

CONCOURS G2E

PHYSIQUE

Durée : 3 heures 30

Les calculatrices programmables et alphanumériques sont autorisées. Les téléphones portables, "smartphones" et tout autre objet connecté doivent être éteints au cours de l'épreuve et ne doivent en aucun cas être utilisés même à titre de montre.

L'usage de tout ouvrage de référence et de tout document est strictement interdit.

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il en fait mention dans sa copie et poursuit sa composition. Dans ce cas, il indique clairement la raison des initiatives qu'il est amené à prendre.

Les candidats doivent respecter les notations de l'énoncé et préciser, dans chaque cas, la numérotation de la question posée.

La rédaction se fera uniquement à l'encre bleue ou noire et l'utilisation du blanc correcteur et effaceur est interdite. Les découpages et collages sur la copie sont interdits.

Une grande attention sera apportée à la clarté de la rédaction et à la présentation des différents schémas si nécessaire.

ANNEXE À COMPLÉTER ET À RENDRE IMPÉRATIVEMENT AVEC VOTRE COPIE

Des couleurs contrastées pourront être utilisées pour des schémas, pour davantage de lisibilité, les couleurs pâles sont à proscrire.

Le sujet s'intéresse au fonctionnement d'une centrale hydroélectrique ainsi qu'à une utilisation de l'électricité produite. La partie A étudie la force de pression exercée par l'eau sur le mur de retenue d'un barrage. La partie B traite de l'écoulement et du phénomène de cavitation dans les conduites forcées tandis que la partie C s'intéresse à la vidange de fond du barrage. L'oscillation de bulles de cavitation est présentée dans la partie D. Le rendement des turbines et le principe du pompage-turbinage est traité dans la partie E. Enfin, la partie F s'intéresse à l'utilisation de l'électricité produite.

Donnés pour tout l'énoncé

Accélération de la pesanteur $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$;

Viscosité dynamique de l'eau : $\eta = 10^{-3} \text{ Pa.s}$.

On notera ρ la masse volumique de l'eau.

A. FORCE DE PRESSION EXERCÉE SUR LE MUR DU BARRAGE

Le barrage étudié (la figure 1 représente le barrage vu de profil) est constitué d'un mur plan de hauteur $H = 160 \text{ m}$ et de largeur $L = 550 \text{ m}$ (suivant la direction Oy perpendiculaire au schéma). L'épaisseur du barrage est de $e_{min} = 10 \text{ m}$ au sommet et de $e_{max} = 520 \text{ m}$ à la base. On donne : $P_0 = 1,0 \text{ bar}$, la valeur de la pression atmosphérique. On suppose que le barrage est rempli d'eau sur toute sa hauteur.

1. Démontrer la relation fondamentale de la statique des fluides : $\frac{dP}{dz} = \rho g$.
2. Exprimer littéralement la pression $P(z)$ dans l'eau puis calculer $P(H)$ à la base du barrage après avoir rappelé l'ordre de grandeur usuel de ρ . On supposera l'eau incompressible.

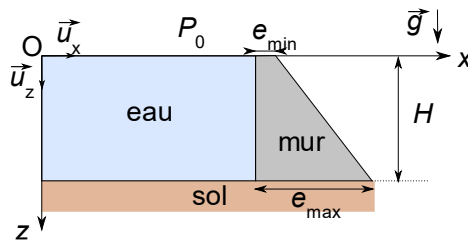


Figure 1 : vue de profil d'un barrage « rectangle »

3. Déterminer l'expression littérale de la force de pression que l'on notera $\vec{F}_2$ exercée par l'eau sur le mur du barrage. Pour cela, on exprimera dans un premier temps l'intensité de la force $d\vec{F}_2$ s'exerçant sur une surface élémentaire judicieusement choisie.
4. Déterminer l'expression littérale de la force de pression que l'on notera $\vec{F}_1$ exercée par l'air sur le mur du barrage.
5. Montrer que la composante horizontale de la résultante des forces pressantes sur un barrage « rectangle » s'écrit : $F_{\text{rect},x} = \frac{\rho g H^2}{2} L$.
6. Faire l'application numérique portant sur $F_{\text{rect},x}$.
7. Commenter qualitativement l'évolution de l'épaisseur du barrage en fonction de la profondeur.

On s'intéresse maintenant à un barrage de type Serre-Ponçon où le mur du barrage est trapézoïdal et voit sa largeur varier avec la profondeur z (voir figure ci-dessous avec le mur du barrage vu de face) :

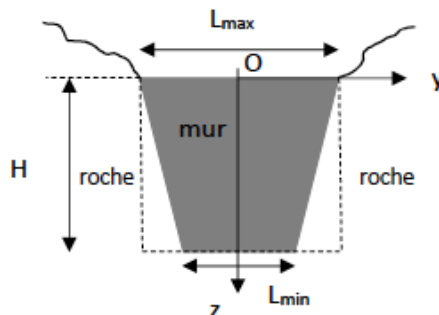


Figure 2. Coupe d'un barrage de type Serre-Ponçon vu de face

8. Déterminer, en fonction de L_{max} et L_{min} , la largeur L d'un barrage « rectangle » qui aurait la même surface et la même hauteur H que le barrage de type Serre-Ponçon précédent.
9. On peut montrer que l'expression littérale de la composante horizontale de la résultante des forces pressantes sur le mur du barrage de type Serre-Ponçon vaut $F_{\text{SP},x} = \frac{\rho g H^2}{6} (L_{\text{max}} + 2L_{\text{min}})$. Comparer cette force de pression à celle qui s'exerce sur un barrage rectangle de même surface et conclure sur l'intérêt du barrage de type Serre-Ponçon.

B. ÉCOULEMENT ET CAVITATION DANS LES CONDUITES FORCÉES

La centrale est alimentée par une conduite d'eau cylindrique de diamètre D dite conduite principale qui se scinde ensuite en trois conduites cylindriques d'eau parallèles dites conduites forcées de même diamètre d . On suppose que l'eau sortant d'une des conduites forcées est à la pression atmosphérique $P_0 = 1 \text{ bar}$. L'axe (Oz) est pris ici vertical ascendant avec le niveau $z = 0$ correspondant au niveau de la sortie S de la conduite forcée. On se placera dans les conditions d'application de la relation de Bernoulli. La vitesse dans la conduite principale vaut $v_P = 7,5 \text{ m.s}^{-1}$ tandis que la vitesse v_F dans une conduite forcée est $v_F = 18 \text{ m.s}^{-1}$. On donne $D = 7,1 \text{ m}$.

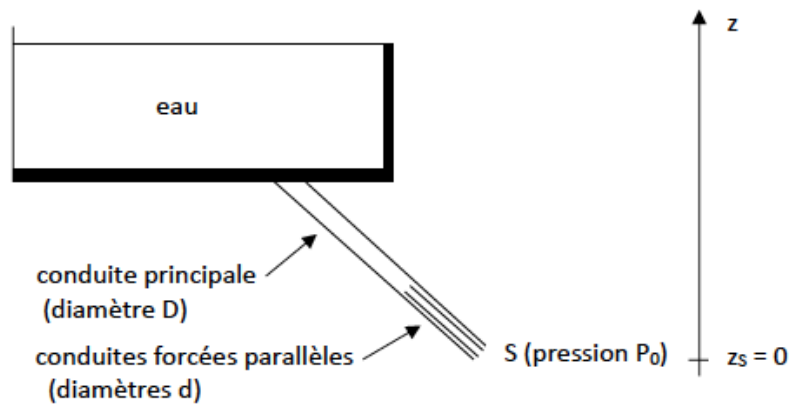


Figure 3. Schématisation du réservoir d'eau et des conduites

10. Dédurre des données précédentes, le diamètre d des conduites forcées et faire l'application numérique.
11. Rappeler la relation de Bernoulli ainsi que ses hypothèses d'application.
12. Montrer que la pression à l'intérieur de la conduite forcée peut s'écrire : $P(z) = P_0 \left(1 - \frac{z}{z_0}\right)$.

On donnera l'expression de z_0 et on calculera sa valeur numérique.

13. La pression de vapeur saturante de l'eau à la température ambiante est $P_{\text{sat}} = 3.10^3$ Pa. Montrer qu'au-dessus d'une certaine hauteur notée z_{cav} dans la conduite forcée, apparaissent des bulles de gaz. Ce phénomène, appelé cavitation, crée de nombreux problèmes (corrosion, ondes sonores) qui nuisent au bon fonctionnement de l'installation et doit être limité. Faire l'application numérique pour z_{cav} .

C. ÉTUDE D'UNE VIDANGE DE FOND

Le rôle fondamental des vidanges de fond est de permettre la vidange d'une retenue afin d'assurer l'entretien du barrage lors de visites décennales ou d'évacuer rapidement de l'eau en cas de crues.

L'élément clé du dispositif de vidange de fond est une vanne de vidange. Rappelons qu'une vanne est un dispositif visant à contrôler (stopper ou modifier) le débit d'un fluide, liquide dans le cas de l'eau issue de la retenue.

Dans la conduite amont de largeur $b = 1,5$ m et de hauteur $h_0 = 2,4$ m, l'écoulement est en charge, l'eau occupant l'ensemble de la galerie. On considère ici une vanne de fond de section rectangulaire de largeur b (dans une direction perpendiculaire au schéma ci-dessous). Au niveau de la vanne, la hauteur d'eau pouvant passer vaut $a = 0,7$ m. La conduite aval est munie d'une conduite d'aération, de telle sorte que l'écoulement dans la galerie aval soit à surface libre (présence conjointe d'eau et d'air). Le passage de l'eau au niveau de la vanne induit une contraction de l'écoulement en aval : le minimum de hauteur atteinte par l'eau vaut $a_c = c_c \cdot a$ avec $c_c = 0,62$, le coefficient de contraction.

L'objectif est de dimensionner la conduite d'aération afin d'assurer une transition optimale entre les deux modes d'écoulement dans les galeries amont/aval. On va faire appel ici à la notion de charge d'un écoulement. La relation de Bernoulli stipule que dans les conditions appropriées, la charge de l'écoulement est constante.

Les pertes de charge dans la galerie amont sont négligées.

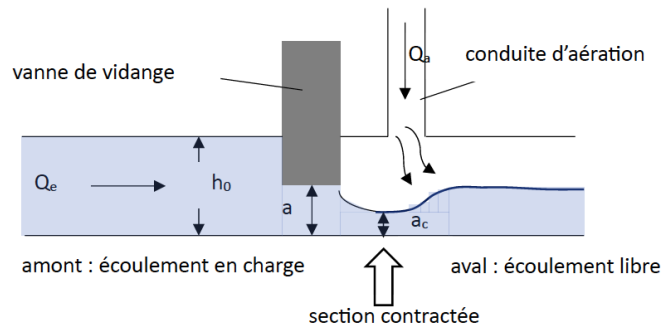


Figure 4. Schéma d'une vidange de fond

On peut exprimer la charge C d'un écoulement (en Pa) en hauteur d'eau H (en m) telle que $H = \frac{C}{\rho g}$. La charge au niveau de la section contractée, exprimée en hauteur d'eau, s'élève alors à $H_c = 100$ m.

14. En admettant que c'est le terme de densité volumique d'énergie cinétique qui prédomine dans la charge de l'écoulement, exprimer la vitesse v_c de l'écoulement au niveau de la section contractée en fonction de H_c et g puis faire l'application numérique sur v_c .

15. Exprimer le débit en volume d'eau Q_e en fonction de H_c , g , b , a et c_c . Faire l'application numérique sur Q_e .

16. Le nombre de Froude noté F est défini de la façon suivante : $F = \frac{v}{\sqrt{gh}}$ où v est la vitesse moyenne du fluide, g l'accélération de la pesanteur et h la hauteur de la canalisation. Justifier que F permet de comparer l'énergie cinétique du fluide de vitesse v à l'énergie potentielle du fluide de hauteur h .

17. Montrer que le nombre de Froude F_c au niveau de la section contractée s'exprime sous la forme :

$$F_c = \sqrt{\frac{2H_c}{c_c a}}. \text{ Faire l'application numérique sur } F_c.$$

Dans le modèle d'un écoulement libre dans une galerie et pour un nombre de Froude $F_c < 40$ et un coefficient $0,12 < \frac{a}{h_0} < 1$, le mécanisme d'aération (dans le cadre d'un écoulement d'air incompressible) est régi par les équations suivantes :

➔ Le rapport entre le débit d'air Q_a et le débit d'eau Q_e ne dépend pas des dimensions des conduites d'eau et d'aération et est donné par :

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_e} = 0,09 F_c$$

avec F_c le nombre de Froude au niveau de la section contractée.

➔ La surface de la section de la conduite d'aération S_a se déduit de celle S_e de la canalisation d'eau en amont selon :

$$S_a = 1,73 S_e \cdot \left(\frac{\beta}{0,94 F_c^{0,62}} \right)^{10/9}$$

➔ Il faut tenir compte de l'effet de la compressibilité de l'air dans la canalisation d'aération lorsque la vitesse de l'air dépasse $v_{a,lim} = 50 \text{ m.s}^{-1}$.

18. Après avoir vérifié que les conditions d'application des expressions de β et S_a sont remplies, déterminer le débit Q_a de l'air et la section S_a de la conduite d'aération. Faire l'application numérique sur Q_a et S_a .

19. En déduire l'expression du diamètre d_a de la canalisation cylindrique d'aération et sa valeur numérique.

20. En déduire la vitesse v_a de l'air dans la canalisation d'aération. Conclure quant au modèle employé.

D. OSCILLATION DE BULLES DE CAVITATION

Une bulle de gaz dans de l'eau liquide peut se comporter comme un oscillateur à cause du caractère élastique des gaz non condensables présents dans la bulle (dioxygène, diazote...). Il en résulte qu'une fréquence propre est associée à chaque bulle en fonction de ses caractéristiques, fréquence que l'on cherche à déterminer. Dans ce qui suit :

- $P_0 - P_{\text{sat}}$ représente la différence de pression entre la pression du liquide loin de la bulle et la pression de vapeur saturante ;
- k est un nombre sans dimension dépendant du modèle thermodynamique choisi pour modéliser les gaz non condensables ;
- R_0 est le rayon initial de la bulle et $R(t)$ son rayon à l'instant t ;
- On néglige tout phénomène de tension superficielle et on note η la viscosité de l'eau.

On suppose que la pression P autour de la bulle oscille autour de P_0 à la pulsation ω et avec l'amplitude δp :

$$P = P_0 + \delta p \sin \omega t$$

On définit le déplacement radial au cours de l'oscillation par : $r = R - R_0$ avec $r \ll R_0$.

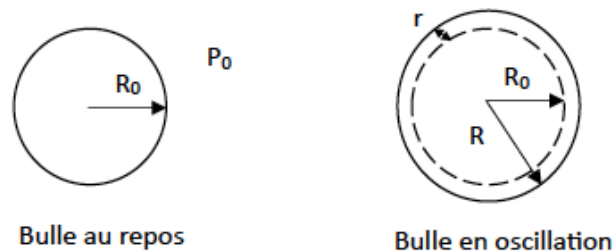


Figure 5. Schéma d'une bulle de rayon au repos R_0

$r(t)$ vérifie l'équation différentielle ci-dessous :

$$\rho R_0 \ddot{r} + 4\eta \frac{\dot{r}}{R_0} + 3k(P_0 - P_{\text{sat}}) \frac{r}{R_0} = -\delta p \sin \omega t$$

21. Déterminer l'expression de la fréquence propre f_0 de la bulle ainsi que celle du facteur de qualité Q en fonction des grandeurs apparaissant dans l'équation précédente.
22. Quels sont les différents régimes transitoires en fonction de la valeur de η ?
23. On cherche à vérifier expérimentalement la relation trouvée à la question 21 en mesurant f_0 pour différentes valeurs de R_0 . Quelle courbe faisant intervenir f_0 en ordonnées est à tracer pour obtenir une relation linéaire ?

On donne dans le tableau ci-dessous la fréquence propre de résonance f_0 en fonction du rayon R_0 de la bulle.

R_0 (μm)	5	10	50	100	500
f_0 (kHz)	645	322	64,5	32,2	6,5

On souhaite valider le modèle précédent en effectuant une régression linéaire portant une grandeur Y en ordonnées en fonction d'une grandeur X en abscisses et en faisant appel à la méthode des résidus qui permet une meilleure visualisation de l'écart des points par rapport à la droite de tendance. Les incertitudes sur X sont négligeables.

On utilise alors un script Python, donné en annexe (les spécifications de certaines commandes y étant précisées). On notera A le coefficient directeur de la droite de régression.

24. Compléter, sur l'annexe à rendre, les lignes des parties :

```
### Calcul des abscisses X et des ordonnées Y
```

```
### Régression linéaire
```

Le script complété et exécuté donne les résultats suivants :

Coefficient directeur A : 3.2243956

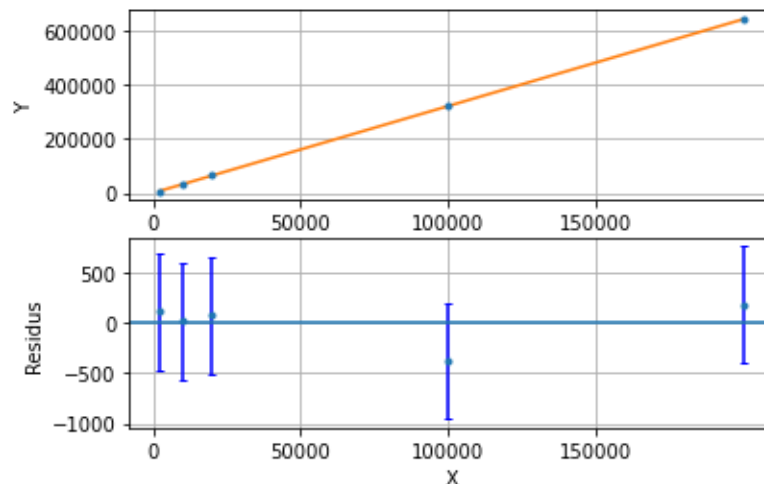


Figure 6. Graphiques portant Y en fonction de X (graphique du haut) et les écarts des points par rapport à la courbe de tendance en fonction de X (graphique du bas)

25. La relation linéaire définie dans la question 23 est-elle vérifiée ?

On souhaite déterminer le facteur k et estimer son incertitude type grâce à la méthode de Monte Carlo.

26. Donner l'expression littérale de k en fonction des pressions P_0 et P_{sat} , de la masse volumique de l'eau et du coefficient directeur A , déterminé grâce au script Python précédent.

On donne les valeurs de P_0 et P_{sat} et la demi-étendue associée : $P_0 = 1,0 \cdot 10^5$ Pa ; $P_{sat} = 2300$ Pa et $e(P) = 100$ Pa.

L'incertitude type sur le coefficient directeur A est estimée à $u(A) = 1,5 \cdot 10^{-6}$ U.S.I, celle sur la masse volumique de l'eau à $u(\rho) = 8,2 \cdot 10^{-3}$ g.mL⁻¹.

On fait appel à la loi uniforme pour les valeurs simulées des pressions et à la loi normale pour la masse volumique et le coefficient directeur.

27. Compléter les lignes en-dessous de

```
### Détermination de k et de son incertitude
```

Un script approprié donne les valeurs suivantes :

```
k : 1.4003408756187132
```

```
Incertitude-type sur k : 0.011502577490360301
```

28. Proposer une écriture correcte du résultat final sur k en prenant 2 chiffres significatifs pour l'incertitude.

E. RENDEMENT DES TURBINES ET POMPAGE-TURBINAGE

Une turbine est un dispositif mécanique permettant de transformer l'énergie hydraulique d'un fluide en énergie mécanique. On note v la vitesse du jet incident d'eau arrivant sur la turbine dans le référentiel terrestre supposé galiléen, ρ la masse volumique du fluide et Q le débit de volume.

29. Le jet est issu de la chute libre de l'eau sur une hauteur ΔH , sans frottements et avec une vitesse initiale nulle. Etablir l'expression de v en fonction de g et de ΔH .
30. Donner la formulation en termes de puissance, du premier principe pour les fluides en écoulement stationnaire en précisant les significations physiques et les unités des différents termes.
31. On considère que l'écoulement est isotherme, adiabatique, et que la variation d'énergie potentielle au passage dans la turbine est négligeable. On néglige de plus la vitesse du fluide à la sortie de la turbine par rapport à la vitesse d'entrée v . Montrer que la puissance hydraulique fournie par la turbine s'écrit $\mathcal{P}_H = \rho \cdot Q \cdot g \cdot \Delta H$.

On donne ci-dessous les caractéristiques techniques de la centrale hydroélectrique de Grand'Maison dans l'Isère. La conduite forcée issue du barrage se scinde en deux afin d'alimenter une usine extérieure et une usine souterraine. La hauteur de chute est supposée la même pour les deux usines.

Données techniques pour le barrage de Grand'Maison
Hauteur de chute : $\Delta H = 930 \text{ m}$
Débit alimentant l'usine extérieure : $Q_e = 76 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Débit alimentant l'usine souterraine : $Q_i = 140 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Puissance mécanique d'une turbine extérieure ou souterraine : $\mathcal{P}_1 = 150 \text{ MW}$
Nombre de turbines extérieures : 4
Nombre de turbines souterraines : 8
Volume du lac de retenue : $V_2 = 140 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Volume du lac inférieur : $V_1 = 14,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

32. Déterminer numériquement le débit total Q puis faire l'application numérique pour $\mathcal{P}_H$.
33. Déterminer numériquement la puissance mécanique effective $\mathcal{P}_m$ lorsque toutes les turbines sont en fonctionnement puis en déduire le rendement r des turbines.

Le pompage-turbinage consiste à produire de l'électricité avec une centrale hydroélectrique ayant la particularité d'être réversible : l'eau est soit prélevée du réservoir supérieur pour produire de l'énergie électrique (turbinage) soit remontée du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur (pompage). Lors du pompage, de l'électricité est consommée par des moteurs actionnant des turbines pompes pour déplacer l'eau du niveau inférieur vers le niveau supérieur. Lors du turbinage, l'eau qui descend du niveau supérieur vers le niveau inférieur actionne des turbines reliées aux alternateurs pour produire de l'électricité. Le turbinage a lieu de jour tandis que le pompage se déroule de nuit. Dans la centrale de Grand'Maison, seule l'usine souterraine est concernée par le pompage-turbinage.

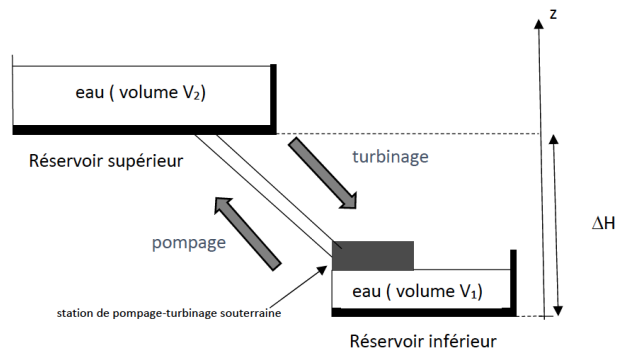


Figure 7. Schématisation du pompage-turbinage entre deux réservoirs

34. On souhaite déverser dans le lac inférieur initialement vide un volume V_1 d'eau avec le débit de volume Q_i . Quelle est la durée en heure Δt_1 de l'opération de turbinage ?
35. Sachant que la puissance de production électrique est $\mathcal{P}_{el} = 1200$ MW, déterminer l'énergie produite E_{turb} en MWh (MégaWattsHeure) durant la phase de turbinage.
36. En supposant que l'on dépense durant la phase de pompage, une énergie E_{pomp} nécessaire pour faire passer le volume V_1 d'eau de l'altitude 0 à l'altitude ΔH , exprimer E_{pomp} en fonction des données et faire l'application numérique en MWh.
37. Conclure quant à l'intérêt de l'opération de turbinage-pompage d'un point de vue énergétique puis d'un point de vue économique. On calculera la perte d'énergie (en %) lors d'un cycle pompage-turbinage.

F. UTILISATION DE L'ÉLECTRICITÉ PRODUITE

Cette partie ne nécessite pas de connaissances particulières sur la puissance complexe et fait intervenir les notions de base sur la notation complexe (module, argument...).

On s'intéresse à un dipôle alimenté en courant alternatif sinusoïdal de pulsation ω , courant produit par la centrale hydraulique. On note $u(t)$ la tension instantanée aux bornes de ce dipôle et $i(t)$ l'intensité instantanée du courant le traversant.

La tension $u(t)$ est prise comme origine des phases et peut s'écrire : $u(t) = U_m \cdot \cos(\omega t)$ avec U_m l'amplitude de la tension. L'intensité du courant est alors de la forme $i(t) = I_m \cos(\omega t - \varphi)$ avec φ le déphasage de la tension par rapport à l'intensité.

On se place en notation complexe et on introduit la tension complexe $\underline{U} = U\sqrt{2}e^{j\omega t}$ et l'intensité complexe $\underline{I} = I\sqrt{2}e^{-j\varphi}e^{j\omega t}$, U et I sont les valeurs efficaces de la tension et de l'intensité.

La puissance complexe est définie par $\underline{S} = \frac{1}{2}\underline{U} \times \underline{I}^*$ où $\underline{I}^*$ désigne le complexe conjugué de $\underline{I}$.

La puissance complexe s'écrit également : $\underline{S} = P + jQ$. Le terme $\cos\varphi$ est appelé facteur de puissance.

Le module S de $\underline{S}$ est nommée puissance apparente, P est appelée puissance active (c'est une puissance qui peut être transformée en transfert mécanique ou thermique, elle représente la majorité de la puissance consommée dans les habitations) et Q est la puissance réactive (c'est une puissance que l'on cherche à minimiser, elle peut être compensée par l'utilisation de condensateurs par exemple, ce qui permet de réaliser des économies d'énergie).

Dans une installation utilisant plusieurs appareils, les puissances actives s'ajoutent. Dans les installations que nous allons étudier, les puissances réactives aussi.

38. Exprimer P et Q en fonction de U , I et φ puis exprimer Q en fonction de P et φ .
39. Quelle valeur doit avoir le facteur de puissance pour minimiser la puissance réactive ?

Sur l'emballage d'une ampoule LED sont indiqués la puissance active et l'intensité efficace : 16 W et 140 mA. La tension efficace du secteur est de 220 V.

40. Calculer le facteur de puissance d'une ampoule LED. Commenter.

41. Cinq ampoules LED branchées en parallèle fonctionnent simultanément. Montrer que le facteur de puissance est inchangé.

On caractérise généralement un dipôle récepteur par son impédance complexe $\underline{Z}$, généralisation de la notion de résistance aux grandeurs complexes. $\underline{Z}$ s'écrit sous la forme : $\underline{Z} = R + jX$ avec R la résistance du dipôle et X sa réactance. En particulier, la loi d'Ohm aux bornes d'un récepteur, s'écrit en grandeurs complexes : $\underline{U} = \underline{Z} \underline{I}$.

42. Exprimer le module S de $\underline{S}$ en fonction de U et I puis en fonction de P et Q .

43. En déduire l'expression de I en fonction de U , P et Q .

44. En exprimant de deux façons différentes la puissance dissipée par effet Joule dans le dipôle récepteur, établir l'expression de R puis celle de X en fonction de P , Q et U .

Un moteur d'ascenseur possède une puissance mécanique utile $\mathcal{P}_u = 3,6$ kW. Son rendement est égal à $\eta = 0,75$ et son facteur de puissance vaut 0,85.

45. Définir le rendement du moteur et en déduire la valeur de la puissance active P .

46. Calculer R et X du moteur lorsqu'il fonctionne sur secteur de tension efficace 220 V.

FIN DU SUJET

Bloc éditable

Modèle CMEN-DR v2 ©EXATECH

Nom de famille :

(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'usage)

Prénom(s) :

Número Inscription : Né(e) le : / /

(Le número est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)

(Remplir cette partie à l'aide de la notice)

Concours / Examen : Section/Spécialité/Série :

Epreuve : Matière : Session :

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuille officielle, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Numéroté chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) et placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuille officielle. Ne joindre aucun brouillon.

ANNEXE A RENDRE OBLIGATOIREMENT AVEC VOTRE COPIE

Script Python

```

1.      # Importation des bibliothèques
2.      import numpy as np
3.      import numpy.random as rd
4.      import matplotlib.pyplot as plt
5.
6.      # Entrée des données expérimentales
7.      R0 = [5, 10, 50, 100, 500]
8.      f0 = [645, 322, 64.5, 32.2, 6.5]
9.
10.     ### calcul des abscisses X et ordonnées Y
11.     X = [..... for i in .....]          # à compléter
12.     Y = [..... for i in .....]          # à compléter
13.
14.     ###régression linéaire
15.     p=np.polyfit(.....)  # à compléter
16.     A= .....                # à compléter
17.     ord_ori= .....          # à compléter

```

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

```
18.     print('A = ', format(A,"#.8g"))
19.
20.     ###Estimation de l'incertitude sur f0. La demi-étendue (intervalle sur
lequel on pense que la valeur se situe) est prise égale à 0,5 kHz
21.     u_Y=0.5*1e3/np.sqrt(3)
22.
23.     ###tracé de la régression linéaire
24.     plt.subplot(211)
25.     plt.errorbar(X,Y,yerr=2*u_Y,fmt='.')
26.     plt.plot(X,np.polyval(p,X),'-')
27.     plt.xticks(np.arange(0,200e3,50e3))
28.     plt.ylabel('Y')
29.     plt.grid()
30.
31.     ### Méthode des résidus : graphique
32.     plt.subplot(212)
33.     plt.errorbar(X,Y-np.polyval(p,X),yerr=2*u_Y,fmt='.',          capsize=2,
ecolor='b')
34.     plt.xticks(np.arange(0,200e3,50e3))
35.     plt.xlabel('X')
36.     plt.ylabel('Residus')
37.     plt.axhline()
38.     plt.grid()
39.     plt.show()
40.
41.     ### Détermination de k et de son incertitude
42.     P0=      # à compléter
```

```
43.     Psat= ..... # à compléter
44.     u_A= ..... # à compléter
45.     eP= ..... # à compléter
46.     # Calcul de N valeurs simulées par la méthode de Monte Carlo
47.     N=100000
48.     A_sim= .....# à compléter
49.     rho_sim= .....# à compléter
50.     P0_sim= .....# à compléter
51.     Psat_sim= .....# à compléter
52.     # Calcul des valeurs simulées de k
53.     k_sim= .....# à compléter
54.     # Calcul de la moyenne des valeurs simulées
55.     k_moy= .....# à compléter
56.     # Calcul de l'incertitude sur k
57.     u_k= .....# à compléter
58.
59.     print(f"k : {k_moy}")
60.     print(f"incertitude sur k : {u_k}")
```

Données

polyfit est une fonction de la bibliothèque *numpy* qui permet d'obtenir les paramètres de modélisations polynomiales. On utilise polyfit comme indiqué ci-dessous si on souhaite une modélisation par une fonction polynomiale de degré n :

p = np.polyfit(X, Y, n) donne un tableau des coefficients du polynôme du plus grand degré au plus faible.

polyval est une fonction de la bibliothèque *numpy* qui évalue le polynôme p au point x par la commande np.polyval(p, x).

random.uniform(a,b,N) est une commande permettant de générer aléatoirement N valeurs réelles comprises dans l'intervalle [a;b[selon une distribution uniforme.

random.normal(MOY,u_X,N) est une commande permettant de générer aléatoirement N valeurs réelles selon une distribution normale de moyenne MOY et d'écart-type u_X.