

CONCOURS EMS-2024

EPREUVE DE PHYSIQUE

Durée : 04 Heures

SUJET N°1

Exercice N°1

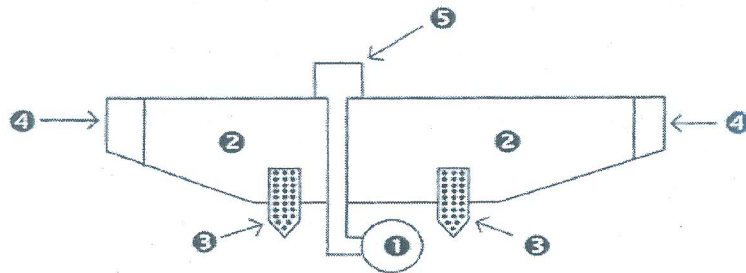
LE BATHYSCAPHE

(25 points)

Les bathyscaphes sont des sous-marins d'exploration abyssale. En service de 1948 à 1982, ils ont été les seuls submersibles capables d'atteindre les grandes profondeurs (10 916 m dans la fosse des Mariannes, le 23 janvier 1960).

Un bathyscaphe est constitué d'une lourde cabine sphérique en acier, pouvant accueillir deux ou trois passagers, suspendue à un flotteur rempli d'un liquide noté « L » moins dense que l'eau qui compense le poids. Le bathyscaphe descend par gravitation et remonte en lâchant du lest (voir figure 1).

À cause de leur poids, les bathyscaphes ne peuvent être embarqués et sont remorqués par leur navire.



- ① cabine
- ② flotteurs remplis de liquide « L »
- ③ lest
- ④ ballasts
- ⑤ puits d'accès pour l'équipage

- Pour plonger le bathyscaphe remplit ses ballasts d'eau ou largue une partie du liquide « L » qu'il remplace par de l'eau de mer (dans notre étude on se placera dans la deuxième hypothèse).
- Il s'alourdit et descend verticalement s'il n'y a pas de courants marins.
- Il se pose ensuite sur le fond.
- Pour remonter, il largue une partie de son lest.

FIGURE 1

1. Étude de la plongée d'un bathyscaphe

Dans tout l'exercice on supposera que l'on peut négliger les courants marins et donc que le bathyscaphe descend verticalement. Les mouvements seront étudiés dans le référentiel terrestre supposé galiléen.

Données :

- Masse totale du bathyscaphe : $M = 200 \text{ t}$ (tonnes) (liquide « L » compris)
- Volume total du bathyscaphe : $V = 194 \text{ m}^3$
- Volume de liquide « L » embarqué : $V_L = 170 \text{ m}^3$
- Masse volumique de l'eau de mer : $\rho_E = 1,03 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$
- Masse volumique du liquide « L » : $\rho_L = 0,66 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$
- Intensité de la pesanteur : $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$

1.1. Le bathyscaphe est complètement immergé mais ne plonge pas encore.

1.1.1. Donner l'expression littérale, en fonction des données, de la valeur F_A de la poussée d'Archimède exercée sur le bathyscaphe complètement immergé. Calculer sa valeur numérique.

1.1.2. Comparer les valeurs du poids du bathyscaphe et de la poussée d'Archimède qu'il subit. Que peut-on en conclure ?

1.2. On admettra que, rapidement, le bathyscaphe remplace un volume V_L du liquide « L » par un même volume $V_E = V_L$ d'eau de mer. Ceci est en fait un modèle simplifié.

1.2.1. La valeur F_A de la poussée d'Archimède varie-t-elle ? Expliquez.

1.2.2. Déterminer l'expression littérale de la variation de masse du bathyscaphe (par la suite, elle sera notée ΔM et comptée positivement). Faire l'application numérique **Donnée : $V_E = V_L = 2,0 \text{ m}^3$** .

1.2.3. Expliquez pourquoi le bathyscaphe se met à descendre.

1.3. Plongée du bathyscaphe.

Dans cette partie, on considère que la masse totale du bathyscaphe est à présent $M' = 200,74 \text{ t}$ et qu'il est soumis à des forces de frottements $\vec{f} = -k v^2 \vec{j}$ où k est une constante positive qui dépend de la nature du fluide et de la forme de l'objet.

1.3.1. Faire le bilan des forces exercées sur le bathyscaphe en y représentant sans échelle, ces forces sur un schéma clair.

1.3.2. Établir l'équation différentielle régissant la vitesse v du centre d'inertie G selon un axe vertical descendant (Oy).

1.3.3. La vitesse limite atteinte par le bathyscaphe est $v_{\text{lim}} = 1,0 \text{ m.s}^{-1}$.

1.3.3.a. Déterminer l'expression littérale de cette vitesse limite v_{lim} .

1.3.3.b. En déduire la valeur de k . Justifier l'unité de k par une analyse dimensionnelle.

2. La propulsion du sous-marin « Le Terrible »

D'abord propulsés par des moteurs Diesel rechargeant des batteries, les sous-marins ne pouvaient pas rester en plongée très

longtemps car pour utiliser leur moteur, ils devaient obligatoirement faire surface pour évacuer les gaz d'échappement des moteurs. Tout changea avec la propulsion nucléaire : ce n'était plus la propulsion qui limitait la durée de plongée mais la résistance physique de l'équipage.

Dans cette partie, on se propose d'étudier le mode de propulsion du dernier sous-marin nucléaire français « Le Terrible » qui entrera bientôt en service.

Un tel sous-marin utilise comme combustible de l'uranium enrichi en isotope $^{235}_{92}\text{U}$ (cet isotope est fissile).

Données : $^{235}_{92}\text{U}$: $m(\text{U}) = 235,0439 \text{ u}$; $^{94}_{38}\text{Sr}$: $m(\text{Sr}) = 93,9154 \text{ u}$; $^{140}_{54}\text{Xe}$: $m(\text{Xe}) = 139,9252 \text{ u}$; ^1_0n : $m(\text{n}) = 1,0087 \text{ u}$

$1 \text{ u} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$; $C = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$; Masse molaire de $^{235}_{92}\text{U}$: $M(\text{U}) = 235 \text{ g.mol}^{-1}$.

2.1. Donner la composition du noyau d'uranium $^{235}_{92}\text{U}$.

2.2. Les noyaux d'uranium $^{235}_{92}\text{U}$ subissent des réactions de fissions. La plus fréquente est donnée par l'équation suivante :



2.2.1. Montrer que $x = 2$ justifier.

2.2.2. Calculer l'énergie libérée E_{lib} par la fission selon l'équation ci-dessus d'un noyau d'uranium 235.

2.2.3. Le réacteur fournit une puissance moyenne $P_m = 200 \text{ MW}$. **Donnée :** $1 \text{ mois} = 2,6 \times 10^6 \text{ s}$

2.2.3.a. Déterminer le nombre de fissions qui se produisent par seconde.

2.2.3.b. En déduire la masse d'uranium m_U consommée en une durée $\Delta t = 504 \text{ h}$.

2.2.4. Un tel sous-marin est prévu pour naviguer pendant une durée de 60 jours.

Quelle masse minimum d'uranium 235 devra-t-il embarquer pour assurer son approvisionnement en énergie pendant cette durée ?

EXERCICE 2 : LE SPECTROGRAPHE DE MASSE (25 POINTS)

Le spectromètre de masse permet de mesurer la masse de particules chargées avec une telle précision qu'il peut servir à déterminer des compositions isotopiques d'éléments chimiques. Cet exercice a pour objectif de déterminer la composition isotopique et le nombre de masse x de l'un des isotopes de l'élément mercure Hg. On considérera que le mercure naturel est constitué essentiellement de deux isotopes

$^{200}_{80}\text{Hg}$ et $^{x}_{80}\text{Hg}$

Données : $d = 1,00 \text{ m}$; $U = 1,00 \cdot 10^4 \text{ V}$; $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$;

m_0 (masse d'un nucléon) = $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $E_1 = 5,30 \cdot 10^4 \text{ V.m}^{-1}$; $B_1 = 0,383$

T ; $B_2 = 0,200 \text{ T}$; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

2.1. Accélération des ions :

Une source émet des ions mercures $^{200}_{80}\text{Hg}^{2+}$ et $^{x}_{80}\text{Hg}^{2+}$. Chaque ion de masse m et de charge q émis par la source située en F_1 , avec une vitesse initiale négligeable, est accéléré par une différence de potentiel $U = U_{P_1 P_2}$ appliquée entre les plaques conductrices P_1 et P_2 (Voir figure 2).

2.1.1. Préciser le signe de la tension $U = U_{P_1 P_2}$. Reproduire la figure 2 et y représenter le champ électrique accélérateur $\vec{E}_0$ qui règne entre les plaques P_1 et P_2 puis calculer sa norme.

2.1.2. Exprimer en fonction de m , q et U , la vitesse V_0 d'un ion lorsqu'il passe par F_2 au niveau de la plaque P_2 . En notant respectivement V_{01} et V_{02} les vitesses de passages en F_2 des ions $^{200}_{80}\text{Hg}^{2+}$ et $^{x}_{80}\text{Hg}^{2+}$, exprimer le rapport $\frac{V_{01}}{V_{02}}$ en fonction de x .

En déduire la valeur de x sachant que $\left(\frac{V_{01}}{V_{02}}\right)^2 = 1,01$.

2.2. Filtrage en fonction de la vitesse :

En pratique, les ions ne présentent pas une vitesse parfaitement négligeable en F_1 ce qui entraîne une différence des valeurs des vitesses des ions au niveau de F_2 . Pour résoudre ce problème on réalise une opération de filtrage pour améliorer la précision du spectromètre.

Dans l'espace de filtrage entre les plaques P_2 et P_3 , on établit un champ électrique $\vec{E}_1$ uniforme et un champ magnétique $\vec{B}_1$ uniforme (voir figure 2).

2.2.1. Représenter sur la figure 2 les forces électrique $\vec{F}_e$ et magnétique $\vec{F}_m$ qui s'exercent sur un ion.

2.2.2. Écrire l'expression vectorielle de la force de Lorentz entre les plaques P_2 et P_3 . Préciser sa valeur pour les ions qui ont un mouvement rectiligne jusqu'en F_3 .

2.2.3. Établir l'expression de la vitesse v_1 des ions qui parviennent en F_3 , en mouvement rectiligne, en fonction de E_1 et B_1 .

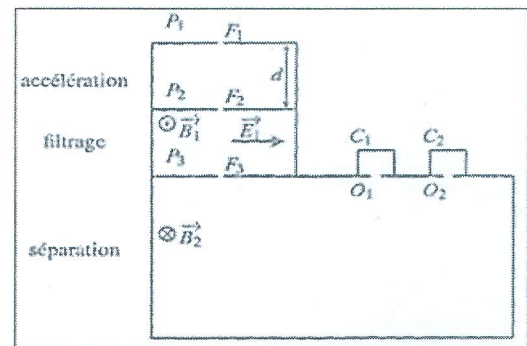


FIGURE 2

Calculer v_1 . En déduire lequel, entre les deux isotopes $^{200}_{80}\text{Hg}^{2+}$ et $^{180}_{80}\text{Hg}^{2+}$, parvient en F_3 ?

2.3. Séparation et comptage des ions.

Pour établir la composition isotopique du mercure, on règle en fait la valeur de $\vec{E}_1$ pour assurer le passage des ions $^{200}_{80}\text{Hg}^{2+}$ pendant une minute à travers la fente F_3 puis on la modifie pour assurer le passage des ions $^{180}_{80}\text{Hg}^{2+}$ pendant une minute en maintenant B_1 constant.

Après la traverse de la fente F_3 les ions pénètrent dans une région où ne règne qu'un champ magnétique $\vec{B}_2$ uniforme afin de les dévier vers les collecteurs C_1 et C_2 .

Durant la mesure, le détecteur C_1 collecte une charge $Q_1 = 1,20 \cdot 10^{-7} \text{ C}$ et le collecteur C_2 une charge $Q_2 = 3,5 \cdot 10^{-8} \text{ C}$.

2.3.1. Montrer que le mouvement d'un ion dans cette zone est circulaire uniforme. Préciser l'isotope reçu en C_1 .

2.3.2. Exprimer les distances F_3O_1 et F_3O_2 en fonction de m_u , U , e et B_2 . En déduire la distance O_1O_2 .

2.3.3. Trouver la composition isotopique du mercure.

2.3.4. Déterminer la masse molaire moyenne du mercure naturel.

EXERCICE 3 : LE CIRCUIT (R,L,C)

(25 POINTS)

Un circuit électrique série comprend (voir figure 3) :

- Un générateur basses fréquence (G.B.F.) qui délivre une tension alternative sinusoïdale de fréquence N réglable.
- Une bobine d'inductance L et de résistance négligeable.
- Un résistor de résistance réglable sur la valeur R .
- Un condensateur de capacité C .

On désigne par I l'intensité efficace du courant dans le circuit, par U la tension efficace aux bornes du GBF et par Z l'impédance du circuit.

Données : $U = 3,0 \text{ V}$; $R = 5,0 \Omega$; $L = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ H}$ et $C = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ F}$.

On se propose d'étudier les variations de la puissance moyenne notée P absorbée par le circuit en fonction de la fréquence N .

3.1. Faire la construction de Fresnel pour ce circuit puis exprimer le facteur de puissance en fonction de R et Z .

3.2. Exprimer la puissance moyenne P en fonction de U , R et Z d'une part et d'autre part en fonction de R et I .

3.3. Lorsque le circuit est à la résonance d'intensité, déterminer les valeurs de la fréquence N_0 , de l'impédance Z_0 , de l'intensité efficace I_0 , et de la puissance moyenne P_0 .

3.4. Exprimer le coefficient de surtension δ à la résonance d'intensité en fonction de l'inductance L , de la fréquence N_0 et de la résistance R . faire l'application numérique.

3.5. Établir l'expression suivante de la puissance moyenne : $P = \frac{P_0}{1 + \frac{X^2}{R^2}}$. On exprimera X^2 en fonction de L , C et N .

3.6. Montrer qu'il existe deux valeurs N_1 et N_2 ($N_2 > N_1$) de la fréquence N pour lesquelles $P = \frac{P_0}{2}$. En déduire l'expression $\Delta N = N_2 - N_1$ en fonction de R et L .

3.7. Montrer que pour $N = N_1$ ou $N = N_2$ on a $I = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$.

3.8. On étudie P au voisinage de la résonance l'on pose $N = N_0(1 + \varepsilon)$ avec $\varepsilon = \frac{\Delta N}{N_0}$ variation relative de la fréquence ($\varepsilon \ll 1$).

3.8.1. Montrer que $\frac{X}{R} = 2 \cdot \varepsilon \cdot \delta$ puis exprimer P en fonction de P_0 , ε et δ .

On rappelle $(1 + \varepsilon)^n \approx 1 + n\varepsilon$ si $\varepsilon \ll 1$.

3.8.2. En déduire les valeurs approchées de N_1 et N_2 et la valeur de la bande passante relative $\frac{\Delta N}{N_0}$ du circuit.

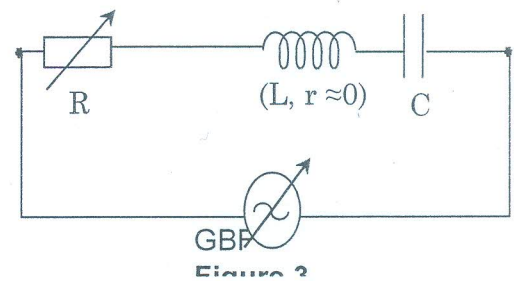


Figure 3

EXERCICE 4 : LES SUPERCONDENSATEURS

(25 Points)

Un supercondensateur permet de stocker et de restituer rapidement de l'énergie électrique.

Dans certains transports en commun, un supercondensateur est utilisé pour emmagasiner un maximum d'énergie électrique en quelques secondes lors des phases de freinage.

Par exemple, les trains express régionaux (T.E.R.) qui sont utilisés dans beaucoup de capitales des pays de l'Afrique de l'ouest, Dakar, Abidjan pour ne citer que ceux-là, fonctionnent sur ce principe.

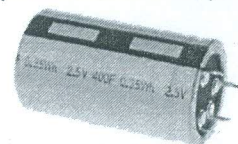
Si des condensateurs classiques étaient utilisés à la place des supercondensateurs, il faudrait des armatures de très grandes surfaces et très rapprochées, séparées par un excellent diélectrique.

Cet exercice comporte deux (02) parties permettant de comparer les condensateurs usuels et un supercondensateur, puis la détermination expérimentale de sa capacité C (Contrôle de qualité)

4.1. Partie 1 : Comparaison de capacités

Données : fournies par le constructeur sur le supercondensateur étudié :

- Dimensions : 35 mm × 60 mm ; capacité : 400 F



- Tension maximale $U_{\max}$: 2,5 V ; énergie maximale : 0,35 Wh
- Capacités usuelles utilisées au niveau des laboratoires de Physique de Lycée : de quelques nanofarads à quelques farad ($C_{\max} = 10 \text{ F}$)

4.1.1. Comparer la valeur de la capacité du supercondensateur étudié aux valeurs usuelles des capacités des condensateurs utilisés au lycée ou en électronique.

4.1.2. La valeur de la capacité C d'un condensateur plan peut être déterminée à l'aide de la relation :

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \times \frac{S}{d}$$

où : S : est la surface en regard des deux armatures,
 d : est l'écartement entre les deux armatures,
 ϵ_r : permittivité électrique relative du matériau isolant placé entre les deux armatures.

4.1.2.a. Calculer la capacité C_1 d'un condensateur plan dont la surface $S_1 = 1,00 \text{ cm}^2$, la distance d_1 étant égale à $2,00 \mu\text{m}$ et dont la valeur de $\epsilon_r = 2,25$.

4.1.2.b. On veut associer un nombre n de condensateurs plans identiques de capacité C_1 pour obtenir une capacité équivalente égale à celle du supercondensateur $C_{\text{eq}} = C = 400 \text{ F}$.

- Proposer le type d'association à réaliser (schéma à faire) en argumentant votre choix.
- Déterminer le nombre n de condensateurs à associer. Quel regard critique pouvez-vous faire sur le résultat obtenu ?

Donnée : Permittivité électrique du vide $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$

4.2. Partie 2 : Étude du modèle du circuit RC série

Un groupe d'ingénieurs (experts) de la S.E.T.E.R (Société d'exploitation du Train express régional) souhaite vérifier la valeur de la capacité C du supercondensateur qu'il a commandé en utilisant un cycle de charge dans un circuit RC. Pour cela, il étudie dans un premier temps le comportement d'un modèle de circuit RC série.

Il réalise ainsi le circuit électrique composé d'une source idéale de tension E , d'un interrupteur K , d'un conducteur ohmique de résistance R , du supercondensateur de capacité C et d'un ampèremètre de résistance interne négligeable (la tension aux bornes de l'ampèremètre est considérée comme nulle).

Le supercondensateur est initialement déchargé. À l'instant $t = 0 \text{ s}$, il ferme l'interrupteur.

4.2.1. Faire le schéma de ce circuit en y représentant les tensions fléchées aux bornes des dipôles et le sens du courant de charge i . L'interrupteur K est en position fermée.

4.2.2. Établir la relation entre l'intensité $i(t)$ du courant électrique et la dérivée de la charge $q(t)$ portée par l'armature A du supercondensateur, puis la relation entre l'intensité $i(t)$, la capacité C et la dérivée de la tension électrique $u_C(t)$ aux bornes du supercondensateur.

4.2.3. Montrer que l'équation différentielle dont la tension électrique aux bornes du supercondensateur $u_C(t)$ peut s'écrire comme suit

$$\frac{du_C}{dt}(t) + \frac{1}{\tau} \cdot u_C(t) = \frac{E}{\tau}$$

Exprimer la constante de temps τ en fonction de R et de C .

4.2.4. Vérifier que les solutions de cette équation différentielle sont de la forme : $u_C(t) = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + E$

Déterminer l'expression de A pour la situation étudiée.

4.3. Étude expérimentale et détermination de la valeur de la capacité C

Il réalise le montage précédent avec une source idéale de tension de valeur $E = 2,5 \text{ V}$ et un conducteur ohmique de résistance $R = 2,00 \Omega$.

À l'aide d'une carte d'acquisition, le groupe fait un suivi temporel de la tension aux bornes du supercondensateur durant sa charge (**Courbe en annexe**).

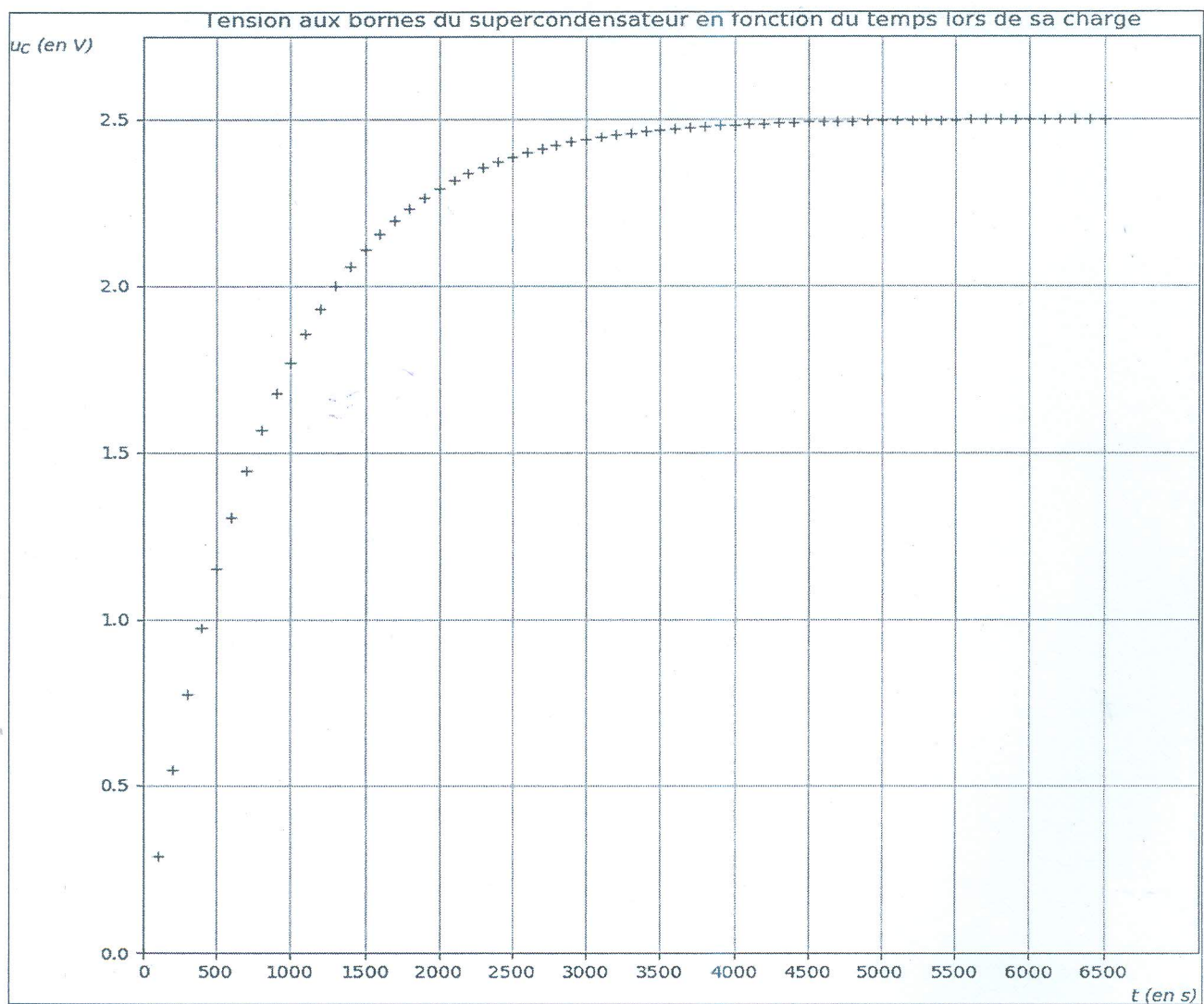
4.3.1. A partir de la courbe, déterminer la valeur C_{exp} de la capacité du supercondensateur en explicitant la démarche suivie.

4.3.2. Comparer la valeur de la capacité C_{exp} déterminée expérimentalement avec la valeur de référence $C_{\text{réf}}$ donnée par le constructeur en utilisant le quotient $\frac{|C_{\text{exp}} - C_{\text{réf}}|}{C_{\text{réf}}}$. Conclure en argumentant sur la validité du résultat obtenu expérimentalement.

Quel sera l'avis de ce groupe d'experts sur la qualité du supercondensateur fourni par le constructeur ?

Fin du Sujet

Annexe à rendre avec la copie



Courbe $u_c = f(t)$.