delta_r G_1^\circ(T) = -259,4 + 62,55 \cdot 10^{-3}\,T$$

$$[2] \quad \frac{3}{4}\,Fe_{(s)} + \frac{1}{2}\,O_{2(g)} \quad \rightleftharpoons \quad \frac{1}{4}\,Fe_3O_{4(s)} \qquad \Delta_r G_2^\circ(T) = -272,5 + 78,10 \cdot 10^{-3}\,T$$

$$[3] \quad 3\,FeO_{(s)} + \frac{1}{2}\,O_{2(g)} \quad \rightleftharpoons \quad Fe_3O_{4(s)} \qquad \Delta_r G_3^\circ(T) = -312,0 + 125,00 \cdot 10^{-3}\,T$$

$$[4] \quad 2\,Fe_3O_{4(s)} + \frac{1}{2}\,O_{2(g)} \quad \rightleftharpoons \quad 3\,Fe_2O_{3(s)} \qquad \Delta_r G_4^\circ(T) = -250,0 + 140,50 \cdot 10^{-3}\,T$$

$$[5] \quad CO_{(g)} + \frac{1}{2}\,O_{2(g)} \quad \rightleftharpoons \quad CO_{2(g)} \qquad \Delta_r G_5^\circ(T) = -282,1 + 86,70 \cdot 10^{-3}\,T$$

Q37. Montrer que, dans le domaine de températures considéré, la réduction de l'oxyde $Fe_2O_{3(s)}$ en $Fe_3O_{4(s)}$ par le monoxyde de carbone est thermodynamiquement favorisée.

On considère l'équilibre $[a] \quad \frac{1}{4}\,Fe_3O_{4(s)} + CO_{(g)} \quad \rightleftharpoons \quad \frac{3}{4}\,Fe_{(s)} + CO_{2(g)}$.

Q38. Montrer qu'il s'agit bien d'une réduction de l'oxyde $Fe_3O_{4(s)}$ par le monoxyde de carbone gazeux $CO_{(g)}$. Lister le nombre de paramètres intensifs permettant la description de ce système physico-chimique et en déduire le nombre maximal de degrés de liberté de ce système.

Q39. Vérifier que $\ln\left(K_a^\circ(T)\right) = \dfrac{1\,155}{T} - 1,03$.

Q40. Quels seraient les effets d'une augmentation de pression et d'une augmentation de température sur le système initialement en équilibre, les autres paramètres étant maintenus constants ? On détaillera le raisonnement.

Q41. Déterminer l'expression du rapport r_{eq} des pressions partielles de dioxyde de carbone et de monoxyde de carbone à l'équilibre $r_{\mathrm{eq}} = \dfrac{P^{\mathrm{eq}}_{CO_{2(g)}}}{P^{\mathrm{eq}}_{CO_{(g)}}}$ en fonction de la température T. Que se passe-t-il si, à un instant t de la réaction, le rapport r des pressions partielles est supérieur à r_{eq} ?

L'étude peut ensuite être approfondie en envisageant la superposition d'équilibres pour conduire au fer métallique.

$$\begin{cases} [b] \quad Fe_3O_{4(s)} + CO_{(g)} \quad \rightleftharpoons \quad 3\,FeO_{(s)} + CO_{2(g)} \\ [c] \quad FeO_{(s)} + CO_{(g)} \quad \rightleftharpoons \quad 3\,Fe_{(s)} + CO_{2(g)} \end{cases}$$

Document 1 - Données thermodynamiques à 298 K

Potentiel standard du couple $Fe^{3+}_{(aq)}/Fe^{2+}_{(aq)}$	$E_1^\circ = 0,77\ \mathrm{V}$
Potentiel standard du couple $O_{2(g)}/H_2O_{(\ell)}$	$E_2^\circ = 1,23\ \mathrm{V}$
Potentiel standard du couple $H^+_{(aq)}/H_{2(g)}$	$E_3^\circ = 0,00\ \mathrm{V}$

Document 2 - Notations et valeurs numériques

Conversion	$1,0\,\mathrm{TW} = 1,0 \cdot 10^{12}\,\mathrm{W}$
Constante de la gravitation universelle	$\mathscr{G} = 6,7 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}}$
Champ de pesanteur terrestre au sol	$g = 9,8\,\mathrm{m \cdot s^{-2}}$
Rayon de la Terre	$R_T = 6,4 \cdot 10^3\,\mathrm{km}$
Masse de la Terre	$M_T = 6,0 \cdot 10^{24}\,\mathrm{kg}$
Constante des gaz parfaits	$R = 8,3\,\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}}$
Coefficient isentropique de l'air $\gamma = \dfrac{c_P}{c_V}$	$\gamma = 1,4$
Pression atmosphérique	$P_0 = 1,0\,\mathrm{bar}$
Masse molaire de l'oxygène	$\mathcal{M}_O = 16 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{kg \cdot mol^{-1}}$
Masse molaire de l'azote	$\mathcal{M}_N = 14 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{kg \cdot mol^{-1}}$
Masse volumique de l'eau liquide	$\mu_e = 1,0 \cdot 10^3\,\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$
Constante de Faraday	$\mathscr{F} = 96 \cdot 10^3\,\mathrm{C \cdot mol^{-1}}$
Constante de Nernst à $298\,\mathrm{K}$	$e_N = \dfrac{RT}{\mathscr{F}}\ln(10) \approx 0,060\,\mathrm{V}$

Annexe - Paramétrage de l'installation

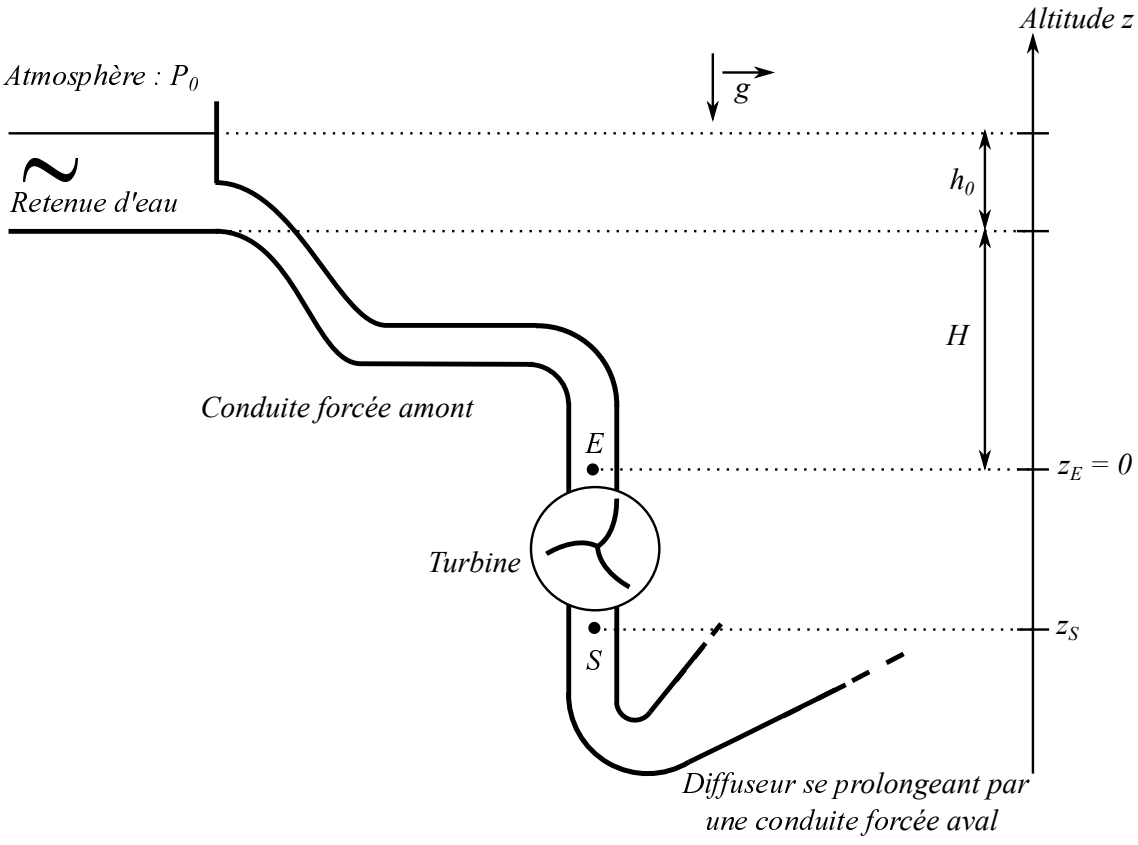


FIGURE 12 – Paramétrage de l'installation

FIN

IMPRIMERIE NATIONALE – 26 1021 – D'après documents fournis

Travailler les chapitres de ce sujet

Prepa Help suit le programme de PSI chapitre par chapitre : cours détaillé, méthodes, pièges, exercices et problèmes corrigés pas à pas, tirés des concours. L'essai gratuit donne accès aux chapitres offerts de ta filière, sans carte bancaire.

Chapitres liés à ce sujet

- Propagation d'un signal
- Amplificateur linéaire intégré, stabilité et rétroaction
- Filtrage linéaire
- Diagrammes potentiel-pH
- Oxydoréduction et piles électrochimiques
- Second principe : enthalpie libre, potentiel chimique et équilibre chimique
- Optimisation d'un procédé : facteurs d'équilibre et déplacement d'équilibre
- Premier principe appliqué aux transformations physico-chimiques : grandeurs standard de réaction et effets thermiques

Ouvrir l'essai gratuit

Scanne le code ou clique sur le bouton.

prepahelp.com/#essai

Une question sur le concours ou sur ta filière :
écrire sur WhatsApp

Les autres années et épreuves : prepahelp.com/annales/e3a/psi