

Enoncés

1

On étudie le montage de la figure ci contre ou :

- L'A.O.P est polarisé par les tensions $\pm U_{DD} = \pm 15 \text{ V}$.

- Le générateur BF délivre à l'entrée de l'amplificateur une tension u_E triangulaire.

- Les résistors ont des résistances $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$.

1- Monter que le montage utilisé est un comparateur à deux seuils de basculement.

2- Quelles valeurs peut prendre la tension de sortie u_S .

3- Décrire ce qu'on observe sur l'écran de l'oscilloscope si :

a- $u_E(t)$ est une tension triangulaire d'amplitude $U_{em} = 2 \text{ V}$

b- $u_E(t)$ est une tension triangulaire d'amplitude $U_{em} = 9 \text{ V}$. Représenter dans ce cas ce qu'on observe sur l'oscilloscope en passant en mode XY.

4- On élimine par la suite le GBF et on insère dans le circuit un dipôle RC ou $R = 10 \text{ k}\Omega$ et $C = 10 \text{ nF}$. On obtient le montage de la figure ci-contre :

a- Quel est le rôle joué par le dipôle RC ?

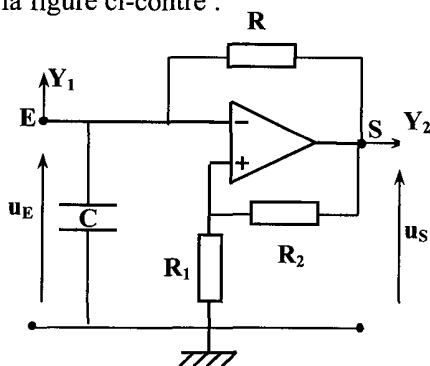
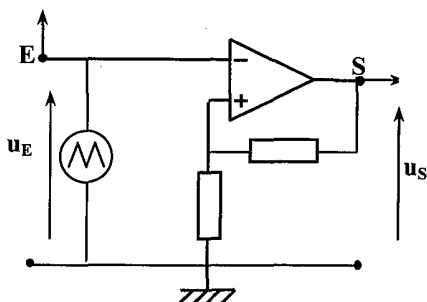
b- Etablir l'équation différentielle qui régie les variations de u_C .

c- Quelle est la solution de cette équation différentielle ?

d- Représenter l'allure des tensions u_C et u_S observées sur l'écran de l'oscilloscope.

e- Trouver l'expression de la période T du signal de sortie. En déduire sa valeur.

f- Déterminer la valeur du rapport cyclique de ce multivibrateur.



2

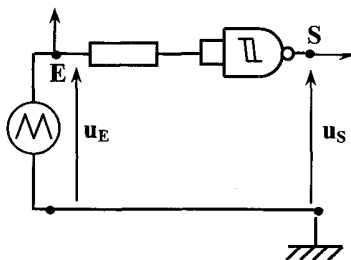
On étudie le montage de la figure ci-contre avec :

- Une porte logique CMOS 4093 montée en inverseur, et polarisée par une tension $U_{DD} = 12 \text{ V}$.

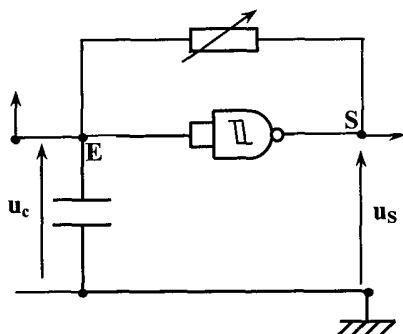
- Un générateur BF délivre à l'entrée de la porte une tension u_E triangulaire.

- Un résistor de résistance $R = 180 \text{ k}\Omega$.

1- Monter que le montage utilisé est un comparateur à deux seuils de basculement.



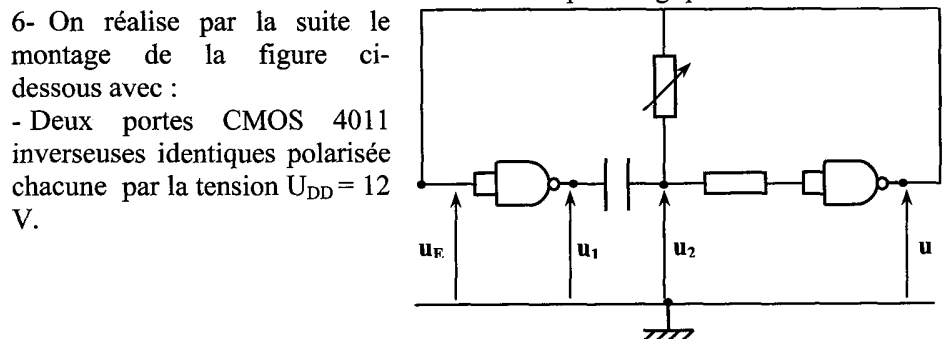
- 2- Quelles valeurs peut prendre la tension de sortie u_s .
- 3- Décrire ce qu'on observe sur l'écran de l'oscilloscope si :
 - a- $u_e(t)$ est une tension triangulaire d'amplitude $U_{em} = 2V$
 - b- $u_e(t)$ est une tension triangulaire d'amplitude $U_{em} = 9V$. Représenter dans ce cas ce qu'on observe sur l'oscilloscope en passant en mode XY.
- 4- On élimine par la suite le GBF et on insère dans le circuit un dipôle RC où R est fixée à $10k\Omega$ et $C = 10\text{ nF}$. On obtient le montage de la figure ci-contre :
 - a- Quel est le rôle joué par le dipôle RC ?
 - b- Etablir l'équation différentielle qui régie les variations de u_c .
 - c- Quelle est la solution de cette équation différentielle ?
 - d- Trouver l'expression de la période T du signal de sortie. En déduire sa valeur.
 - e- Déterminer la valeur du rapport cyclique de ce multivibrateur.
 - f- Représenter l'allure des tensions u_c et u_s observées sur l'écran de l'oscilloscope.



3

On étudie le montage formé par :

- Une porte logique CMOS 4011 inverseuse et polarisée par une tension $U_{DD} = 12\text{ V}$.
 - Un générateur BF délivre à l'entrée de la porte une tension u_E triangulaire.
 - Un résistor de résistance $R = 10\text{ k}\Omega$ inséré entre le GBF et la porte.
- 1- Faire le schéma du montage.
 - 2- Monter que le montage utilisé est un comparateur à un seul seuil de basculement.
 - 3- Quelles valeurs peut prendre la tension de sortie u_s .
 - 4- Décrire ce qu'on observe sur l'écran de l'oscilloscope si :
 - a- $u_e(t)$ est une tension triangulaire d'amplitude $U_{em} = 2V$
 - b- $u_e(t)$ est une tension triangulaire d'amplitude $U_{em} = 9V$. Représenter dans ce cas ce qu'on observe sur l'oscilloscope en passant en mode XY.
 - 5- Peut-on réaliser un multivibrateur avec cette porte logique. Justifier.



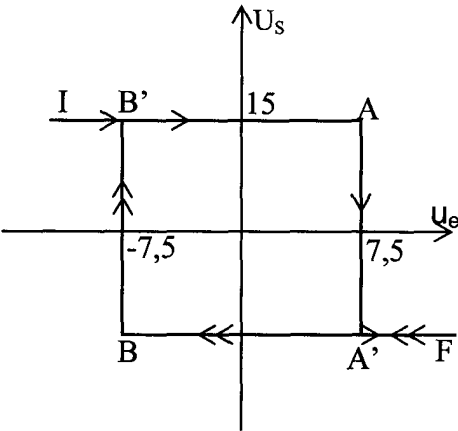
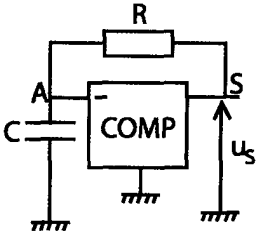
- Un condensateur de capacité $C = 10\text{ nF}$.
- Un résistor de résistance $R_p = 470\text{ k}\Omega$.

Tracer les chronogrammes de u ; u_1 ; u_2 ; u_c et u_{E1}



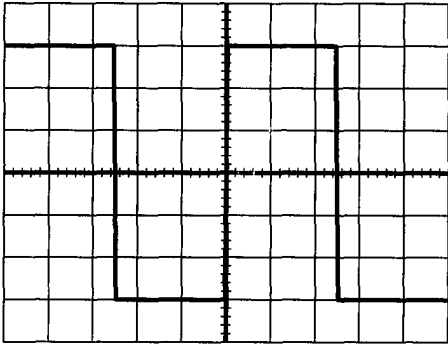
Le multivibrateur est un générateur de signaux non sinusoïdaux. il formé d'un comparateur inverseur et d'un réservoir d'énergie comme l'indique la figure ci-contre :

1. Préciser le dipôle qui joue le rôle de réservoir d'énergie dans le multivibrateur.
2. Donner les grandeurs caractéristiques d'un multivibrateur.
3. La caractéristique de transfert $u_s = f(u_e)$ du comparateur est donnée par le graphe de la figure ci dessous :



Indiquer les tensions de basculement E_{HB} et E_{BH} du comparateur.

4. La tension délivrée par le multivibrateur est donnée par la figure 2



- a- Représenter sur le graphe de la figure ci-dessus la tension $u_c(t)$; tension aux bornes du condensateur.
- b- Calculer graphiquement la période T et le rapport cyclique du multivibrateur sachant que la sensibilité horizontale est de $0,1\text{ms/div}$
- c- On montre que pour ce multivibrateur sa période s'écrit $T = 2RC \text{ Log}3$; calculer la capacité C du condensateur si $R = 1\text{k}\Omega$.



On considère le multivibrateur astable suivant constitué par un comparateur à amplificateur opérationnel, où $U_S = \pm V_{DD} = \pm 12\text{ V}$ et $R_1 = R_2 = 10\text{ k}\Omega$.

1) a- Déterminer l'expression du potentiel U_1 de l'entrée non inverseuse de l'amplificateur opérationnel par rapport à la masse, en fonction de R_1 , R_2 et U_S .

b- Déterminer les expressions des tensions d'entrée seuils qui provoquent le basculement de la tension de sortie d'un niveau à l'autre.

2) Etablir l'équation différentielle en fonction de la tension $u_c(t)$ aux bornes du condensateur.

3) Déterminer l'expression de la tension $u_c(t)$ aux bornes du condensateur. On suppose qu'à $t = 0$, le condensateur est chargé sous la tension U_i et que la tension de sortie est au niveau haut.

4) a- Déterminer, T_1 temps d'établissement du niveau haut et T_2 temps d'établissement du niveau bas de la tension de sortie.

b- Dédire la période T du signal de sortie U_S , en fonction de R_1 , R_2 , R et C .

c- Calculer le rapport cyclique δ du multivibrateur.

5) Déterminer la valeur de la capacité C du condensateur à prendre permettant d'avoir une fréquence d'oscillation de 100 Hz , sachant que $R = 5\text{ k}\Omega$.

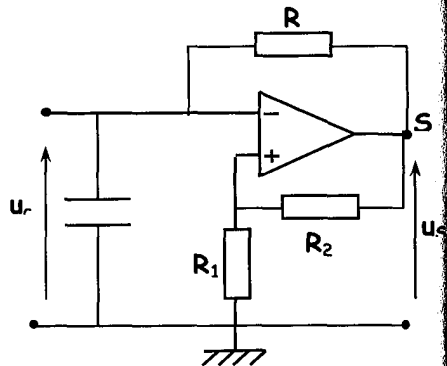
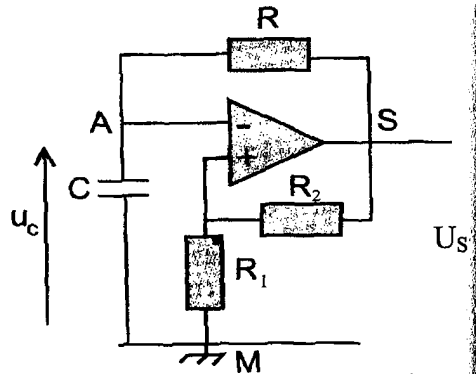
6) Représenter sur le même graphe et à l'échelle les chronogrammes de $u_c(t)$ et $u_s(t)$ sur deux périodes.



On réalise le multivibrateur schématisé sur la figure ci-contre où $C=10^{-7}\text{F}$, $R_1=R_2=R=10\text{k}\Omega$ et l'amplificateur opérationnel, considéré idéal, est polarisé par les tensions symétriques

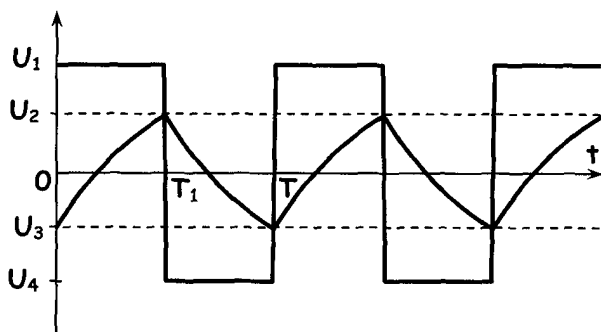
$\pm U_{\text{sat}} = \pm 15\text{V}$.

1- Identifier dans ce montage les deux constituants principaux du multivibrateur.



2- Établir l'équation différentielle vérifiée par la tension u_c aux bornes du condensateur.

3- Les chronogrammes des tensions d'entrée u_c et de sortie u_s , sont données par la figure ci- dessous.



- Donner les valeurs des tensions indiquées sur le graphe.
- Déterminer l'expression de la tension u_c au cours de la phase de charge qui se produit dans l'intervalle de temps $[0, T_1]$.
- En déduire la durée, du niveau haut.
- Déterminer l'expression de la tension u_c au cours de la phase de décharge qui se produit dans l'intervalle de temps $[T_1; T]$.
- En déduire la période et la fréquence N de la tension de sortie u_s .
- Calculer le rapport cyclique de ce multivibrateur.

Corrigés

1

1. Dans la maille : MABM

$$u_e + \varepsilon - R_1 i = 0$$

$$\Rightarrow \varepsilon = R_1 i - u_e$$

Dans la maille MASM :

$$u_s - (R_1 + R_2) i = 0$$

$$\Rightarrow i = \frac{u_s}{R_1 + R_2}$$

Ce qui donne $\varepsilon = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_s - u_e$

Or d'après la caractéristique de transfert d'un AOP idéal

- Si $\varepsilon > 0 \Rightarrow u_s = u_{sat}$

$$\Rightarrow \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{sat} - U_e > 0 \Rightarrow U_e < \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{sat} = \beta U_{sat} \text{ avec } \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

- Si $\varepsilon < 0 \Rightarrow u_s = -U_{sat}$

$$\Rightarrow -\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{sat} - U_e < 0 \Rightarrow U_e > -\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{sat} = -\beta U_{sat}$$

Ainsi : si $u_e < V_{b2} = \beta U_{sat}$ la tension de sortie $u_s = U_{sat}$

si $u_e > V_{b1} = -\beta U_{sat}$ la tension de sortie $u_s = -U_{sat}$

D'où le montage joue le rôle d'un comparateur à deux seuils de basculement.

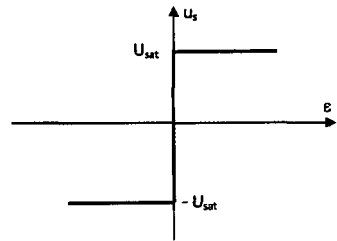
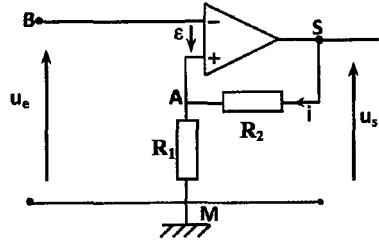
2. U_s ne peut prendre que deux valeurs possibles $+U_{sat}$ si $U_e < V_{b2}$

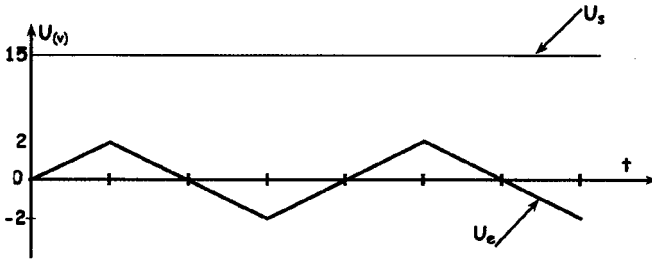
et $-U_{sat}$ si $U_e > V_{b1}$

3.

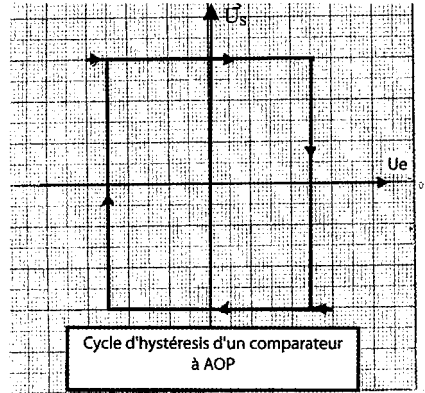
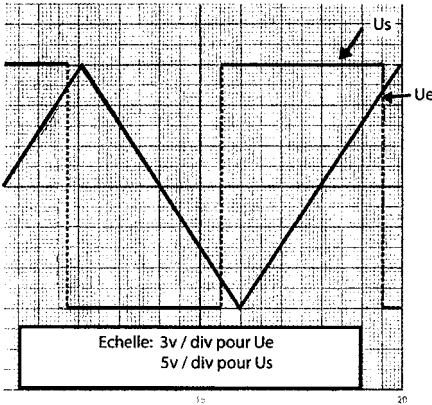
a. $U_{em} = 2V < V_{b2} = \beta U_{sat} = 7,5V$ avec $\beta = \frac{1}{2}$

D'où $U_s = +U_{sat}$





b. $U_{em} = 9V > \beta U_{sat} = 7,5V$ alors sur l'écran de l'oscilloscope on observe :



Oscilloscope en mode XY

4. a. Le circuit obtenu est celui d'un multivibrateur astable dont le réservoir d'énergie est le dipôle RC.

b. Dans la maille MASM

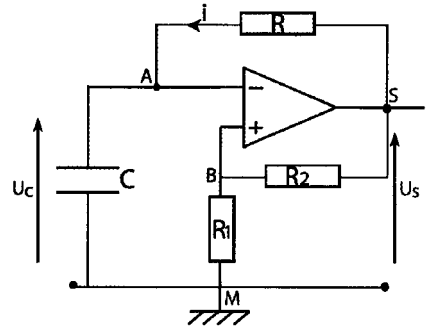
$$u_c + u_R - u_s = 0$$

$$\Rightarrow u_c + Ri = u_s$$

$$\text{Or } i = \frac{dq}{dt} = C \cdot \frac{du_c}{dt}$$

$$\text{Ce qui donne } u_c + RC \frac{du_c}{dt} = u_s :$$

équation différentielle en u_c .

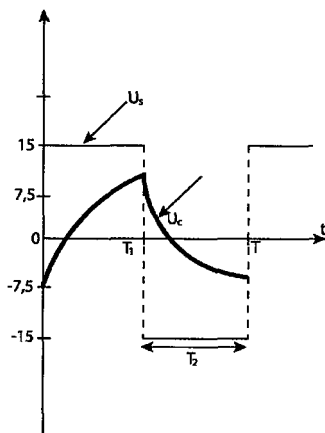


c. Cette équation différentielle admet une solution de forme $u_c(t) = Ae^{\frac{-t}{\tau}} + B$ avec $\tau = RC$

$$\left. \begin{array}{l} \text{à } t=0 \quad u_c(i) = A + B \\ t=\infty \quad u_c(f) = B \end{array} \right\} \Rightarrow A = u_c(i) - u_c(f)$$

D'où $u_c(t) = [u_c(i) - u_c(f)] e^{-\frac{t}{RC}} + u_c(f)$.

d.



e. la tension u_c va varier entre $V_{b1} = -7,5V$ et $V_{b2} = 7,5V$

Au cours de la charge : u_c croît de V_{b1} vers V_{b2} en visant U_{sat}

$$\Rightarrow u_c(T_1) = V_{b2} ; u_c(i) = V_{b1} \text{ et } u_c(f) = U_{sat}$$

$$D'où \quad e^{-\frac{T_1}{RC}} = \frac{u_c(T_1) - u_c(f)}{u_c(i) - u_c(f)} = \frac{7,5 - 15}{-7,5 - 15} = \frac{1}{3}$$

$$\Rightarrow T_1 = RC \ln 3.$$

- Au cours de la décharge :

$$u_c(T_2) = V_{b1} = -7,5V ; u_c(i) = V_{b2} = 7,5 \text{ et } u_c(f) = -15$$

$$\text{Ce qui donne } e^{-\frac{T_2}{RC}} = \frac{u_c(T_2) - u_c(f)}{u_c(i) - u_c(f)} = \frac{-7,5 + 15}{7,5 + 15} = \frac{1}{3}$$

$$\Rightarrow T_2 = RC \ln 3$$

$$T = T_1 + T_2 = 2RC \ln 3$$

$$\text{AN } T = 2 \times 10^{-3} \times 10^{-9} \ln 3 = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

f. Le rapport cyclique du multivibrateur est

$$\delta = \frac{T_H}{T} = \frac{T_1}{T} = \frac{RC \ln 3}{2RC \ln 3} = 0,5$$



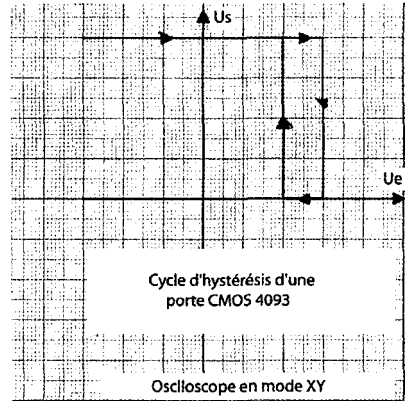
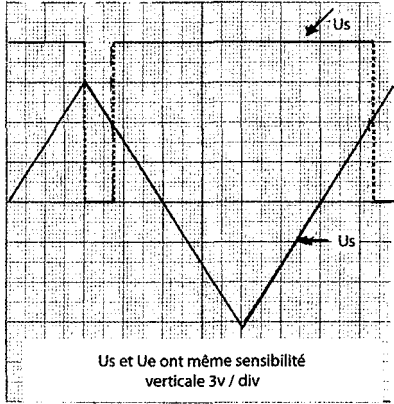
1. La porte CMOS 4093 a deux seuils de basculements

$V_{b1} = \frac{1}{2}U_{dd}$ et $V_{b2} = \frac{3}{4}U_{dd}$ d'où ce montage joue le rôle d'un comparateur à deux seuils de basculement.

2. La tension de sortie de ce montage ne peut prendre que les valeurs

$$U_{dd} = U_s \text{ si } U_e < V_{b_2} = \frac{3}{4}U_{dd} \text{ et } 0 = U_s \text{ si } U_e > V_{b_1} = \frac{1}{2}U_{dd}$$

3. a. Si $U_{em} = 2V < \frac{3}{4}U_{dd} = 9V$ ce qui donne $U_s = U_{dd} = 12V$ dans ce cas ce circuit ne joue pas le rôle de comparateur à deux seuils



4. a. Le dipôle RC joue dans ce cas le rôle du réservoir d'énergie du multivibrateur astable.

b. Dans la maille MESM :

$$u_c - u_R - u_c = 0 \Rightarrow u_c + Ri = u_s$$

$$\text{or } i = \frac{dq}{dt} = c \cdot \frac{duc}{dt} \text{ ce qui donne } u_c + RC \frac{duc}{dt} = U_s$$

c. Cette équation différentielle admet une solution de la forme

$$u_c(+) = Ae^{\frac{t}{\tau}} + B \text{ avec } C = RC \text{ une étude analogue à l'exercice précédent}$$

$$\text{donne } u_c(+) = [u_c(i) - u_c(f)] e^{\frac{t}{\tau}} + u_c(f)$$

d. Pendant la durée T_1 de l'état haut, le condensateur se charge

$$u_c(T_1) = \frac{3}{4}U_{dd} = 9V$$

$$u_c(i) = \frac{1}{2}U_{dd} = 6V \text{ et } u_c(f) = U_{dd} = 12V$$

$$e^{\frac{T_1}{\tau}} = \frac{u_c(T_1) - u_c(f)}{u_c(i) - u_c(f)} = \frac{9 - 12}{6 - 12} = \frac{1}{2}$$

D'où $T_1 = RCLn2$

Pendant la durée T_2 de l'état bas, le condensateur se décharge

$$u_c(T_2) = \frac{1}{2}U_{dd} = 6V$$

$$u_c(i) = \frac{3}{4}U_{dd} = 9V \text{ et } U_c(f) = 0$$

$$\text{D'où } e^{-\frac{T_2}{\tau}} = \frac{u_c(T_2) - u_c(f)}{u_c(i) - u_c(f)} = \frac{6 - 0}{9 - 0} = \frac{2}{3}$$

$$\text{D'où } T_2 = RCLn\frac{3}{2}$$

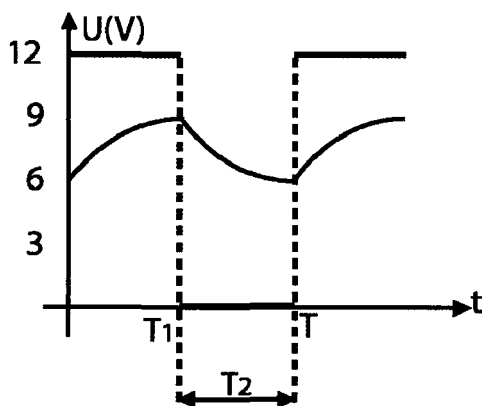
$$\text{La période } T = T_1 + T_2 = RCLn2 + RCLn\frac{3}{2}$$

$$T = RCLn3$$

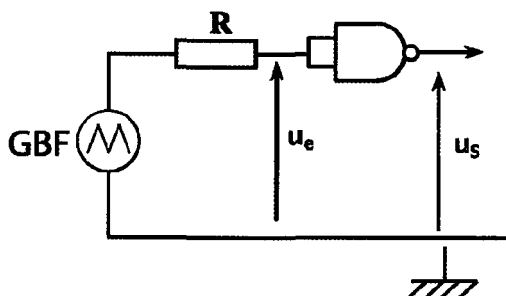
$$\text{AN } T = 10.10^3 \times 10.10^{-9} Ln3 \approx 1,1.10^{-4} \text{ S}$$

e. Le rapport cyclique de ce multivibrateur est $\delta = \frac{T_1}{T} = \frac{RCLn2}{RCLn3} = 0,63$

f.



1.



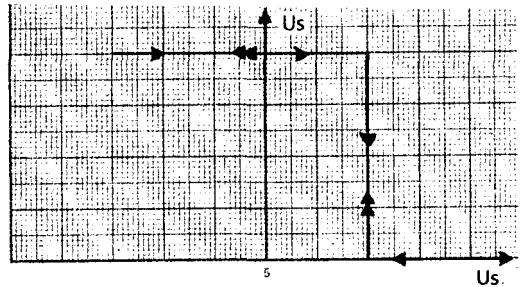
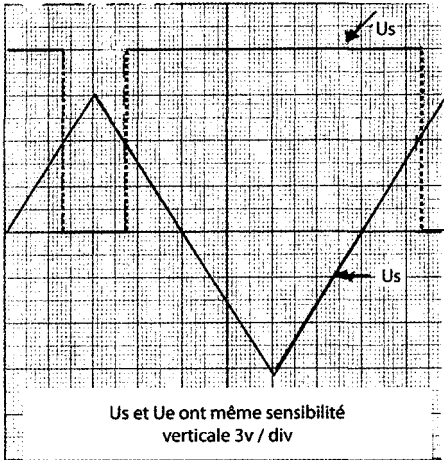
2. La porte CMOS 4011 à un seuil de basculement $V_b = \frac{U_{DD}}{2}$ donc le montage joue le rôle d'un comparateur à un seul seuil de basculement.

3. La tension de sortie u_s peut prendre les valeurs

$$u_s = U_{dd} \text{ si } u_e < \frac{U_{DD}}{2} \text{ et } u_s = 0 \text{ si } U_e > \frac{U_{DD}}{2}$$

4. a. même observation que la porte CMOS 4093.

b.



Oscilloscope en mode XY

5. Un multivibrateur est constitué d'un comparateur à deux seuils de basculement, or la porte CMOS 4011 à seul seuil de basculement donc avec une seule porte logique CMOS 4011 on ne peut pas réaliser un multivibrateur. On peut réaliser un multivibrateur à l'aide de deux portes CMOS 4011.

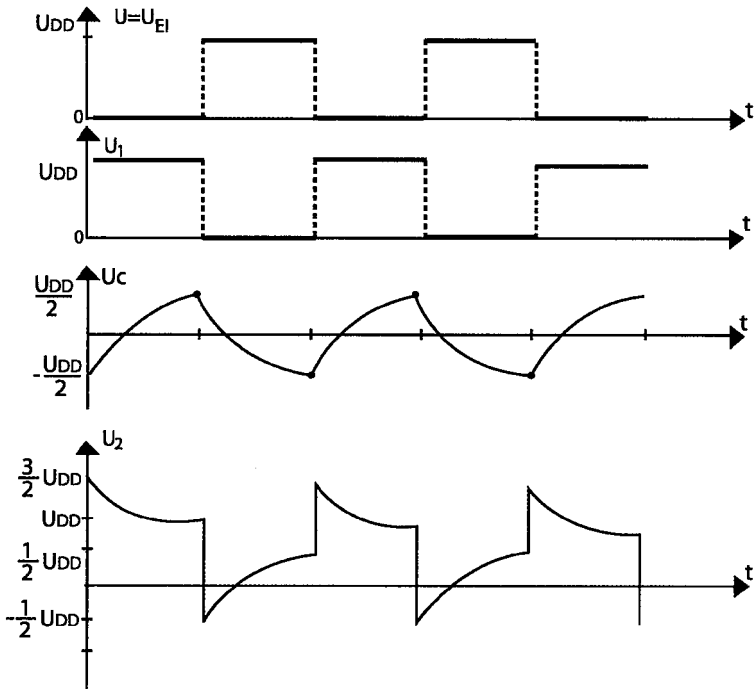
6. Ce montage joue le rôle d'un multivibrateur astable.

. Les points A et B sont même potentiel $\Rightarrow u_{E1} = u$

$$u_c = \text{varie entre } -\frac{U_{DD}}{2} \text{ et } \frac{U_{DD}}{2}$$

$$u_2 = u_1 - u_c$$

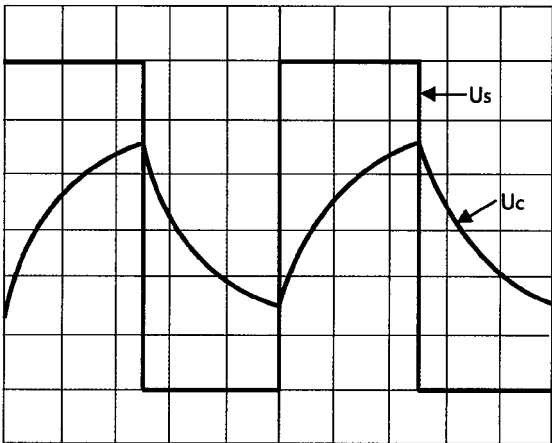
Ainsi :



4

1. Le dipôle RC est le réservoir d'énergie dans le multivibrateur.
2. Un multivibrateur est caractérisé par :
 - sa période T
 - son rapport cyclique δ
3. $E_{HB} = 7,5\text{ V}$ et $E_{BH} = -7,5\text{ V}$

4. a.



b. $T = 5 \times 0,1 \text{ ms} = 0,5 \text{ ms}$

$$\delta = \frac{T_1}{T} = 0,5$$

c. $T = 2RCLn3 \Rightarrow C = \frac{T}{2RLn3} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^3 Ln3} = 2,28 \cdot 10^{-7} \text{ F}$



1.a

$$U_1 = R_1 i_2$$

$$U_s = (R_1 + R_2) i_2$$

$$\Rightarrow i_2 = \frac{U_s}{R_1 + R_2}$$

D'où $U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_s$

b. $U_2 = U_1 - \varepsilon \Rightarrow \varepsilon = U_1 - U_2$ avec U_2 la tension d'entrée

$$\Rightarrow \varepsilon = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_s - u_2$$

Ainsi. Si $\varepsilon > 0$, $u_s = +U_{sat} \Rightarrow \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{sat} - u_2 > 0$

Ce qui donne $u_2 < \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{sat} = V_{b_2}$

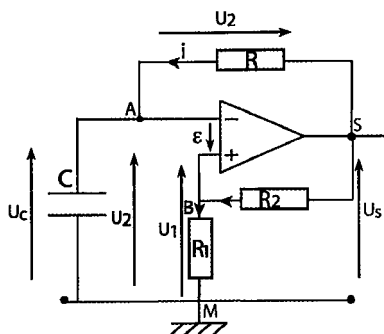
Si $\varepsilon < 0$, $u_s = -U_{sat} \Rightarrow -\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{sat} - U_2 < 0$

Ce qui donne $U_2 > -\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{sat} = V_{b_1}$

2. $u_s - u_R - u_c = 0 \Rightarrow u_c + Ri = U_s$ or $i = \frac{dq}{dt}$

et $q = c \cdot u_c \Rightarrow i = c \cdot \frac{duc}{dt}$ d'où

$$u_c + RC \frac{duc}{dt} = u_s$$



$$3. u_c(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + B$$

$$\left. \begin{array}{l} At=0 \quad u_c(i) = A+B \\ At=\infty \quad u_c(f) = B \end{array} \right\} \Rightarrow u_c(t) = [U_c(i) - u_c(f)]e^{-\frac{t}{\tau}} + U_c(f) \quad \text{avec} \quad \tau = RC$$

4. a. * Dans l'intervalle $[0, T_1]$ le condensateur se charge :

$$u_c(i) = V_{b_1} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{sat}$$

$$u_c(f) = U_{sat} \quad \text{et} \quad u_c(T_1) = V_{b_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{sat}$$

$$\text{D'où} \quad e^{-\frac{T_1}{\tau}} = \frac{u_c(T_1) - u_c(f)}{u_c(i) - u_c(f)} = \frac{V_{b_2} - U_{sat}}{V_{b_1} - U_{sat}}$$

$$T_1 = RCLn \frac{V_{b_1} - U_{sat}}{V_{b_2} - U_{sat}}$$

* Dans l'intervalle $[T_1, T] = T_2$ le condensateur se décharge

$$u_c(i) = V_{b_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{sat}$$

$$u_c(f) = -U_{sat} \quad \text{et} \quad u_c(T_2) = V_{b_1} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{sat}$$

$$\text{D'où} \quad e^{-\frac{T_2}{\tau}} = \frac{u_c(T_2) - u_c(f)}{u_c(i) - u_c(f)} = \frac{V_{b_1} + U_{sat}}{V_{b_2} + U_{sat}}$$

$$T_2 = RCLn \frac{V_{b_2} + U_{sat}}{V_{b_1} + U_{sat}}$$

$$\text{b.} \quad T = T_1 + T_2 = RCLn \frac{V_{b_1} - U_{sat}}{V_{b_2} - U_{sat}} + RCLn \frac{V_{b_2} + U_{sat}}{V_{b_1} + U_{sat}}$$

$$T = RCLn \left[\frac{(-2R_1 - R_2)(2R_1 + R_2)}{(-R_2)(R_2)} \right]$$

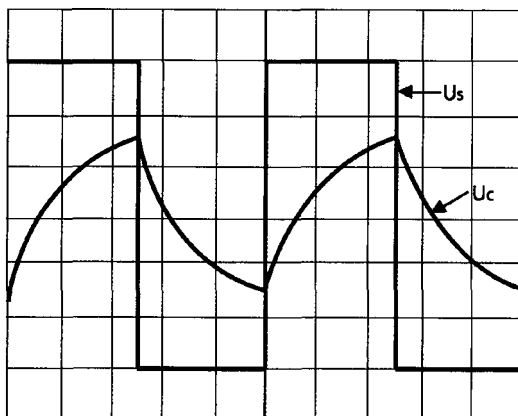
$$T = 2RCLn \frac{2R_1 + R_2}{R_2}$$

C. Le rapport cyclique $\delta = \frac{T_1}{T} = \frac{RCLn \frac{2R_1 + R_2}{R_2}}{2RCLn \left(\frac{2R_1 + R_2}{R_2} \right)}$

5. $T = 2RCLn \frac{2R_1 + R_2}{R_2} \Rightarrow C = \frac{T}{2RLn \left(\frac{2R_1 + R_2}{R_2} \right)} = \frac{1}{2NRLn3}$

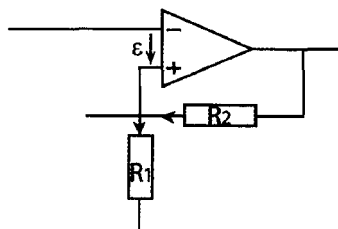
AN $C = \frac{1}{2 \times 100 \times 510^3 Ln3} = 9,1.10^{-7} F$

6.

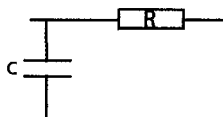


6

1. Les deux constituants principaux du multivibrateur sont le comparateur à deux seuils de basculement.



Et le réservoir d'énergie : le dipôle RC



2. $u_c + u_R = u_s$ or $u_R = Ri = RC \frac{duc}{dt}$

$\Rightarrow u_c + RC \frac{duc}{dt} = u_s$

3.

a. $U_1 = U_{sat}$; $U_4 = -U_{sat}$

$$U_2 = \beta' U_{sat} = \frac{U_{sat}}{2} \quad \text{car } R_1 = R_2 \quad \text{et } \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_3 = -\beta U_{sat} = \frac{-U_{sat}}{2}$$

$$\text{b. } u_c = [u_c(i) - u_c(f)] e^{\frac{t}{\tau}} + u_c(f)$$

$$\text{or } u_c(i) = -\frac{U_{sat}}{2} \quad \text{et } u_c(f) = U_{sat}$$

$$\text{ce qui donne } u_c(t) = -\frac{3}{2} U_{sat} e^{\frac{T_1}{\tau}} + u_{sat}$$

$$u_c(t) = u_{sat} \left[1 - \frac{3}{2} e^{\frac{t}{\tau}} \right]$$

$$\text{c. A la date } T_2 \quad u_c(T_2) = \frac{U_{sat}}{2}$$

$$\Rightarrow \frac{U_{sat}}{2} = U_{sat} \left[1 - \frac{3}{2} e^{\frac{T_1}{\tau}} \right]$$

$$\frac{3}{2} e^{\frac{T_1}{\tau}} = \frac{1}{2} \Rightarrow T_1 = \tau \ln 3 = RCLn3$$

d. En utilisant l'expression de $u_c = [u_c(i) - u_c(f)] e^{\frac{t}{\tau}} + u_c(f)$ et en prenant une nouvelle origine de temps t qui correspond à T_1

$$u_c(t) = \frac{U_{sat}}{2}, \quad u_c(f) = -u_{sat}$$

$$u_c = \left[+\frac{U_{sat}}{2} + U_{sat} \right] e^{\frac{t}{\tau}} - U_{sat}$$

$$U_c(+) = U_{sat} \left[\frac{3}{2} e^{\frac{t}{\tau}} - 1 \right]$$

e. La durée de l'état bas est T_2

$$\text{à } t = T_2 \quad u_2(T_2) = -\frac{U_{sat}}{2} = U_{sat} \left[\frac{3}{2} e^{\frac{T_2}{\tau}} - 1 \right]$$

$$\frac{3}{2} e^{\frac{T_2}{\tau}} = \frac{1}{2} \quad \text{ce qui donne } T_2 = \tau \ln 3 = RCLn3$$

$$\text{La période } T = T_1 + T_2 = 2RCLn3 = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$N = \frac{1}{T} = \frac{1}{2RCLn3} = 455 \text{ Hz}$$

$$\text{f. } \delta = \frac{T_1}{T} = \frac{RCLn3}{2RCLn3} = 0,5$$