

C31191

**Ecole Normale Supérieure de Cachan**

61 avenue du président Wilson  
94230 CACHAN

---

Concours d'admission en 3<sup>ème</sup> année  
**GÉNIE ÉLECTRIQUE**  
Session 2011

---

**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<sup>er</sup> 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

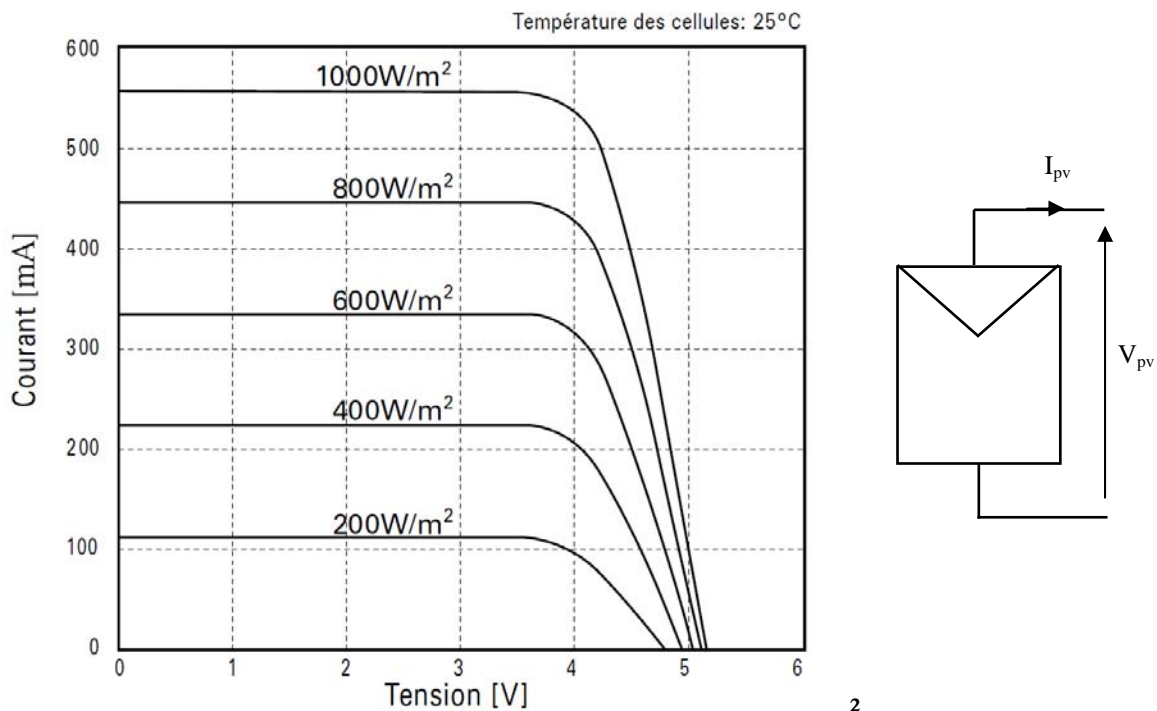
---

La partie électrotechnique se compose de deux problèmes totalement indépendants à peu près équilibrés (barème réparti équitablement entre les deux). Il est vivement recommandé de les traiter tous les deux.

### 1- CHARGEUR DE BATTERIE A PARTIR D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

On propose d'étudier un chargeur de téléphone mobile fonctionnant à partir d'un module photovoltaïque.

On considère un générateur au silicium monocristallin de dimensions 15 cm x 8 cm et dont les caractéristiques électriques dans les conditions standards d'irradiation lumineuse ainsi que le symbole sont donnés ci-dessous :



Le point de puissance maximale à 1000 W/m<sup>2</sup> est défini par les valeurs de la tension et du courant suivantes :

$V_{mpp} = 4,2 \text{ V}$  et  $I_{mpp} = 510 \text{ mA}$  (mpp pour « maximum power point »)

On supposera que les cellules composant le générateur reçoivent toutes la même irradiation lumineuse et que leur température ne varie pas et reste égale à 25°C.

L'accumulateur à recharger est composé d'une cellule Lithium-Ion de capacité égale à 600 mAh et dont la tension  $V_{sto}$  varie avec l'état de charge et la puissance entre 3 et 4,2 V. Cette plage de tension conditionne la structure du régulateur nécessaire, mais pour la suite du problème, on considérera sa tension constante égale à 3,6 V, dans le seul but de simplifier le problème (sa résistance interne vaut 0,1  $\Omega$ , un courant de 500 mA conduirait à une variation de tension de 50 mV que l'on négligera).

## 1.1- Générateur photovoltaïque

### 1.1.1- Analyse des caractéristiques

Sur la base des informations fournies, calculer son rendement au point de puissance maximale.

A votre avis, de quelle technologie photovoltaïque s'agit-il et comment se situe cette valeur de rendement par rapport à celles que l'on pourrait obtenir avec d'autres technologies ?

### 1.1.2- Variation de la puissance

**a-** Tracer un graphique qualitatif montrant l'allure de la courbe de la puissance générée en fonction de la tension pour deux valeurs de puissance incidente : 1000 et 200 W/cm<sup>2</sup> et indiquer approximativement les valeurs des abscisses et ordonnées des deux points de puissance maximale.

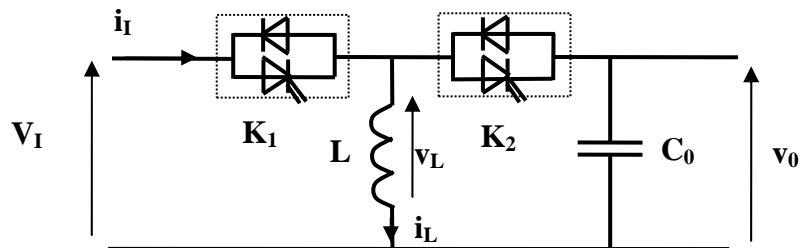
**b-** Calculer la puissance de recharge qui serait obtenue pour ces deux valeurs d'irradiation solaire si l'accumulateur était connecté directement aux bornes du module PV et comparer la avec les valeurs optimales déterminées précédemment.

**c-** Proposer une solution électronique (schéma de principe de la structure de puissance et de régulation) pour récupérer le maximum de puissance.

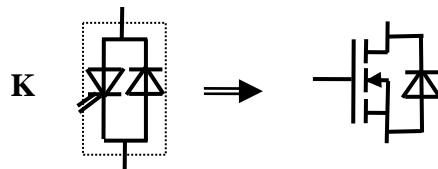
Quel doit-êtr son rendement minimal pour qu'elle soit rentable sur le plan énergétique pour un rayonnement solaire de 1000 W/m<sup>2</sup> ?

## 1.2- Régulateur à découpage

On propose la structure suivante (qui n'est pas nécessairement celle trouvée à la question 1.1.2c) :



Les symboles utilisés pour  $K_1$  et  $K_2$  représentent des interrupteurs unidirectionnels en courant commandés à l'amorçage et au blocage équipés de diodes antiparallèles. D'un point de vue technologique, ils sont réalisés avec des transistors MOS de puissance :



Les interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$  sont commandés complémentaires à fréquence de découpage fixe égale à  $F$ , et l'on appelle  $\alpha$  le rapport cyclique de commande de  $K_1$  tel que :

$$\alpha = \frac{t_{on}}{T} \text{ où } t_{on} \text{ est le temps de conduction et } T \text{ la période de découpage (égale à } 1/F)$$

Par conséquent le rapport cyclique de commande de  $K_2$  vaut  $1-\alpha$ .

### **1.2.1- Etude du fonctionnement aux valeurs moyennes**

En supposant tous les composants du montage idéaux (pas de pertes notamment), établir l'expression de la valeur moyenne  $V_0$  de la tension de sortie  $v_0$  (orientée comme sur le schéma et supposée parfaitement lissée) en fonction de  $V_I$  et de  $\alpha$ .

### **1.2.2- Architecture de puissance**

En considérant la représentation donnée (sur la première figure) pour le générateur photovoltaïque (les conventions de tension et courant étant de type générateur et les signes du courant et de la tension étant positifs), dessiner le schéma de puissance global en prenant soin de bien repérer les polarités du convertisseur et de l'accumulateur.

### **1.2.3- Calcul des ondulations et des éléments de filtrage**

La fréquence de découpage vaut 500 kHz.

a- En supposant la tension de sortie parfaitement lissée, tracer les formes d'onde de la tension  $v_L$  aux bornes de l'inductance et du courant  $i_L$  puis déterminer l'expression de l'ondulation crête à crête  $\Delta i_L$  du courant en fonction de  $V_I$ ,  $\alpha$ ,  $L$  et  $F$ .

b- En raisonnant à tension de sortie imposée (3,6 V) et en supposant que la tension d'entrée varie entre (3,3 V et 4,2 V), déterminer la valeur du rapport cyclique conduisant à la plus forte ondulation de courant dans l'inductance.

Calculer la valeur de l'inductance nécessaire pour que l'ondulation de courant reste inférieure à 200 mA.

c- Déterminer l'expression  $\Delta v_0$  de l'ondulation de tension de sortie dans l'hypothèse où la charge n'est pas assimilable à une source parfaite de tension (il est vivement conseillé de faire ce calcul en utilisant les variations de charge du condensateur sans passer par la détermination de l'expression de la tension instantanée  $v_0$ ). On se placera dans le cas particulier où l'ondulation de courant  $\Delta i_L$  est faible devant le courant de sortie.

Calculer la valeur de la capacité  $C_0$  nécessaire pour que l'ondulation reste inférieure à 50 mV en supposant un fonctionnement au point de puissance maximale et sans pertes.

### **1.2.4- Aspects technologiques**

a- Pourquoi a-t-on utilisé des transistors MOS ?

b- Quel est l'intérêt de cette structure par rapport à un classique buck-boost (à un transistor pour  $K_1$  et une diode pour  $K_2$ ) ?

c- Proposer et justifier des choix technologiques pour le condensateur de sortie et pour l'inductance.

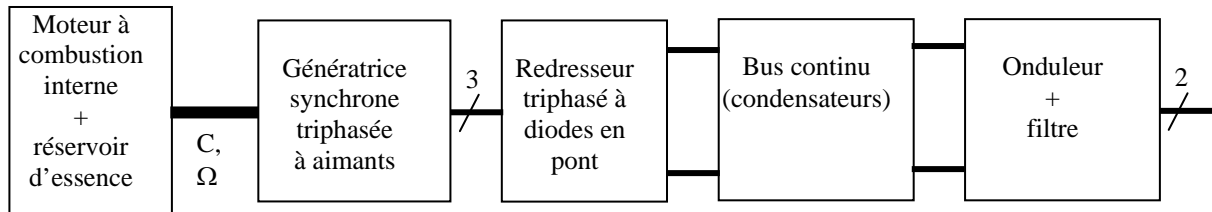
### **1.2.5- Pertes**

a- En supposant que les résistances des MOS à l'état passant et de l'inductance sont telles que :  $r_{dson} = 50 \text{ m}\Omega$  et  $R_L = 50 \text{ m}\Omega$  et en négligeant les autres pertes, calculer le rendement du hacheur au point de puissance maximale. On négligera également les effets de l'ondulation du courant dans l'inductance.

b- Préciser quelles sont les autres pertes négligées.

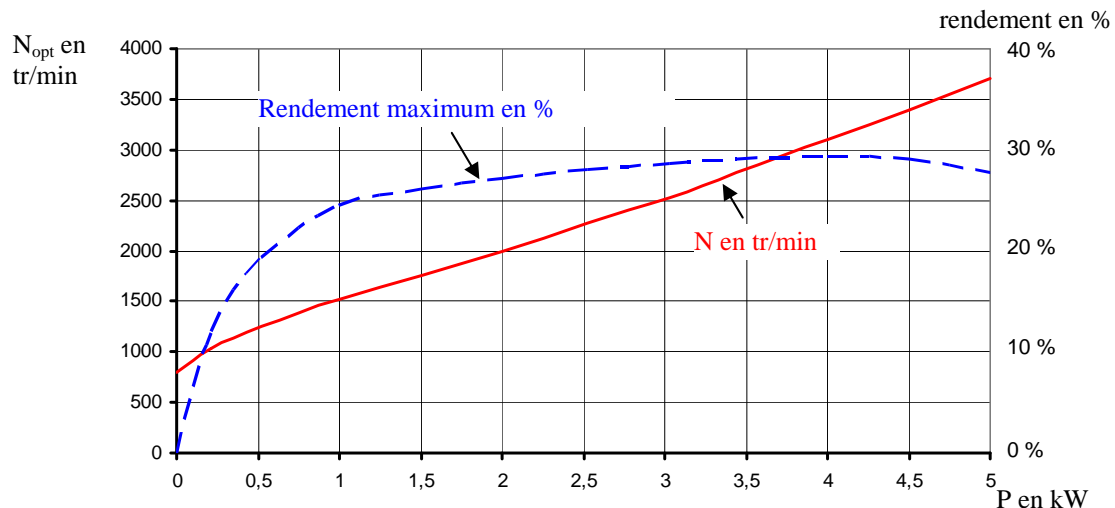
## 2- GROUPE ELECTROGENE A VITESSE VARIABLE

On propose la structure suivante pour réaliser un groupe électrogène 4 kVA monophasé (230 V – 50 Hz) à haut rendement :



C et  $\Omega$  sont respectivement le couple et la vitesse mécaniques sur l'arbre de transmission du moteur à combustion interne (MCI) entraînant la génératrice synchrone à aimants (GSA).  
Moteur à combustion interne (MCI) alternateur à aimants – pont de diodes – onduleur MLI

Les courbes de la vitesse de rotation optimale permettant de maximiser le rendement du moteur à essence et de son rendement maximal sont données sur la figure suivante :



### 2.1- Analyse qualitative

#### 2.1.1- Comparaison avec une architecture classique de groupe électrogène

**a-** Rappeler (ou imaginer) l'architecture de puissance et de contrôle (en précisant les variables de contrôle) d'un tel groupe électrogène classique.

**b-** Effectuer une comparaison des avantages et inconvénients d'une telle architecture par rapport à celle plus conventionnelle d'un groupe électrogène constitué d'un alternateur à excitation séparée entraîné par le même moteur à combustion interne.

#### 2.1.2- Architectures de contrôle

Proposer et justifier une architecture de contrôle des différents composants du système incluant la régulation de vitesse du moteur à combustion interne dans l'objectif de fonctionner au rendement maximum tout en délivrant une tension sinusoïdale d'amplitude et de fréquence régulées.

Le niveau de description demandé des différents blocs s'arrête aux fonctions globales.

## 2.2- Calculs énergétiques

On suppose que le groupe débite sur une charge consommant une puissance active de 3,2 kW pour une puissance apparente de 4 kVA.

Le rendement de la chaîne électrique (de la puissance mécanique entraînant la génératrice jusqu'à la sortie du filtre), en ce point de fonctionnement, vaut 80%.

### 2.2.1- Consommation de carburant au fonctionnement nominal

a- Sur la base d'une valeur énergétique de 12 kWh/kg de l'essence consommée, calculer la consommation horaire (en kg/heure) du groupe.

b- Chaque kg d'essence (d'origine fossile) rejette 3,16 kg de CO<sub>2</sub>. Calculer les rejets de CO<sub>2</sub> par kWh électrique produit par le groupe électrogène.

Qu'en sera-t-il pour un point de fonctionnement à puissance plus faible ?

### 2.2.2- Aspects purement électriques

Après avoir rappelé les définitions des puissances active P et apparente S dans le contexte du sujet (tension sinusoïdale, mais courant éventuellement déformé), expliquer les raisons possibles de leur différence dans l'exemple considéré.

Si la tension sinusoïdale délivrée par l'onduleur a une valeur efficace égale à 230 V, calculer la valeur efficace du courant délivré par le groupe.

## 2.3- Fonctionnement de l'onduleur

L'onduleur est un pont complet à modulation de largeur d'impulsions, il est associé à un filtre LC. On négligera ici les pertes et les chutes de tension de cet ensemble.

On suppose que le rapport cyclique maximal de découpage de l'onduleur peut atteindre 100% et que, par conséquent, la tension crête délivrable est égale à la tension  $U_{dc}$  du bus continu.

### 2.3.1- Contraintes de dimensionnement

a- Représenter la structure électronique de puissance de l'onduleur monophasé.

Quelle doit être la tension minimale du bus continu qui permet de délivrer, dans ces conditions, une tension de valeur efficace 230 V à 50 Hz ?

b- En considérant que la plage de vitesse variable du groupe est comprise entre 1500 et 3500 tr/min et que la tension du bus continu variera exactement dans ces proportions, calculer la plage de variation de la tension du bus continu.

Pour une puissance de sortie active de 3,2 kW et apparente de 4 kVA (le courant consommé par la charge est supposé parfaitement sinusoïdal), déterminer la valeur maximale du courant crête (supposé sinusoïdal) commuté par l'onduleur.

### 2.3.2- Dimensionnement du condensateur du bus continu vis-à-vis des contraintes onduleur

On suppose une modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale idéale dans laquelle les deux bras de pont sont commandés de façon totalement complémentaire (les deux interrupteurs de chaque bras étant eux-mêmes commandés de façon complémentaire).

Le rapport cyclique varie suivant la loi :

$$\alpha(t) = \frac{1}{2} [1 + \alpha_M \sin \omega t]$$

où  $\omega$  est la pulsation de la tension de sortie correspondant au 50 Hz requis.

La valeur moyenne, à l'échelle de la période de hachage, ou valeur moyenne glissante, de la tension de sortie de l'onduleur (avant filtrage) vaut alors :

$$\overline{u_0}(t) = (2\alpha - 1).U_{dc}$$

a- Calculer l'expression de la valeur moyenne glissante de la tension de sortie de l'onduleur en fonction du temps.

Quelle est la valeur de  $\alpha_M$  requise pour obtenir une tension de valeur efficace 230 V si la vitesse de rotation est maximale.

b- Déterminer l'expression de la valeur moyenne glissante du courant en entrée de l'onduleur en fonction de  $\alpha_M$ ,  $I_M$  l'amplitude du courant de sortie et  $\varphi$  son déphasage retard par rapport à la tension sinusoïdale délivrée.

Calculer, pour une valeur efficace du courant de sortie de l'onduleur de 17 A et un déphasage de  $37^\circ$  en retard, sa valeur moyenne sur une période de la sinusoïde 50 Hz et l'amplitude de son premier harmonique.

c- Déterminer les principales caractéristiques du condensateur du bus continu vis-à-vis de ces contraintes pour que l'ondulation de la tension du bus continu reste inférieure à 5 V, on suppose que qu'elle dépend essentiellement de la composante harmonique précédemment déterminée.

## 2.4- Fonctionnement de la génératrice

La machine est branchée en étoile, les caractéristiques de son schéma équivalent monophasé sont les suivantes :

$K_\phi = 1,3 \text{ Wb}$  ( $E = K_\phi \cdot \Omega$  où  $E$  est la valeur efficace de la force électromotrice d'une phase,  $\Omega$  est la vitesse de rotation mécanique en rd/s)

$L = 100 \text{ mH}$

$R = 5 \Omega$

$p = 3$  (nombre de paires de pôles)

### 2.4.1- Diagramme de Fresnel

On suppose, malgré le pont de diodes connecté directement sur le bus continu (sans inductance de lissage), que les courants délivrés par la machine sont sinusoïdaux. On donne la relation suivante qui lie la valeur du courant efficace dans la machine avec la valeur moyenne

du courant en sortie du pont de diodes :  $I_{dc} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} I$ .

Tracer le diagramme de Fresnel qualitatif correspondant à un tel fonctionnement.

Puis calculer les valeurs efficaces des composantes du diagramme de Fresnel liant la tension à la force électromotrice pour le point de fonctionnement où la machine délivre 3,2 kW à 3500 tr/min.

### 2.4.2- Formes d'ondes

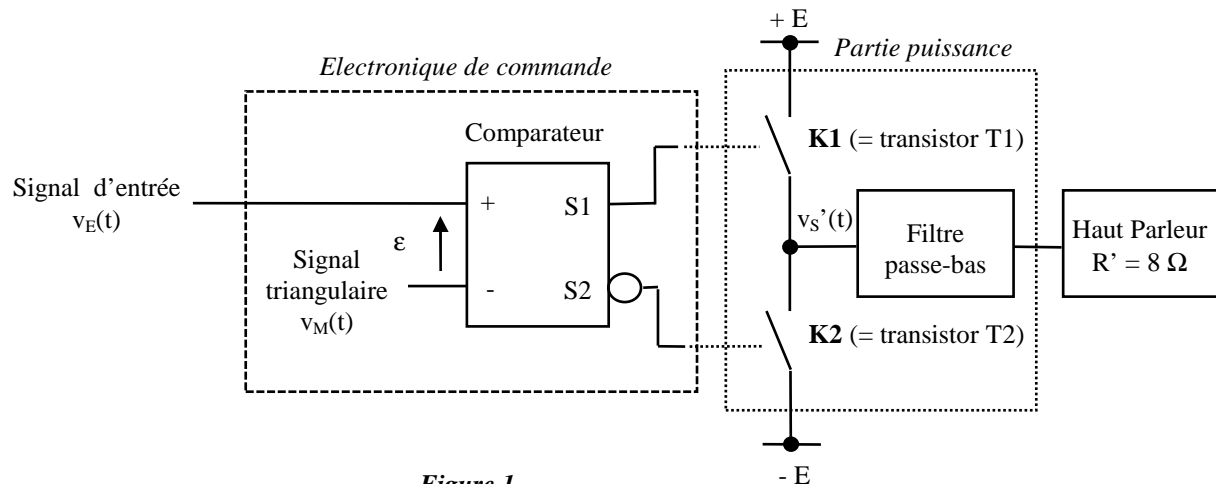
Si les courants sont sinusoïdaux, tracer la forme d'onde de la tension composée aux bornes de la machine débitant sur le pont de diodes triphasé, lui-même connecté à une source de tension  $U_{dc}$  supposée parfaitement constante.

---

*SECONDE PARTIE*  
**- Electronique Analogique -**

---

Cette partie traite de l'étude d'un amplificateur de puissance de classe D (dit également amplificateur à découpage). Celui-ci fonctionne en modulation de largeur d'impulsion (MLI). Le schéma suivant illustre ce que l'on peut trouver dans ce type de système :



*Figure 1*

Cet amplificateur fonctionne par découpage, ce qui veut dire que les deux transistors constituant la partie puissance fonctionnent en bloqué / saturé, et peuvent donc dans l'idéal être représentés par des interrupteurs parfaits (ici notés K1 et K2 sur la figure 1).

Le pilotage de ces transistors est obtenu via une électronique de commande qui génère deux signaux modulés en largeur (on parle de **Modulation de Largeur d'Impulsion** ou MLI). Pour obtenir ces deux signaux, il suffit de comparer un signal triangulaire parfaitement symétrique (valeur moyenne nulle - amplitude  $V_M$  constante - fréquence  $f_M$  constante) au signal d'entrée à amplifier (dans la partie C, on supposera que ce dernier est parfaitement sinusoïdal).

Pour ce qui est du fonctionnement du comparateur, lorsque la tension  $\varepsilon$  est positive, l'interrupteur K1 est fermé et l'interrupteur K2 est ouvert. On a le fonctionnement inverse lorsque la tension  $\varepsilon$  est négative.

Le signal  $v_s'(t)$  après les transistors étant alternativement égal à  $\pm E$  (dans le cas idéalisé), un filtre passe-bas est nécessaire pour retrouver aux bornes du haut parleur, une tension proche au niveau de la forme, de la tension d'entrée.

Remarque importante : les trois parties de ce problème sont totalement indépendantes.

La partie A traite de la réalisation du générateur de signaux triangulaires.

La partie B traite d'une autre technique que celle présentée en figure 1 pour générer le signal MLI, puisque l'on utilisera une structure de type astable.

La partie C traite de l'étude de la MLI, ceci dans un cas de figure assez simple.



## Partie A : Génération de signaux analogiques périodiques.

On se propose d'étudier le montage suivant pour générer le signal triangulaire :

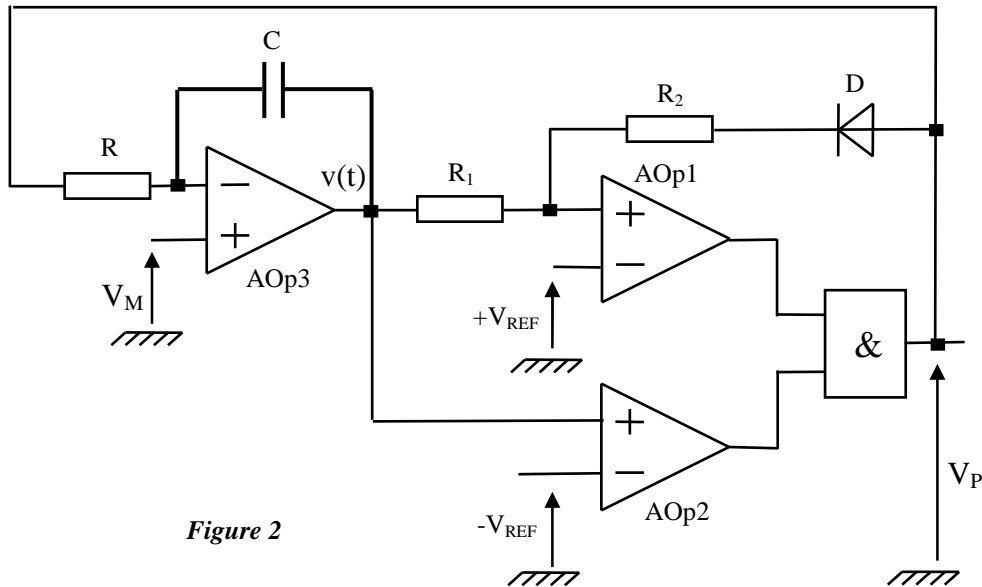


Figure 2

On supposera que tous les amplificateurs opérationnels (notés AOp) sont parfaits. Il en sera de même de la diode D (pas de chute de tension à l'état passant).

Tous les circuits (AOp et porte logique) sont alimentés sous tension symétrique (notée  $\pm V_{CC}$ ). On supposera que ces valeurs de tension sont aussi les tensions maximales que l'on peut avoir en sortie des AOp. Pour ce qui est de la porte logique (ici de type ET - symbole &), la sortie (tension notée  $V_P$ ) sera uniquement à  $+V_{CC}$  lorsque les 2 entrées seront à ce même potentiel. La diode D sera bloquée lorsque  $V_P$  sera égal à  $-V_{CC}$  et conductrice dans le cas contraire. Enfin on suppose que la tension  $V_{REF}$  est constante et comprise entre 0 et  $+V_{CC}/2$ .

- A.1/ Dans le cas où la diode est bloquée, préciser la condition à vérifier sur le potentiel  $v(t)$  (sortie de l'AOp3) pour que la sortie de la porte ET soit égale à  $+V_{CC}$  (on donnera ici la fourchette de tension possible, la tension  $v(t)$  étant comprise entre  $-V_{CC}$  et  $+V_{CC}$ ).
- A.2/ La diode est maintenant conductrice, préciser alors la valeur du potentiel en sortie de l'AOp1. Donner en fonction des éléments du montage (ici  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $V_{CC}$  et  $V_{REF}$ ) la condition à vérifier sur  $v(t)$  pour que la sortie de l'AOp1 change d'état (ou de niveau).
- A.3/ Peut-on vérifier ici la condition précédente si on prend  $R_1$  égale à  $10\text{ k}\Omega$  et  $R_2$  égale à  $2,2\text{ k}\Omega$  ? Quel est le circuit qui permet le changement de niveau en sortie de la porte logique dans ce cas (indiquer le niveau de  $v(t)$  qui permet ce basculement) ?
- A.4/ Exprimer le courant dans la résistance R en fonction de R,  $V_M$  et  $V_{CC}$  dans les deux situations possibles ici (on supposera que la tension  $V_M$  est constante et comprise entre 0 et  $+V_{CC}$ ). En déduire pour chaque cas, l'évolution du potentiel  $v(t)$  (donner les équations temporelles de  $v(t)$  sans se soucier pour l'instant des conditions initiales).
- A.5/ En supposant  $V_M$  nulle et  $V_{REF}$  égale à  $V_{CC}/2$  pour cette question, tracer en correspondance les chronogrammes de  $v(t)$  et de  $V_P(t)$  pour une période de fonctionnement (on notera bien les valeurs extrêmes du signal  $v(t)$  sur ces graphes).

- A.6/ Après avoir détaillé les différentes étapes de calcul, donner l'expression de la période du signal  $v(t)$ . Exprimer également la valeur du rapport cyclique pour le signal  $V_P$ .  
A quoi peut alors servir l'entrée  $V_M$  ?

### Partie B : Montage astable à amplificateur opérationnel.

On se propose d'étudier le montage de type astable à amplificateur opérationnel dont le schéma est donné ci-dessous :

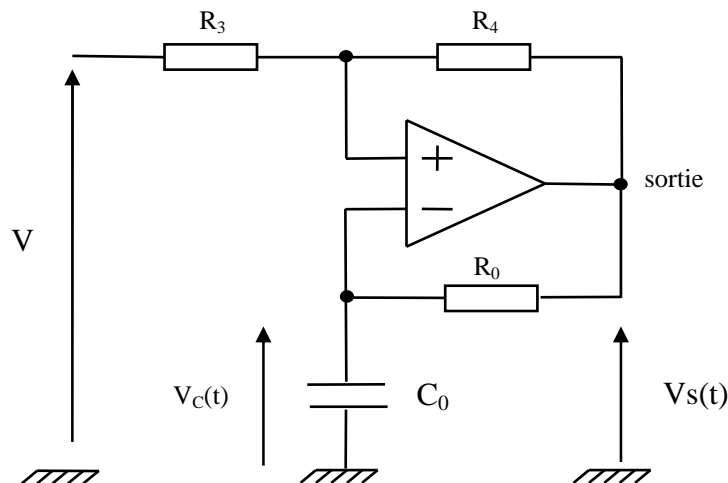


Figure 3

L'amplificateur opérationnel est supposé parfait et est alimenté sous tension symétrique (notée  $\pm V_{CC}$ ). On supposera que ces valeurs de tension sont aussi les tensions maximales que l'on peut avoir en sortie de l'AOp. La tension  $V$  est constante (elle servira de paramètre de réglage par la suite).

- B.1/ En supposant pour cette question que l'on enlève la résistance  $R_0$  et le condensateur  $C_0$  du montage, donner la caractéristique  $V_S$  fonction de  $V_C$  (ce dernier étant le potentiel sur l'entrée inverseuse). On tracera le graphe correspondant pour  $V$  égale à 0 volt et on précisera la valeur des seuils, niveaux et sens de parcours. Quel est l'effet de  $V$  sur la position et la largeur de la fenêtre d'hystérésis ?
- B.2/ Le fonctionnement de l'ensemble est de type astable, calculer pour le régime permanent, le temps pendant lequel la sortie est à  $+V_{CC}$  (temps noté  $T_h$ ) et le temps pendant lequel cette dernière est à  $-V_{CC}$  (temps noté  $T_b$ ). On posera clairement les équations permettant d'arriver au résultat, en détaillant les différentes étapes de calculs. Exprimer alors  $T_h$  et  $T_b$  en fonction de  $R_0$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $C_0$ ,  $V_{CC}$  et  $V$ .
- B.3/ Dédurre du calcul précédent, l'expression de la période du signal de sortie et du rapport cyclique (rapport temps à l'état haut sur la période).
- B.4/ Dans le cas où  $V$  est égale à 0 volt, et pour  $R_3$  égale à  $R_4$ , tracer en correspondance les graphes de  $V_S(t)$  et  $V_C(t)$  en précisant les valeurs particulières.
- B.5/ En pratique, on choisit  $R_4$  égale à 100 fois  $R_3$  dans ce montage. Redonner alors les expressions de la période et du rapport cyclique du signal de sortie (ces expressions ne doivent faire intervenir que les termes  $R_0$ ,  $C_0$ ,  $V_{CC}$  et  $V$ ).

- B.6/ Donner la valeur du rapport cyclique et de la fréquence pour  $V$  égale à -4 volts, -2 volts, 0 volt, +2 volts et +4 volts. Pour cela on prendra pour valeurs numériques,  $V_{cc}$  égale à 9 volts,  $R_0$  égale à 1 k $\Omega$  et  $C_0$  égale à 100 nF.

### **Partie C : Etude de la MLI (cas où le rapport $m$ est égal à 5) :**

On suppose (voir la figure 1) que le signal d'entrée est parfaitement sinusoïdal (amplitude  $V_E$  et fréquence  $f$ ). Le signal triangulaire est parfaitement symétrique (valeur moyenne nulle - amplitude  $V_M$  constante - fréquence  $f_M$  constante). On notera  $m$  l'indice de modulation égal au rapport de  $f_M$  sur  $f$ , et on supposera pour la suite que  $V_E$  est égale à 0,8 fois  $V_M$ .

- C.1/ Dessiner pour  **$m$  égal à 5** et pour une période  $T$  de fonctionnement ( $T=1/f$ ), les chronogrammes de la tension sinusoïdale et de la tension triangulaire. En correspondance, donner le graphe de la tension après les transistors (tension notée  $v'_s(t)$  sur la figure 1). On supposera ici à  $t = 0$ , que le signal triangulaire est nul et est d'abord croissant. Il en sera de même pour le signal sinusoïdal (on parle de « **synchronicité** »).
- C.2/ Sachant que la période  $T$  correspond à un angle de 360°, donner les équations qui permettent de déterminer les deux premières valeurs de l'angle  $\theta$  (différentes de 0), qui correspond aux premières commutations (angles exprimés en degré). On notera  $\theta_1$  et  $\theta_2$  ces deux valeurs que vous devrez ici calculer (calculatrice quasi indispensable !).
- C.3/ En tenant compte des symétries et des particularités du signal  $v'_s(t)$ , donner la décomposition en série de Fourier du signal  $v'_s(t)$  (à exprimer en fonction de  $E$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  et de  $k$  rang de l'harmonique).
- C.4/ Calculer pour  $k$  compris entre 1 et 10, la valeur de l'amplitude de chaque composante du signal  $v'_s(t)$ . On supposera que  $E$  est égale à 25 Volts.
- C.5/ Donner la formule permettant de calculer la distorsion harmonique du signal  $v'_s(t)$ . Simplifier éventuellement cette expression (ou la présenter sous une autre forme) et donner la valeur de la distorsion dans ce cas.
- C.6/ Tracer le spectre du signal  $v'_s(t)$  en ramenant « l'amplitude » du fondamental à 100 %.

Fin de la partie Electronique Analogique.