

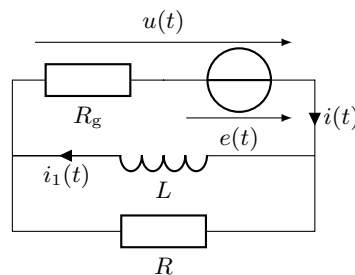
Travail demandé

à rendre le 19/09/2025

Chaque étudiant rend une copie même s'il n'est pas interdit de chercher les exercices en groupe.

Problème I - Électrocinétique et mesure*Ce sujet est extrait de l'épreuve de physique des Mines d'Albi, d'Alès de Douai et de Nantes 2008.***I.1. Modélisation linéaire d'un circuit**

I.1. Dans le circuit ci-dessous, l'intensité $i(t)$ fournie par le générateur se divise entre une inductance pure L (qui représente une bobine de résistance négligeable) et un résistor (résistance R) ; en respectant les notations du schéma, donner trois expressions de $u(t)$ en régime quelconque, en fonction de $i(t)$, $i_1(t)$ et des données.



I.2. La tension $e(-\infty < t < 0)$ est égale à une valeur constante notée E ; déterminer rapidement la tension $u(t = 0^-)$ ainsi que les intensités $i(t = 0^-)$ et $i_1(t = 0^-)$.

I.3. À $t = 0$, on « éteint » le générateur, qui devient équivalent à sa seule résistance interne (ce qui signifie qu'on a $e(t > 0) = 0$) ; établir l'équation différentielle régissant l'évolution ultérieure de $u(t)$, et faire apparaître la constante de temps τ du circuit.

I.4. En utilisant une propriété remarquable d'une grandeur - propriété à préciser, déterminer $u(t = 0^+)$.

I.5. Déterminer complètement $u(t > 0)$ puis donner l'allure de la représentation graphique de u pour $t \in [-10\tau, 10\tau]$.

I.2. Générateur et oscilloscope

On s'intéresse à quelques caractéristiques de ces deux appareils essentiels.

I.6. On dispose d'un voltmètre de très grande résistance interne (considérée infinie), d'un générateur de tension (GBF) et de boîtes de résistances réglables. La force électromotrice du générateur étant fixée (en continu), on effectue entre ses bornes les deux mesures suivantes, la charge étant le réseau passif connecté aux bornes du générateur :

- mesure (1) : on mesure une tension $U = 6 \text{ V}$ pour une résistance de charge infinie ;
- mesure (2) : on mesure une tension de 3 V pour une charge égale à 50Ω .

Déduire de ces mesures la résistance interne R_g et la force électromotrice E du générateur étudié.

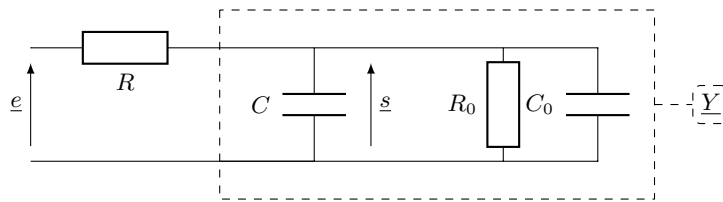
I.7. On alimente désormais par ce générateur une association RC série, en régime sinusoïdal de pulsation ω réglable. Quelle sera, en module, l'impédance de charge minimale du générateur? À quelle condition (qualitative) pourra-t-on considérer le générateur comme idéal?

On supposera cette condition remplie dans la suite, avec $R = 4.7 \text{ k}\Omega$ et $C = 22 \text{ nF}$.

I.8. En l'absence d'oscilloscope branché sur le circuit, déterminer la fonction de transfert complexe en tension \underline{H} si la grandeur de sortie est la tension aux bornes du condensateur; quel est le filtrage ainsi réalisé? Comment définit-on la pulsation de coupure ω_c d'un filtre de cette nature et comment s'exprime-t-elle ici?

Application numérique : calculer la fréquence de coupure du filtre.

I.9. On utilise un oscilloscope dont les caractéristiques d'entrée sont indiquées : « $1 \text{ M}\Omega$, 25 pF »; dans la suite, on désigne par R_0 et C_0 la résistance et la capacité correspondantes. Cet appareil, branché sur le filtre précédent, correspond ainsi au circuit suivant :



Déterminer simplement le gain en tension à basse fréquence, noté H_0 .

I.10. Exprimer l'admittance complexe $\underline{Y} = 1/\underline{Z}$. Quelle est la limite à basse fréquence du déphasage de la tension \underline{s} par rapport à l'intensité \underline{i} parcourant le dipôle équivalent d'admittance \underline{Y} ?

I.11. Déterminer la nouvelle fonction de transfert $\underline{H}' = \underline{s}/\underline{e}$ sous la forme $H_0/(1 + j\omega/\omega_0)$ (on pourra s'aider du calcul de \underline{Y}).

I.12. Comparer H_0 et la nouvelle fréquence de coupure aux valeurs précédentes (question 8), et conclure quant à l'utilisation de l'oscilloscope pour étudier le filtre RC .

Problème II - Système d'arrosage automatique d'un green de golf

Ce sujet est extrait de l'épreuve de physique CCINP MPI 2024.

Entre océan, dunes et pinèdes, le département des Landes abrite de grands espaces naturels et sauvages. En parfaite harmonie avec ces espaces, neuf golfs, véritables écrans de verdure (dont six se trouvent sur le littoral), participent à la beauté des paysages. Ceux de Seignosse, Moliets et Hossegor jouissent d'une renommée internationale.

Entretien un green sur un sol sablonneux (y compris parfois à même la dune littorale! (photo 5)) demande une maîtrise des techniques d'irrigation. On se propose dans cette partie d'étudier le montage électronique de la figure 9 qui illustre un système d'arrosage automatique.



Photo 5 - Green sur la dune du Golf de Moliets (trou n°16)
(<http://www.golflounge.com>)

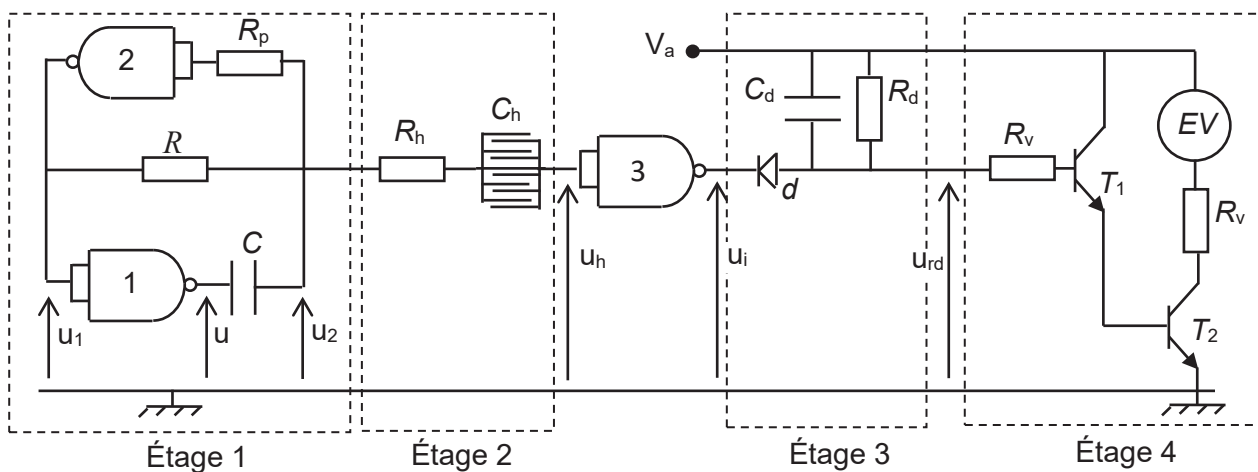


Figure 9 - Schéma d'un système électronique d'arrosage automatique

Il s'agit d'un montage comportant trois portes NAND à deux entrées reliées entre elles.

EV est une électrovanne permettant l'arrivée d'eau, d est une diode et T_1 et T_2 sont des transistors de puissance. Aucune connaissance sur le fonctionnement de ces composants n'est nécessaire.

La tension de sortie des portes NAND est $V_a > 0$ pour une sortie à l'état logique "1" et 0 pour une sortie à l'état logique "0".

La tension V_a est aussi utilisée comme potentiel imposé au point représenté sur le montage.

On note V_b (avec $V_b < V_a$) la tension de basculement des portes logiques : une tension d'entrée $V_e < V_b$ correspond à un niveau logique "0" en entrée de porte. Inversement une tension d'entrée $V_e > V_b$ correspond à un niveau logique "1".

On néglige la résistance de sortie des portes logiques et on considère leur résistance d'entrée comme infinie.

Q28. Rappeler la table de vérité d'une porte NAND à deux entrées indépendantes. Quelle est la fonction de cette porte lorsque ses deux entrées sont reliées entre elles ?

On étudie l'étage 1. La résistance R_p est une résistance de protection (indispensable en pratique) mais elle ne joue aucun rôle dans l'étude théorique de l'étage 1. De plus, le prélèvement en courant, réalisé par la connexion à l'étage 2, est supposé négligeable (ce qui est assuré par la grande valeur de la résistance R_h).

Q29. Établir que l'équation différentielle vérifiée par la tension $u_c(t) = u_2(t) - u(t)$ s'écrit $\tau \frac{du_c}{dt} + u_c = u_1 - u$ dans laquelle on exprimera le temps caractéristique τ .

Q30. a) À l'instant initial de date $t = 0$, le condensateur C est déchargé et $u_1 = V_a$. Que vaut alors $u(t = 0^+)$? En déduire les expressions de $u_c(t)$ et de $u_2(t)$, valables tant que $u_1 = V_a$.

b) Exprimer la date t_b de fin de validité des expressions précédentes de $u_c(t)$ et de $u_2(t)$. On donnera t_b en fonction de τ , V_a et de V_b .

Q31. a) Écrire, en justifiant, la nouvelle équation différentielle vérifiée par $u_c(t)$, valable à partir de la date t_b et jusqu'à une nouvelle date de fin de validité $t'_b > t_b$.

b) Obtenir alors les nouvelles expressions de $u_c(t)$ et de $u_2(t)$ pour $t_b < t < t'_b$.

c) Exprimer $t'_b - t_b$ en fonction de τ , V_a et de V_b .

Q32. a) Quelle équation différentielle est à considérer à partir de la date t'_b et jusqu'à une nouvelle date de fin de validité $t''_b > t'_b$? Exprimer alors $u_c(t)$ et $u_2(t)$ pour $t'_b < t < t''_b$.

b) En déduire $t''_b - t'_b$ en fonction de τ , V_a et de V_b .

Q33. Faire un tracé soigné des chronogrammes de $u(t)$, $u_c(t)$ et $u_2(t)$ sur une même figure.

Q34. a) Déduire l'expression de la période T des signaux obtenus pour $t > t_b$.

b) Calculer T pour $V_a = 5 \text{ V}$, $V_b = 1,5 \text{ V}$, $R = 100 \text{ k}\Omega$ et $C = 20 \text{ nF}$.

c) Quel rôle assure l'étage 1 pour les étages postérieurs à lui ? Quel nom porte ce type de circuit en électronique ?

L'étage 2 correspond à un capteur capacitif d'humidité enfoui dans le sol. Il s'agit d'un condensateur de capacité C_h variable avec le taux d'humidité. La tension $u_h(t)$ en sortie de capteur est envoyée à l'entrée de la porte NAND 3, qui fournit une tension $u_i(t)$ à sa sortie. L'étage 3, constitué de la diode d en série avec un circuit (R_d, C_d) , réalise un redressement-filtrage qui transforme $u_i(t)$ en une tension $u_{rd}(t)$ quasi-constante (on ne demande pas de justifier ce point). Lorsque u_{rd} dépasse $3,5 \text{ V}$, l'électrovanne EV est alimentée en courant (grâce aux transistors présents à l'étage 4), ce qui déclenche l'arrosage.

Les chronogrammes de $u_h(t)$, $u_i(t)$ et de $u_{rd}(t)$ sont donnés en **figure 10a** lorsque $C_h = 1\,000 \text{ pF}$ et en **figure 10b** lorsque $C_h = 700 \text{ pF}$ (l'origine des temps sur ces graphes a été choisie arbitrairement).

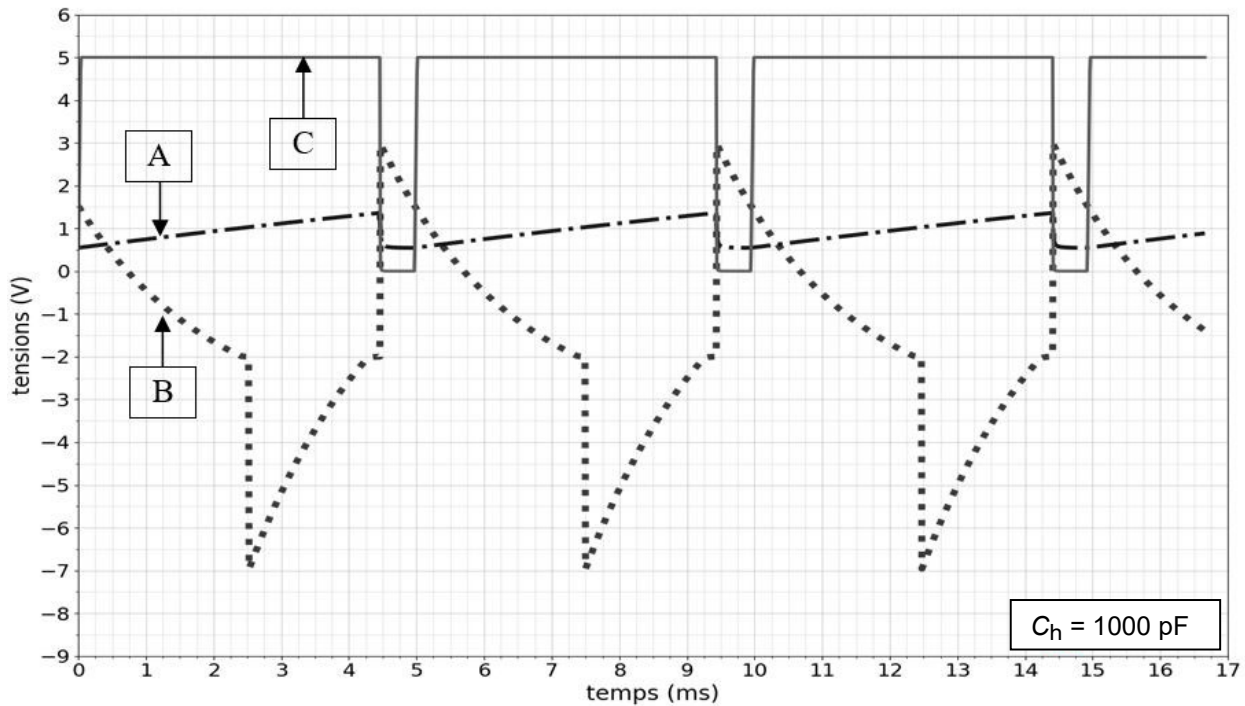


Figure 10a - Chronogrammes de $u_h(t)$, $u_i(t)$ et $u_{rd}(t)$ pour $C_h = 1\ 000\ \text{pF}$

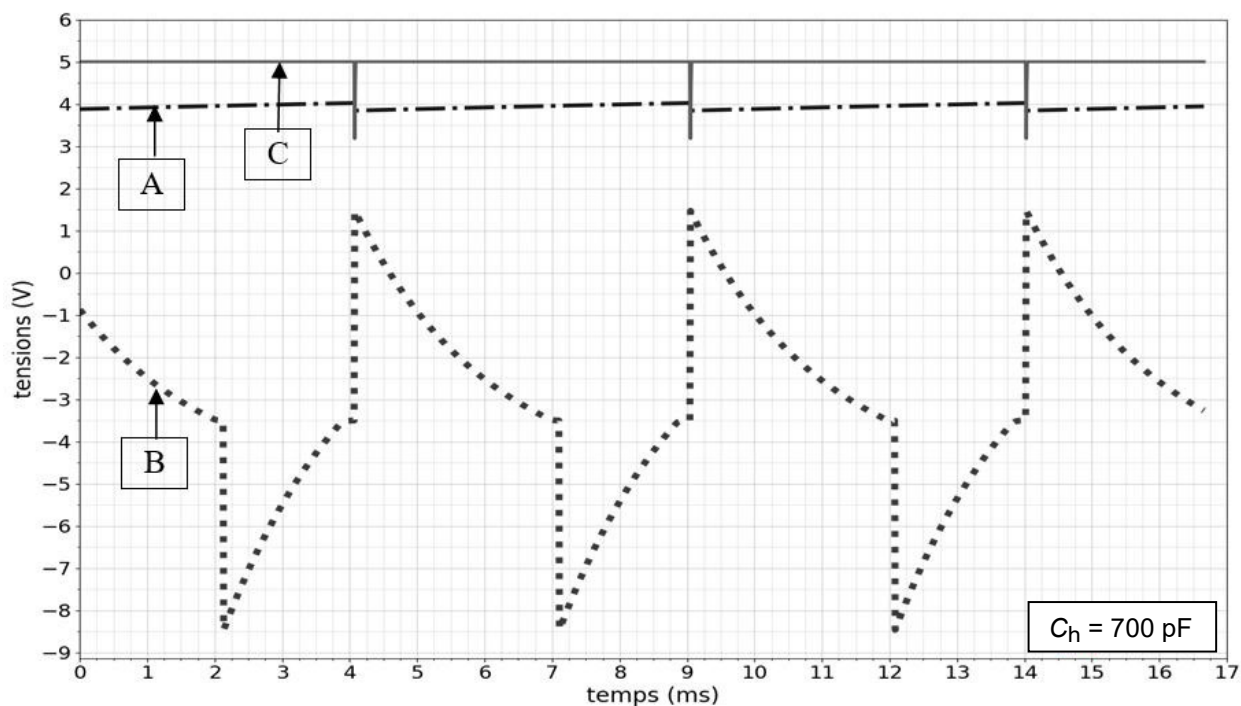


Figure 10b - Chronogrammes de $u_h(t)$, $u_i(t)$ et $u_{rd}(t)$ pour $C_h = 700\ \text{pF}$

- Q35. a)** Justifier que $u_h(t) = u_2(t) + k$ où k est une constante qu'on ne cherchera pas à expliciter. On admet par ailleurs que cette constante dépend de la valeur de C_h .
- b)** Associer chaque signal $u_h(t)$, $u_i(t)$ et $u_{rd}(t)$ à son chronogramme **A**, **B** ou **C**.
- c)** Laquelle des **figures 10a** ou **10b** correspond à la situation d'arrosage ? La capacité C_h augmente-t-elle ou diminue-t-elle avec le taux d'humidité ?
- d)** Expliquer la forme du signal **C** en lien avec le signal **B** de la **figure 10a**. Commenter le cas de la **figure 10b**.

Problème III - Amplificateur de tension à triode

Ce sujet est extrait de l'épreuve de physique-chimie CCS 2 MPI 2025.

Une troisième électrode, nommée *grille*, est ajoutée au dispositif décrit en partie A pour former une triode (voir figure 2). Il s'agit d'un nouveau filament conducteur entourant la cathode (à ne pas confondre avec le filament de chauffage). Ce filament est porté à une tension notée U_{gc} par rapport à la cathode, ce qui a pour conséquence de modifier le potentiel électrostatique régnant entre la cathode et l'anode; cela modifie aussi le courant anodique I_a .

On note I_g le courant de grille associé au flux d'électrons circulant depuis la cathode vers la grille. Le symbole de la triode et les grandeurs électriques associées sont illustrés sur la figure 6.

Dans une triode, l'influence électrostatique de la grille est significativement plus importante que celle de l'anode. Par conséquent, le fonctionnement électrique de la triode est décrit par la relation $I_a = \beta' (\mu U_{gc} + U_{ac})^{\frac{3}{2}}$ avec, pour la triode ECC83, $\beta' = 3,3 \times 10^{-6}$ USI et $\mu = 100$ (μ ne dépend que de la géométrie du tube considéré et le facteur β' est différent de β en raison de la prise en compte de la présence de la grille). Cette relation est vérifiée lorsque $I_g = 0$. On rappelle que seule la cathode est chauffée par le filament et donc seule la cathode est le siège d'une émission significative d'électrons.

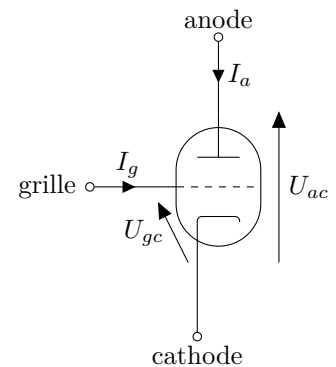


Figure 6 – Triode : symbole et fléchage des grandeurs électriques associées.

I – Montage amplificateur de tension à triode et principe d'analyse

Une triode ECC83 est utilisée pour réaliser un amplificateur de tension selon le schéma de la figure 7. La tension à amplifier est la tension $v_e(t)$, **variable**, dont l'amplitude vaut quelques centaines de millivolts; elle est délivrée par un générateur idéal de tension et est de fréquence $f = 1,0$ kHz. La source de tension continue $V_{cc} = 3,5 \times 10^2$ V alimente le circuit, et permet de fixer le point de fonctionnement (ou point de polarisation) de la triode. Le signal de sortie $V_s(t)$ est pris à l'anode du tube et comporte une composante continue notée V_s^0 et une composante variable notée $v_s(t)$, soit $V_s(t) = V_s^0 + v_s(t)$.

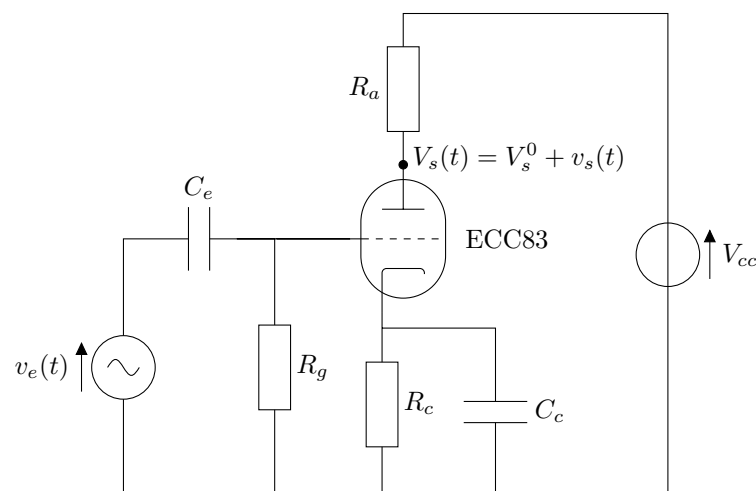


Figure 7 – Triode ECC83 utilisée en amplificateur de tension.

Q31. Donner une raison pour laquelle le principe de superposition ne s'applique pas dans ce circuit.

Les grandeurs électriques liées à la source $v_e(t)$ peuvent être vues comme une perturbation à l'ordre 1 du point d'équilibre électrique dû à la source V_{cc} . Ainsi, l'analyse de ce circuit va être menée de la façon suivante :

- étape 1 : étude, en régime stationnaire, du circuit sous la seule influence de V_{cc} , avec détermination du point de fonctionnement I_a^0 , U_{ac}^0 et U_{gc}^0 de la triode ECC83, puis détermination de V_s^0 ;

- étape 2 : linéarisation de la caractéristique de la triode, à l'ordre 1, autour du point de fonctionnement ;
- étape 3 : étude, en régime variable, du circuit linéarisé sous la seule influence de $v_e(t)$ pour déterminer $v_s(t)$.

Q32. Donner un argument numérique justifiant cette démarche. Préciser de quelle(s) source(s) dépendent respectivement les grandeurs V_s^0 et $v_s(t)$.

II – Étape 1 : point de fonctionnement et dimensionnement des résistances R_a et R_c

Dans cette partie, seules les grandeurs continues sont prises en compte. La source V_{cc} est ainsi considérée, tandis que la source $v_e(t)$ est supposée de tension nulle. À la mise sous tension, un régime transitoire apparaît le temps de charger les différents condensateurs du montage. À l'issue de ce régime transitoire, le circuit est en régime stationnaire.

Q33. Déterminer le comportement électrique d'un condensateur en régime stationnaire. En déduire la représentation du schéma électrique équivalent du montage de la figure 7 en régime stationnaire.

Q34. Montrer alors qualitativement que $I_g = 0$ quelles que soient les valeurs des résistances R_a , R_g et R_c .

Le point de fonctionnement souhaité est tel que $I_a^0 = 1,2$ mA et $U_{ac}^0 = 2,5 \times 10^2$ V.

Q35. Déterminer la valeur de U_{gc}^0 de U_{gc} compatible. En déduire les valeurs à prendre pour R_c et R_a . Expliquer pourquoi la valeur de R_g n'intervient pas ici.

Q36. Préciser alors la valeur de V_s^0 .

III – Étape 2 : linéarisation du comportement de la triode ECC83

On s'intéresse maintenant aux petites variations autour du point de fonctionnement dues à la présence de v_e . Les grandeurs électriques sont notées $U_{gc} = U_{gc}^0 + u_{gc}$, $U_{ac} = U_{ac}^0 + u_{ac}$ et $I_a = I_a^0 + i_a$ avec u_{gc} , u_{ac} et i_a des infiniment petits d'ordre 1 devant respectivement U_{gc}^0 , U_{ac}^0 et I_a^0 .

Q37. Donner un argument numérique autorisant à utiliser la caractéristique statique $I_a(U_{gc}, U_{ac})$ de la triode en régime variable.

Q38. Montrer que les grandeurs u_{gc} , u_{ac} et i_a sont liées à l'ordre 1 par la relation suivante, où les coefficients g_m et r_a sont à exprimer en fonction de β' , μ et I_a^0 :

$$i_a = g_m u_{gc} + \frac{1}{r_a} u_{ac}. \quad (1)$$

Q39. Exprimer la quantité $g_m r_a$. Commenter.

Q40. Calculer les valeurs numériques de g_m et r_a .

IV – Étape 3 : détermination du gain de l'amplificateur

Les condensateurs C_e et C_c sont supposés suffisamment capacitifs pour se comporter comme des fils (interrupteurs fermés) dans le domaine fréquentiel du signal v_e . De plus, la source de tension V_{cc} étant une source continue, elle est aussi assimilable à un fil en régime variable car elle impose une variation de tension nulle à ses bornes. En se limitant aux signaux variables, le circuit électrique équivalent du montage amplificateur est donc celui de la figure 8 dans lequel les grandeurs u_{gc} , u_{ac} et i_a sont liées entre elles par la relation établie à la question **Q38**.

Q41. Montrer que $v_s = A_V v_e$ et préciser l'expression de l'amplification en tension A_V en fonction de g_m , r_a et R_a . Commenter le signe et calculer cette amplification en décimal et en décibels.

Q42. En réalité, la source v_e n'est pas idéale et possède une résistance de sortie notée $r_e = 50 \Omega$. Préciser, avec justification, comment doit être choisie la valeur de R_g pour ne pas altérer la valeur de A_V .

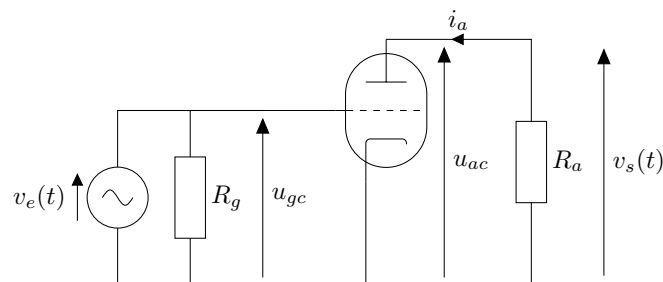


Figure 8 – Circuit équivalent en régime variable.

V – Distorsion harmonique de l'amplificateur

On cherche maintenant à quantifier la non-linéarité de l'amplificateur étudié en relation principalement avec la non-linéarité de la caractéristique de la triode vis-à-vis de U_{gc} .

Q43. En reprenant le raisonnement effectué à la question **Q38**, mais à l'ordre 2 en u_{gc} , établir la relation :

$$i_a = g_m u_{gc} + \xi u_{gc}^2 + \frac{1}{r_a} u_{ac}. \quad (2)$$

Exprimer ξ en fonction de μ , β' et I_a^0 . Faire l'application numérique.

Q44. Déterminer alors l'expression de $v_s(t)$ en fonction de $v_e(t)$, $v_e(t)^2$ et des autres grandeurs utiles.

Q45. Montrer que, pour un signal v_e sinusoïdal de la forme $v_e(t) = U \sin(\omega t)$, le signal v_s comporte plusieurs composantes spectrales. Identifier leurs caractéristiques.

On appelle distorsion harmonique de rang n , notée DH_n , le rapport de l'amplitude de l'harmonique de rang n sur l'amplitude du fondamental. On exprime ce rapport en pourcentage.

Q46. Calculer les valeurs de DH_2 pour $U = 0,1$ V, $U = 0,3$ V et $U = 0,5$ V. Commenter.