

## Exercices : 01 - Électricité - Électronique

### A. Régime linéaire

#### 1. Electrocinétique et symétries

Les circuits de la figure 1 sont réalisés à l'aide de générateur idéaux de fem  $E$  (de taille infiniment petite) et d'un fil résistif identique en tout endroit. Toutes les intersections représentées par un point sont des nœuds. La résistance de la portion  $OB$  est  $r$ .

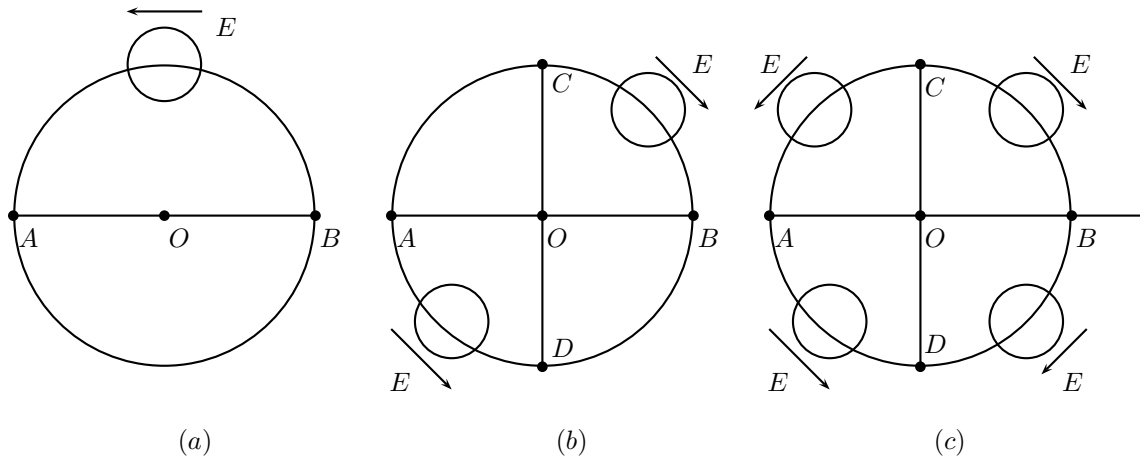


FIGURE 1 – Symétries...

1. Dans le cas de la figure 1(a), calculer l'intensité  $I_{AB}$  qui circule dans le conducteur diamétral  $AB$ .

$$a) I_{AB} = \frac{\pi}{2\pi + 3} \frac{E}{r} \quad b) I_{AB} = \frac{1}{\pi + 4} \frac{E}{r} \quad c) I_{AB} = \frac{8\pi}{3} \frac{E}{r} \quad d) I_{AB} = \frac{4}{2 + \pi} \frac{E}{r}$$

2. Dans le cas de la figure 1(b), calculer les intensités  $I_{AD}$  et  $I_{DB}$ .

$$a) I_{AD} = \frac{2}{\pi + 4} \frac{E}{r} \quad b) I_{AD} = \frac{2}{\pi + 2} \frac{E}{r} \quad c) I_{DB} = 0 \quad d) I_{DB} = \frac{\pi}{2} \frac{E}{r}$$

3. Dans le cas de la figure 1(c), calculer les intensités  $I_{AD}$  et  $I_{DO}$ .

$$a) I_{AD} = \frac{2}{\pi + 4} \frac{E}{r} \quad b) I_{AD} = \frac{2}{\pi + 2} \frac{E}{r} \quad c) I_{DO} = \frac{2}{\pi + 2} \frac{E}{r} \quad d) I_{DO} = \frac{4}{\pi + 4} \frac{E}{r}$$

#### 2. Modèles de Thévenin et de Norton

On considère le circuit de la figure 2. L'objectif est de montrer l'équivalence du modèle de THÉVENIN d'un générateur de tension avec le modèle de NORTON d'un générateur de courant. Dans les deux cas le circuit électrique doit faire passer la même intensité dans le circuit d'utilisation modélisé par une résistance  $R_u$ .

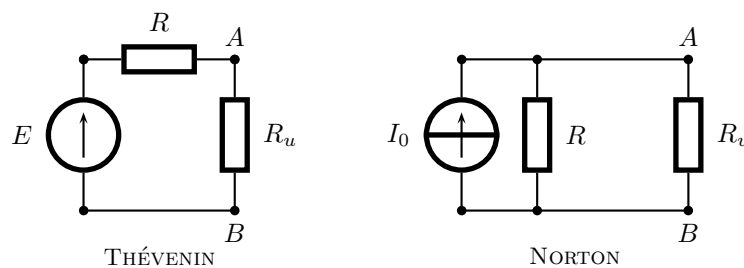


FIGURE 2 – Montage linéaire en continu

1. Dans le cas du modèle de THÉVENIN, déterminer l'expression de l'intensité traversant la résistance  $R_u$  et de la tension aux bornes de cette résistance.

- Le générateur de courant impose l'intensité  $I_0$  dans sa branche. Déterminer l'expression de  $I_0$  en fonction de  $E$  et de  $R$  pour que le courant passant dans la résistance  $R_u$  soit le même que celui déterminé à la question précédente.
- Montrer qu'il y a bien équivalence des deux montages.

**3. Mesures en courant continu**

La déformation d'une lame est mesurée par une jauge de contrainte, formée d'un fil conducteur. La résistance  $R(z, \vartheta)$  de cette jauge du déplacement vertical  $z$  de la jauge et de la température  $\vartheta$ , selon la loi générale  $R = R_0 [1 + \alpha z + \beta(\vartheta - \vartheta_0)]$ ,  $\vartheta_0$  étant une température de référence, et  $\beta(\vartheta - \vartheta_0)$  étant du même ordre de grandeur que  $\alpha z$ .

On dispose en fait deux jauges sous la lame, de sorte que pour celles-ci  $R_+$  et  $R'_+$  correspondent à  $\alpha = A > 0$  (la déformation de la lame provoque un allongement de la jauge), et deux autres jauges sur la lame, de sorte que pour celles-ci  $R_-$  et  $R'_-$  correspond à  $\alpha = -A < 0$  (la déformation de la lame provoque un raccourcissement de la jauge).  $\beta$  a la même valeur pour les quatre jauges.

- Ces jauges sont branchées comme sur le schéma de la figure 3. Elles sont disposées dans ce montage pour avoir une tension  $v$  maximale lorsque la lame est courbée. Déterminer alors  $v$  quand une résistance  $\rho_1$  est branchée entre  $A$  et  $B$ . Quels sont alors les effets de la température sur la mesure de  $z$  ?

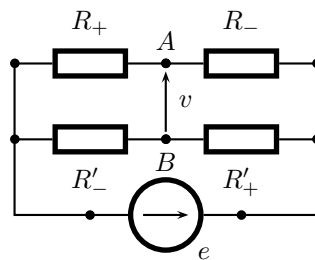


FIGURE 3 – Mesure passive de déformation

- La déformation  $z$  est en fait mesurée par un montage utilisant trois amplificateurs opérationnels idéaux (figure 4). Exprimer  $v$  puis  $v'$  et  $v''$  ; commenter.

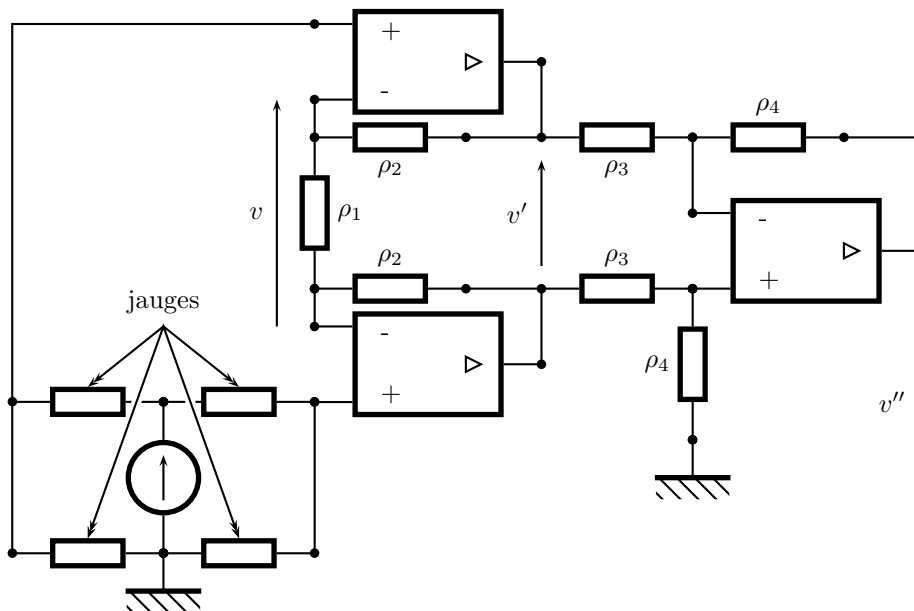


FIGURE 4 – Mesure active de déformation

#### 4. Prise de Terre

Afin de protéger une installation, on ajoute un fil de Terre (jaune et vert) relié à une tige très conductrice de forme cylindrique plantée sur une longueur  $L$  dans le sol ; le rayon de la tige est  $r_T$  et la tige se termine par une hémisphère. Voir le schéma de la figure 5.

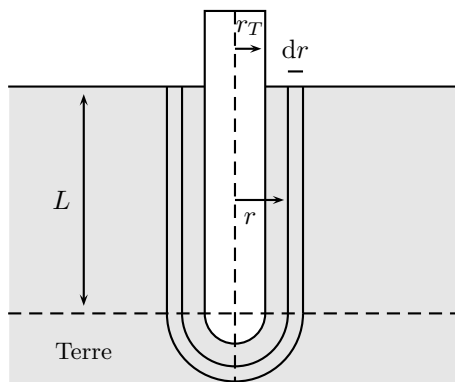


FIGURE 5 – Schéma de la prise de Terre enfoncée dans le sol

1. Rappeler l'expression de la résistance  $R_b$  d'un barreau de section  $S$ , de longueur  $\ell$  et de résistivité  $\rho$ .
2. Justifier que la résistance du sol (de la Terre) peut s'exprimer par la relation :

$$R_s = \int_{r_T}^{\infty} \frac{\rho}{S(r)} dr$$

où  $\rho$  est la résistivité du sol,  $S(r)$  est l'aire latérale d'un cylindre de longueur  $L$  et de rayon  $r$  plus l'aire de l'hémisphère de rayon  $r$ . Préciser l'expression de  $S(r)$ .

3. Déterminer l'expression littérale de la résistance  $R_s$ . Effectuer l'application numérique avec  $L = 3$  m,  $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$  et  $r_T = 1$  cm.
4. Le code de l'électricité demande que la résistance de mise à la Terre soit inférieure à  $25 \Omega$ . La solution consiste à placer plusieurs tiges en parallèle toutes reliées par un câble électrique de résistance  $R_c$ . On obtient finalement le schéma de la figure 6.

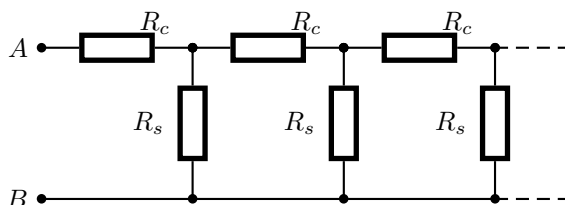


FIGURE 6 – Schéma équivalent aux diverses prises de Terre

Le câble possède un diamètre  $D = 8$  mm, une conductivité  $\sigma = 6 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  et une longueur  $d = 5$  m. Déterminer la valeur de  $R_c$  et comparer à  $R_s$ .

5. Si  $R_n$  est la résistance de  $n$  blocs ( $R_c, R_s$ ), établir une relation de récurrence entre  $R_{n+1}$  et  $R_n$ . Lorsque  $n \rightarrow \infty$ , la résistance  $AB$  tend vers une limite finie. Déterminer l'expression de cette limite en fonction de  $R_c$  et  $R_s$ . Commenter.

#### 5. Conduction électrique dans un milieu granulaire

L'objectif de cet exercice est d'étudier la conduction électrique dans un milieu granulaire (c'est-à-dire constitué de grains comme une poudre). Nous travaillerons dans ce qui suit, sur un modèle simplifié et remplacerons la poudre (milieu complexe et désordonné) par une chaîne de billes métalliques représentée à la figure 7. Le rayon des billes vaut  $r = 4$  mm.

1. Soit un dipôle de longueur  $L$  et de section  $S$  constitué d'un matériau homogène de résistivité  $\rho$  aux bornes duquel on impose une tension  $U$  engendrant un courant  $I$ . On rappelle que la résistance  $R$  est donnée par  $R = \rho L/S$ . La dépendance de  $R$  avec les paramètres du dipôle est-elle en accord avec l'intuition ? Retrouver par analyse dimensionnelle l'unité usuelle de  $\rho$ .

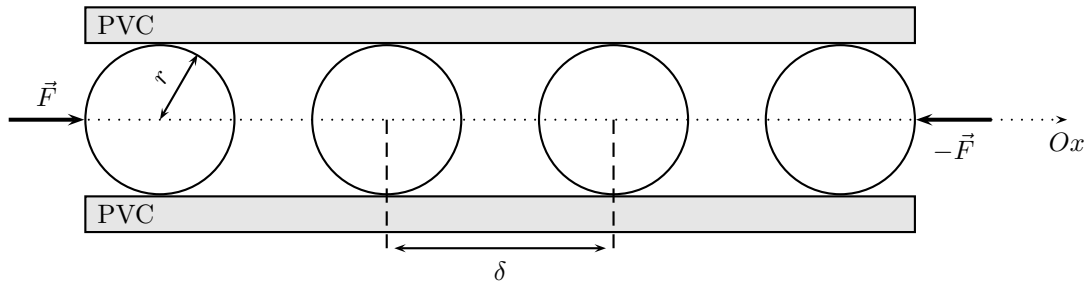


FIGURE 7 – Modèle de la chaîne de billes métalliques. Deux billes successives ont leurs centres systématiquement espacés de  $\delta$ .

On propose d'étudier la résistance de la chaîne de billes métalliques légèrement déformables présentée à la figure 7. Les billes, de rayon  $r$ , sont contraintes par un canal en PVC (matériau isolant) à se déplacer le long de l'axe  $Ox$ . Par souci de simplification, on suppose que la distance entre les centres de deux billes successives est la même et notée  $\delta$ . Cette distance peut diminuer sous l'effet de forces de module  $F$  appliquées aux première et dernière billes. On négligera les frottements solides entre les billes et le PVC. Lorsque la situation est à l'équilibre (les billes ne bougent plus) une tension  $U$  est imposée aux bornes de la chaîne et le courant  $I$  est mesuré.

2. Dans un premier temps, les billes sont disposées dans le canal sans qu'aucune force en soit appliquées et  $\delta > 2r$ . Que vaut alors la résistance de la chaîne ? Dans un second temps, les forces appliquées de part et d'autre de la chaîne sont de module  $F$  non nul, constant et suffisant pour déplacer les billes. Reproduire le schéma de la figure 7 lorsqu'un nouvel état d'équilibre est atteint. Représenter sur ce schéma le générateur imposant la tension  $U$  et les appareils permettant de mesurer  $U$  et l'intensité  $I$  parcourant la chaîne.

Lorsque les billes se déforment, on note  $d$  la distance d'enfoncement introduite schématiquement sur la figure 8 et telle que  $\delta = 2r - d$ . On se place dorénavant dans le cas où  $d > 0$ .

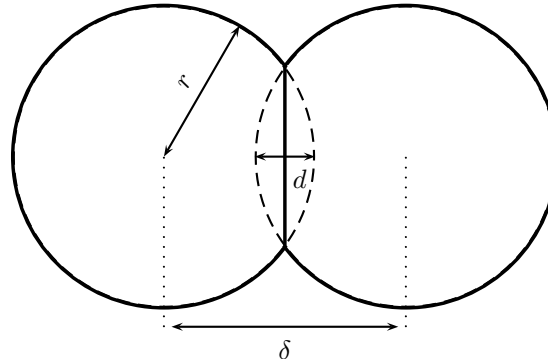


FIGURE 8 – Vue de profil du contact déformé entre les deux sphères

La description du contact entre les sphères, dit contact de HERTZ, permet de montrer la relation suivante entre les forces  $F$  appliquées de part et d'autre de la chaîne et l'enfoncement  $d$  :

$$F = \frac{E\sqrt{2r}}{3(1 - \nu^2)} d^{3/2}$$

où  $E$  et  $\nu$  sont des coefficients (respectivement module d'YOUNG et coefficient de POISSON) traduisant la capacité du matériau à se déformer.

3. La courbe en échelle logarithmique présentée à la figure 9 représente l'enfoncement total  $d_{tot}$  de la chaîne de billes équivalent à  $(N - 1)d$ ,  $N$  étant le nombre de billes. Le graphe permet-il de confirmer ou d'infirmer la relation donnant  $F$  ?
4. En vous appuyant sur la figure 8, montrer par des arguments géométriques qu'au premier ordre en  $d$ , le rayon  $a_{\text{géom}}$  de la surface de contact entre deux sphères vaut  $a_{\text{géom}} = \sqrt{rd}$ . En réalité, la déformation des deux sphères est atténuée et le rayon réel du contact vaut  $a = \sqrt{rd/2} < a_{\text{géom}}$ . En déduire la relation entre le rayon du contact entre deux sphères et la valeur des forces appliquées à chacune :

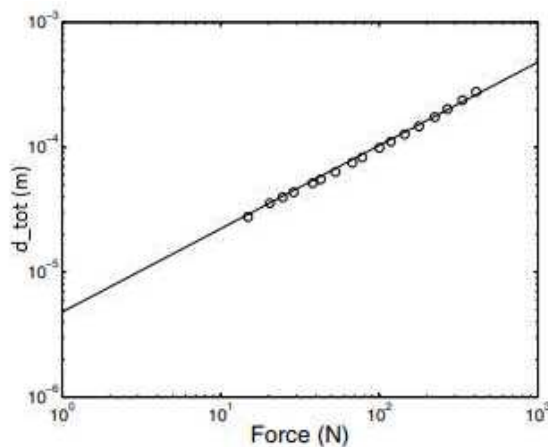


FIGURE 9 – Enfoncement  $d_{tot}$  mesuré en fonction de la valeur des forces  $F$  appliquées et ajustement à partir de  $F = 2$  N.

$$a = \left[ \frac{3(1 - \nu^2)}{4E} r F \right]^{1/3}$$

Évaluer l'ordre de grandeur de  $a$  sachant notamment que pour le métal utilisé dans l'expérience,  $E = 1,95 \times 10^{11}$  Pa et  $\nu = 0,27$ .

5. La résistance totale  $R$  de la chaîne continue de billes est principalement composée de deux résistances placées en série : la résistance électrique des billes en dehors des zones de contact et la résistance des contacts entre les billes. Dans la question 1., et en considérant uniquement les sections associées à ces deux résistances, justifier que l'une des deux est prédominante. Un argument numérique est attendu. En négligeant totalement l'autre résistance, quelle devrait-être la dépendance de  $R$  avec le module  $F$  des forces appliquées aux extrémités de la chaîne ? On ne demande pas d'explicitier les préfacteurs.

L'expérience montre que la résistance varie avec la force selon le graphe représenté à la figure 10, qui est en échelle logarithmique.

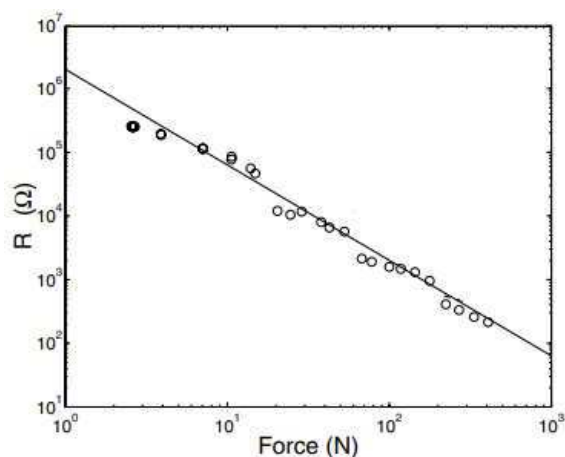


FIGURE 10 – Résistance de la chaîne de billes mesurée en fonction de la valeur des forces appliquées et ajustement.

6. Ces résultats expérimentaux sont-ils en accord avec la relation trouvée à la question précédente ? Un argument numérique est attendu.

**6. Circuit  $R - L$  et régime transitoire**

On étudie le circuit représenté à la figure 11. L'interrupteur est fermé à la date  $t = 0$ . On donne  $R = 30 \Omega$ ,  $L = 300 \text{ mH}$  et  $E = 15 \text{ V}$ . Quelle est l'allure de la tension aux bornes de la bobine ?

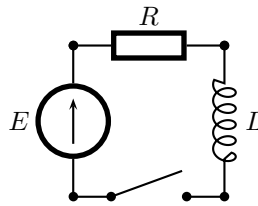


FIGURE 11 – Circuit  $R - L$  étudié

Proposition de réponses à la figure 12.

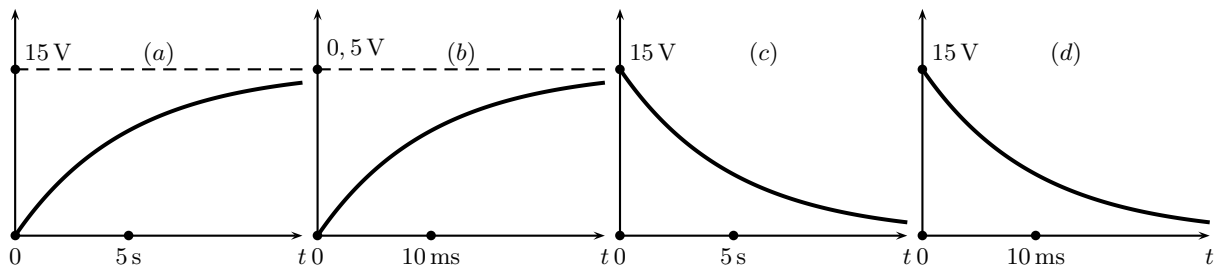


FIGURE 12 – Régime transitoire de la tension aux bornes de la bobine

**7. Régime critique**

On considère le circuit représenté sur la figure 13.

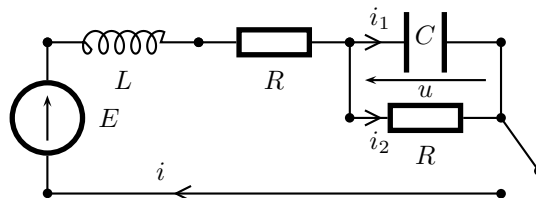


FIGURE 13 – Recherche du régime critique

L'interrupteur étant ouvert, les intensités  $i_1$  et  $i_2$  sont nulles et le condensateur est déchargé. On le ferme dans de telles conditions.

1. Déterminer, presque sans calculs et en les justifiant, les valeurs de  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i$  et  $u$  juste après la fermeture de l'interrupteur.
2. Même question lorsqu'au bout d'un temps suffisamment long, le régime permanent est établi.
3. Écrire, sans le résoudre, le système d'équations permettant d'obtenir l'équation différentielle vérifiée par la tension  $u$ .
4. Voici quatre propositions pour l'équation différentielle vérifiée par la tension  $u$  dont une seule est correcte. Toujours sans résoudre le système précédent, expliquer pourquoi trois équations sont fausses et déterminer la bonne équation.

$$\begin{aligned}
 \text{a) } \frac{d^2 u}{dt^2} - \left[ \frac{1}{RC} + \frac{R}{L} \right] \frac{du}{dt} + \frac{2u}{LC} &= \frac{E}{LC} & \text{b) } \frac{d^2 u}{dt^2} + \left[ \frac{1}{RC} + \frac{R}{L} \right] \frac{du}{dt} + \frac{2u}{LC} &= \frac{E}{LC} \\
 \text{c) } \frac{d^2 u}{dt^2} + \left[ \frac{1}{RC} + \frac{R}{L} \right] \frac{du}{dt} + \frac{u}{LC} &= \frac{E}{LC} & \text{d) } \frac{d^2 u}{dt^2} + \left[ \frac{1}{C} + \frac{R^2}{L} \right] \frac{du}{dt} + \frac{2u}{LC} &= \frac{E}{LC}
 \end{aligned}$$

5. Quelle relation doit-il exister entre  $R$ ,  $C$  et  $L$  pour que la solution de l'équation différentielle corresponde à un régime critique ?

Pour la suite, on prendra  $C = 1,0 \mu\text{F}$  et  $L = 20 \text{ mH}$ .

6. Déterminer la (les) valeur(s) de  $R$  correspondant au régime critique.
7. Déterminer, en fonction du temps, l'expression complète de la tension  $u$ .
8. Donner une estimation du temps nécessaire pour que le régime permanent soit établi dans le circuit (c'est à dire pour que la valeur de  $u$  diffère de moins de 1% de sa valeur finale).

### 8. Ouverture d'un interrupteur

On considère le circuit de la figure 14 qui comporte deux résistances  $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$  et  $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$ , un condensateur de capacité  $C = 200 \text{ nF}$ , une bobine idéale d'inductance  $L = 10 \text{ mH}$  et un générateur idéal de tension continue  $E = 12 \text{ V}$ . Un interrupteur idéal initialement fermé  $K$  relie le générateur au reste du circuit.

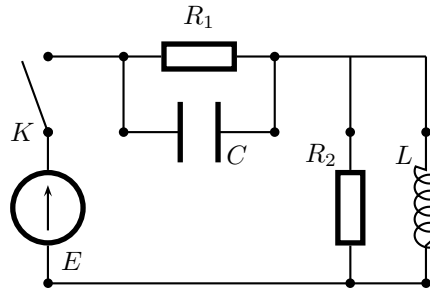


FIGURE 14 – Régime après l'ouverture de  $K$

1. En régime établi alors que l'interrupteur  $K$  est toujours fermé, déterminer la tension  $u_1$  aux bornes de la résistance  $R_1$ .
2. Toujours dans les mêmes conditions qu'à la question précédente, déterminer la puissance  $P_2$  reçue par la résistance  $R_2$ .
3. À une date qu'on note  $t = 0$ , on ouvre l'interrupteur  $K$ . Quelle est l'équation différentielle vérifiée par  $u_L$ , tension aux bornes de la bobine ?
4. Déterminer la condition initiale sur la tension  $u_L(t = 0^+)$ . Quelle est la solution de l'équation différentielle à laquelle obéit la tension  $u_L$  ?
5. Déterminer la variation d'énergie du condensateur entre  $t = 0$  et  $t \rightarrow \infty$ .

### 9. Principe du télégraphe

Le premier télégraphe a été mis au point par CHARLES WHEATSTONE en 1838, puis amélioré par SAMUEL MORSE. Le principe est d'envoyer une série d'impulsions électriques longues (appelées traits) ou courtes (appelées points) dans une ligne électrique selon un code appelé alphabet Morse. Le signal codé pour SOS est réalisé de la façon suivante :

- Le S est constitué de trois points et le O de trois traits.
- La durée d'un trait est trois fois plus grande que celle d'un point.
- L'intervalle entre chaque point ou chaque trait codant pour la même lettre a la même durée qu'un point.
- L'intervalle entre deux lettres a la même durée que trois points, c'est-à-dire qu'un trait.

Le signal SOS en alphabet Morse est représenté à la figure 15.

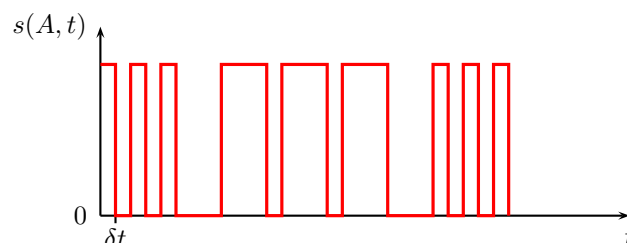


FIGURE 15 – Message SOS en code Morse produit par la source  $A$  située au début de la ligne

On note  $L$  la longueur de la ligne télégraphique entre  $A$  et  $B$  et  $\delta t$  la durée d'un point. La célérité  $c$  de l'onde dans la ligne est telle que  $L = 4c\delta t$ . Le télégraphiste situé en  $A$  envoie le SOS à partir de la date  $t = 0$ , voir la figure 15. On suppose que l'onde dans la ligne télégraphique est une onde progressive.

1. Exprimer  $\tau$  le temps de propagation de l'onde de  $A$  en  $B$  en fonction de  $\delta t$ . Représenter le signal  $s(B, t)$  en fonction du temps.

2. Représenter la forme de l'onde dans la ligne aux différents instants suivants :  $t = 4\delta t$  et  $t = 8\delta t$

### 10. TSF

La télégraphie sans fil (TSF) est apparue au début du XX<sup>ème</sup> siècle. Elle repose toujours sur le codage de l'alphabet Morse mais la transmission s'effectue par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques. Le principe consiste à émettre une série d'impulsions électromagnétiques de durées variables pour représenter les traits et les points. Un émetteur courant de la TSF est l'émetteur à ondes amorties par excitation indirecte, voir la figure 16.

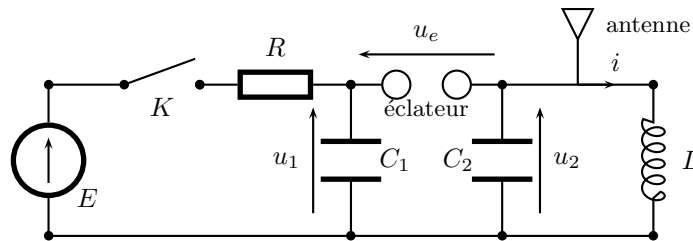


FIGURE 16 – Émetteur à ondes amorties par excitation indirecte

Lorsque le télégraphiste veut émettre un signal, il appuie sur l'interrupteur  $K$ . Tant que la tension  $u_e$  aux bornes de l'éclateur reste inférieure à une tension de claquage  $U_E$ , l'éclateur peut être assimilé à un interrupteur ouvert. Lorsque la tension  $u_e$  dépasse la tension  $U_E$  une étincelle apparaît entre les deux bornes de l'éclateur et celui-ci devient conducteur : on considérera qu'il se comporte alors comme un fil. La tension imposée par le générateur de tension continue est égale à  $E > U_E$ . La bobine d'inductance  $L$  est supposée idéale. À un instant  $t = 0$ , le télégraphiste ferme l'interrupteur  $K$ . Les condensateurs de capacité  $C_1$  et  $C_2$  sont déchargés pour  $t < 0$ . On donne  $C_1 = 1,0 \mu\text{F}$ ,  $U_E = 5,0 \text{ kV}$  et  $E = 5,5 \text{ kV}$ .

1. Que vaut la tension  $u_e$  aux bornes de l'éclateur juste après la fermeture de l'interrupteur ? Montrer que l'éclateur se comporte au départ comme un interrupteur ouvert.
2. Déterminer l'expression de la tension  $u_1(t)$  pour  $t > 0$ , tant que l'éclateur se comporte comme un interrupteur ouvert.
3. Déterminer l'expression du temps  $t_1$  à partir duquel l'éclateur se comporte comme un fil.
4. Toujours en admettant que  $K$  reste fermé, tracer l'allure de  $u_1(t)$  pour  $0 \leq t \leq t_1$ .
5. Sachant que  $t_1 = 2,50 \text{ ms}$ , calculer la valeur de la résistance  $R$ .

Lorsque l'étincelle apparaît au niveau de l'éclateur, ce dernier se comporte comme un fil. Un transfert de charges quasi-instantané s'opère alors du condensateur de capacité  $C_1$  vers le condensateur de capacité  $C_2$ , conduisant à l'apparition d'une tension  $u_2 = U_0$  aux bornes du condensateur de capacité  $C_2$ . Du fait de la brièveté de cette phase, la bobine d'inductance  $L$  pourra être assimilée à un interrupteur ouvert.

6. La charge totale se conservant, déterminer l'expression de  $U_0$  en fonction de  $U_E$ ,  $C_1$  et  $C_2$ .
7. Sachant que  $C_2 \gg C_1$ , montrer qu'on peut considérer que le condensateur de capacité  $C_1$  est quasi-intégralement déchargé à l'issue de cette phase.

À l'issue de ce transfert de charges, l'étincelle disparaît et l'éclateur se comporte à nouveau comme un interrupteur ouvert. On prend une nouvelle date origine des temps  $t' = 0$ , de telle sorte que  $u_2(t' = 0) = U_0$  et  $i(t' = 0) = 0$ .

8. Déterminer l'expression de la tension  $u_2(t)$  pour  $t' > 0$  (et avant tout nouveau court-circuit de l'éclateur, soit  $t' < t_1$ ), en négligeant la présence de l'antenne. Préciser l'expression de la période  $T_0$  des oscillations électriques.

Les oscillations électriques sont converties en une onde électromagnétique par l'antenne. Du fait de la conversion d'énergie électrique en énergie électromagnétique, l'amplitude des oscillations électriques diminue, jusqu'à être nulle. On admettra que cette décroissance se fait sur une durée inférieure à  $t_1$ , et on approximera la pseudo-période des oscillations à  $T_0$ .

9. En supposant que les pertes par effet JOULE sont négligeables, déterminer l'énergie transmise à l'antenne  $E_{an}$  en fonction de  $C_2$  et  $U_0$ .

La répétition de ce cycle conduit alors à l'émission par l'antenne d'une série d'ondes amorties, comme représenté sur la figure 17.



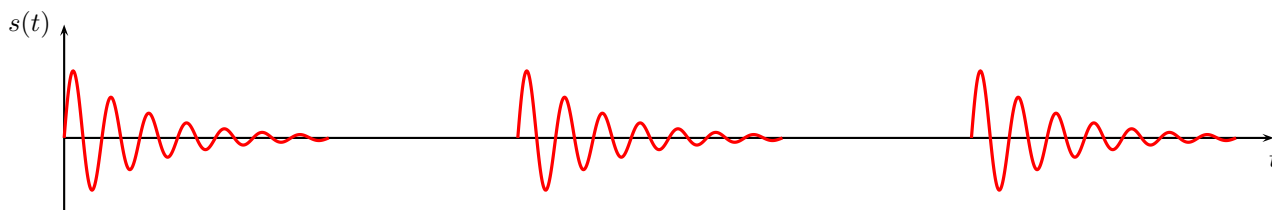


FIGURE 17 – Émission par l'antenne de train d'ondes

10. Indiquer sur la figure 17 les durées  $t_1$  et  $T_0$ . On justifiera.
11. Représenter l'allure de la tension  $u_1$  au cours du temps sur plusieurs cycles en complétant le premier graphique réalisé avant. On tiendra compte de la relation d'ordre entre les tensions  $U_0$  et  $U_E$ .
12. À chaque émetteur TSF, on alloue une fréquence d'émission, qui est égale à la fréquence des oscillations électriques du circuit  $LC_2$ . Quels paramètres du circuit peut-on régler pour émettre à la fréquence allouée ?
13. À la réception, le signal électromagnétique est capté par une antenne qui convertit le signal électromagnétique en un signal électrique proportionnel. À la suite de traitements plus ou moins complexes selon le type de récepteur, on obtient un nouveau signal que l'on convertit en signal acoustique de même fréquence. Lorsqu'un signal est reçu, le télégraphiste entend un son dont la durée lui permet de distinguer les traits et les points de l'alphabet Morse, afin de reconstituer le message. Sachant que  $t_1 = 2,50$  ms, montrer que le télégraphiste entend bien un son lors de la réception du signal.

### 11. Ligne à retard

Une « cellule à retard » est représentée sur la figure 18.

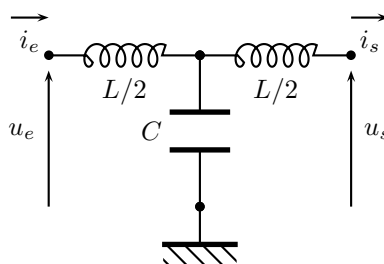


FIGURE 18 – Cellule à retard

1. On branche à l'entrée de la cellule un générateur de tension parfait sinusoïdal et on laisse la sortie ouverte : étudier qualitativement le comportement de la tension de sortie  $u_s$  à basse et haute fréquence.  
On branche à l'entrée de la cellule un générateur de courant parfait sinusoïdal et la sortie est court-circuitée : étudier qualitativement le comportement du courant de sortie  $i_s$  à basse et haute fréquence.
2. On se place dans le cas général, pour des signaux harmoniques de pulsation  $\omega$ . Exprimer les relations donnant les grandeurs de sortie  $u_s$  et  $i_s$  en fonction des grandeurs d'entrée  $u_e$  et  $i_e$ . On mettra le résultat sous la forme  $\begin{bmatrix} u_s \\ i_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_e \\ i_e \end{bmatrix}$ . Vérifier alors les résultats de la première question.
3. Exprimer, sans calculs,  $u_e$  et  $i_e$  en fonction de  $u_s$  et  $i_s$ .
4. On se place dans ce qui suit à basse fréquence : on se limitera aux termes d'ordre deux au maximum en  $\omega$ . Montrer qu'il existe une valeur particulière de  $R$  telle que, si on branche la résistance  $R$  en sortie du montage, alors le montage complet présente une impédance apparente  $R$  à l'entrée. Exprimer  $R$  en fonction de  $L$  et  $C$ . On supposera dans ce qui suit que  $R$  est branchée à la sortie du montage.
5. Montrer que le montage se comporte comme un déphaseur pour les grandeurs de sortie  $u_s$  et  $i_s$ , relativement aux grandeurs correspondantes à l'entrée. Calculer le déphasage  $\varphi(\omega)$  correspondant.
6. On impose enfin à l'entrée un signal de forme quelconque, mais dont les variations sont suffisamment lentes pour que la condition de basse fréquence reste satisfaite. Montrer que le signal de sortie est identique au signal d'entrée, à un retard  $\tau$  près, que l'on déterminera.

### 12. Atténuateur d'oscilloscope

Un atténuateur est un quadripôle dont la réponse est indépendante de la fréquence. Pour augmenter l'impédance d'entrée d'un oscilloscope, on réalise un atténuateur passif dont le principe est illustré par l'étude du circuit de la figure 19, à gauche.

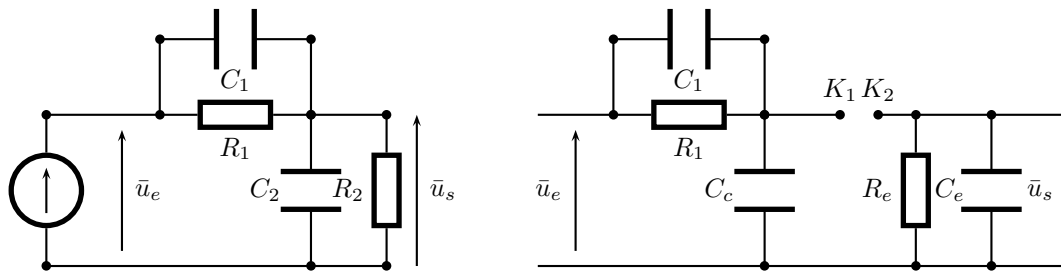


FIGURE 19 – Circuit atténuateur (à gauche). Réalisation de ce circuit avec un oscilloscope (à droite)

- Exprimer le rapport  $\bar{h}_a = \bar{u}_s/\bar{u}_e$  en fonction de  $R_1, R_2, \tau = R_1 C_1$  et  $\tau' = \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2}$ . Lequel des trois cas  $\tau > \tau', \tau = \tau'$  ou  $\tau < \tau'$  correspond-il à un atténuateur ?
- Dans le cas d'un oscilloscope (figure 19 à droite), le circuit atténuateur contient les éléments  $R_1, C_1$  reliés à l'oscilloscope par un câble de capacité  $C_c$ . Les éléments  $R_2, C_2$  sont constitués par la résistance d'entrée  $R_e$  et la capacité d'entrée  $C_e$  augmentée de la capacité du câble. L'amplificateur de l'oscilloscope a une impédance d'entrée infinie ; le signal qui lui est appliqué est  $\bar{u}_s$ . On prend  $C_c + C_e = 120 \text{ pF}$  et  $R_e = 1 \text{ M}\Omega$ .  
Enfin, les points  $K_1$  et  $K_2$  sont reliés par un condensateur de capacité  $C = 0,5 \text{ mF}$  (connexion en mode AC) ou par un simple fil (connexion en mode DC) ; quel est le rôle de ce commutateur ?  
On se placera en mode DC dans toute la suite.
- Calculer les valeurs de  $R_1, C_1$  pour obtenir un atténuateur de gain  $-20 \text{ dB}$ .
- Calculer et comparer l'impédance (résistance + capacité en parallèle) d'entrée du montage (atténuateur + câble + oscilloscope) avec celle du montage sans atténuateur (câble + oscilloscope).
- Montrer que la bande passante de l'oscilloscope muni de l'atténuateur augmente d'une décade lorsque l'impédance de sortie du circuit étudié est résistive, de résistance  $R_g$  avec  $R_g \ll R_1$ .

**13. Filtrage par un pont de Wien**

On étudie le filtre de la figure 20 constitué à partir de deux résistances  $R_1 = 90 \text{ k}\Omega$  et  $R_2$  et à partir de deux condensateurs de capacité  $C_1 = 10 \text{ nF}$  et  $C_2$ . On fournit aussi le diagramme de BODE de son amplitude toujours à la figure 20. L'abscisse fournie est  $\log f/f_0$  où  $f$  est la fréquence et  $f_0 = 10 \text{ Hz}$ . Dans cette étude, on ne se préoccupera pas de la phase mais uniquement de l'amplitude des signaux. On se contentera de raisonner sur le diagramme asymptotique de la figure 20.

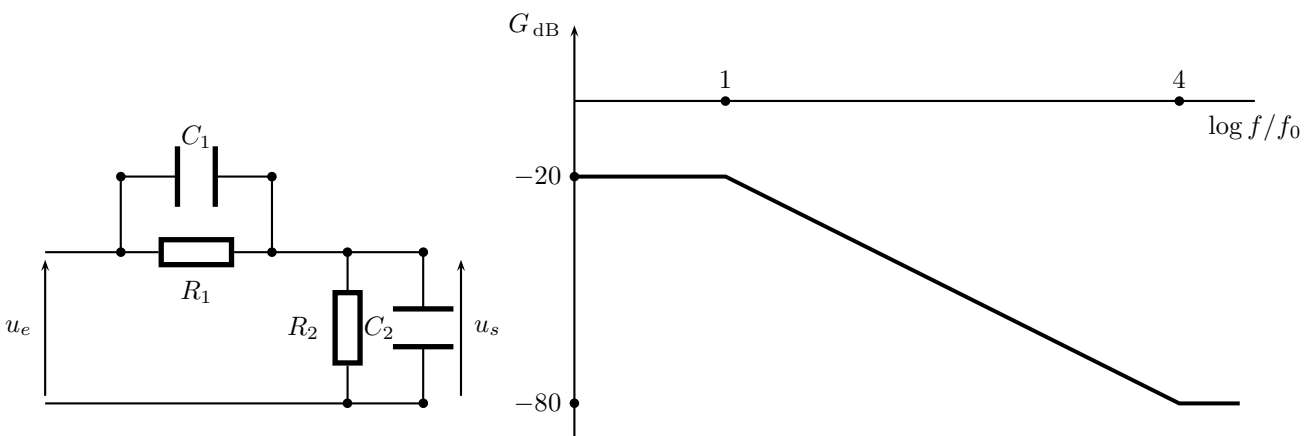


FIGURE 20 – Filtrage par un pont de WIEN

- En utilisant le comportement du filtre en basse et en haute fréquence, déterminer  $R_2$  et  $C_2$ .
- On met en entrée un signal de fréquence  $10 \text{ kHz}$  constitué de deux harmoniques d'amplitudes respectives  $6 \text{ V}$  et  $4 \text{ V}$ . Déterminer les amplitudes caractérisant le signal en sortie.
- On donne cette fois  $u_e(t) = 10 \cos(2\pi f_1 t) + 10 \cos(2\pi f_2 t)$  avec  $f_1 = 10 \text{ Hz}$  et  $f_2 = 100 \text{ kHz}$ . Déterminer les amplitudes caractérisant le signal en sortie.

**14. Caractère dérivateur d'un filtre et résonance**

On étudie le filtre de la figure 21.

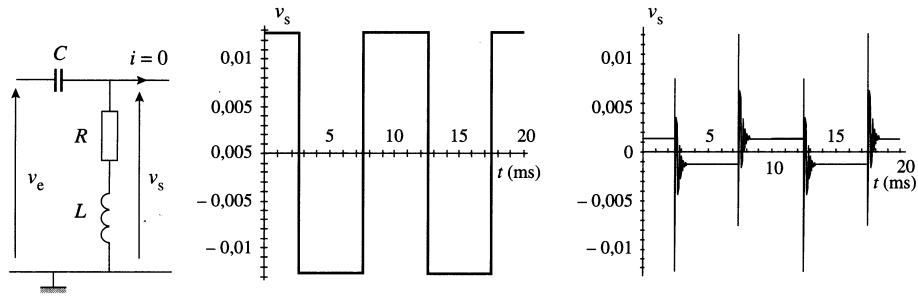


FIGURE 21 – Filtre en sortie ouverte

- Déterminer sous forme canonique (faisant intervenir le facteur de qualité  $Q$  et la fréquence réduite  $x$ ) la fonction de transfert réalisée à l'aide du circuit représenté. De quel type est ce filtre ?
- Dans quel domaine de fréquences ce filtre est-il dérivateur pour un signal sinusoïdal ?
- En utilisant, par exemple un logiciel de tracé, représenter  $G_{dB}$  en fonction de  $\log x$  pour les facteurs de qualité  $Q = 0,5$  et  $Q = 5$ .
- Interpréter les courbes obtenues pour un signal d'entrée triangulaire de fréquence 100 Hz et d'amplitude 1 V pour  $L = 10$  mH,  $C = 22$  nF,  $R = 140 \Omega$  (figure  $v_s(t)$  gauche) ou  $R = 14 \Omega$  (figure  $v_s(t)$  droite).

**15. Comparaison de l'efficacité de deux filtres**

On considère le montage de la figure 22 dans lequel l'amplificateur opérationnel est idéal et fonctionne en régime linéaire. La tension d'entrée  $e(t)$  est sinusoïdale de pulsation  $\omega$  variable.

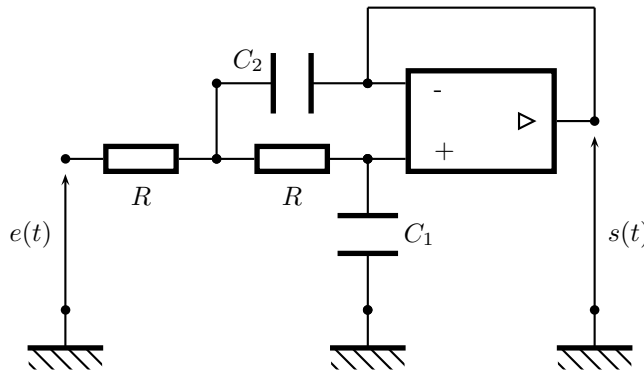


FIGURE 22 – Filtre

- Déterminer sans calcul la nature du filtre.
- Déterminer le nombre minimal d'équations nécessaires pour exprimer  $s$  et fonction de  $e$  des impédances ou admittances des éléments du circuit et pouvoir calculer  $\underline{T} = s/e$ . Écrire ces équations.
- Pourquoi peut-on éliminer les expressions suivantes de  $\underline{T}$  :

$$\underline{T} = \frac{jRC_1\omega}{1 - R^2C_1C_2\omega^2 + j2RC_1\omega} \qquad \underline{T} = \frac{1}{1 - R^2C_1C_2\omega^2 + j2C_1\omega}$$

$$\underline{T} = \frac{1}{RC_1\omega(RC_2\omega + j2)} \qquad \underline{T} = \frac{1}{1 - R^2C_1C_2\omega^2 + j2RC_2\omega}$$

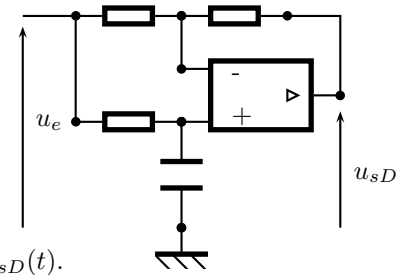
- On a  $C_2 = 2C_1$ . Montrer que  $|\underline{T}|^2 = 1/(1+x^4)$  avec  $x = \omega/\omega_0$  et  $\omega_0 = 1/(\sqrt{2}RC_1)$ . Tracer le diagramme de Bode pour  $|\underline{T}|^2$ . Superposer le diagramme de  $|\underline{T}_1|^2 = 1/(1+x^2)$ . Quel est l'avantage de  $|\underline{T}|$  par rapport à  $|\underline{T}_1|$  ?

**16. Démodulation de fréquence**

Pour réaliser un démodulateur de fréquence, on utilise le circuit de la figure ci-contre. La tension  $u_e$  est sinusoïdale.

Les trois résistances ont même valeur  $R_D$ , la capacité a pour valeur  $C_D$  et la pulsation  $\omega$  du signal  $u_e$  est voisine de  $\omega_0$ , avec  $\omega_0 R_D C_D = 1$ .

On posera  $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ ; on notera  $\varphi(\omega)$  la phase de  $u_{sD}$  relativement à  $u_e$ .



1. Déterminer la fonction de transfert du réseau.
2. Donner une expression approchée de la phase  $\varphi(\Delta\omega)$ .
3. Proposer un montage permettant d'obtenir la tension  $u(t) = u_e(t) - u_{sD}(t)$ .
4. Montrer que l'application d'un montage « détecteur de crête » (c'est-à-dire fournissant la valeur instantanée de l'amplitude d'un signal rapidement variable) à la tension  $u(t)$  réalise une mesure de  $\Delta\omega$ .

**17. Oscillateur**

Le réseau de la figure 23 ne débite pas de courant.

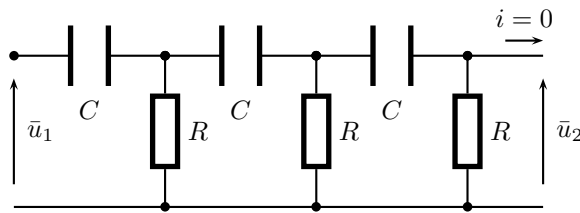


FIGURE 23 – Circuit à trois cellules  $R, C$

1. Déterminer la fonction de transfert  $\bar{H} = \frac{\bar{u}_2}{\bar{u}_1}$ ; donner l'allure du diagramme de Bode asymptotique correspondant (en gain et en phase).
2. La résolution numérique de l'équation  $1 + 5x + 6x^2 + x^3 = 0$  fournit les trois solutions  $x_1 = -5,049$ ,  $x_2 = -0,643$  et  $x_3 = -0,308$ . On impose à l'entrée du dispositif un échelon de tension ( $u_1(t)$  est nul pour  $t \leq 0$ , et constant égal à  $E_0 > 0$  pour  $t > 0$ ). Déterminer la forme de  $u_2(t)$ .
3. Comment réaliser un montage électronique qui :
  - présente pour tension d'entrée  $\bar{u}_e = \bar{u}_2$ ;
  - présente pour tension de sortie  $\bar{u}_s = \bar{u}_1$ ;
  - assure l'absence de courant en sortie du montage de la figure 23;
  - présente un gain en tension  $k < 0$ , indépendant de  $\omega$ .
4. Montrer que le système ainsi bouclé peut réaliser un oscillateur sinusoïdal spontané pour  $k = k_0 = -29$ . Quelle est la fréquence d'oscillation ?

**18. Filtre et oscillateur**

On considère le montage de la figure 24 où l'amplificateur opérationnel utilisé est idéal et fonctionne en régime linéaire.

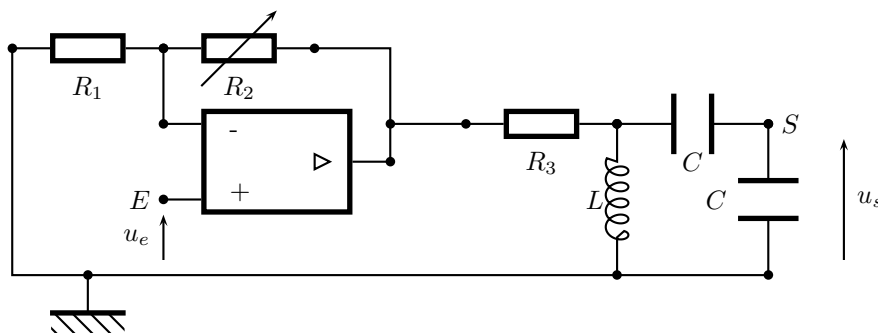


FIGURE 24 – Filtre et oscillateur

1. Établir la fonction de transfert  $H(j\omega) = u_s/u_e$ . En déduire qualitativement la nature du filtre.
2. On relie par un fil les points  $E$  et  $S$ . Établir l'équation différentielle vérifiée par  $u_s$ .

3. Que peut-on prévoir ? Dans quelles conditions ?

### 19. Caractérisation d'une impédance

On cherche à déterminer une impédance inconnue  $\underline{Z} = A(\omega) + jB(\omega)$ . Le circuit de la figure 25 est alimenté par le signal  $e(t) = E_0 \cos \omega t$ . L'amplificateur opérationnel utilisé est supposé idéal et fonctionne de manière linéaire. Dans ces conditions, les courants des entrées inverseuse  $-$  et non inverseuse  $+$  sont nuls, et les potentiels de ces entrées sont égaux. Le courant de sortie inconnu est non nul.

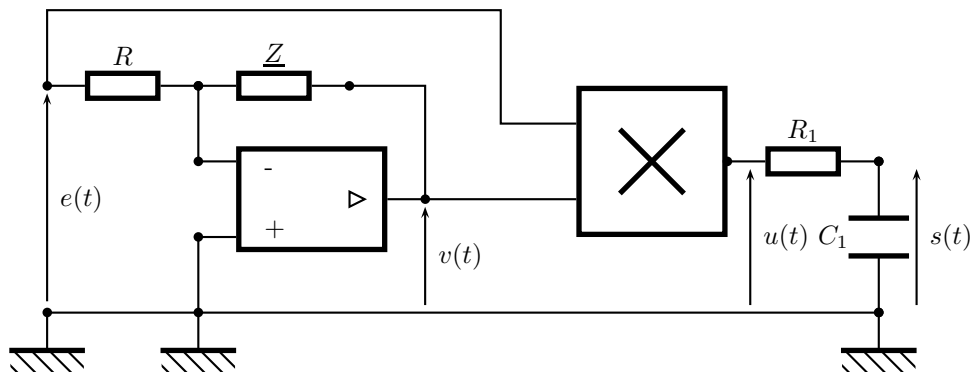


FIGURE 25 – Montage permettant la caractérisation de la partie réelle de  $\underline{Z}$

- Déterminer l'expression réelle de la tension  $v(t)$ .
- Le multiplieur reçoit deux tension  $e_1(t)$  et  $e_2(t)$  et renvoie une tension  $m(t) = ke_1(t)e_2(t)$ . Déterminer l'expression de la tension  $u(t)$ , les calculs seront conduits en réels.
- Déterminer une condition sur  $R_1$  et  $C_1$  pour déterminer  $A(\omega)$  grâce au signal de sortie  $s(t)$ . On donnera l'expression de  $s(t)$  dans ces conditions.
- Que peut-on envisager de faire pour déterminer  $B(\omega)$  ?

## B. Puissance

### 20. Conducteur ohmique

On considère un bloc parallélépipédique d'argent, de section  $a \times b$ , de conductivité  $\gamma$ . Il est parcouru par un courant d'intensité continu  $I = 5,0 \text{ mA}$ . On a  $a = 2,0 \text{ mm}$  et  $b = 1,0 \text{ cm}$ . On fournit les valeurs numériques suivantes :

Masse molaire de l'argent	$M_{\text{Ag}} = 108 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$
Masse volumique de l'argent	$\mu_{\text{Ag}} = 9,3 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Conductivité électrique de l'argent	$\gamma = 6,3 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$
Charge élémentaire	$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Masse de l'électron	$m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Constante d'AVOGADRO	$\mathcal{N}_A = 6,01 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

- Déterminer la densité volumique de courant  $\vec{j}$ .
- Déterminer la densité volumique de charges libres  $\rho_l$  en sachant qu'il y a un électron libre par atome d'argent.
- Déterminer la vitesse moyenne  $v_l$  des charges libres.
- Déterminer le champ électrique  $\vec{E}$  responsable du passage du courant.
- Déterminer la densité volumique de puissance JOULE dissipée dans le conducteur.

### 21. Adaptation d'impédance

Un générateur d'impédance interne  $\underline{Z}_g = R_g + jX_g$ , délivrant une fem sinusoïdale  $e(t) = E_0 \sqrt{2} \cos \omega t$  est connecté aux bornes d'une charge d'impédance  $\underline{Z}_u = R_u + jX_u$ . L'admittance  $\underline{Y}_u$  correspondant à l'impédance  $\underline{Z}_u$  est notée  $\underline{Y}_u = G_u + jH_u$ .

- Calculer l'intensité efficace  $I$  qui circule dans le circuit.

2. Calculer la puissance moyenne  $P_u$  absorbée sur une période par l'impédance de charge  $Z_u$ .
3. Exprimer la puissance moyenne  $P_u$  en fonction de  $R_u$  et  $I$ .
4. Déterminer les relations qui existent entre  $R_u$ ,  $X_u$ ,  $R_g$  et  $X_g$  pour que  $P_u$  soit maximale. On dit alors qu'il y a *adaptation d'impédance*.

**22. Lignes Haute Tension**

On cherche à quantifier les pertes JOULE occasionnées lors du transport d'une puissance électrique  $P = 100$  MW, fournie par le poste de distribution, sur une distance  $\ell = 100$  km de ligne électrique, que l'on considérera comme purement résistive. Cela permettra d'illustrer l'intérêt du transport électrique à haute tension.

1. Déterminer les courants de ligne  $I_1$  et  $I_2$  pour des tensions respectives  $U_1 = 400$  kV et  $U_2 = 100$  kV.
2. La densité de courant dans les câbles de transport est toujours  $j = 0,7$  A · mm<sup>-2</sup>. Déterminer la section  $S_1$  nécessaire pour une transport en 400 kV, ainsi que celle  $S_2$  pour un transport à 100 kV.
3. Le matériau utilisé pour les câbles de transport est un alliage d'aluminium, préféré au cuivre pour sa légèreté et son moindre coût. La résistivité de ce matériau est  $\rho = 26 \times 10^{-3}$  Ω · mm<sup>2</sup> · m<sup>-1</sup>. Déterminer alors la résistance électrique de chaque ligne de transport que l'on notera  $R_1$  et  $R_2$ .
4. Pour les deux tensions envisagées, déterminer les pertes JOULE en ligne notées respectivement  $P_{J1}$  et  $P_{J2}$ .
5. Calculer le rendement  $\eta$  du transport de l'électricité défini comme le rapport entre la puissance utile disponible après transport et celle fournie en entrée de ligne.

**23. Alimentation d'un moteur**

On considère un générateur de tension sinusoïdale de valeur efficace  $E_0 = 12$  V et de résistance interne  $R_g = 50$  Ω. Ce générateur fonctionne à la fréquence  $f = 50$  Hz. Il alimente un petit moteur électrique dont le modèle est constitué d'une résistance interne  $r = 10$  Ω en série avec une bobine idéale de coefficient d'autoinductance  $L$  tel que  $L\omega = L2\pi f = 30$  Ω.

1. Représenter le circuit électrique correspondant au montage décrit.
2. Déterminer littéralement et numériquement l'impédance  $Z_m$  du moteur. En déduire le déphasage entre le courant traversant le moteur et la tension à ses bornes.
3. Déterminer la puissance moyenne consommée par le moteur.
4. Déterminer la puissance moyenne délivrée par la source idéale de tension. En déduire le rendement du transfert de puissance entre le générateur idéal de tension et le moteur.

**24. Étude d'un séchoir électrique**

Un séchoir électrique est modélisé par la mise en parallèle d'une résistance chauffante  $R$ , réglable et d'un moteur de soufflerie, modélisé par une bobine d'inductance propre  $L$  et de résistance  $r$  invariables.

L'appareil présente quatre états possibles de fonctionnement, soufflerie à froid (F) si  $R$  n'est pas branchée ou bien, selon la valeur de la résistance branchée, chauffage modéré (I), moyen (II) ou fort (III).

L'ensemble est alimenté en courant industriel alternatif (220 V, 50 Hz). On branche à l'entrée de l'appareil un dispositif permettant de mesurer le déphasage  $\varphi$  entre la tension d'alimentation et le courant qui traverse l'ensemble.

La puissance totale consommée par l'appareil est indiquée par le constructeur ; elle figure dans le tableau ci-dessous, en même temps que le déphasage mesuré.  $\eta$  mesure le rapport des puissances utilisées au chauffage et à la propulsion de l'air.

Mode	F	I	II	III
Puissance	476 W	1 000 W	2 000 W	3 000 W
$ \varphi $			0,81 rad	0,61 rad
$\eta$	0			

1. Déterminer l'admittance complexe  $Y$  du moteur de la soufflerie. En déduire  $r$  et  $L$ .
2. Compléter le tableau ci-dessus.
3. Commenter les valeurs numériques de  $\cos \varphi$ . Pourquoi faudrait-il augmenter cette valeur ? Comment réaliser cette augmentation sans consommer plus de puissance ?

### C. Régime non linéaire

#### 25. Détecteur de crête

On considère le montage de la figure 26 composé d'une diode supposée idéale et d'un condensateur parfait de capacité  $C = 1 \mu\text{F}$ .

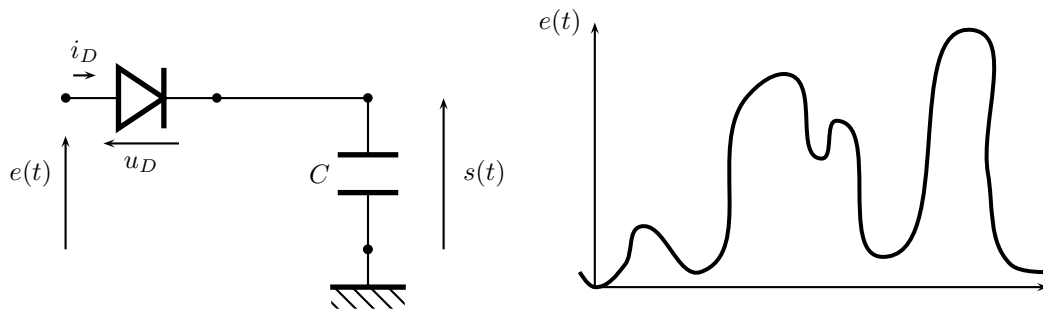


FIGURE 26 – Détecteur de crête

1. À la date  $t = 0$ , le condensateur est déchargé, il reçoit alors le signal  $e(t)$  représenté sur la figure 26. Représenter le signal  $s(t)$  que l'on obtient en sortie du montage. On apporte une petite modification au circuit de la figure 26. On obtient alors celui de la figure 27.

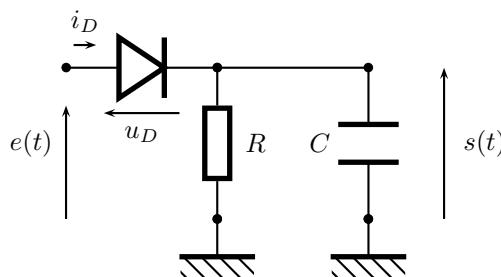


FIGURE 27 – Détecteur de crête pratique

2. Comment est modifié le comportement du circuit ? Discuter en fonction de la valeur de  $R$ .
3. Le signal  $e(t)$  est maintenant une tension sinusoïdale de fréquence 500 Hz dont on souhaite mesurer la tension efficace. Représenter ce que l'on peut obtenir pour  $s(t)$ . Quelle valeur de  $R$  faut-il prendre afin que le circuit de la figure 27 se comporte comme un détecteur de crête ? Quel montage électrique simple proposeriez-vous afin de mesurer à la sortie de celui-ci directement la tension efficace ?

#### 26. Accumulateur

Un accumulateur est modélisé par un condensateur de capacité  $C = 10^{-5} \text{ F}$ , placé en parallèle avec sa résistance de fuite  $R$ . On désire le maintenir chargé grâce à une alimentation utilisant une tension périodique et une diode idéale  $D$ , voir la figure 28. Il faut pour cela rendre minimum le *taux d'ondulation* défini par :

$$\tau = \frac{u_{s,max} - u_{s,min}}{u_{s,max} + u_{s,min}}$$

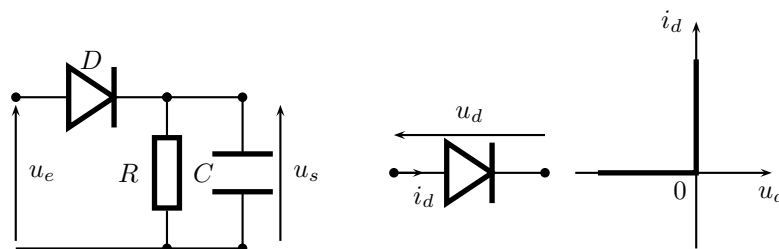


FIGURE 28 – Le modèle de l'accumulateur et le modèle de la diode idéale

La tension d'alimentation est sinusoïdale de fréquence  $f = 50 \text{ Hz}$ . Une diode idéale est un dipôle dont la caractéristique est donnée sur la figure 28.

1. Comment varie la tension  $u_d$ ? On distinguera les deux phases de fonctionnement selon que la diode soit passante ou non, en remplaçant la diode soit par un interrupteur fermé, soit par un interrupteur ouvert.
2. À l'aide du script *Pythou 2015-008-Redressement* fourni, visualiser la tension aux bornes de l'accumulateur. Comment doit être la résistance de fuite pour avoir un taux d'ondulation inférieur à 5%?

La tension d'alimentation est maintenant un créneau symétrique de période  $T = 1/f$  défini par :

$$u_e(t) = +u_0 \text{ si } 0 \leq t < T/2 \text{ et } u_e(t) = -u_0 \text{ si } T/2 \leq t < T$$

3. Étudier les deux phases de fonctionnement, en déduire une expression du taux d'ondulation. Est-il préférable d'utiliser cette alimentation ou la précédente?

On utilise désormais un pont contenant quatre diodes idéales, avec une tension d'entrée sinusoïdale, voir le schéma de la figure 29.

4. Quelle est la tension appliquée aux bornes de l'accumulateur?
5. Reprendre la question 2. Le pont de diodes est-il plus avantageux?
6. Comment sont modifiés ces résultats si on tient compte de la résistance interne de la diode, placée en série?
7. Expliquer comment il est aussi possible de diminuer le taux d'ondulation d'un signal grâce à un filtre.

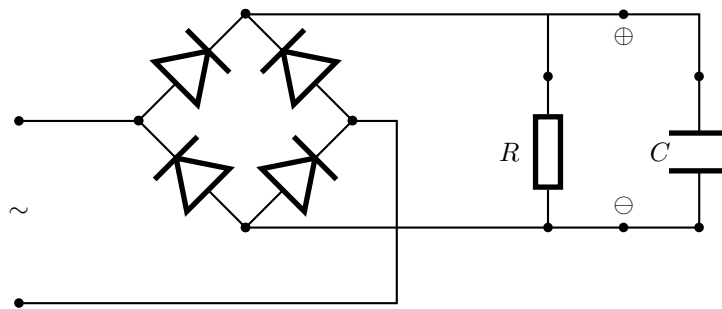


FIGURE 29 – Le modèle de l'accumulateur et le modèle de la diode idéale

### 27. Diode Zener

On considère le circuit représenté qui comporte une diode Zener, de caractéristique fournie à la figure 30. Celle-ci présente trois parties très distinctes, l'une d'elles étant le *coude Zener* à la tension  $-u_z$ . On pose  $E = \alpha u_z$  où  $\alpha$  est un paramètre positif.

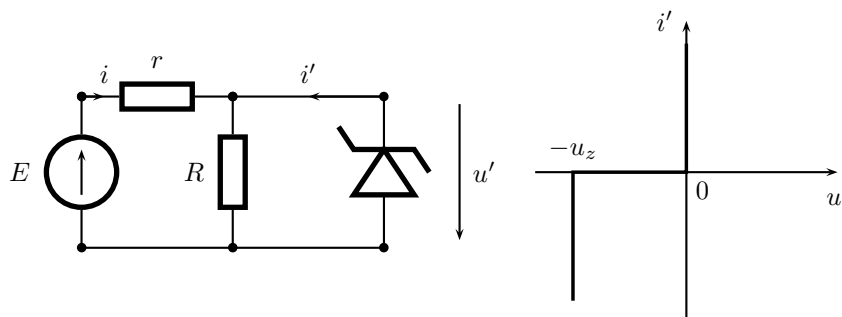


FIGURE 30 – Montage utilisant une diode Zener - Caractéristique de la diode

1. Déterminer  $u'$  et  $i$  en fonction de  $r$ ,  $R$ ,  $u_z$  et  $\alpha$ .
2. Tracer les graphes correspondants  $u'$  et  $i$  fonction de  $\alpha$ .
3. Commenter le rôle de la diode dans le montage.



### 28. Enregistrement d'une figure d'interférences

Dans un dispositif d'interférences, on obtient une intensité lumineuse variant périodiquement selon un axe  $Ox$  d'un écran. La loi donnant l'évolution de l'intensité lumineuse est :  $\phi = \phi_0 \left(1 + \cos 2\pi \frac{x}{i}\right)$  où  $i$  est appelé interfrange. Pour enregistrer cet éclairement grâce à un ordinateur, on utilise le déplacement à vitesse constante  $v_{ph}$  et étalonnée d'une photodiode selon l'axe  $Ox$  de l'écran grâce à un rail rectiligne, voir le schéma de la figure 31.

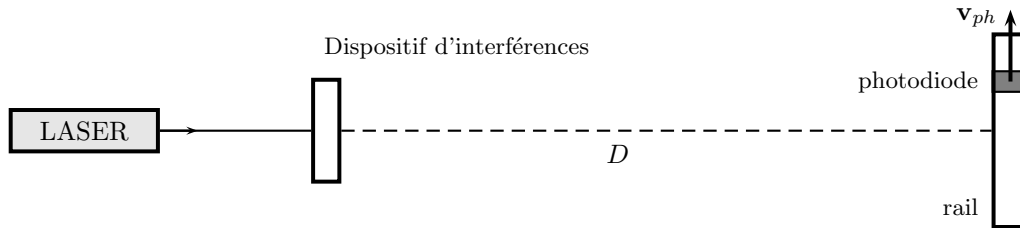


FIGURE 31 – Montage d'enregistrement de l'intensité lumineuse

La conversion de l'intensité lumineuse en une tension électrique pouvant être acquise par l'ordinateur s'effectue au moyen du montage électronique de la figure 32. L'amplificateur opérationnel utilisé est supposé idéal et en régime linéaire.

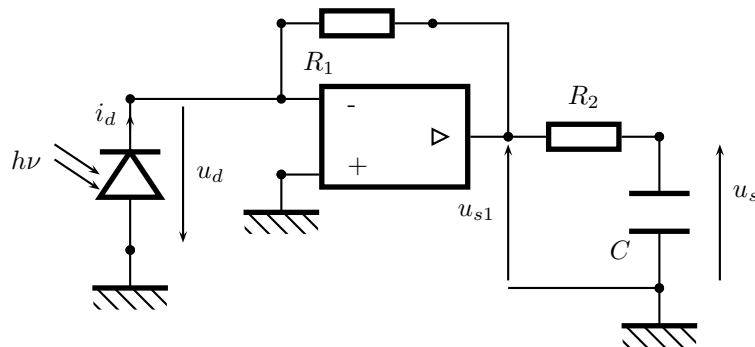


FIGURE 32 – Montage électronique de la photodiode

La photodiode est une jonction entre deux zones de silicium dopée de façon différente créant ce que l'on appelle une jonction  $PN$ . Lorsqu'elle est éclairée cette jonction va permettre à des électrons liés de quitter leur niveau d'énergie pour devenir en quelque sorte des électrons libres et participer à la conduction du courant. La caractéristique de la photodiode est donnée par la loi :

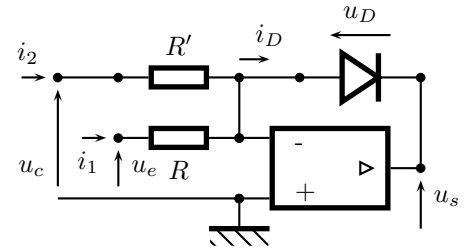
$$i_d = I_0 \exp \frac{eu_d}{kBT} - (I_0 + I_{ph})$$

où  $I_{ph}$  est l'intensité du courant dû aux électrons libérés par le flux lumineux. On parle de courant photoélectrique. Ce dernier est proportionnel à l'intensité lumineuse  $\phi$  reçue :  $I_{ph} = \beta\phi$ .

1. Déterminer l'expression de  $u_{s1}$  en fonction de l'intensité lumineuse  $\phi$ .
2. Déterminer l'expression de  $u_{s1}$  en fonction du temps  $t$ .
3. Quelle est la nature du filtre constitué par la cellule  $R_2C$  placée au niveau de la sortie de l'amplificateur opérationnel ? Déterminer sa fréquence de coupure.
4. Établir en fonction du temps l'expression de  $u_s$ .
5. Conclure sur le rôle de la cellule  $R_2C$  sachant que l'objectif est de pouvoir mesurer l'interfrange  $i$ .

**29. Multiplieur électronique**

On considère le montage de la figure ci-contre. L'amplificateur opérationnel est considéré comme idéal fonctionnant en régime linéaire. La diode est une diode réelle. L'intensité qui la traverse en fonction de la tension à ses bornes est de la forme  $i_D = I_0(\exp(\alpha u_D) - 1)$ .



1. Établir l'expression de  $u_s$  en fonction de  $u_e$  et  $u_c$ .  
Quelle valeur donner à  $u_c$  pour que  $u_s = -\frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{u_e}{RI_0}\right)$ ?
2. On permute les positions de  $R$  et de la diode. Quelle est la nouvelle expression de  $u_s$ ? Quelle est la nouvelle valeur  $u'_c$  qui assure  $u_s = -RI_0 \exp(\alpha u_e)$ ?
3. On considère le montage de la figure 33; les diodes sont identiques et  $u_c$  et  $u'_c$  ont les valeurs déterminées précédemment. Déterminer  $u_s$  en fonction de  $u_{e1}$ ,  $u_{e2}$ ,  $R$  et  $I_0$ .

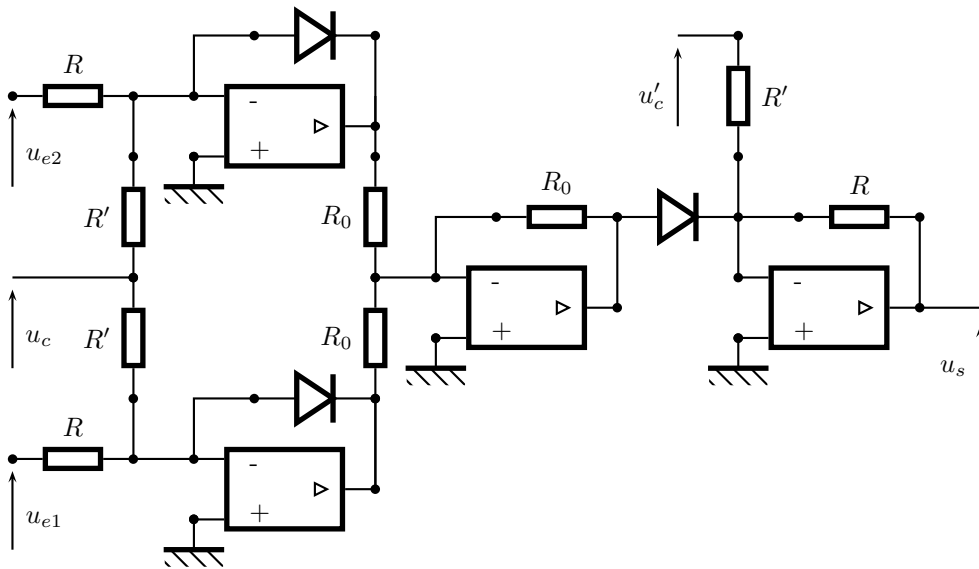


FIGURE 33 – Montage non linéaire