



**ROYAUME DU MAROC**  
المملكة المغربية

Ministère de l'Enseignement Supérieur,  
de la Formation des Cadres et de la Recherche Scientifique

Présidence du Concours National Commun 2015  
**Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique**



**CONCOURS NATIONAL COMMUN**  
d'Admission dans les Établissements de Formation  
d'Ingénieurs et Établissements Assimilés  
Edition 2015

**ÉPREUVE DE PHYSIQUE II**

Filière **PSI**

Durée **4** heures

Cette épreuve comporte 8 pages au format A4, en plus de cette page de garde  
L'usage de la calculatrice est *autorisé*.

- On veillera à une présentation et une rédaction claires et soignées des copies. Il convient en particulier de rappeler avec précision les **références** des questions abordées.
- Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en indiquant clairement les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.
- Toutes les réponses devront être très soigneusement justifiées.
- Si un résultat donné par l'énoncé est non démontré, il peut néanmoins être admis pour les questions suivantes. Ainsi, les diverses parties du problème sont relativement indépendantes entre elles.

## Etude d'un capteur capacitif

L'épreuve est constituée d'un problème composé de quatre parties relativement indépendantes et peuvent être traitées dans l'ordre choisi par le candidat. Après le calcul de la capacité d'un condensateur plan et l'étude du condensateur dans différentes situations, on s'intéresse à montrer qu'on peut utiliser un condensateur pour réaliser un capteur capacitif. On étudie ensuite une chaîne d'acquisition d'une grandeur physique, la hauteur du niveau d'un liquide dans un réservoir.

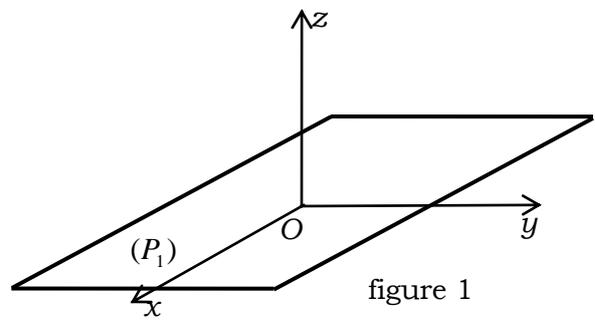
### Données :

- Permittivité du vide :  $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi 10^9} \text{ S.I.}$
- Vitesse de la lumière dans le vide :  $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .
- $\mu_0 \epsilon_0 c^2 = 1$ .

### 1. Champ électrostatique d'un système de deux plans conducteurs

**1.1.** On considère dans un premier temps un conducteur plan ( $P_1$ ) d'axe ( $Oz$ ), de surface  $S$  d'épaisseur négligeable placé dans l'air dont les propriétés électriques et magnétiques sont celles du vide (figure 1). Le plan ( $P_1$ ) correspond au plan ( $Oxy$ ) du système de coordonnées cartésiennes ( $Ox, Oy, Oz$ ) auquel on associe la base orthonormée  $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ .

La position d'un point  $M$  est repérée par ses coordonnées cartésiennes  $(x, y, z)$ . Le conducteur porte une charge répartie uniformément par unité de surface  $\sigma_1 = \sigma$  ( $\sigma > 0$ ). Afin d'étudier les symétries et les invariances, on suppose que le plan est illimité.

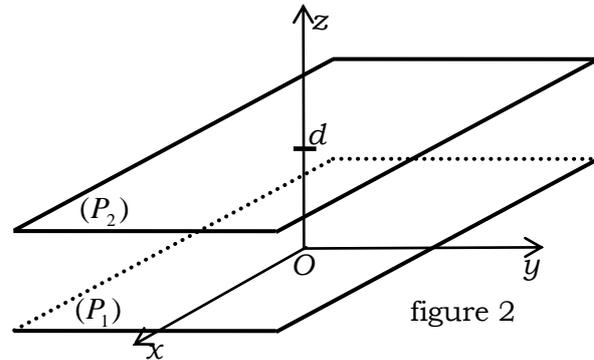


**1.1.1.** Montrer que le champ électrostatique  $\vec{E}_1(M)$  créé par le plan ( $P_1$ ) en tout point  $M$  est de la forme  $\vec{E}_1(M) = E_1(z) \vec{e}_z$ .

**1.1.2.** Ecrire l'équation locale de Maxwell-Gauss et montrer que  $E_1(z)$  est constant. En utilisant les conditions aux limites, achever la détermination du champ électrostatique et donner l'expression de  $E_1(z)$  en tout point de l'espace. En déduire le potentiel électrostatique  $V_1(z)$  dont dérive le champ  $\vec{E}_1(M)$ .

**1.2.** On superpose au premier plan ( $P_1$ ) un deuxième plan conducteur ( $P_2$ ) identique et parallèle au premier (figure 2). Le plans ( $P_2$ ) est situé en  $z = d$  ( $d > 0$ ).

Les deux conducteurs métalliques ont la même surface  $S$  supposée très grande devant le carré de la distance  $d$ . Le conducteur ( $P_2$ ) porte une charge répartie uniformément par unité de surface  $\sigma_2 = -\sigma$ . L'ensemble est situé dans l'air assimilé au vide.



**1.2.1.** Déterminer le champ électrostatique  $\vec{E}(M)$  créé par le système des deux conducteurs en tout point de l'espace. En déduire la distribution de potentiel  $V(M)$  dont dérive le champ  $\vec{E}(M)$ .

**1.2.2.** Tracer les allures des courbes donnant le champ  $E(M)$  et le potentiel  $V(M)$  en précisant les valeurs aux points remarquables. On prendra  $V(z=0) = V_1$ .

**2. Condensateur plan**

Le système étudié dans la question précédente constitue un condensateur plan formé des deux conducteurs (armatures) métalliques ( $P_1$ ) et ( $P_2$ ) en équilibre électrostatique. Les deux armatures sont de forme rectangulaire (longueur  $L$  et largeur  $l$ ) et distantes de  $d$  (figure 2). L'armature supérieure ( $P_2$ ) est portée au potentiel  $V_2$  et l'armature inférieure ( $P_1$ ) est portée au potentiel  $V_1$ . On pose  $U = V_1 - V_2$ .

**2.1.** Rappeler la définition d'un conducteur en équilibre électrostatique et celle d'un condensateur électrique.

**2.2.** Pour que le condensateur plan vérifie la définition de la question précédente, on néglige les effets de bord. Préciser, qualitativement, les conditions que doivent vérifier les armatures pour que l'approximation soit valable.

**2.3.** On note  $Q_1$  la charge de l'armature ( $P_1$ ),  $Q_2$  celle de l'armature ( $P_2$ ). Définir la charge  $Q$  de ce condensateur.

**2.4.** Après avoir défini la capacité  $C$  d'un condensateur et en utilisant l'expression du champ électrostatique calculé dans la question **1.2.1**, montrer que la capacité du condensateur plan est donné par  $C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ .

**2.5.** Déterminer l'expression  $W_p$  de l'énergie potentielle du condensateur en fonction du champ électrostatique. Retrouver l'expression de la densité volumique d'énergie électrique.

**2.6.** Après avoir isolé le condensateur, on introduit entre les armatures ( $P_1$ ) et ( $P_2$ ) un plan métallique ( $P$ ) (figure 3), initialement neutre, d'épaisseur uniforme  $e$ , parallèle aux armatures, de surface  $S$ , centré sur l'axe du condensateur. On appelle  $e_1$  et  $e_2$  les distances de ces faces aux armatures.

**2.6.1.** Décrire les phénomènes électriques qui se produisent lorsqu'on introduit ce conducteur.

**2.6.2.** Calculer la nouvelle capacité  $C'$  du condensateur, et la différence de potentiel  $U'$  entre les armatures.

**2.6.3.** On refait l'opération en maintenant constante la différence de potentiel  $U$  grâce à un générateur. Calculer la nouvelle charge  $Q'$  du condensateur.

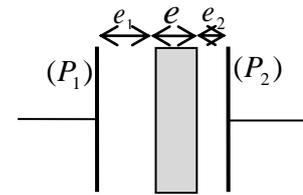


figure 3

**2.7.** On introduit une lame à faces parallèles diélectrique de permittivité relative  $\epsilon_r$  entre les armatures du condensateur plan alimenté. Le diélectrique occupe tout l'espace entre les armatures considérées toujours suffisamment grandes. Le champ  $\vec{E}_0$  créé par le condensateur entre ses armatures est supposé uniforme et polarise uniformément le diélectrique.

**2.7.1.** Quel est l'intérêt pratique d'introduire un matériau diélectrique entre les armatures d'un condensateur ?

**2.7.2.** Décrire les phénomènes électriques qui se produisent lorsqu'on introduit ce diélectrique.

**2.7.3.** Donner quelques ordres de grandeur de la permittivité relative  $\epsilon_r$ .

**2.7.4.** Déterminer la capacité  $C$  en fonction de la capacité dans le vide  $C_0$  quand le diélectrique occupe seulement une partie du volume d'épaisseur  $e'$  par rapport à l'épaisseur totale  $d$  (figure 4).

**2.7.5.** Déterminer la capacité  $C$  du condensateur en fonction de  $C_0$ ,  $\epsilon_r$  et  $e'$  et vérifier le résultat en étudiant les cas limites :  $e'=0$  ;  $\epsilon_r=1$  ;  $e'=d$ .

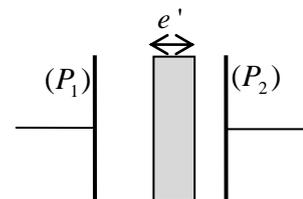


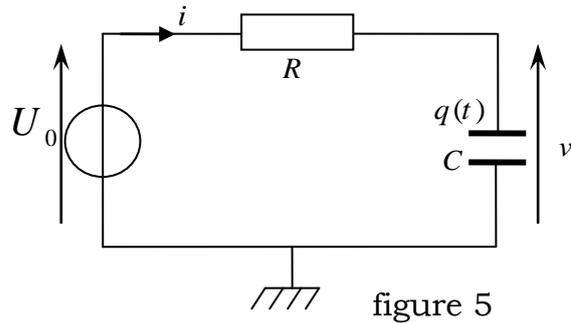
figure 4

### 3. Charge lente du condensateur plan

Les armatures du condensateur plan étudié précédemment sont supposées circulaires de rayon  $a$  situées à la distance  $d$  l'une de l'autre. On s'intéresse à la charge, supposée lente, du condensateur inséré dans le circuit de résistance  $R$  (figure 5). Le milieu entre les armatures est assimilé au vide. Le condensateur

étant initialement déchargé ( $q(t=0)=0$ ), on le charge à l'aide d'un générateur idéal de tension de f.é.m. constante.

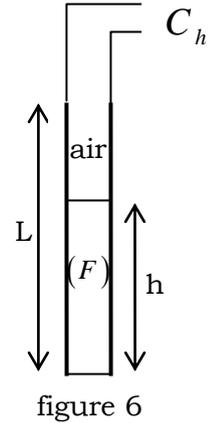
- 3.1.** Déterminer l'expression de la charge  $q(t)$  portée par l'armature ( $P_1$ ) en fonction du temps.
- 3.2.** Déterminer, pendant la durée de la charge totale du condensateur, l'énergie  $W_g$  fournie par le générateur, l'énergie  $W_c$  emmagasinée par le condensateur et l'énergie  $W_j$  dissipée par effet Joule.



- 3.3.** Rappeler les équations de Maxwell dans le vide sous forme locale en présence de charge et de courant et donner leurs expressions intégrales ainsi que leur signification physique.
- 3.4.** A quelle condition sur la variation de la charge  $q(t)$  l'expression du champ électrique calculée dans la question **1.2.1** reste-t-elle valable ? On suppose cette condition vérifiée dans la suite. Exprimer dans ce cas le champ électrique  $\vec{E}(t)$  en fonction de  $t$ ,  $U_0$ ,  $d$ ,  $R$ ,  $C$  et  $\epsilon_0$ . En déduire l'expression de la densité de courant de déplacement  $\vec{J}_D$ .
- 3.5.** On repère un point  $M$  de l'espace inter-armature par ses coordonnées cylindriques  $(r, \theta, z)$  et on note  $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$  la base correspondante. Justifier rigoureusement que le champ magnétique entre les armatures du condensateur peut s'écrire sous la forme  $\vec{B}(M, t) = B(r, t)\vec{e}_\theta$ . Quelle est la forme des lignes de champ du champ magnétique ?
- 3.6.** Montrer que le champ magnétique entre les armatures s'écrit :  $\vec{B}(M, t) = B_0(r)\exp(-\frac{t}{\tau})\vec{e}_\theta$ . Donner l'expression de  $B_0(r)$  et celle de la constante de temps  $\tau$ .
- 3.7.** Déterminer l'expression du vecteur de Poynting  $\vec{\Pi}(M, t)$  en un point  $M$  intérieur du condensateur. Commenter la direction de ce vecteur et donner sa signification physique.
- 3.8.** Calculer la puissance rayonnée sortant de l'espace entre les armatures délimité par la surface latérale du cylindre d'axe  $(Oz)$  et de rayon  $a$ .
- 3.9.** Déterminer alors l'énergie électromagnétique qui est entrée dans cet espace pendant la charge du condensateur. Comparer cette énergie avec celle emmagasinée par le condensateur.
- 3.10.** Le champ  $\vec{B}(M, t)$  calculé dans la question **3.6** vérifie-t-il l'équation de Maxwell-Faraday ? Interpréter.

**4. Application : Capteur capacitif**

On plonge le condensateur formé des deux armatures ( $P_1$ ) et ( $P_2$ ) dans une cuve contenant un liquide ( $F$ ) isolant de permittivité électrique relative  $\epsilon_r(F)$  (figure 6). Les deux armatures sont de forme rectangulaire (longueur  $L$  et largeur  $l$ ) et distantes de  $d$ . Le liquide est assimilé à un diélectrique homogène, linéaire et isotrope. Le niveau du liquide est repéré par la hauteur  $h$  ( $0 \leq h \leq L$ ). L'air surmontant le liquide est de l'air que l'on assimile de point de vue électrique au vide.



**4.1.** On peut alors considérer le condensateur ainsi obtenu comme l'association de deux condensateurs  $C_0'$  et  $C_1$ .  $C_0'$  et  $C_1$  sont-ils associés en série ou en parallèle ?

**4.2.** Déterminer l'expression de la capacité équivalente  $C_h$  en fonction de  $h$ ,  $l$ ,  $L$ ,  $d$ ,  $\epsilon_0$  et  $\epsilon_r(F)$ . Montrer que  $C_h$  s'écrit sous la forme :  $C_h = C_0(1 + \alpha h)$ . Calculer les valeurs numériques des constantes  $C_0$  et  $\alpha$ . On donne :  $L = 1,00 \text{ m}$ ,  $l = 4,31 \text{ cm}$ ,  $d = 2,54 \text{ mm}$  et  $\epsilon_r(F) = 80$ .

**5. Mesure du niveau d'un liquide dans un réservoir**

On souhaite mesurer la hauteur  $h$  d'un liquide contenu dans un réservoir à l'aide du dispositif étudié ci-dessus. On insère alors le condensateur plan plongé dans le réservoir contenant un liquide dans le circuit de la figure 7.

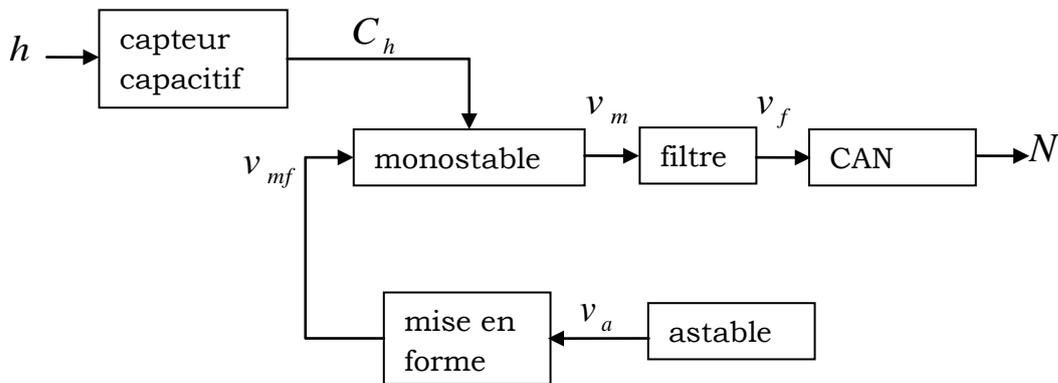


figure 7

**5.1.** Le signal  $v_a$  est délivré par le multivibrateur astable de la figure 8 où l'amplificateur opérationnel de tensions de saturation  $\pm V_{sat}$  est considéré idéal.

**5.1.1.** Montrer que les seules tensions possibles en sortie sont  $+V_{sat}$  ou  $-V_{sat}$ . Quelles sont les tensions  $v_+$  correspondantes à l'entrée non inverseuse de l'AO ?

**5.1.2.** Etudier le fonctionnement de ce circuit et montrer qu'il est le siège

d'oscillations dues à des charges et des décharges du condensateur. On suppose qu'à la mise sous tension à  $t = 0$ , le condensateur est chargé à  $-\frac{R_1}{R_1 + R_2}V_{sat}$  et  $V_a = +V_{sat}$ .

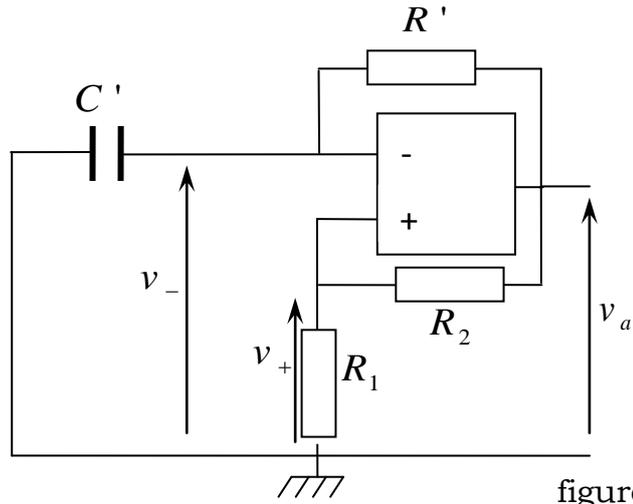


figure 8

- 5.1.3. Sur un chronogramme, dessiner l'évolution des tensions  $v_+$ ,  $v_-$  et  $v_a$  sur deux périodes complètes.
- 5.1.4. On suppose qu'un régime périodique s'est établi. Calculer les temps de charge  $T_c$  et de décharge  $T_d$  du condensateur au cours d'une période. En déduire l'expression de la période  $T$  des oscillations de la tension  $v_a$  en fonction de  $R'$ ,  $C'$ ,  $R_1$  et  $R_2$ .
- 5.2. Le signal  $v_a$  est appliqué à l'entrée du montage de mise en forme représenté dans la figure 9a. ( $D_z$ ) est une diode zener dont la caractéristique est représentée dans la figure 9b. On donne :  $U_D = -0,5 V$  et  $U_Z = 5,1 V$ .

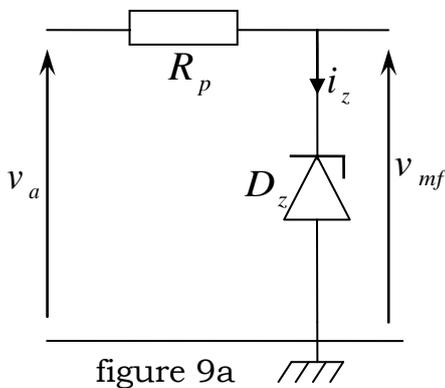


figure 9a

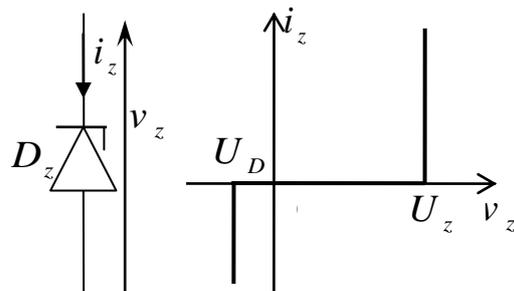


figure 9b

- 5.2.1. Représenter l'allure de la tension  $v_{mf}$  en fonction du temps.
- 5.2.2. Calculer la valeur minimale de  $R_p$  limitant l'intensité du courant  $i_z$  à  $10 mA$  lorsque  $v_a$  prend sa valeur minimale. Cette valeur est-elle toujours correcte lorsque  $v_a$  prend sa valeur maximale ? Justifier votre réponse.
- 5.3. Le monostable, alimenté par une tension continue  $V_{CC} = 5 V$ , est un circuit électronique qui a un seul état stable (il correspond ici à l'état bas, sortie à  $0 V$ ) quand il est au repos. Il utilise le condensateur  $C_h$ , une

résistance ajustable  $R_x$  et deux portes logiques ET-NON. Il est déclenché à chaque transition descendante du signal d'entrée  $v_{mf}$  de période  $T = 2 \text{ ms}$  délivré par le circuit de mise en forme. Il passe alors à son état instable (ici à l'état haut,  $+5 \text{ V}$ ), il y reste une durée  $T_i = R_x C_h$  (durée de l'état instable) qui dépend de  $R_x$  et  $C_h$ , puis il revient à son état stable au bout de ce temps. Cette durée ne peut être inférieure à  $T_0 = 10 \mu\text{s}$ .

- 5.3.1.** Le réservoir est supposé vide. Calculer la valeur minimale  $C_{h \min}$  de la capacité  $C_h$ . Déterminer la valeur minimale  $R_{x \min}$  de  $R_x$  permettant un fonctionnement correct du monostable.
- 5.3.2.** Le réservoir est supposé plein. Calculer la valeur maximale  $C_{h \max}$  de la capacité  $C_h$ . Déterminer la valeur maximale  $R_{x \max}$  de  $R_x$  permettant d'avoir  $T_i < T$ .
- 5.3.3.** Représenter l'allure de la tension de sortie du monostable  $v_m(t)$  pour une hauteur  $h = 50 \text{ cm}$ . On prendra  $R_x = 82,3 \text{ kW}$ .
- 5.3.4.** Déterminer l'expression de la valeur moyenne  $V_{m0}$  de la tension de sortie  $v_m(t)$  en fonction de  $R_x$ ,  $C_0$ ,  $\alpha$ ,  $T$ ,  $V_{CC}$  et  $h$ . Commenter. Quelle est la plage de variation de  $V_{m0}$  pour  $R_x = 82,3 \text{ kW}$  ?
- 5.4.** Afin d'obtenir la composante continue de la tension  $v_m(t)$ , on applique cette tension au filtre de fonction de transfert  $\underline{H}(j\omega) = \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}$ . On réalise le filtre à l'aide d'une résistance  $R_f = 220 \text{ kW}$  et d'un condensateur de capacité  $C_f$ .
- 5.4.1.** Préciser, en le justifiant, la nature du filtre. Déterminer la fréquence de coupure théorique  $f_c$  à  $-3 \text{ dB}$ , et le comportement du circuit de part et d'autre de sa fréquence de coupure.
- 5.4.2.** Le développement en série de Fourier de la tension  $v_m(t)$  est  $v_m(t) = V_{m0} + \sum_{n=1}^{+\infty} (V_{m_n} \cdot \sin(n\omega t + \varphi_{m_n}))$  où  $n$  est un entier et  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ . Tracer le spectre de la tension  $v_m(t)$ .
- 5.4.3.** Donner l'expression de la tension  $v_f(t)$  à la sortie du filtre. A quelle condition sur  $f_c$  peut-on écrire  $v_f(t) = V_{f0} + V_{f1} \sin(\omega t + \varphi_{f1})$  ? Exprimer  $V_{f0}$  et  $V_{f1}$ .
- 5.4.4.** La fréquence de coupure du filtre est  $f_c = 0,5 \text{ Hz}$ . Justifier le choix de cette valeur et calculer la valeur de  $C_f$  permettant d'obtenir cette fréquence.
- 5.4.5.** On néglige toute tension dont l'amplitude est inférieure à  $3 \text{ mV}$ .

Vérifier que l'on peut écrire  $v_f(t) \approx V_{f_0}$ .

- 5.5.** Pour acquérir et traiter le signal  $v_f$  à l'aide d'un ordinateur il faut convertir le signal analogique obtenu à la sortie du filtre en signal numérique : on utilise alors un convertisseur analogique-numérique (CAN). On peut décomposer la conversion en deux étapes : l'échantillonnage et la numérisation. Dans la pratique, ces deux étapes se font simultanément.
- 5.5.1.** Justifier que la tension acquise  $v_f(t)$  à la sortie du filtre est un signal électrique analogique.
- 5.5.2.** La tension analogique acquise  $v_f$  est échantillonnée avec une période d'échantillonnage  $T_e$  pendant une durée d'acquisition  $T_a$ . Expliquer brièvement le principe de l'échantillonnage d'un signal analogique et donner le nombre d'échantillons prélevés par seconde. Proposer un montage pratique simple réalisant l'échantillonnage.
- 5.5.3.** Un ordinateur ne peut traiter que des signaux numériques. Définir ce qu'est un signal numérique et expliquer brièvement le principe de la numérisation. Quels sont les avantages de la numérisation ?
- 5.5.4.** Pour numériser la tension  $v_f$  on dispose d'un CAN de 8 bits et de calibre (plage de tension convertible en numérique)  $[V_{\min}, V_{\max}]$ . On appelle  $N$  le mot binaire fourni en sortie du CAN. On admettra que la tension à l'entrée du CAN a pour expression  $v_f = 0,031 + 2,438.h$ , où  $v_f$  est exprimée en volt et  $h$  en mètre. On donne :  $V_{\min} = 0 \text{ V}$  et  $V_{\max} = 2,560 \text{ V}$ .
- 5.5.4.1.** Combien de valeurs possibles peut prendre un échantillon numérisé sur 8 bits ?
- 5.5.4.2.** La résolution d'un CAN ou encore quantum est la plus petite variation de tension analogique que le CAN sera capable de repérer. On la définit par :  $q = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2^{n_b} - 1}$ ,  $n_b$  étant le nombre de bits. Quelle est la résolution  $q$  du CAN utilisé ? En déduire la plus petite variation de hauteur du liquide mesurable par celui-ci. Quelles sont les valeurs minimale et maximale que pourra prendre  $N$  ?
- 5.5.4.3.** On admet que l'incertitude globale  $\Delta h$  sur toute la chaîne de mesure est équivalente à 2,5 fois la valeur de la résolution du CAN. Calculer alors  $\Delta h$ .
- 5.5.4.4.** Calculer la valeur du mot binaire  $N$  fourni en sortie du CAN et son incertitude  $\Delta N$  pour une hauteur de liquide mesurée  $h = 50 \text{ cm}$ .