

C30191

Ecole Normale Supérieure de Cachan

61 avenue du président Wilson

94230 CACHAN

Concours d'admission en 3^{ème} année

GÉNIE ÉLECTRIQUE

Session 2010

Épreuve de SYSTÈMES ÉLECTRONIQUES ET ÉLECTROTECHNIQUES

Durée : 4 heures

Aucun document n'est autorisé.

Aucun dictionnaire n'est autorisé.

L'usage de calculatrices électroniques de poche à alimentation autonome, non imprimantes et sans document d'accompagnement, est autorisé selon la circulaire n°99018 du 1^{er} février 1999. De plus, une seule calculatrice est admise sur la table, et aucun échange n'est autorisé entre les candidats.

*L'épreuve est d'une durée de quatre heures et est constituée de deux parties indépendantes (électrotechnique et électronique). **Les deux parties doivent obligatoirement être traitées et rédigées sur des feuilles séparées** ; il est suggéré aux candidats de consacrer deux heures à chacune des parties.*

PREMIERE PARTIE

ELECTROTECHNIQUE ET ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

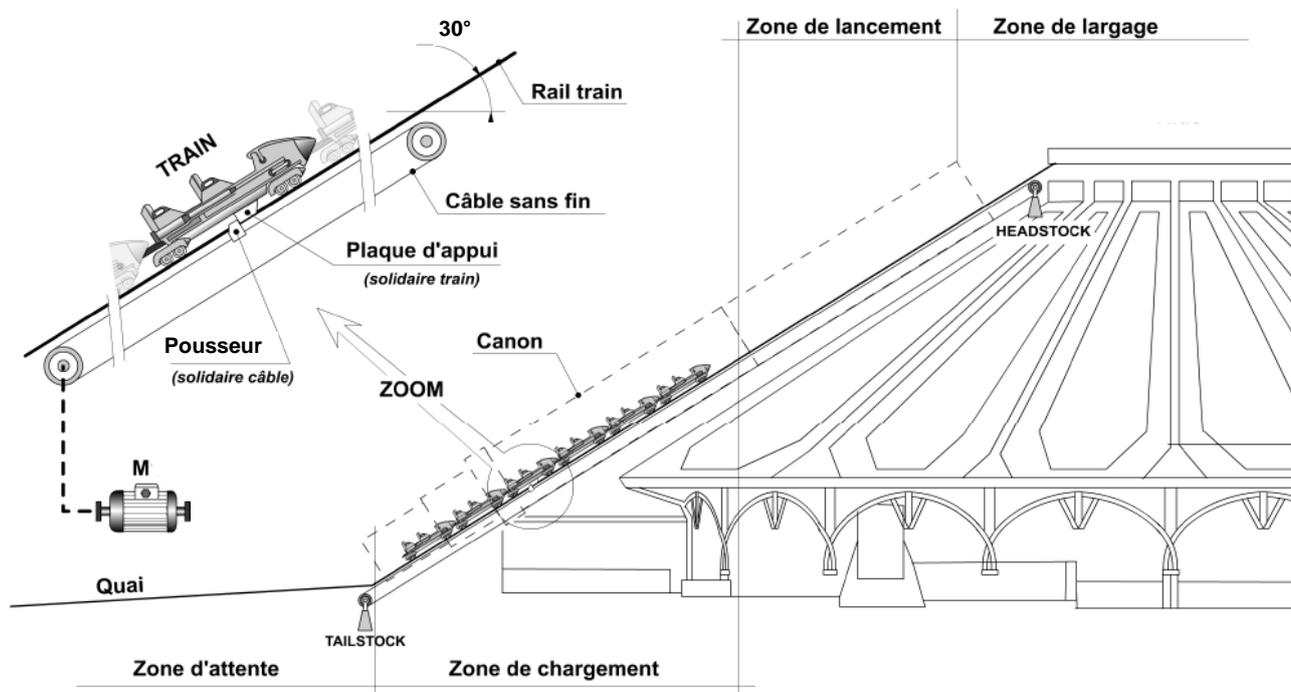
La partie électrotechnique se compose de trois parties indépendantes. Il est vivement recommandé de les traiter toutes.

Le sujet comporte 9 pages dont **3 pages de documents réponses à remettre avec la copie.**

Chaine d'énergie du système de lancement d'une attraction foraine

Cette attraction se présente sous la forme d'un chapiteau renfermant une montagne russe à grande vitesse. Le système de lancement est une catapulte à propulsion électrique du type de celle rencontrée sur porte-avions pour l'aide au décollage.

Les trains chargés en passagers, sont envoyés sur une zone d'attente de la rampe de lancement où ils sont maintenus en position par un système de freins. Lorsque le train est au repos au bas de la rampe de lancement, le système de catapultage, le pousseur, vient s'accrocher sous le train pour le hisser en zone de largage, comme le montre le dessin suivant.



La machine entraîne directement un tambour sur lequel est enroulé un câble sans fin qui supporte le pousseur. Le pousseur positionne le train en zone de largage puis le catapulte.

Description du cycle de fonctionnement

▪ Phase 0 : Engagement du pousseur

Le cycle du pousseur débute, à partir de sa position basse, par l'accostage avec le train à la hauteur du deuxième wagonnet, son aileron venant rencontrer la plaque d'appui prévue à cet effet. Pendant cette opération d'engagement du pousseur, qui dure 5 secondes au maximum, le train reste fixe. A la fin de l'engagement, le train est immobile en attente d'une autorisation de lancement.

▪ Phase 1 : zone de chargement

Cette phase permet un test dynamique du système de lancement : le pousseur monte le train dans la zone de chargement. Le train de passagers subit une accélération de $2,5 \text{ m/s}^2$ pour l'amener à une vitesse de 3 m/s , vitesse qui est maintenue pendant 5 s. Un freinage à décélération constante de 4 m/s^2 jusqu'à la vitesse nulle termine le cycle dans la zone de chargement.

En fin de phase de chargement, une attente de durée t_4 est alors imposée avant de débiter la phase de lancement.

▪ Phase 2 : Lancement du train

Le train est lancé par l'intermédiaire du pousseur avec une accélération de 8 m/s^2 jusqu'à une vitesse de 14 m/s . Lorsque cette vitesse est atteinte, le pousseur se désolidarise du train. Le train, qui se déplace sur un axe incliné parallèle à la surface du toit de l'attraction, termine son ascension sur sa lancée à une vitesse d'apogée de 4 m/s au minimum. Il rentre alors dans un virage vertical pour entamer un plongeon dans la montagne russe.

▪ Phase 3 : Décélération du pousseur et retour en position d'origine

Le pousseur se dégage du train en freinant alors que le train poursuit sur sa lancée. Le freinage du train achevé, le pousseur revient en position initiale.

Partie A : Etude électromécanique

L'évolution de la vitesse du pousseur, lors des trois phases 1, 2 et 3 de fonctionnement décrites précédemment, est représentée sur le document réponse n°1. On y associe 9 intervalles de temps numérotés de 1 à 9.

A.1. Détermination de l'accélération angulaire du moteur

Q.A.1. En reprenant la description des différentes phases, ajouter sur le document réponse n°1 sur la courbe de vitesse, les valeurs de l'accélération γ en m/s^2 du pousseur lors des intervalles, en précisant le signe. Déterminer la valeur des intervalles de temps t_1 , t_3 , t_5 , t_6+t_7 et t_9 . La durée des intervalles t_2 , t_4 et t_8 est la suivante : $t_2 = 5 \text{ s}$, $t_4 = 1 \text{ s}$ et $t_8 = 6 \text{ s}$.

On rappelle que la machine entraîne directement un tambour sur lequel est enroulé un câble sans fin qui supporte le pousseur.

Le diamètre de ce tambour est $D = 1 \text{ m}$.

On note :

- v la vitesse du pousseur en m/s ,
- Ω la vitesse de rotation du moteur en rad/s .

Q.A.2. Déterminer la relation entre v , Ω et D . En déduire la vitesse maximale de rotation du moteur Ω_{max} sachant que $v_{\text{max}} = 14 \text{ m/s}$. Donner le résultat en rad/s puis en tr/min .

Q.A.3. Déterminer la relation entre l'accélération angulaire du moteur $\frac{d\Omega}{dt}$, l'accélération du pousseur γ et le diamètre du tambour D .

Q.A.4. Tracer alors, sur le document réponse n°1, l'évolution de $\frac{d\Omega}{dt}$ sur les 9 intervalles de temps.

A.2. Détermination du couple résistant statique

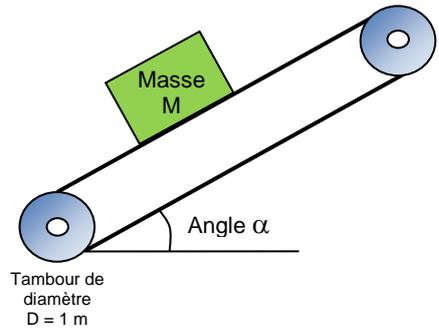
On suppose les différentes liaisons mécaniques sans frottement. Le couple résistant statique au niveau de l'arbre de rotation de la machine ne dépend donc que de la masse du pousseur et du train.

On note :

- M_t la masse du train avec $M_t = 7\ 500$ kg,
- M_p la masse du pousseur avec $M_p = 900$ kg,
- g , l'accélération de la pesanteur avec $g = 10$ m/s²,
- α , l'angle d'inclinaison de la rampe de lancement avec l'horizontal $\alpha = 30^\circ$.

Q.A.5. On simplifie l'étude au schéma ci-contre, exprimer dans chaque phase de fonctionnement le couple résistant C_R ramené à l'axe du moteur en fonction de D , M_t , M_p , g et α .

Q.A.6. Tracer les valeurs numériques du couple résistant C_R sur le document réponse n°1.



A.3. Détermination du couple de la machine

L'accélération angulaire et le couple résistant statique étant connus sur les différents intervalles de temps, on cherche maintenant à déterminer le couple total que la machine doit exercer pour générer le cycle.

On note :

- J_1 le moment d'inertie de l'ensemble pousseur + tambour et câble + train ramené à l'axe de la machine avec $J_1 = 3\ 100$ kg.m²,
- J_2 le moment d'inertie du pousseur + tambour et câble ramené à l'axe de la machine avec $J_2 = 1\ 200$ kg.m².

J_1 sera donc utilisé pour les phases 1 et 2, et J_2 pour la phase 3.

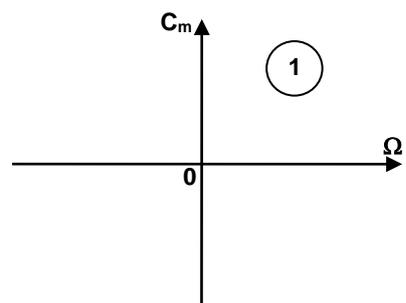
Q.A.7. Exprimer le couple total de la machine C_m en fonction de J_1 , J_2 , $\frac{d\Omega}{dt}$ et C_R pour chaque phase de fonctionnement. Tracer l'évolution du couple de la machine C_m sur le document réponse n°1 en justifiant les valeurs numériques. En déduire la valeur numérique du couple de la machine maximal C_{max} .

Q.A.8. On définit le couple quadratique moyen $C_{quad\ moyen}$ de la façon suivante. Déterminer sa valeur numérique.

$$C_{quad\ moy} = \sqrt{\frac{\sum_i (C_{mi}^2 \cdot t_i)}{\sum_i t_i}}$$

La représentation ci-contre sera utilisée pour décrire le fonctionnement dans les différents quadrants. Lors de l'intervalle t_1 , le couple C_m et la vitesse Ω sont positifs, on place donc le chiffre 1 (comme le numéro de l'intervalle 1) dans le quadrant correspondant.

Q.A.9. Reproduire ce schéma et indiquer les quadrants utilisés pour les intervalles 2 à 9. Justifier que le cycle de lancement de la catapulte nécessite un fonctionnement dans les 4 quadrants. Préciser pour chaque quadrant le type de fonctionnement de la machine (moteur/récepteur ou frein/générateur).



Partie B : Motorisation du tambour de la catapulte

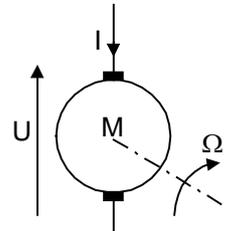
L'entraînement du tambour est obtenu par une machine à courant continu (MCC) fonctionnant à flux inducteur constant. Les caractéristiques et une photographie de la MCC sont données ci-dessous :

Caractéristiques	Moteur NP710KX8
Tension d'induit nominale U_n	700 V
Courant d'induit nominal I_n	2033 A
Vitesse nominale N_n	275 tr/min
Puissance utile nominale P_n	1300 kW
Masse	15850 kg
C_{max}/C_n	2,1
Excitation	constante



Les conventions utilisées sont données par le schéma ci-contre.

Le couple délivré par la machine est le couple C_m calculé dans la partie A.
On néglige son couple de pertes C_p : le couple utile est égal au couple électromagnétique.
On note R la résistance de l'induit.



Q.B.1. Calculer le couple nominal C_{mn} . La machine choisie correspond-elle aux spécifications du cahier des charges ? Justifier la réponse.

Q.B.2. Justifier que $E = k\Omega$, Ω étant la vitesse angulaire du moteur (en rad.s^{-1}) et k une constante dont on précisera l'unité. En déduire l'expression du couple C_m en fonction du courant d'induit I .

Q.B.3. Déterminer les valeurs numériques de k et de R .

Q.B.4. Dans une des phases d'accélération, le couple C_m nécessaire vaut 70,3 kN.m, et la vitesse doit être de 270 tr/min. En déduire la valeur que doit prendre la tension d'induit pour ce fonctionnement.

Q.B.5. La machine à courant continu doit permettre un fonctionnement dans les quatre quadrants du plan (C_m, Ω) , préciser les signes de la tension U et du courant I permettant d'aller dans ces 4 quadrants si on néglige la chute ohmique d'induit RI devant la fem E .

Partie C : Variateur de vitesse

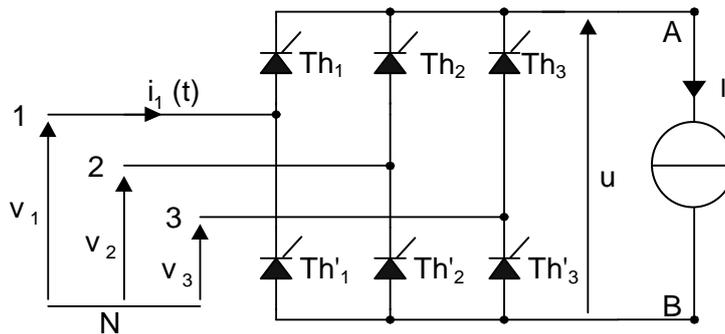
La machine à courant continu est alimentée par un variateur composé de 2 ponts complets triphasés à thyristors (notés PD3).

L'étude portera tout d'abord sur un seul pont redresseur PD3. Il sera ensuite mis en évidence la nécessité d'utiliser un second pont monté « tête bêche » de façon à permettre un fonctionnement dans les 4 quadrants.



C.1. MCC alimentée par un pont PD3

On suppose tout d'abord que la tension d'induit de la machine à courant continu est contrôlée par un variateur utilisant un PD3 dont le schéma de principe est donné ci-dessous :



Les six thyristors sont supposés parfaits. Le pont est alimenté par un système de tensions triphasées équilibrées de valeur efficace $V = \frac{700}{\sqrt{3}} V$ (tensions simples par rapport au neutre N) et de fréquence $f = 50 \text{ Hz}$.

Le pont est connecté en A et B à la machine à courant continu, dont l'inductance d'induit est supposée suffisamment élevée pour que le courant I puisse être considéré comme parfaitement constant.

L'angle de retard à l'amorçage α des thyristors est compté à partir de la commutation naturelle des diodes du même pont non commandé.

Q.C.1. Représenter, sur le document réponse n° 2, la tension u entre les points A et B pour $\alpha = 60^\circ$, la forme du courant i_{th1} dans le thyristor Th_1 et du courant i_1 dans la phase 1.

Q.C.2. Exprimer la valeur moyenne du courant dans un thyristor $\langle i_{th} \rangle$ puis la valeur efficace du courant $I_{1\text{eff}}$ dans la phase 1 en fonction de I .

Q.C.3. Tracer l'allure du fondamental de i_1 . Que vaut le déphasage φ entre la tension v_1 et le fondamental du courant i_1 ?

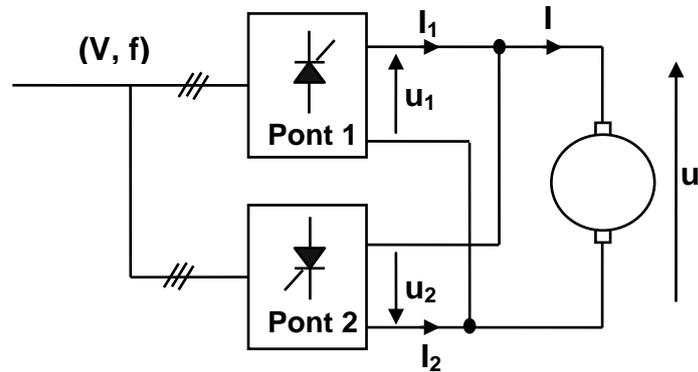
Q.C.4. Montrer que la valeur moyenne U de u s'exprime par : $U = 2,34.V.\cos\alpha$ (V valeur efficace des tensions simples). Calculer U pour $\alpha = 60^\circ$ et 120° . Quelle valeur faut-il donner à α pour obtenir $U = 700 \text{ V}$?

Q.C.5. Préciser, en justifiant votre réponse, le type de fonctionnement du pont (redresseur ou onduleur) suivant la valeur de α .

Q.C.6. Le courant I peut-il changer de signe ? Pourquoi ? Ce variateur répond-il alors aux spécifications du cahier des charges ? Justifier la réponse.

C.2. MCC alimentée par deux ponts PD3

Deux ponts tête bêche sont utilisés pour piloter la machine à courant continu, le schéma de principe est alors le suivant :



Les 2 ponts sont commandés de manière séparée : lorsque le pont 1 est commandé, le pont 2 est bloqué et inversement lorsque le pont 2 est commandé, le pont 1 est bloqué. Le pont 1 est commandé avec un angle de retard à l'amorçage α_1 , le pont 2 avec un angle α_2 .

Q.C.7. Etablir la relation entre α_1 et α_2 pour que le courant puisse s'inverser très rapidement à tension imposée aux bornes de la charge.

Q.C.8. En raisonnant sur le signe de U , valeur moyenne de la tension d'induit, et le signe de I , courant d'induit, compléter le document réponse n°3 en indiquant pour les 3 quadrants restants, le fonctionnement du pont commandé. Conclure sur l'intérêt de l'utilisation de ces 2 ponts « tête bêche ».

SECONDE PARTIE
– ELECTRONIQUE –

Nous étudions ici deux fonctions de base de nombreux systèmes électronique analogiques, à savoir :

- la génération de formes d'ondes (exercice 1),
- l'amplification en petit signal (exercice 2).

Les deux exercices sont *indépendants*.

Note : l'énoncé est relativement long, mais les réponses aux questions sont souvent brèves.

Exercice 1 : Etude d'un oscillateur contrôlé en tension (OCT) à amplificateurs opérationnels

Le montage de la figure 1 représente un OCT à amplificateurs opérationnels (AOP). Les deux AOP, notés A_1 et A_2 , sont considérés comme parfaits. Ils sont alimentés symétriquement à l'aide de deux alimentations continues fournissant $\pm 15V$ ($V_{CC} = 15V$). Les niveaux de saturation (par valeurs positive et négative) en sortie des AOP sont symétriques : $V_{sat}^+ = -V_{sat}^- = V_{sat} = 13,5V$. La tension d'entrée V_E est continue et est comprise entre $0V$ et V_{CC} . On supposera que la tension de saturation du transistor bipolaire T est nulle ($V_{CEsat} = 0V$).

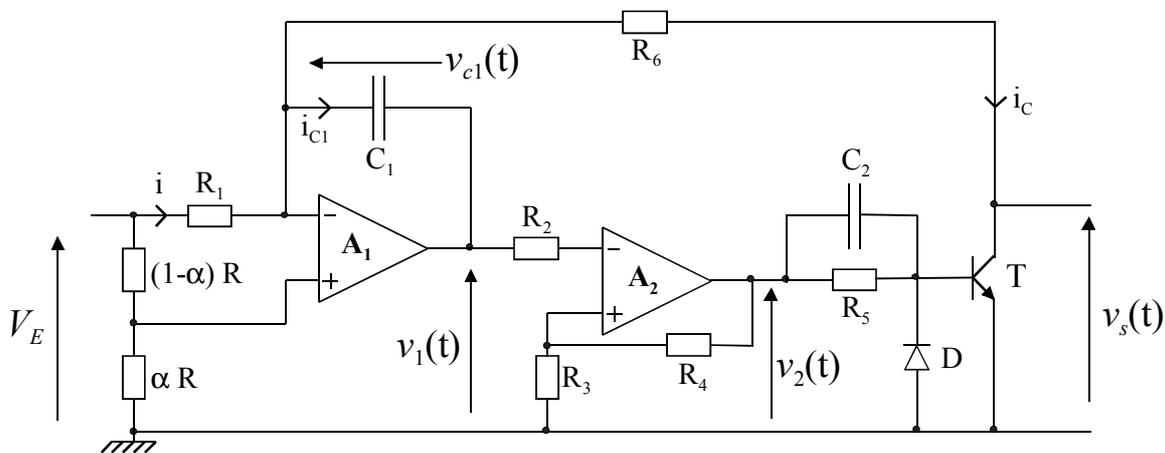


Figure 1. Schéma de l'OCT à amplificateurs opérationnels.

Cet exercice comporte quatre parties indépendantes où l'on étudie successivement :

- Partie 1 : le circuit d'entrée de la Figure 1 (question 1),
- Partie 2 : la fonction réalisée par A_2 (questions 2 à 5),
- Partie 3 : le fonctionnement du montage complet (questions 6 à 17),
- Partie 4 : discussions diverses (question 18).

On ne tient pas compte du condensateur C_2 et de la diode D dans les parties 1, 2 et 3. Le paramètre α est compris entre 0 et 1.

Partie 1 : Etude du circuit d'entrée de la Figure 1

On suppose que l'amplificateur A_1 fonctionne en régime linéaire.

1. Montrer que le courant d'entrée, i , s'exprime de la façon suivante :

$$i = (1 - \alpha) \frac{V_E}{R_1}.$$

Partie 2 : Etude de la fonction réalisée par A_2

Les tensions d'entrée et de sortie de A_2 sont respectivement notées $v_1(t)$ et $v_2(t)$.

2. Expliquer qualitativement le fonctionnement de A_2 .
3. Tracer la caractéristique de transfert entrée-sortie $v_2 = f(v_1)$.
4. Quel est le nom typique de la fonction électronique ainsi réalisée ?
5. Quel est le rôle de la résistance R_2 ?

Partie 3 : Etude du montage complet (Figure 1)

6. Dans quel régime de fonctionnement opère le transistor T ?
7. A la mise sous tension (à l'instant $t = 0$), on suppose que :
 - le condensateur C_1 est déchargé : $v_{c1}(t = 0) = 0$,
 - la tension v_2 vaut $-V_{sat}$.
- 7a. Quel est l'état du transistor T ?
- 7b. En écrivant que $i_{C1} = i$, montrer que $v_1(t)$ varie linéairement en fonction du temps.
- 7c. Déterminer l'expression complète de $v_1(t)$. Tracer $v_1(t)$.
- 7d. En déduire que l'évolution temporelle de $v_1(t)$ provoquera, au bout d'un certain temps, le basculement de A_2 et le passage de v_2 à la valeur $+V_{sat}$.
- 7e. Dans ce cas, montrer que le transistor T passe à l'état saturé.

Le transistor T est maintenant supposé saturé.

8. Déterminer la valeur minimale de R_6 garantissant que le transistor T soit effectivement saturé, et ceci quelle que soit la valeur de V_E . Cette valeur minimale sera exprimée en fonction de α , du gain en courant β du transistor T, de R_5 , et des tensions V_{CC} , V_{BE} et V_{sat} . On rappelle que V_{BE} désigne la tension entre la base et l'émetteur de T.
On supposera par la suite que cette condition est satisfaite.
9. Calculer l'expression du courant $i_{c1}(t)$ qui charge C_1 lorsque T est saturé. Montrer que $i_{c1}(t)$ est négatif si la condition suivante est remplie :

$$R_6 < \frac{\alpha}{1 - \alpha} R_1.$$

On supposera par la suite que cette condition est vérifiée.

10. Déterminer l'expression de $v_1(t)$.

Les questions 7 à 10 ont permis d'analyser, pas à pas, le fonctionnement du montage de la figure 1. Les questions suivantes ont pour objectifs de déterminer les performances de ce montage. Désormais ce dernier est supposé fonctionner en *régime établi*.

11. Expliquer qualitativement le fonctionnement du montage.
12. Tracer *précisément* l'évolution temporelle des trois tensions $v_1(t)$, $v_2(t)$ et $v_s(t)$. Ces trois tensions seront représentées en correspondance, l'une sous l'autre. On donnera les valeurs des tensions importantes sur ces trois graphes.
13. Donner les expressions analytiques des pentes de la tension $v_1(t)$.
14. Déterminer les durées T_{haut} et T_{bas} des états respectivement haut et bas de $v_s(t)$.
15. Montrer que le rapport cyclique $\Delta = \frac{T_{haut}}{T_{haut} + T_{bas}}$ de $v_s(t)$ s'écrit :

$$\Delta = 1 - \frac{1 - \alpha}{\alpha} \frac{R_6}{R_1}.$$
16. Quelle est la relation analytique que doivent satisfaire α , R_1 et R_6 pour avoir $\Delta = 0,5$. Dans ces conditions, donner la relation analytique définissant la fréquence f_{osc} des oscillations du montage ? Commenter ce résultat.
17. *Application numérique.*
 On donne : $\alpha = 0,15$, $R_1 = 39 \text{ k}\Omega$, $R_3 = R_4 = 20 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 470 \text{ pF}$.
 Calculer f_{osc} pour V_E égale à 2 V , 7 V et 12 V .

Partie 4 : Discussions

18. On analyse ici qualitativement les défauts et améliorations possibles du montage.
 - 18a. Quel est le rôle du condensateur C_2 ?
 - 18b. Quel est le rôle de la diode D ?
 - 18c. Les AOP ne sont plus supposés idéaux.
 - Rappeler la liste, aussi complète que possible, des défauts des amplificateurs opérationnels. Des ordres de grandeurs de ces défauts pourront être fournis pour appuyer vos affirmations.
 - Parmi ces défauts, quel est celui qui impacte le plus le fonctionnement du montage de la figure 1.

Exercice 2 : Etude d'un amplificateur à transistor bipolaire NPN en petit signal

On considère le montage émetteur commun représenté sur la figure 2. Le gain en courant h_{21} du transistor bipolaire vaut 200 (à la fois en régimes statique et dynamique), et le paramètre h_{11} de son schéma équivalent petit signal vaut 500Ω . On suppose que h_{22} est nul.

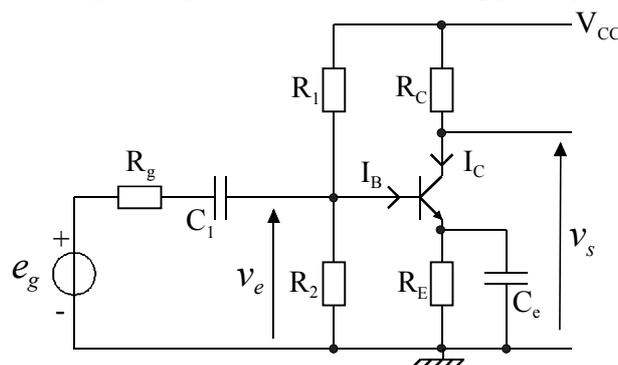


Figure 2. Amplificateur à transistor (comme l'indique ce schéma, il n'y a pas de charge).

- 19.** Déterminer les résistances R_C et R_E pour que les conditions suivantes soient satisfaites :
- En régime statique, le courant de polarisation de collecteur I_c est égal à 10mA,
 - Le gain en tension v_s/v_e vaut -150 lorsque la résistance R_E est totalement découplée (c'est à dire lorsque que le condensateur C_e se comporte comme un court-circuit à la fréquence de travail),
 - Le gain en tension v_s/v_e vaut -15 en l'absence de C_e .

Donner les valeurs numériques de R_C et R_E .

- 20.** Calculer les résistances R_1 et R_2 pour que, en régime statique, le courant de polarisation circulant dans R_1 soit égal à $10 \times I_B$ (I_B désigne le courant de polarisation de base du transistor). On suppose que $V_{CC}=12V$ et $V_{BE}=0,6V$.
- 21.** En l'absence de C_e (R_E non découplée) :
- 21a.** Déterminer l'expression de la résistance d'entrée du montage (notée $R_{entrée}$), à droite de C_1 . Faire l'application numérique.
- 21b.** En déduire l'expression du gain en tension v_e/e_g . Tracer son diagramme de bode asymptotique en module (en dB).
- 21c.** Déterminer l'expression de la fréquence de coupure basse due à C_1 . Faire l'application numérique. On suppose que $R_g=1k\Omega$ et $C_1=1\mu F$.
- 21d.** Expliquer, de manière qualitative, l'action de C_e sur la variation du gain v_s/v_e en fonction de la fréquence.