

**Travaux dirigés  
Systèmes électroniques**

TD n°1. Bases de l'électrocinétique .....	1
TD n°2. Circuits électriques I - Introduction .....	2
TD n°3. Circuits électriques II - Dipôles .....	4
TD n°4. Circuits électriques III - Calculs de circuits.....	7
TD n°5. Régime transitoire .....	9
TD n°6. Régime sinusoïdal forcé .....	12
TD n°7. Filtres du 1 <sup>er</sup> ordre .....	14
TD n°8. Systèmes électroniques.....	16

**Version du 22 juillet 2014**

Textes de TD proposés par A. Dégardin (n°1, n°2, n°3, n°5, n°7 et n°8), M. Darces (n°3), O. Dubrunfaut (n°3 et n°4), H. Roussel (n°6) et F. Vallette (n°8). Rédaction : A. Dégardin

# TD n°1. Bases de l'électrocinétique

## 1. Fil de cuivre vs. fil d'aluminium\*

À l'intérieur des réceptacles des digicode des immeubles résidentiels, les circuits électriques, qui supportent en général des courants élevés pouvant atteindre une intensité  $I_{\max} = 20 \text{ A}$ , sont câblés avec des fils de cuivre de diamètre  $D = 0,2 \text{ cm}$ .

### 1.1. Étude d'un fil de cuivre, longueur $\ell = 1 \text{ m}$ , parcouru par le courant d'intensité $I_{\max}$ .

- ✓ Calculer la densité de courant  $J$  supposée uniforme sur la section du fil.
- ✓ Sachant que le fil est soumis à un champ électrique  $E = 1 \text{ mV}\cdot\text{cm}^{-1}$ , calculer la conductivité électrique  $\sigma_{\text{Cu}}$  et la résistivité électrique  $\rho_{\text{Cu}}$  du cuivre.
- ✓ Calculer la puissance dissipée  $\mathcal{P}_{\text{Cu}}$  dans le fil.

### 1.2. Comparaison avec un fil d'aluminium diamètre $D$ , longueur $\ell = 1 \text{ m}$ , parcouru par le courant d'intensité $I_{\max}$ . La résistivité de l'aluminium vaut $\rho_{\text{Al}} = 27 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ . Soit $\mathcal{P}_{\text{Al}}$ la puissance dissipée dans ce fil d'aluminium.

- ✓ Exprimer puis calculer le rapport des puissances dissipées  $\mathcal{P}_{\text{Al}}/\mathcal{P}_{\text{Cu}}$ .
- ✓ Quelle longueur  $\ell'$  de fil d'aluminium dissipe une puissance égale à  $\mathcal{P}_{\text{Cu}}$ ? Conclure.

## 2. Stockage d'énergie\*

Une centrale thermique produit typiquement une puissance voisine de 500 MW. Imaginons qu'on utilise des batteries Li-ion rechargeables (telles que celle d'un téléphone portable) pour stocker 500 MW·h.

### 2.1. Une batterie fonctionne à tension constante $V = 3,7 \text{ V}$ et délivre $1500 \text{ mA}\cdot\text{h}$ . Quelle serait la capacité (en A·h) nécessaire pour stocker 500 MW·h ? En déduire le nombre total de batteries.

### 2.2. Estimer le volume et la masse d'une batterie de téléphone portable. Quel serait la taille du pack de batteries nécessaire pour stocker 500 MW·h. Quelles seraient l'énergie volumique (en $\text{W}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$ ) et l'énergie massique (en $\text{W}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) de ce système ?

## 3. Foudre tombant dans un champ\*\*

Sur la Figure 1.1, un promeneur et une vache sont situés à une distance radiale  $D = 60 \text{ m}$  du point où la foudre frappe le sol (courant d'intensité  $I = 100 \text{ kA}$ ). Le courant s'étale uniformément à travers le sol dans une demi-sphère centrée sur le point de frappe. Les pieds du promeneur sont espacés de  $\Delta r_p = 50 \text{ cm}$ ; les pattes avant et arrière de la vache sont espacées de  $\Delta r_v = 1,5 \text{ m}$ .

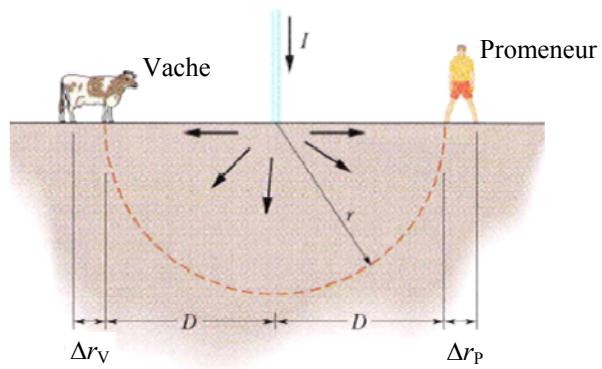


Figure 1.1. © 2008 Wiley & Sons, Inc

La résistivité du sol vaut  $\rho_{\text{sol}} = 100 \Omega\cdot\text{m}$ . La résistance du promeneur entre ses pieds et celle de la vache entre ses pattes avant et arrière sont identiques :  $R = 4 \text{ k}\Omega$ .

### 3.1. Exprimer l'amplitude du champ électrique $E$ à une distance $r$ du point d'impact en fonction de $I$ , $\rho_{\text{sol}}$ et $r$ .

### 3.2. À partir de la relation liant le potentiel électrique $V$ et le champ électrique $E$ (déterminé à la question 3.1), déterminer par intégration la différence de potentiel électrique $\Delta V$ existant entre les pieds du promeneur ou les pattes de la vache.

### 3.3. En déduire les intensités des courants $I_p$ traversant le promeneur et $I_v$ traversant la vache. Conclure.

### 3.4. Quelle est l'attitude à adopter en cas d'orage en rase campagne ?

## TD n°2. Circuits électriques I – Introduction

### 1. Bien assimiler les notions : fréquence / pulsation ; valeurs maximale / moyenne / efficace\*

**1.1.** Soit le circuit de la Figure 2.1. La résistance  $R$  est alimentée par une source de tension alternative  $u(t) = U_{\max} \sin \omega t$ , où  $U_{\max}$  est l'amplitude (ou valeur crête) de la tension  $u$  et  $\omega$  est la pulsation (ou fréquence angulaire).

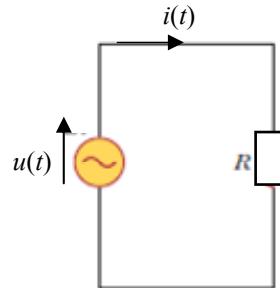


Figure 2.1.

- ✓ Si le courant  $i(t)$  dans le circuit est égal à 60% de sa valeur crête  $I_{\max}$  à  $t = 7$  ms, calculer la fréquence  $f$  de la source qui fournit ce courant  $i$ .
- ✓ Si la tension  $u(t)$  est égale à 25% de la valeur crête  $U_{\max}$  à  $t = 10$  ms, calculer la pulsation  $\omega$  de la source. Calculer la valeur suivante de  $t$  pour laquelle  $u(t)$  est de nouveau égale à 25% de  $U_{\max}$ .

**2.2.** Soit la représentation de la tension en dents de scie de la Figure 2.2.

- ✓ Que vaut sa valeur moyenne ?
- ✓ Calculer sa valeur efficace.

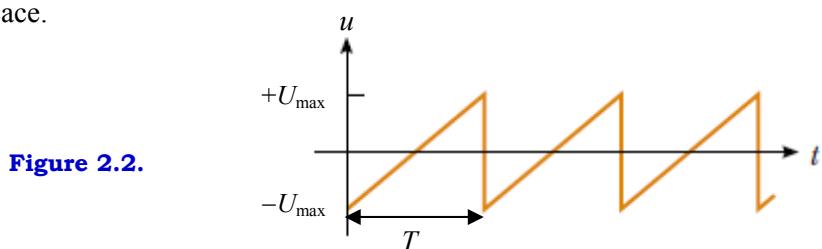


Figure 2.2.

### 2. Pertes dans les lignes à haute tension\*

Une centrale électrique délivre une puissance électrique moyenne  $P_c = 400$  MW sous une tension de valeur efficace  $U_c$ . On considère que cette puissance est transportée jusqu'à une usine, située à une distance  $\ell = 100$  km de la centrale, par une ligne bifilaire (constituée d'un câble « aller » et d'un câble « retour », Figure 2.3). Les câbles de ligne sont typiquement à base d'alliages d'aluminium.

Données : Diamètre d'un câble :  $D = 2,7$  cm.

Résistivité de l'alliage d'aluminium :  $\rho = 5,7 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ .

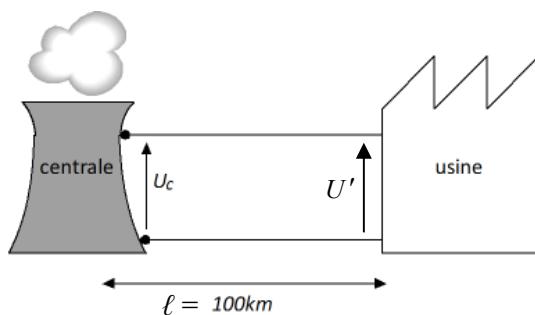


Figure 2.3.

**2.1.** Donner l'expression de la résistance  $R_c$  d'un câble de la ligne bifilaire. En déduire l'expression de la résistance totale  $R_{\text{ligne}}$  de la ligne bifilaire. Calculer sa valeur numérique.

**2.2.** La tension diminue le long de la ligne.

- ✓ Quelle en est la raison ?

On appelle alors  $U'$  la valeur efficace de la tension disponible directement à l'entrée de l'usine.

- ✓ Exprimer la chute de tension  $\Delta U = U_c - U'$  d'abord en fonction de la résistance  $R_{\text{ligne}}$  de la ligne et du courant d'intensité efficace  $I$  circulant dans la ligne, puis en fonction de  $R_{\text{ligne}}$ ,  $P_c$  et  $U_c$ . On indique que, dans le cas considéré, on peut écrire  $P_c = U_c I$ .

**2.3.** De façon générale, la compagnie de transport d'électricité s'assure que la chute de tension  $\Delta U$  est telle que :

$$\frac{\Delta U}{U_c} \leq 5\%. \quad (1)$$

Sachant que ni  $P_c$  ni  $R_{\text{ligne}}$  ne peuvent varier, la relation (1) impose une condition de valeur minimale  $U_{c\min}$  de la tension  $U_c$  à fournir. Exprimer puis calculer  $U_{c\min}$ .

**2.4.** La compagnie délivre une tension  $U_c = 400$  kV.

- ✓ Exprimer puis calculer l'intensité  $I$  du courant circulant dans la ligne.
- ✓ En déduire l'expression puis la valeur de la puissance  $P_l$  dissipée dans la ligne de résistance  $R_{\text{ligne}}$ .
- ✓ Exprimer puis calculer l'énergie  $E_l$  (en kW·h) perdue par jour pour la compagnie de transport électrique.

### 3. Lignes haute tension : aspects sécurité\*\*

L'effondrement au sol d'une ligne électrique aérienne est une source de risque de choc électrique; aussi convient-il d'éviter à tout prix ce danger. Les tensions entre lignes en zone résidentielle restent très élevées (typiquement 2 kV). Imaginons que soudain une telle ligne se casse et que le conducteur métallique touche le sol (Figure 2.4). Pourquoi ne faut-il pas toucher au câble tombé à terre ? Un individu situé entre les points A et B (donc au voisinage de ce câble) est-il en sécurité ?

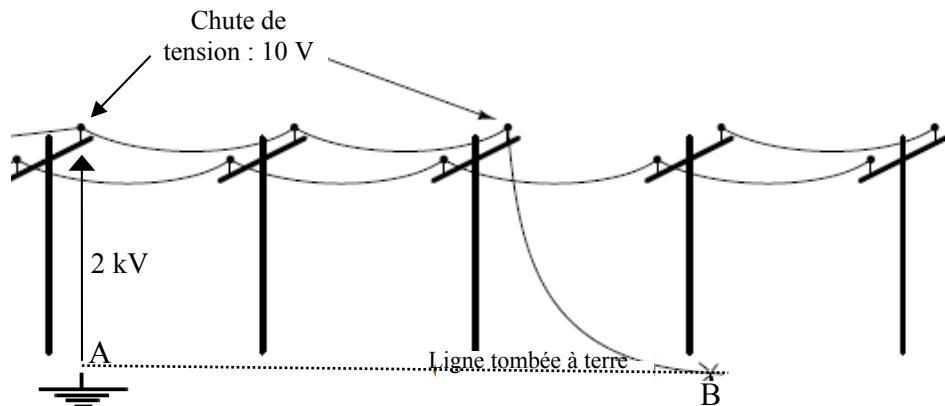


Figure 2.4.

## TD n°3. Circuits électriques II – Dipôles

**Note liminaire :** Dans un certain nombre d'ouvrages d'enseignement, on utilise spécifiquement le terme "résistor" ou encore "dipôle résistant" pour désigner le composant électrique dont la principale caractéristique est d'opposer une résistance (mesurée en ohm) à la circulation du courant électrique. Néanmoins, dans la pratique, le mot « résistance », qui désigne avant tout une propriété physique, est largement utilisé pour désigner aussi le composant. En ce qui nous concerne, nous choisissons la dénomination usuelle de « résistance » pour désigner à la fois le composant et sa caractéristique.

### 1. Jauge de niveau resistive\*

Sur la Figure 3.1 est schématisé le circuit électrique d'une jauge de niveau d'essence dans le réservoir d'une automobile. Le circuit est alimenté avec une source de tension  $E_0 = 12$  V. L'indicateur placé sur le tableau de bord a une résistance  $R_{\text{ind}} = 10 \Omega$ . La jauge est un flotteur connecté à une résistance variable  $R_c$ , qui varie linéairement avec le volume d'essence :  $R_c = 140 \Omega$  quand le réservoir est vide et  $R_c = 20 \Omega$  quand le réservoir est plein.

Calculer dans les trois cas suivants l'intensité du courant dans le circuit quand le réservoir est : vide, à moitié plein et plein.

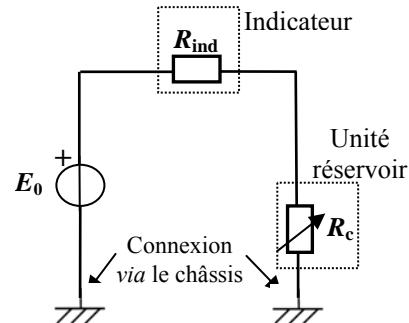


Figure 3.1.

### 2. Un voltmètre récalcitrant !\*

On considère le schéma électrique de la Figure 3.2. La source de tension a pour valeur  $E = 12$  V. Les deux résistances sont égales à  $R = 1 \text{ M}\Omega$ .

**2.1.** Exprimer les tensions  $U_{BM}$  et  $U_{AB}$  en fonction des éléments du montage puis calculer leur valeur numérique.

**2.2.** Pour relever les valeurs de tension, on utilise un voltmètre dont la résistance interne est égale à  $r = 1 \text{ M}\Omega$ . Ainsi, le schéma électrique équivalent à la mesure de la tension  $U_{BM}$ , par exemple, revient à brancher une résistance  $r$  en parallèle sur  $R$  entre B et M.

- 2.2.1.** Exprimer puis calculer la résistance  $R_{eq}$  équivalente à la mise en parallèle de  $r$  avec  $R$ .
- 2.2.2.** Donner l'expression puis la valeur numérique de la tension lue sur le voltmètre lorsqu'on le branche :
  - d'abord entre B et M : on appellera  $U_{BM\_mes}$  cette tension ;
  - puis entre A et B : on appellera  $U_{AB\_mes}$  cette tension.
- 2.2.3.** Comparer les valeurs de tension  $U_{BM}$  et  $U_{AB}$  calculées à la question 2.1 à celles mesurées  $U_{BM\_mes}$  et  $U_{AB\_mes}$  à la question 2.2.2. Quelle est la condition sur la résistance interne du voltmètre pour réaliser correctement une mesure de tension ?

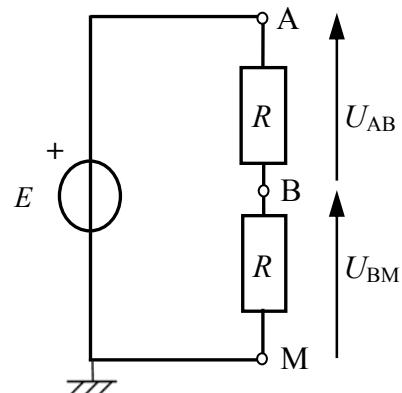


Figure 3.2.

### 3. Source réelle\*

Soit le circuit de la Figure 3.3a où  $(E_g ; R_g)$  est un générateur de tension et  $R$  une résistance variable.

- ✓ Déterminer la relation entre  $E_g$ ,  $R_g$ ,  $U$  et  $I$ .
- ✓ En faisant varier la résistance  $R$ , on relève la courbe expérimentale de la Figure 3.3b. Déduire de cette courbe les valeurs de  $E_g$  et de  $R_g$ .

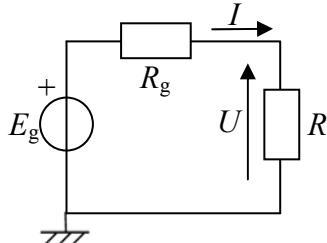


Figure 3.3a

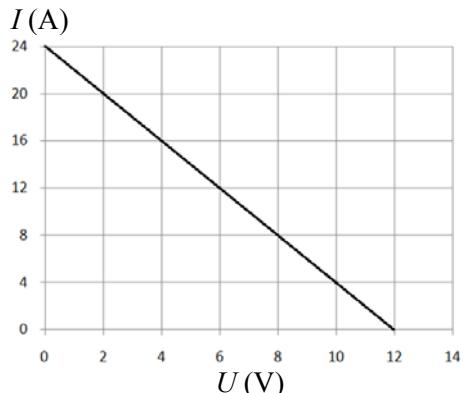


Figure 3.3b

#### 4. Calcul de résistances et de capacités équivalentes\*\*

4.1. Soit le schéma de la Figure 3.4a. Calculer, en fonction de  $R$ , la résistance équivalente  $R_{eq}$  vue entre les points A et B.

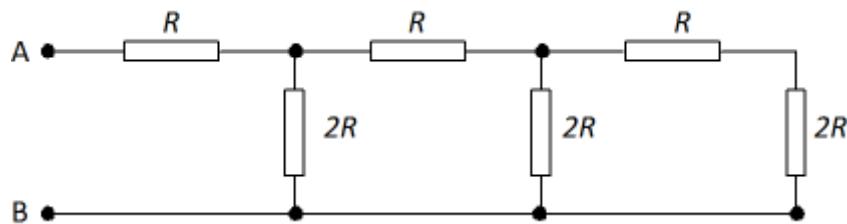


Figure 3.4a

4.2. Soit le schéma de la Figure 3.4b. Quelle est la valeur de la capacité  $C_{eq}$  du condensateur équivalent vu entre les points A et B ?

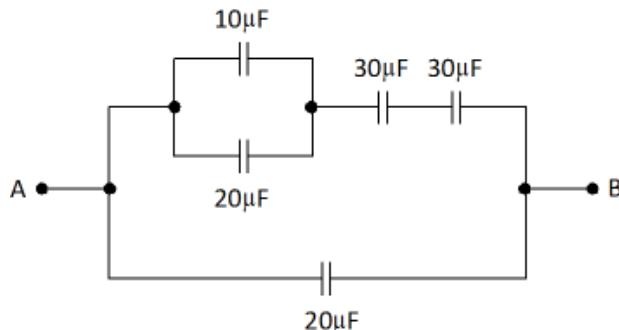


Figure 3.4b

#### 5. Caisson à oxygène pour grands brûlés\*

Un traitement des brûlures consiste à placer le patient étendu sur un plateau coulissant dans un caisson étanche rempli d'air enrichi en oxygène. Une fois la séance effectuée, le plateau est retiré du caisson. Il est arrivé (lors de la mise au point du dispositif) que le plateau prenne feu à son extrémité juste avant son retrait de la chambre. En effet, le plateau et une partie du cadre métallique de la chambre sous le plateau forment un condensateur plan de capacité  $C_i = 250 \text{ pF}$  (Figure 3.5). Si le plateau décharge son excès de charges et l'énergie associée par étincelles, ces dernières peuvent éventuellement enflammer le plateau.

Une étude a révélé que les étincelles apparaissent si la tension entre le plateau et le cadre métallique dépasse 2 kV et qu'un feu ne peut démarrer que si l'énergie potentielle du condensateur dépasse 0,2 mJ.



Figure 3.5.

**5.1.** La tension mesurée était  $U_i = 600$  V. Lorsque le plateau est retiré de la chambre, la surface en regard entre le plateau et le cadre diminue. Quelle était la tension  $U_f$  quand la surface en regard  $S_f$  était de 10% de la surface initiale  $S_i$ ? Conclure.

**5.2.** Quelle était l'énergie du condensateur réalisé quand  $S_f$  était de 10% de  $S_i$ ? Conclure.

## 6. Sécurité des installations domestiques\*\*

Un appareil domestique alimenté par une ligne AC comporte une phase à  $U = 230$  V et un neutre à 0 V. Il est doté d'une carcasse métallique reliée en général par un fil à la terre afin de protéger l'utilisateur. L'absence de terre sur un appareil signifie qu'en cas de défaut d'isolement, le courant s'écoulera à travers l'utilisateur s'il touche la carcasse de l'appareil. Seul un disjoncteur différentiel de valeur seuil 30 mA (valeur pour laquelle il y a tétanisation des muscles avec risque d'asphyxie) coupera le courant et permettra ainsi à l'utilisateur d'éviter l'électrocution.

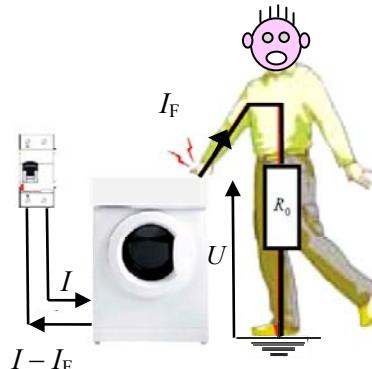


Figure 3.6. D'après banque Agro (A-0310).

**6.1.** Soit une installation monophasée présentant un défaut d'isolement (Figure 3.6). Le courant qui entre dans l'appareil est  $I$  (valeur efficace), celui qui en sort est  $I - I_F$ , où  $I_F$  (valeur efficace) est le courant de fuite, traversant l'utilisateur dont la résistance globale vaut  $R_0$ . Calculer la valeur maximale de la résistance  $R_0$  pour qu'il y ait coupure de courant. Commenter.

**6.2.** On peut modéliser le corps humain selon le schéma électrique représenté sur la Figure 3.7.

Données :  $R_1 = 460 \Omega$ ,  $R_2 = 80 \Omega$ ,  $R_3 = 125 \Omega$ ,  $R_4 = 15 \Omega$ ,  $R_5 = 840 \Omega$ .

**6.2.1.** Comment justifier la valeur élevée des résistances bras – jambe et la faible valeur de  $R_4$  ?

**6.2.2.** Déterminer l'intensité efficace du courant traversant le cœur si :

- ✓ les deux mains tiennent les deux pôles d'une prise 230 V et les chaussures sont isolantes ;
- ✓ une main tient une phase 230 V et les pieds sont nus sur le sol.

**6.2.3.** Commenter ces valeurs vis-à-vis des variations de la résistance de contact de la peau selon les conditions d'humidité.

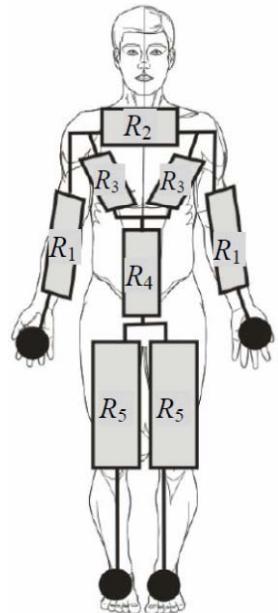


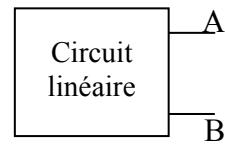
Figure 3.7. Extrait de banque Agro (A-0310).

## TD n°4. Circuits électriques III – Calcul de circuits

### 1. Générateur de Thévenin : point de vue expérimental\*

Soit la Figure 4.1 où le circuit linéaire fonctionne avec des tensions et des courants constants dans le temps. Le générateur équivalent de Thévenin ( $E_{Th}$ ,  $R_{Th}$ ) de ce circuit est déterminé expérimentalement de la façon suivante : la tension  $U_{AB}$  est mesurée avec un voltmètre supposé parfait :

- d'une part dans la configuration de la Figure 4.1 : la tension mesurée vaut alors  $U_{AB1}$  ;
- d'autre part après avoir ajouté une résistance  $R$  entre A et B : la tension mesurée vaut alors  $U_{AB2}$ .



**Figure 4.1.**

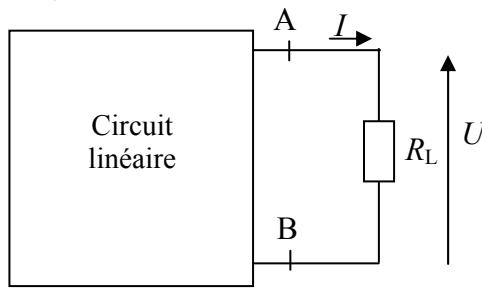
**1.1.** Exprimer  $E_{Th}$  et  $R_{Th}$  en fonction de  $U_{AB1}$ ,  $U_{AB2}$  et  $R$ .

**1.2.** Calculer  $E_{Th}$  et  $R_{Th}$  pour  $U_{AB1} = 10$  V,  $U_{AB2} = 5$  V et  $R = 4$  kΩ.

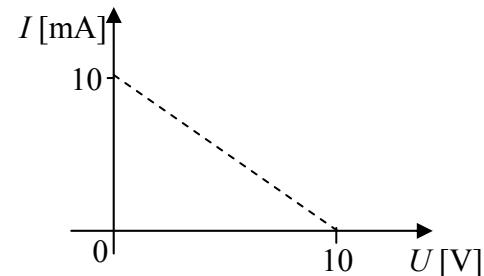
**1.3.** Que vaut  $U_{AB}$  si on place cette fois entre A et B une résistance de 1 kΩ ?

### 2. Générateur de Thévenin et caractéristique courant-tension\*

Soit le montage de la Figure 4.2a. On relève la courbe expérimentale représentée en pointillés sur la Figure 4.2b, en faisant varier la résistance de charge  $R_L$  de 0 (court-circuit) à l'infini (circuit ouvert). Le courant  $I$  est mesuré avec un ampèremètre et la tension  $U$  avec un voltmètre (considérés ici comme parfaits).



**Figure 4.2a.**



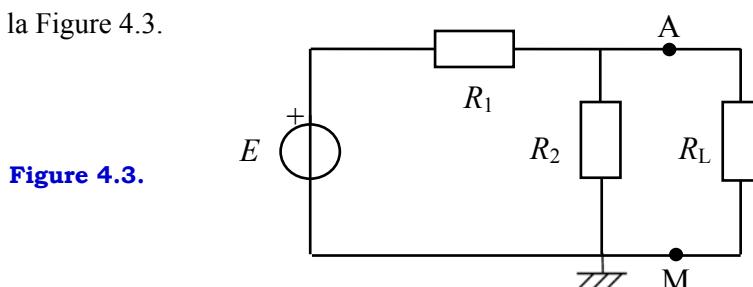
**Figure 4.2b.**

**2.1.** Déduire de la courbe de la Figure 4.2b le générateur équivalent de Thévenin du circuit linéaire de la Figure 4.2a entre A et B.

**2.2.** Calculer le courant  $I$  dans la résistance  $R_L$  dont la valeur est fixée ici à 1 kΩ. Placer ce point sur la Figure 4.2b.

### 3. Générateur de Thévenin et générateur de Norton\*\*

Soit le montage de la Figure 4.3.



**Figure 4.3.**

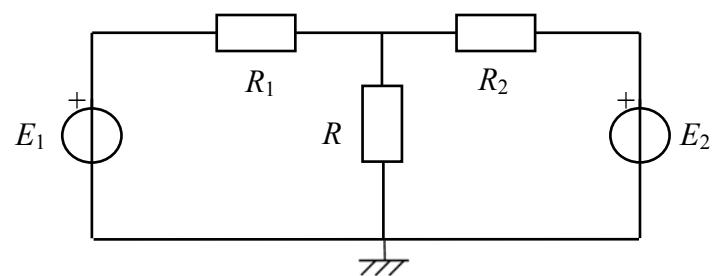
**3.1.** Déterminer le générateur équivalent de Thévenin ( $E_{Th}$  ;  $R_{Th}$ ) du circuit vu par la charge  $R_L$ . En déduire la tension  $U$  aux bornes de  $R_L$  et du courant dans  $R_L$ .

**3.2.** Déterminer le générateur équivalent de Norton ( $I_N$  ;  $R_N$ ) du circuit vu par la charge  $R_L$ . En déduire l'expression de la tension aux bornes de  $R_L$  et du courant dans  $R_L$ . Conclusion ?

## 4. Principe de superposition\*\*

Soit le montage de la Figure 4.4. Exprimer la tension aux bornes de la résistance  $R$  à l'aide du principe de superposition.

**Figure 4.4.**



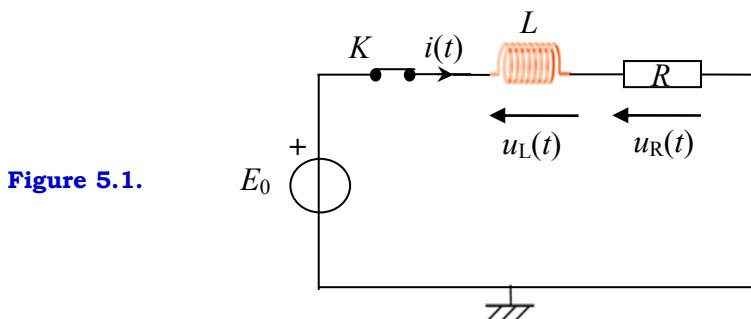
## TD n°5. Régime transitoire

### 1. Détection de métaux\*

Une méthode de détection des métaux repose sur la variation d'inductance d'une bobine placée à proximité d'un métal. Lorsqu'on approche un objet en fer, l'inductance de la bobine augmente, alors qu'elle diminue lorsqu'on approche un objet en or. Nous étudions ici le principe de cette détection.

Le montage utilisé est celui de la Figure 5.1. Un générateur de tension continue  $E_0 = 5 \text{ V}$  alimente une bobine d'inductance  $L = 13 \text{ mH}$  en série avec une résistance  $R = 10 \Omega$ .

À l'instant  $t = 0$ , on ferme l'interrupteur  $K$ . On mesure d'abord la tension  $u_R(t)$  aux bornes de la résistance  $R$ , sans métal à proximité de la bobine. La tension  $u_R(t)$  correspondante est observée sur la courbe A, Figure 5.2. Puis on mesure  $u_R(t)$  avec un objet métallique à proximité de la bobine. La tension  $u_R(t)$  correspondante est observée sur la courbe B, Figure 5.2.



- 1.1. Expliquer pourquoi l'évolution de la tension  $u_R(t)$  est similaire à l'évolution de l'intensité du courant  $i(t)$  dans le circuit.
- 1.2. À partir de la Figure 5.2, déterminer graphiquement pour la courbe A la constante de temps  $\tau_A$  du régime transitoire. Au bout de combien de temps le régime permanent est-il atteint ?
- 1.3. À partir de la Figure 5.2, déterminer graphiquement pour la courbe B la constante de temps  $\tau_B$  du régime transitoire. Au bout de combien de temps le régime permanent est-il atteint ?

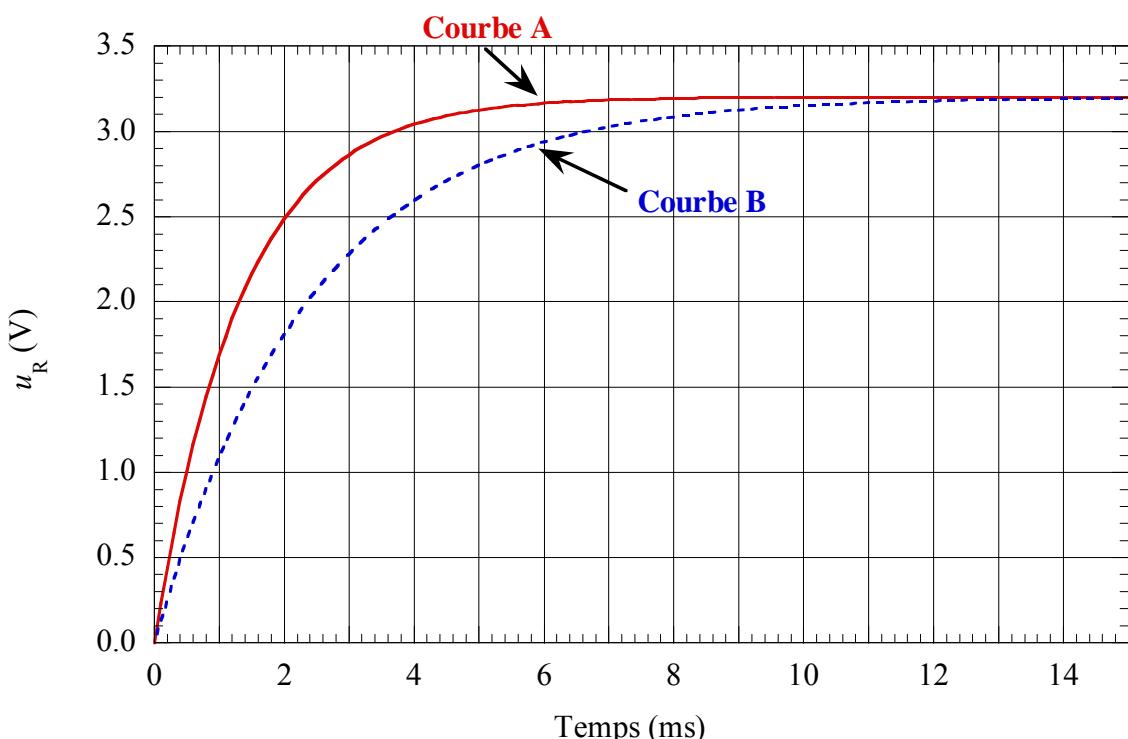


Figure 5.2.

- 1.4.** Exprimer la tension  $u_L(t)$  aux bornes de la bobine en fonction de  $i(t)$ . Que devient cette expression lorsque le régime permanent est atteint ?
- 1.5.** Il s'agit de déterminer en régime transitoire l'évolution de  $i(t)$  dans le circuit constitué de la bobine d'inductance  $L$ , de la résistance  $R$  et du générateur de tension  $E_0$ .
- Établir l'équation différentielle du 1<sup>er</sup> ordre vérifiée par  $i(t)$ .
  - Montrer que la solution  $i_1(t)$  de l'équation homogène (sans second membre) s'exprime sous la forme :  $i_1(t) = X_0 e^{-t/\tau}$ , où  $X_0$  est une constante d'intégration et  $\tau$  est la constante de temps. Exprimer  $\tau$  et préciser son unité usuelle.
  - Déterminer une solution particulière  $I_2$  de l'équation complète.
  - Exprimer la solution  $i(t)$  de l'équation complète sachant qu'en  $t = 0$ ,  $i(0) = 0$ .
- 1.6.** En utilisant l'expression de  $\tau$  et les valeurs déterminées graphiquement  $\tau_A$  et  $\tau_B$ , comparer la valeur  $L_A$  de l'inductance de la bobine en l'absence d'objet métallique à proximité, avec la valeur  $L_B$  de l'inductance de la bobine en présence d'un objet métallique à proximité immédiate. S'agit-il d'un objet en fer ou d'un objet en or ?

## 2. Défibrillateur cardiaque\*\*

Un défibrillateur est un dispositif utilisé en médecine urgentiste qui permet de restaurer le rythme normal de battement du cœur en délivrant *via* des électrodes appliquées sur la poitrine de la victime une impulsion électrique (durée  $\approx$  de 3 à 20 ms, Figure 5.3.a) d'énergie élevée réglable ( $\approx$  de 50 à 360 J) et de stopper ainsi la fibrillation ventriculaire (contractions soudainement désordonnées des fibres musculaires cardiaques, Figure 5.3.b : le cœur "tremble" et la circulation sanguine s'arrête).

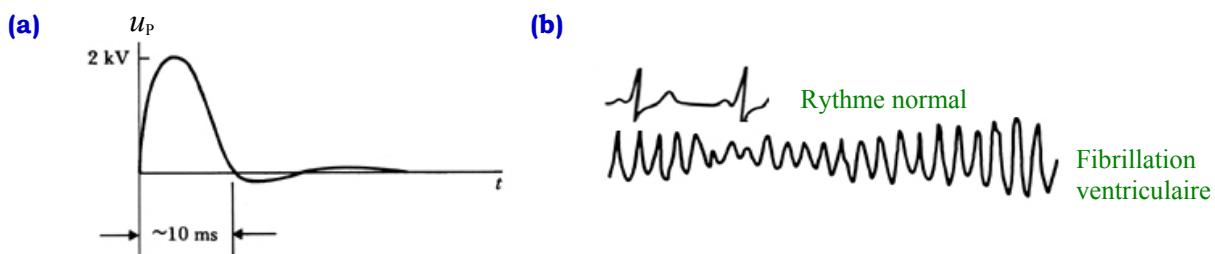


Figure 5.3. (a) Exemple d'impulsion électrique envoyée sur la poitrine d'un patient. (b) Signaux d'électrocardiogramme (ECG) pour un cœur sain et un cœur subissant une fibrillation ventriculaire.  
© D'après J.G. Webster (ed.), *Medical instrumentation: application and design*, 3<sup>rd</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.

Un schéma simplifié du défibrillateur est représenté sur la Figure 5.4. Lorsque l'interrupteur est en position (1), le condensateur  $C$  se charge à travers la résistance  $R$  (phase n°1). Dès que le condensateur est chargé, l'interrupteur passe en position (2) ; le médecin choisit le niveau d'énergie à administrer au patient, puis il envoie le choc électrique *via* les électrodes (modélisées par une résistance équivalente  $R_E$ ) placées sur la poitrine du patient, modélisée ici par une résistance  $R_p$ . Le condensateur  $C$  se décharge jusqu'à ce que le niveau d'énergie choisi ait été délivré (phase n°2).

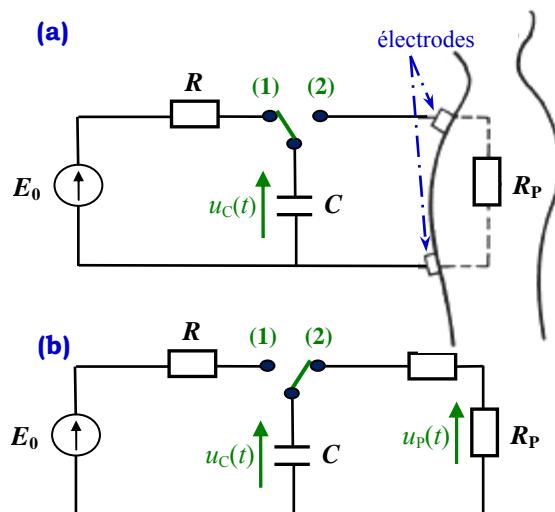


Figure 5.4.

## **2.1. Étude de la phase n°1** (Figure 5.4.a)

Données :  $E_0 = 2 \text{ kV}$ ,  $C = 320 \mu\text{F}$  et  $R = 4,7 \text{ k}\Omega$ .

- a)** Calculer la constante de temps  $\tau$  du circuit de charge.
- b)** Calculer la charge maximale  $Q_{\max}$  aux bornes du condensateur, l'intensité maximale  $I_{\max}$  du courant dans le circuit de charge et l'énergie maximale  $W_{\max}$  que peut emmagasiner le condensateur.
- c)** Rappeler la relation liant charge  $q(t)$  et intensité du courant  $i(t)$ . A partir de la loi des mailles, établir l'équation différentielle du premier ordre vérifiée par la charge  $q(t)$  du condensateur. Résoudre cette équation sachant que  $q(0) = 0$ . En déduire l'expression de la tension  $u_C(t)$  aux bornes du condensateur.
- d)** Si on considère que le condensateur est chargé lorsque  $u_C(t) = U_{C0}$ , valeur correspondant à 97% de la valeur maximale, calculer la durée de la charge du condensateur et l'énergie  $W_{C0}$  emmagasinée correspondante.

## **2.2. Étude de la phase n°2** (Figure 5.4.b)

Données :  $R_P = 95 \Omega$ . Résistance équivalente des deux électrodes :  $R_E = 5 \Omega$ .

Le médecin choisit de délivrer sur la poitrine du patient un choc électrique d'énergie  $W_P = 0,5 W_{C0}$ .

- a)** Exprimer la tension  $u_C(t)$  aux bornes du condensateur et la tension  $u_P(t)$  aux bornes de la résistance  $R_P$ .
- b)** Déterminer l'expression de l'énergie  $W_P$  délivrée dans la poitrine du patient. En déduire la durée du choc électrique envoyé.
- c)** Tracer l'évolution temporelle de la tension  $u_P(t)$ . Ressemble-t-elle à celle de la Figure 5.3.a ? Comment faudrait-il modifier le circuit de décharge pour obtenir une vraie impulsion ?

## TD n°6. Régime sinusoïdal forcé

### 1. Calculs d'impédances (modules et arguments)\*

Déterminer l'impédance complexe  $\tilde{Z}$  des montages de la Figure 6.1. En déduire le module de  $\tilde{Z}$  et la phase de la tension  $u$  par rapport au courant  $i$  ( $\varphi = \arg \tilde{Z}$ ).

### 2. Diviseur de tension avec impédances complexes\*

Pour le montage de la Figure 6.2, exprimer l'amplitude complexe  $\tilde{u}$  de la tension  $u$  en fonction de l'amplitude complexe  $\tilde{e}$  de la tension  $e$ .

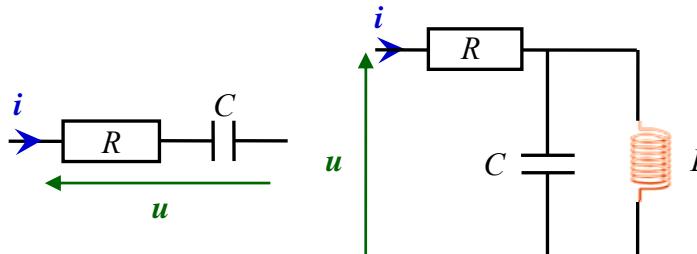


Figure 6.1.

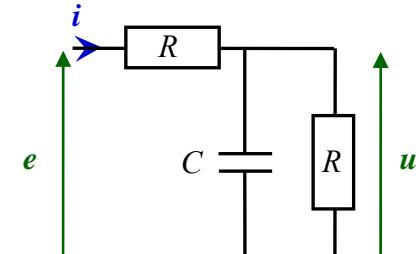


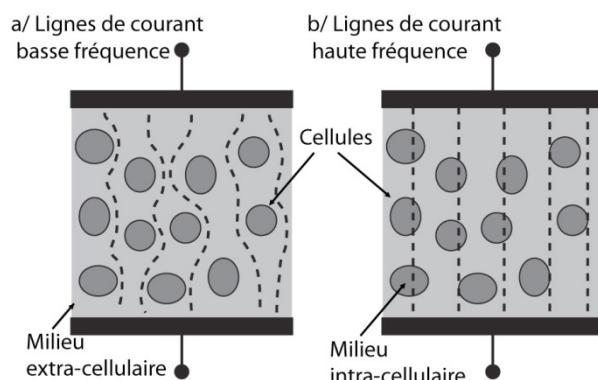
Figure 6.2.

### 3. Le modèle de Fricke pour l'étude de tissus biologiques\*

Un tissu biologique est composé d'un assemblage de cellules en suspension dans un fluide extracellulaire (composé d'eau et d'ions). À basse fréquence, le courant ne circule qu'au sein du milieu extracellulaire, comme indiqué sur la Figure 6.3a. En revanche, à haute fréquence, le courant traverse la membrane des cellules et se propage ainsi dans le milieu intracellulaire (Figure 6.3b). Il y a donc une fréquence de transition caractéristique de l'état physiologique des cellules qui dépend de la composition du milieu observé. Ainsi nous pouvons espérer par une simple mesure d'impédance retrouver le modèle électrique du tissu biologique.

**Figure 6.3.** Comportement des lignes de courant au sein d'un tissus biologique :  
**(a)** à basse fréquence  $f < 10$  kHz ;  
**(b)** à haute fréquence  $f > 500$  kHz.

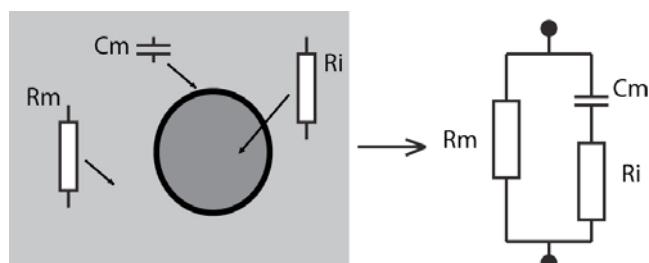
© O. Français et B. Le Pioufle, in « La mesure de la bio-impédance d'un végétal comme moyen d'introduire le domaine de la biologie dans une formation EEA », J3eA (2013).



On a observé par la mesure que le comportement électrique d'une cellule biologique (entre 1 kHz et 1 MHz) peut se représenter à l'aide du schéma électrique suivant appelé modèle de Fricke (Figure 6.4), où  $R_m = 8 \text{ k}\Omega$ ,  $R_i = 300 \Omega$  et  $C_m = 1 \text{ nF}$ .

**Figure 6.4.** Modèle de Fricke : schéma électrique équivalent d'une cellule biologique dans son milieu.

© O. Français et B. Le Pioufle, in « La mesure de la bio-impédance d'un végétal comme moyen d'introduire le domaine de la biologie dans une formation EEA », J3eA (2013).



- 3.1.** Déterminer l'expression de l'impédance équivalente d'une cellule dans le modèle de Fricke.
- 3.2.** Tracer (sur papier semi-log) l'allure du module de l'impédance dans la bande de fréquences [1 kHz – 10 MHz]. Pour cela, on considérera les fréquences successives : 1 kHz, 10 kHz, 20 kHz, 50 kHz, 100 kHz, 500 kHz, 1 MHz, 2 MHz et 10 MHz.
- 3.3.** Quel est le comportement de cette impédance à basse fréquence et à haute fréquence ? Quel lien peut-on faire avec le comportement du tissu biologique ?

## TD n°7. Filtres du 1<sup>er</sup> ordre

### 1. Détermination de la fonction de transfert d'un filtre\*

La Figure 7.1 montre l'évolution temporelle de la tension  $u_e(t)$  appliquée à l'entrée d'un filtre et de la tension  $u_s(t)$  en sortie de ce filtre.

**1.1.** À partir de la Figure 7.1 :

- a) Déterminer l'amplitude  $U_{em}$  (respectivement  $U_{sm}$ ) de la tension  $u_e(t)$  (respectivement  $u_s(t)$ ). En déduire l'amplitude crête-à-crête de  $u_e(t)$  et  $u_s(t)$ .
- b) Préciser la période  $T$ , la pulsation  $\omega$  et la fréquence  $f$  des signaux  $u_e(t)$  et  $u_s(t)$ .
- c) Déterminer le déphasage entre  $u_e(t)$  et  $u_s(t)$ .

**1.2.** À partir des questions précédentes,

- a) Déduire les expressions des tensions  $u_e(t)$  et  $u_s(t)$
- b) Déduire le gain et l'argument de la fonction de transfert du filtre  $\tilde{H}(\omega) = \tilde{u}_s / \tilde{u}_e$  ( $\tilde{u}_e$  et  $\tilde{u}_s$  étant les amplitudes complexes des tensions  $u_e$  et  $u_s$ , respectivement).

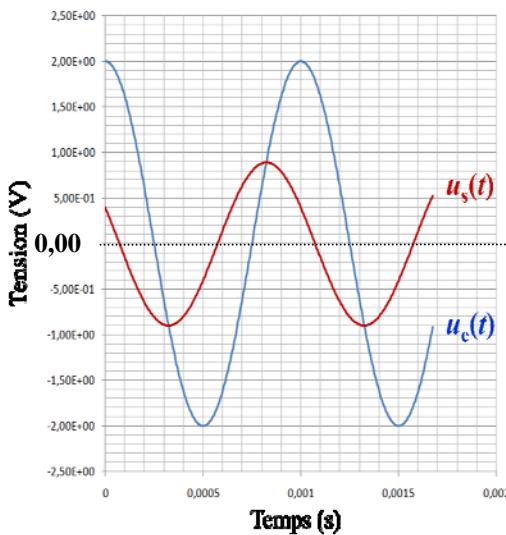


Figure 7.1.

### 2. Conception d'un filtre\*

Sur un signal sinusoïdal de fréquence  $f_S = 10$  Hz se superpose un bruit de fréquence  $f_B = 1$  kHz. Vous êtes chargé(e) de la conception d'un filtre combinant une résistance  $R$  et un condensateur de capacité  $C$ , permettant d'éliminer le bruit parasite de fréquence  $f_B$  tout en conservant le signal utile de fréquence  $f_S$ .

**2.1.** Rappeler l'expression de l'impédance complexe  $\tilde{Z}_c(\omega)$  d'un condensateur de capacité  $C$ , en fonction de la pulsation  $\omega$ . Quelle relation relie pulsation  $\omega$  et fréquence  $f$ ?

**2.2.** Quel type de filtre faut-il concevoir ? Une seule réponse possible à justifier.

- ① Passe-bas                  ② Passe-haut

**2.3.** Le schéma du filtre est donné sur la Figure 7.2. Justifier ce schéma en étudiant le comportement du condensateur lorsque  $\omega \rightarrow 0$  et  $\omega \rightarrow \infty$ .

**2.4. a)** Exprimer la fonction de transfert  $\tilde{H}(\omega) = \tilde{u}_s / \tilde{u}_e$  du filtre ( $\tilde{u}_e$  et  $\tilde{u}_s$  étant les amplitudes complexes des tensions  $u_e$  et  $u_s$ , respectivement).

**b)** Quelle est l'expression de la pulsation de coupure  $\omega_0$ ? En déduire l'expression de la fréquence de coupure  $f_0$ .

## 2.5. Étude du gain

- a) Exprimer le gain en décibel  $G_{\text{dB}}(\omega)$  en fonction de  $\omega$  et  $\omega_0$ .
- b) Étudier son comportement asymptotique lorsque  $\omega \rightarrow 0$  et  $\omega \rightarrow \infty$ . Préciser les pentes des asymptotes.
- c) Tracer le diagramme asymptotique de Bode.

## 2.6. Étude de la phase

- a) Exprimer la phase  $\varphi$  en fonction de  $\omega$  et  $\omega_0$ .
- b) Étudier son comportement asymptotique lorsque  $\omega \rightarrow 0$  et  $\omega \rightarrow \infty$ .
- c) Préciser si la tension de sortie du filtre est en avance ou en retard sur la tension d'entrée pour  $\omega \rightarrow \infty$ .

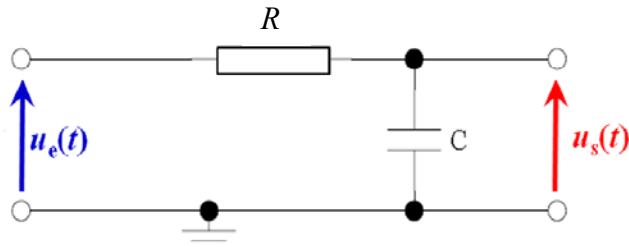
2.7. Quelle valeur de fréquence de coupure  $f_0$  convient-il de choisir ? Une seule réponse possible à justifier.

- ① 100 Hz      ② 1 kHz      ③ 2 kHz

2.8. Avec la valeur de  $f_0$  choisie, de combien en décibel le bruit est-il réduit ?

2.9. Avec la valeur de  $f_0$  choisie, de combien en décibel l'amplitude du signal utile à la fréquence  $f_s$  est-elle réduite ?

Figure 7.2.



## TD n°8. Systèmes électroniques

### 1. Linéarité de systèmes\*

On considère un dispositif électronique dont la caractéristique de transfert  $V_{\text{out}}(V_{\text{in}})$  est donnée sur la Figure 8.1. On excite ce dispositif successivement par les tensions suivantes :

$$V_{\text{in}1}(t) = 1 \times \sin(2\pi 1000t) \text{ [V]}, V_{\text{in}2}(t) = 2 - (1 \times \sin(2\pi 1000t)) \text{ [V]}, V_{\text{in}3}(t) = 4 \times \sin(2\pi 1000t) \text{ [V]}.$$

**1.1.** À quelles conditions peut-on considérer que ce système est linéaire ?

**1.2.** Tracer les sorties  $V_{\text{out}1}$ ,  $V_{\text{out}2}$  et  $V_{\text{out}3}$  en fonction du temps  $t$ .

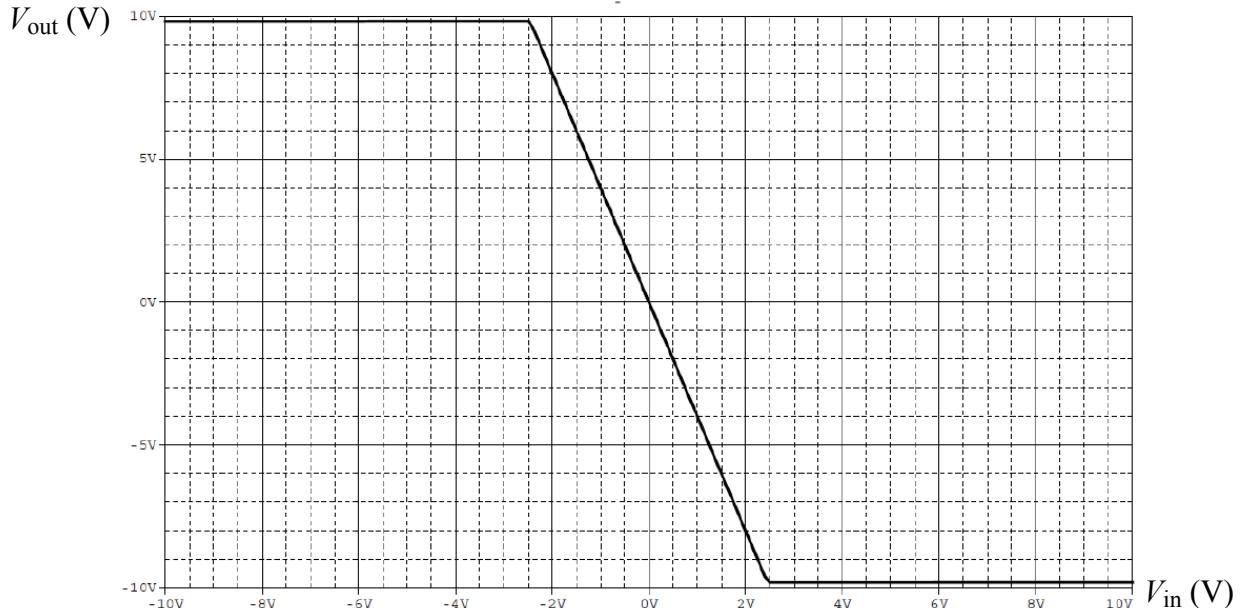


Figure 8.1.

### 2. Conception d'un amplificateur\*

Un générateur de tension de résistance interne  $r_g = 800 \Omega$  délivre un signal sinusoïdal  $e_g(t)$  de fréquence  $f = 10 \text{ Hz}$  et d'amplitude  $E_{\text{gm}} = 100 \text{ mV}$ .

Vous êtes chargé(e) de concevoir l'amplificateur de tension, permettant d'obtenir en sortie un signal sinusoïdal  $v_{\text{out}}(t)$  de même fréquence  $f = 10 \text{ Hz}$  et d'amplitude crête-à-crête  $V_{\text{out-cc}} = 20 \text{ V}$ , alimentant une charge  $R_L = 6 \text{ k}\Omega$ .

Idéalement, on souhaite que le gain de l'amplificateur chargé avec  $R_L$  soit égal au gain à vide  $A_0$  (ou encore que  $v_{\text{out}}(t) = A_0 e_g(t)$ ). L'amplificateur a une impédance d'entrée  $Z_{\text{in}}$  et une impédance de sortie  $Z_{\text{out}}$ .

Le schéma de l'ensemble du montage (générateur + amplificateur + charge) est donné sur la Figure 8.2.

**2.1.** Compléter le schéma avec les éléments donnés dans l'énoncé ( $e_g(t)$ ,  $r_g$ ,  $Z_{\text{in}}$ ,  $Z_{\text{out}}$ ,  $A_0$  et  $R_L$ ).

**2.2.** Dans le cas idéal, quelle serait la valeur du gain à vide  $A_0$ ? Une seule réponse possible à justifier.

- ① 10      ② 20      ③ 100      ④ 200

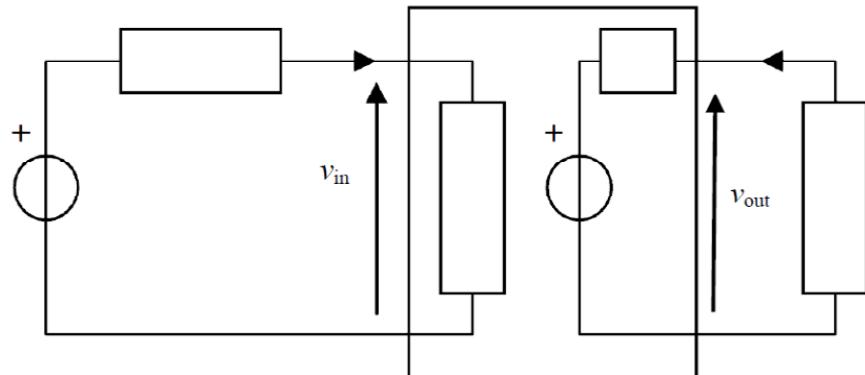
**2.3. a)** Exprimer la tension de sortie de l'amplificateur  $v_{\text{out}}$  en fonction de la tension d'entrée de l'amplificateur  $v_{\text{in}}$  et d'autres éléments du montage.

**b)** Exprimer la tension d'entrée de l'amplificateur  $v_{\text{in}}$  en fonction de  $e_g$  et d'autres éléments du montage.

**c)** Déduire des deux questions précédentes l'expression de  $v_{\text{out}}$  en fonction de  $e_g$  et d'autres éléments du montage.

**2.4.** Quel couple de valeurs ( $Z_{in}$ ,  $Z_{out}$ ) faut-il choisir pour que le gain de l'amplificateur chargé avec  $R_L$  soit le plus proche possible du gain à vide  $A_0$ ? Une seule réponse possible à justifier.

- ①  $Z_{in} = 100 \Omega$ ,  $Z_{out} = 100 \Omega$
- ②  $Z_{in} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $Z_{out} = 10 \text{ k}\Omega$
- ③  $Z_{in} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $Z_{out} = 100 \Omega$
- ④  $Z_{in} = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $Z_{out} = 100 \Omega$



**Figure 8.2.**