

# Mesure du rythme cardiaque

## I - Étude du détecteur de flux sanguin

### 1. Étude de la source lumineuse

Loi de la maille :  $U_{cc} = R_1 \cdot I_d + U_f$

$$\Rightarrow R_1 = (U_{cc} - U_f)/I_d = (5 - 3,6)/20 = 0,07 \text{ k}\Omega = 70 \Omega$$

### 2. Étude du récepteur photosensible

2.1 Pour  $E_{MIN} = 1 \text{ W/m}^2$  la courbe indique  $R_{MAX} = 40 \text{ k}\Omega$   
 Pour  $E_{MAX} = 10 \text{ W/m}^2$  la courbe indique  $R_{MIN} = 10 \text{ k}\Omega$

2.2 Calcul des valeurs correspondantes de la tension  $u_1$  :  
 Diviseur de tension constitué par les résistances  $R_{ph}$  et  $R_2$

$$\Rightarrow u_1 = 5 \cdot R_2 / (R_{ph} + R_2)$$

$$\Rightarrow U_{1MAX} = 5 \cdot 1 / (1 + 10) = 0,45 \text{ V}$$

$$\Rightarrow U_{1MIN} = 5 \cdot 1 / (1 + 40) = 0,12 \text{ V}$$

## II – Étude du filtre

### 1. Étude qualitative

1.1 comportement du condensateur

En basse fréquence  $Z_c = 1/C\omega \rightarrow \infty \Rightarrow$  interrupteur ouvert

En haute fréquence  $Z_c = 1/C\omega \rightarrow 0 \Rightarrow$  interrupteur fermé

1.2 tension de sortie

En basse fréquence  $u_2 = 0 \text{ V}$  (pas de signal en sortie)

En haute fréquence  $u_2 = u_1$  (on retrouve le signal d'entrée)

Le filtre est un filtre passe-haut (passif)

### 2. Étude en régime sinusoïdal

2.1 Expression de la fonction de transfert

le diviseur de tension donne  $\underline{U}_2 = \underline{U}_1 \cdot R_3 / (R_3 + \underline{Z}_{C1}) = \underline{U}_1 / (1 + \underline{Z}_{C1} / R_3)$

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 / (1 - j/R_3 C_1 \omega)$$

$$\underline{T} = \frac{1}{1 - j \frac{1}{R_3 C_1 \omega}}$$

2.2 Expression du module T

$$T = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(R_3 C_1 \omega)^2}}}$$

2.3 Pour les fréquences hautes  $\omega \rightarrow \infty \Rightarrow T \rightarrow 1/1 = 1$  le signal d'entrée se retrouve à la sortie. On retrouve le filtre passe-haut

2.4 Pour la fréquence de coupure on doit avoir  $T = T_{max}/\sqrt{2} = 1/\sqrt{2}$   
 ce qui entraîne  $R_3 C_1 \omega_c = 1 \Rightarrow \omega_c = 1/R_3 C_1 \Rightarrow f_c = \omega_c / 2\pi = 1/2\pi R_3 C_1$

2.5 Valeur de la fréquence de coupure

$$f_c = 1/2\pi \cdot 470 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 0,34 \text{ Hz}$$

2.6 la fréquence correspond au nombre de battements par seconde

$$f_r = 70/60 = 1,2 \text{ Hz}$$

le filtre passe-haut laisse passer les fréquences supérieures à sa fréquence de coupure, ce signal sera transmis

### III – Étude de l'amplificateur

1. L'amplificateur opérationnel possède une réaction négative, il fonctionne (hors saturation) en régime linéaire

2. le régime linéaire entraîne que  $e^+ = e^-$  avec ici  $e^+ = u_2$

Le diviseur de tension conduit à  $e^- = u_3 \cdot R_4 / (R_4 + R_5 + R_6) = u_2$

$$u_3 = u_2 \cdot (R_4 + R_5 + R_6) / R_4$$

3. expression de  $A_v \Rightarrow A_v = 1 + (R_5 + R_6) / R_4$

4. valeurs extrêmes de  $A_v$

pour  $R_6 = 0 \text{ k}\Omega \Rightarrow A_{v\min} = 1 + 33/4,7 = 8,0$

pour  $R_6 = 470 \text{ k}\Omega \Rightarrow A_{v\max} = 1 + 503/4,7 = 108$

5. Pour avoir  $A_v = 10$  il faut que  $(R_5 + R_6) / R_4 = 9 \Rightarrow (R_5 + R_6) = 9 \cdot R_4$

$$R_6 = 9R_4 - R_5 = 9 \cdot 4,7 - 33 = 9,3 \text{ k}\Omega$$

### IV – Étude de la mise en forme du signal

#### 1. Détection de seuils

1.1 L'amplificateur opérationnel A2 fonctionne en régime non linéaire (existence d'une réaction positive)

1.2 la tension de sortie est saturée et ne peut prendre comme valeur que 0 V ou 5 V

1.3 expression de  $e_2^-$

le diviseur de tension donne  $e_2^- = U_{cc} \cdot R_{10} / (R_9 + R_{10}) = 5 \cdot 100 / (100 + 100)$

$$e_2^- = 2,5 \text{ V}$$

1.4 expression de  $e_2^+$

le théorème de superposition conduit à

$$e_2^+ = u_3 \cdot R_8 / (R_7 + R_8) + u_4 \cdot R_7 / (R_7 + R_8)$$

1.5 Valeurs de la tension d'entrée qui provoquent le basculement qui se produit quand  $e_2^- = e_2^+ \Rightarrow u_3 \cdot R_8 / (R_7 + R_8) + u_4 \cdot R_7 / (R_7 + R_8) = 2,5 \text{ V}$

\* pour  $u_4 = 0 \text{ V} \Rightarrow u_3 = 2,5 \cdot (R_7 + R_8) / R_8 = 2,5 \cdot (100 + 247) / 247$

$$u_4 = 3,5 \text{ V}$$

\* pour  $u_4 = 5 \text{ V} \Rightarrow u_3 = 2,5 \cdot (R_7 + R_8) / R_8 - u_4 \cdot (R_7 / R_8)$

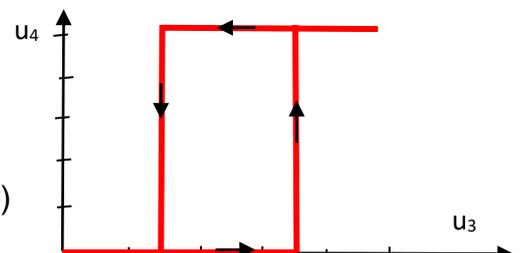
$$= 3,5 - 5 \cdot 100 / 247 \quad u_3 = 1,5 \text{ V}$$

1.6 Caractéristique de transfert

$u_4 = 0$  ou 5 V

$u_3$  seuils à 1,5 V et 3,5 V

comparateur non inverseur (entrée sur  $e^+$ )



1.7 voir document réponse 1

## 2. Détection de fronts

2.1 Valeur de la constante de temps

$$\tau_1 = R_{11}C_2 = 330 \cdot 10^3 \cdot 220 \cdot 10^{-9} = 72,6 \text{ ms}$$

2.2 La diode  $D_1$  élimine tout signal négatif à l'entrée du circuit logique ( $u_5$  est nul si la diode conduit). Elle protège le circuit C11. Elle élimine les pics négatifs qui se produisent sur le front descendant du signal  $u_4$

2.3 voir document réponse 1

## 3. Calibration d'impulsion

3.1 caractéristique  $u_6 = f(u_5)$

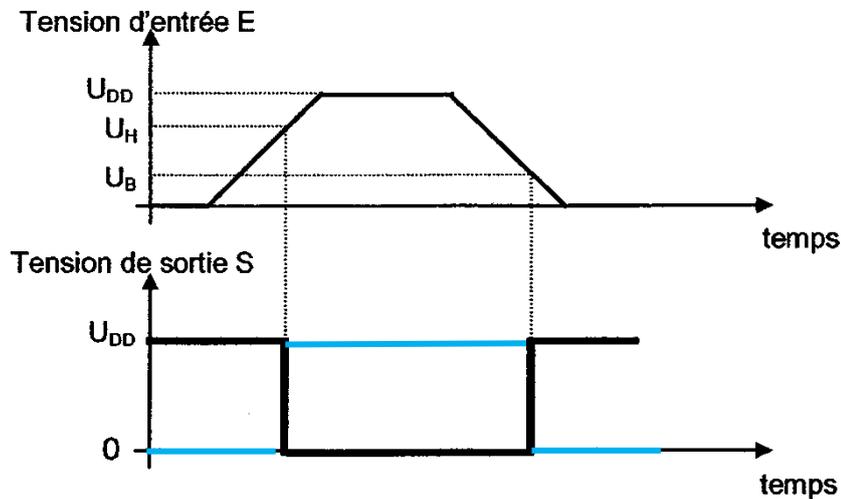
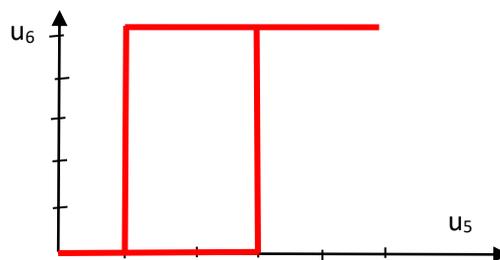


Figure 6 bis

En bleu sur la figure précédente est tracée la tension à la sortie de la seconde porte



Le signal de sortie prend les valeurs 0 ou 5 V

Les seuils de commutation sont à 1 V et 3 V

L'association des deux portes inverseuses donne un comparateur non inverseur

3.2 voir document réponse 1

3.3 la durée de l'impulsion  $t_d$  de la tension  $u_6$  est de 100 ms

## V – Étude de la conversion durée-tension

1. Le circuit A3 fonctionnant en régime linéaire il vient  $e_3^- = e_3^+$  (circuit parfait)
2. Le diviseur de tension conduit à écrire  $e_3^- = u_A \cdot R_{12} / (R_{12} + R_{13}) = u_A / 2$
3. La loi d'ohm donne  $U_{cc} - e_3^+ = R_{14} \cdot I_a \Rightarrow I_a = (U_{cc} - e_3^+) / R_{14}$
4. De même  $u_A - e_3^+ = R_{15} \cdot I_b \Rightarrow I_b = (u_A - e_3^+) / R_{15}$
5. Si le transistor est bloqué alors  $I_T = 0$  et la loi du nœud conduit à  $I_C = I_a + I_b$
6. expression de  $I_C$  compte tenu des résultats précédents  
 $I_C = (U_{cc} - e_3^+) / R_{14} + (u_A - e_3^+) / R_{15}$  avec  $R_{14} = R_{15} = R$   
 $I_C = (U_{cc} - u_A / 2) / R + (u_A - u_A / 2) / R \Rightarrow I_C = U_{cc} / R$
7. Valeur de ce courant  $I_{cc} = 5 / 12,5 = 0,40 \text{ mA}$
8. Relation entre  $u_7$  et  $I_C$   
Pour le condensateur on a  $I_C = C_3 \cdot (du_7 / dt)$  comme ici le courant est constant il vient  $u_7 = (I_C / C_3) \cdot t$
9. La vitesse de variation est ici le rapport  $I_C / C_3$  qui vaut :  
 $400 \cdot 10^{-6} / 100 \cdot 10^{-6} = 4 \text{ V/s}$
10. Si le transistor est saturé il équivaut à un interrupteur fermé, la tension aux bornes est nulle  $\Rightarrow u_7 = 0 \text{ V}$
11. voir document réponse 2
12. Le transistor  $T_1$  court-circuite le condensateur lorsqu'il est saturé et permet à celui-ci se charger à courant constant lorsqu'il est bloqué ; il pilote la charge de  $C_3$

## VI – Étude de la détection de présence d'impulsion

1. Le diviseur de tension donne  $e_4^- = U_{cc} \cdot R_{17} / (R_{17} + R_{16})$
2. Valeur de  $e_4^-$  :  $e_4^- = 5 \cdot 240 / (240 + 10) = 4,8 \text{ V}$
3. Pour que la DEL s'allume, il faut que la sortie de  $A_4$  soit à + 5V. Le comparateur étant non inverseur pour avoir un état haut en sortie il faut que l'entrée soit supérieure au seuil d'où  $u_7 > 4,8 \text{ V}$
4. Pour que  $u_7$  atteigne 4,8 V il faut un temps de  $(1 \text{ s} / 4) \cdot 4,8 = 1,2 \text{ s}$   
Le temps entre deux impulsions est de  $1,2 + 0,1 = 1,3 \text{ s}$  soit une fréquence de  $1 / 1,3 = 0,77 \text{ Hz}$  et en battements par minute  $0,77 \times 60 = 47 \text{ bpm}$

## VII – Étude de la signalisation sonore

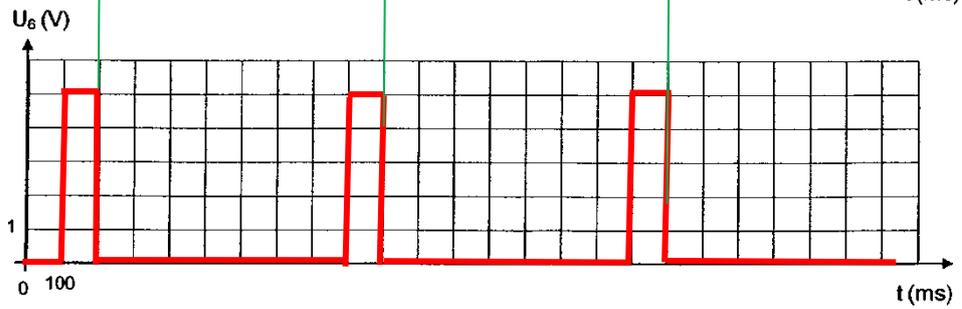
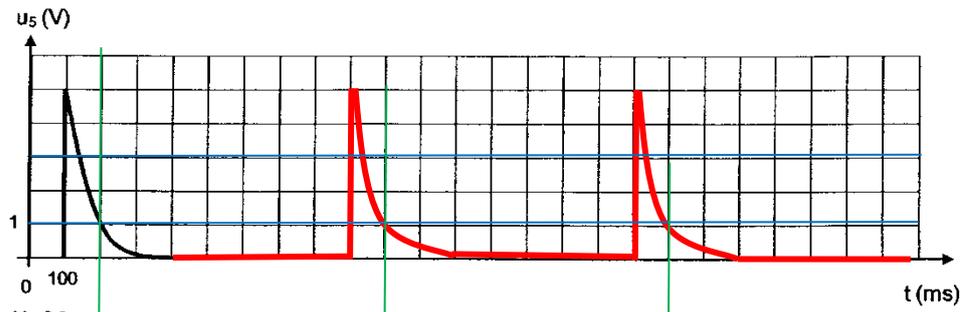
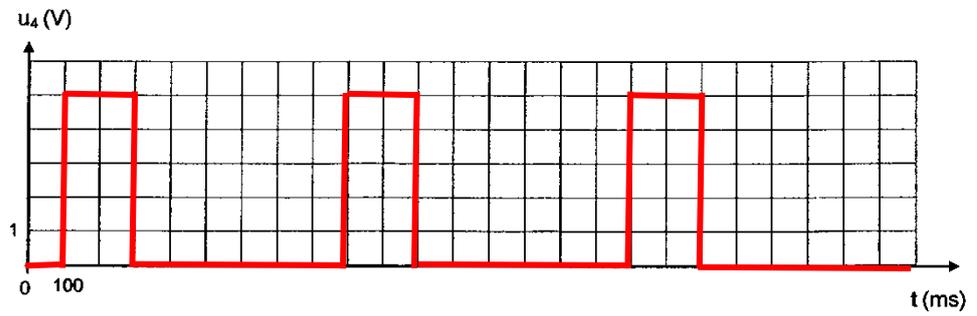
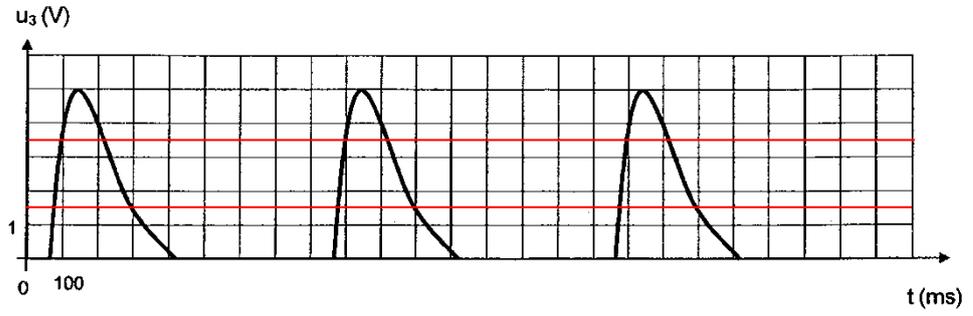
1. Valeur de la constante de temps  $\tau = R_{19} C_4 = 10 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-9} = 1 \text{ ms}$
2. Après  $t_0$  le condensateur se charge de façon exponentielle croissante vers la valeur  $u_8 = + 5 \text{ V}$
3. Lorsque le seuil  $u_H = 3 \text{ V}$  de la porte  $C_{13}$  sera atteint la porte commutera et cette phase s'arrêtera.

4. Calcul de la durée de la phase précédente  
 $\Delta t = t_1 - t_0 = 1 \cdot \ln[(5-1)/(5-3)] = 1 \cdot \ln 2 = 0,69 \text{ ms}$
5. Après la commutation de la porte le condensateur se décharge exponentiellement vers 0 V nouvelle valeur de  $u_8$
6. La tension aux bornes du condensateur diminue lorsqu'elle atteindra la valeur  $u_B = 1 \text{ V}$ , elle fera à nouveau commuter la porte et cette deuxième phase s'arrêtera, on retrouvera la première étape.
7. durée de cette deuxième étape  
 $\Delta t = t'_1 - t'_0 = 1 \cdot \ln[(0-3)/(0-1)] = \ln 3 = 1,1 \text{ ms}$
8. voir document réponse 3
9. La période est  $T = 0,69 + 1,1 = 1,8 \text{ ms}$   
 La fréquence  $F = 1/T = 1/0,0018 = 555 \text{ Hz}$
10. Pour  $u_9 = 0 \text{ V}$  le transistor  $T_2$  (NPN) est bloqué  
 Pour  $u_9 = 5 \text{ V}$  le transistor est saturé
11. Tension aux bornes du HP
  - \*  $u_9 = 0 \text{ V} \Rightarrow u_{T2 \text{ bloqué}} = 5 \text{ V}$  (interrupteur ouvert)  $\Rightarrow u_{10} = 0 \text{ V}$  (pas de courant dans le HP)
  - \*  $u_9 = 5 \text{ V} \Rightarrow u_{T2 \text{ sat}} = 0 \text{ V}$  (interrupteur fermé)  $\Rightarrow u_{10} = 5 \text{ V}$
12. voir document réponse 4

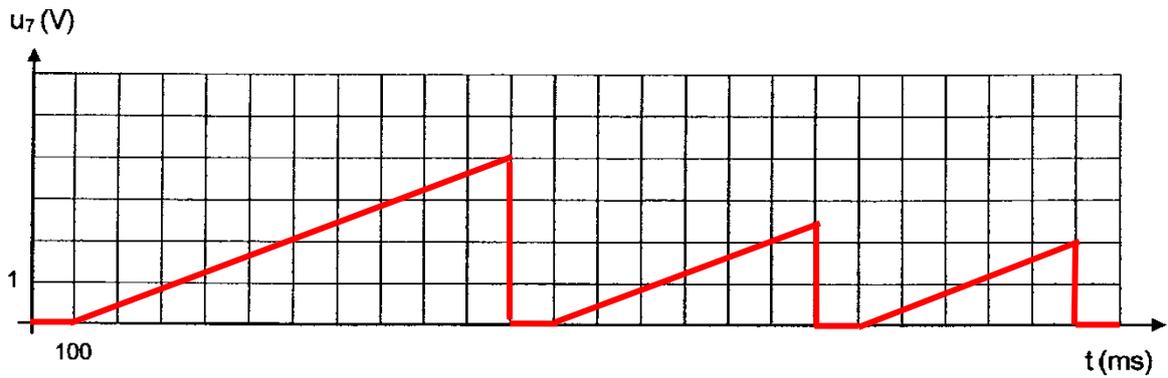
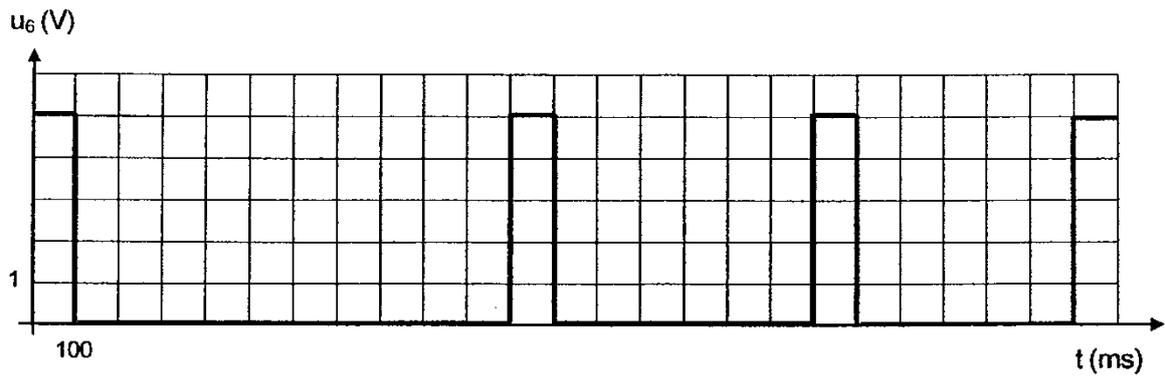
## VIII – Synthèse

1. fréquences cardiaques en bpm
  - \* premier cas  $T = 1,4 \text{ s} \Rightarrow F = 1/T = 0,71 \text{ Hz}$   
 $\Rightarrow$  en bpm  $0,71 \times 60 = 42 \text{ bpm}$
  - \* deuxième cas  $T = 0,2 \text{ s} \Rightarrow F = 1/T = 5 \text{ Hz}$   
 $\Rightarrow 5 \times 60 = 300 \text{ bpm}$
2. voir document réponse 5 et 6

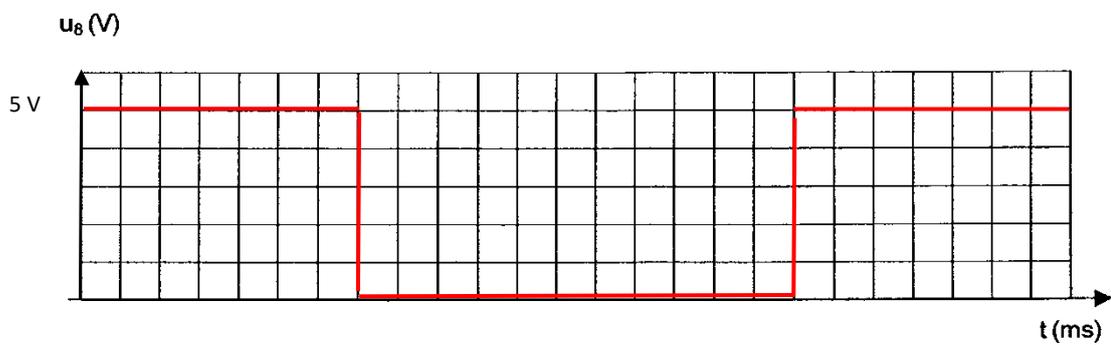
### Document réponse 1



## Document réponse 2



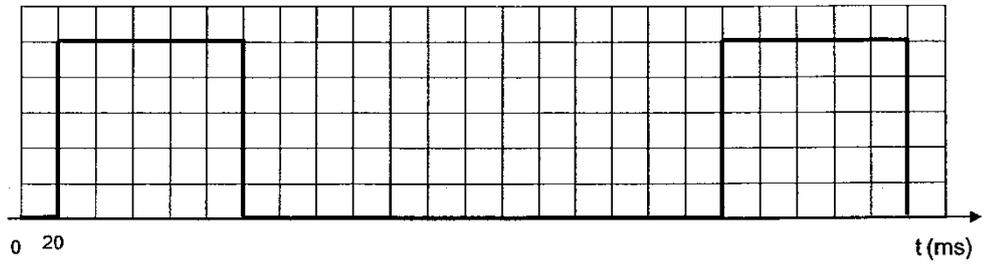
## Document réponse 3



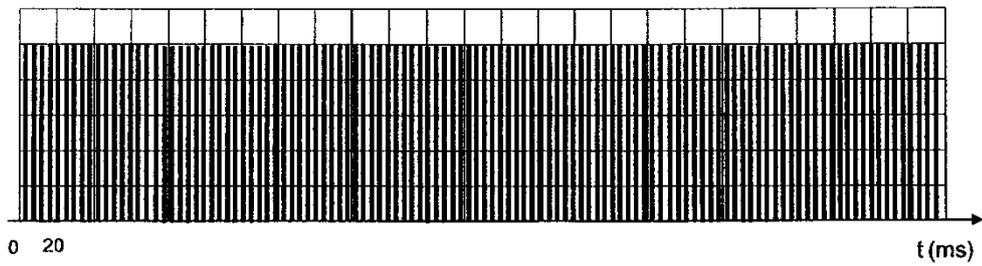
N.B. Les échelles de temps et de tension sont à préciser par le candidat.

### Document réponse 4

$u_6$  (V)



$u_8$  (V)



Le signal se retrouve après la porte ET quand  $u_6$  est à l'état haut

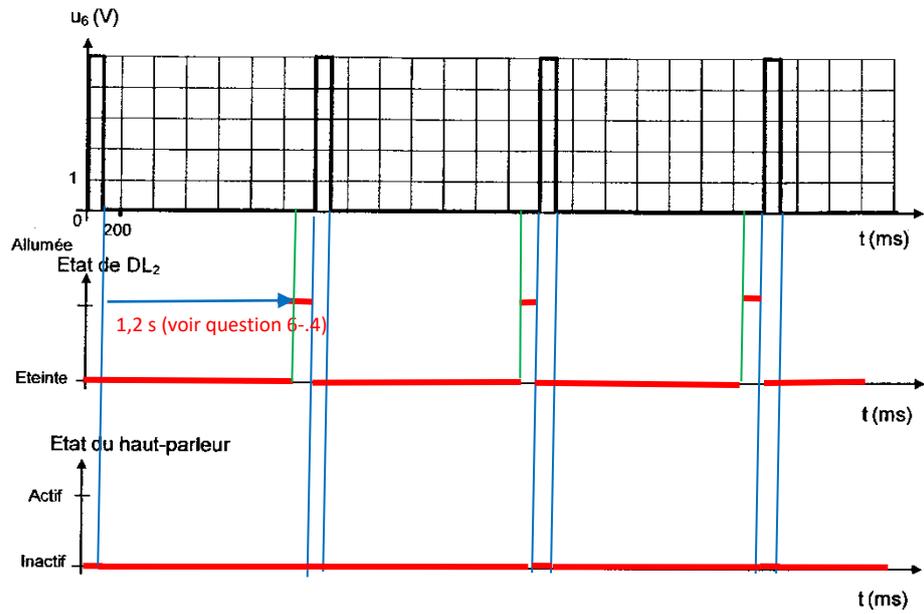
$t$  (ms)

$u_{10}$  (V)



Document réponse 5

42 bpm



Document réponse 6

300 bpm

