

Multivibrateur astable de type RC à inverseurs logiques

par R. KERAVEC

L'étude de cette nouvelle partie du programme de Terminales est particulièrement riche, tant sur le plan fondamental que sur le plan expérimental. Afin de donner à l'expérience toute son importance et son efficacité, nous proposons une maquette simple, claire, dont l'utilisation par les élèves en TP doit conduire à un gain de temps notable.

La maquette permet l'étude :

- des portes logiques et de leurs caractéristiques fondamentales,
- de la charge d'un condensateur à travers une résistance,
- du multivibrateur.

1. PRÉSENTATION DE LA MAQUETTE (figure 1)

Elle est organisée autour du circuit intégré 4 011 B (CMOS) qui contient 4 portes NAND :

- deux sont utilisées pour la réalisation du multivibrateur,
- les deux autres sont maintenues disponibles séparément.

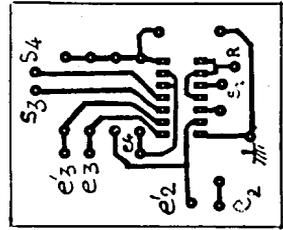
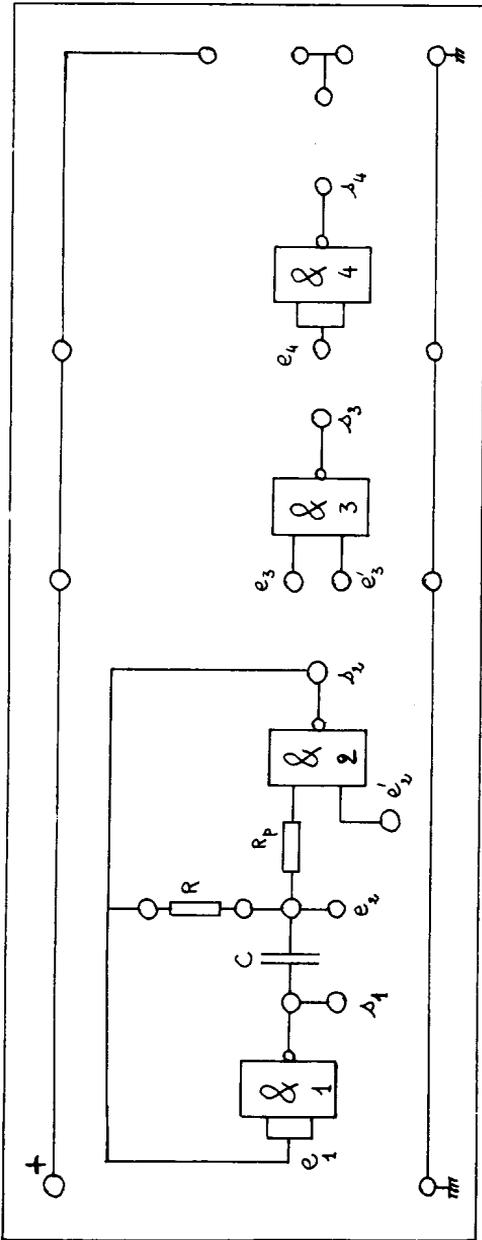
L'alimentation de la maquette peut se faire par toute tension allant de 5 à 15 V.

2. ÉTUDE DES PORTES LOGIQUES

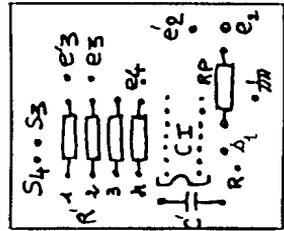
2.1. Établissement des tables de vérité

Alimenter la maquette sous une tension de 10 V par exemple,

- la porte 4 réalise un inverseur à partir d'une fonction NAND (les 2 entrées sont reliées entre-elles).



Plaque
Circuit
imprimé
→ côté
composants
← côté
cuivre →



- Composants sur plaques enfilables:
 C: 47nF - 6,8nF -
 R fixe: 2,2kΩ - 10kΩ - 1MΩ
 R variables: 10kΩ - 47kΩ
- Circuit intégré 4011B (CMOS)
- Les résistances R'1...R'4 = 47kΩ permettant de mettre les entrées e'3, e'4, e'1 au potentiel haut de l'alimentation.
- C' = 10nF (câble r d'⏏) - Rp = 100kΩ

Figure 1

- La porte 3 où l'on maintient l'entrée e_3 au niveau 1 réalise la même fonction inverseur.
- Vérifier que la porte 3 réalise NON-ET et que son association avec 4 réalise ET.

On pourra contrôler les tensions de sortie avec un voltmètre, les entrées étant alternativement portées au + et à la masse de l'alimentation. L'état des sorties peut être visualisé à l'aide d'une LED associée à une résistance de $1\text{ k}\Omega$ en série.

Remarque : entre le + de l'alimentation et les entrées marquées e_2, e_3, e_3, e_4 on a placé une résistance de $47\text{ k}\Omega$, afin de fixer l'état de ces entrées lorsqu'elles ne sont pas utilisées.

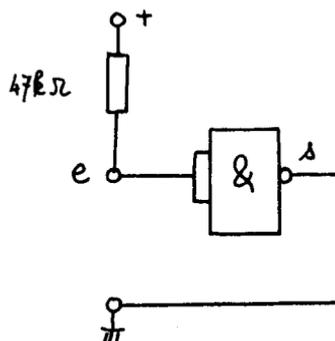


Figure 2

Ces résistances ne sont pas représentées sur la maquette : on peut en effet les ignorer totalement, car elles ne changent rien à la mise au niveau haut ou bas de l'entrée e , lorsque celle-ci est reliée directement soit à la masse soit au + de l'alimentation par l'intermédiaire d'un cordon.

2.2. Caractéristique de transfert d'un inverseur

- Opérer avec la porte 4, (la tension d'alimentation est notée V_{DD} dans les notices techniques ; nous adopterons la notation E pour toute la suite).
- Le GBF délivre un signal triangulaire ($f \approx 100\text{ Hz}$) :

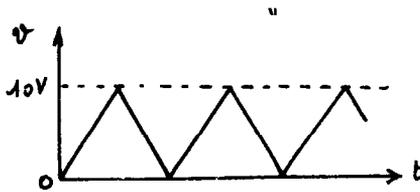


Figure 3

qui sera contrôlé à l'oscilloscope.

– Alimenter l'entrée e_4 par la tension ci-dessus, et visualiser simultanément v_e et v_s .

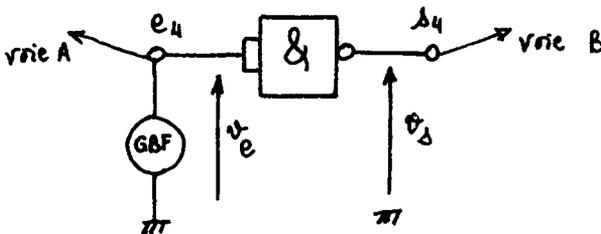


Figure 4

– Observer la forme de la tension de sortie et noter les valeurs de v_e qui provoquent le changement d'état de la sortie. Comparer ces valeurs à la tension E .

– Passer en mode «XY». On observe la caractéristique de transfert $v_s = f(v_e)$.

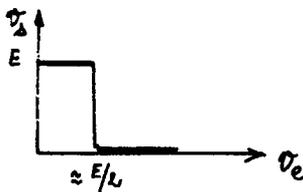


Figure 5

On pourra remarquer un phénomène d'hystérésis plus ou moins marqué selon la tension d'alimentation, la fréquence du signal v_e , et l'origine du composant utilisé:

2.3. Caractéristiques de sortie d'un inverseur

a) niveau bas à l'entrée

– la sortie est à l'état H à vide.

– En charge, la tension disponible à la sortie diminue quand i_s augmente. Le niveau H se dégrade.

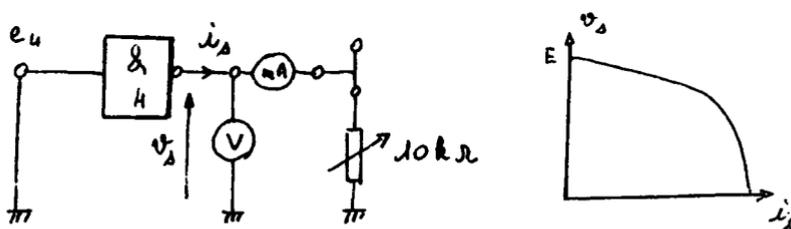


Figure 6

Voir la documentation fournie en annexe.

La caractéristique de sortie «au niveau haut» varie considérablement avec la tension d'alimentation.

Pour des valeurs suffisamment faibles de i_s , on remarque que la porte, vue de la sortie, est équivalent à une source de tension (f.é.m. = E) dont la résistance interne R_s est voisine de 250 Ω.

E = tension d'alimentation

R_s varie de 200 Ω (E = 15 V) à 500 Ω (E = 5V)

b) niveau haut à l'entrée

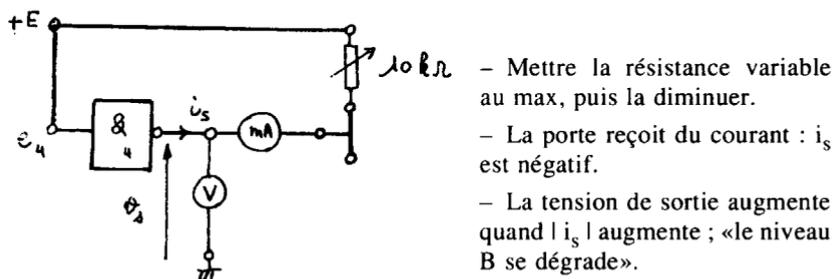


Figure 7

– Mettre la résistance variable au max, puis la diminuer.

– La porte reçoit du courant : i_s est négatif.

– La tension de sortie augmente quand $|i_s|$ augmente ; «le niveau B se dégrade».

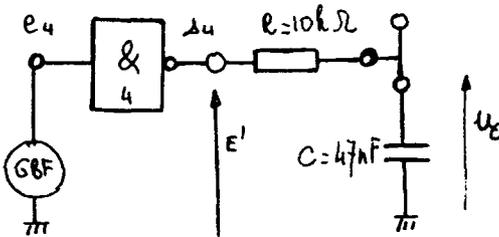
Au niveau bas, la porte est équivalente à une résistance de l'ordre de 150Ω , très peu dépendante de E .

Remarques : . Pour l'étude du multivibrateur, la porte sera idéalisée. On ne tiendra pas compte des résistances internes mises en évidence plus haut :

- sortie au niveau haut équivalente à un générateur de tension E (égale à celle de l'alimentation),
- sortie au niveau bas : $R = 0$,
- tension de basculement $V_b = \frac{E}{2}$
- On admettra que le courant d'entrée d'une porte est toujours négligeable.

3. CHARGE D'UN CONDENSATEUR À TRAVERS UNE RÉSISTANCE

3.1. Montage



$$\tau = RC \approx 0,5 \text{ ms.}$$

Figure 8

- tension d'alimentation $E = 10 \text{ V}$
- le GBF délivre un signal rectangulaire :
- Le visualiser à l'oscilloscope et le régler comme ci-contre avant de l'appliquer à la porte logique.

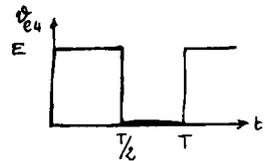


Figure 9

Dans ces conditions, le circuit RC est alimenté par une tension E' de valeur E puis $0 - E...$ etc.

$$E' = \begin{cases} E & \text{si } s_4 \text{ au niveau H.} \\ 0 & \text{si } s_4 \text{ au niveau B.} \end{cases}$$

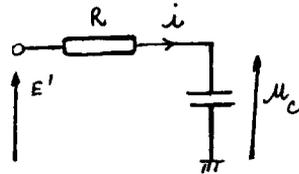


Figure 10

On a toujours $E' = Ri + u_c$ avec $i = C \frac{du_c}{dt}$

soit $u_c + RC \frac{du_c}{dt} = E'$

$u_c = E' + Ae^{-t/RC}$

E' est la valeur finale obtenue au bout d'un temps «infini».

En général à l'instant 0, le condensateur est chargé :

$(u_c)_0$: valeur initiale

$(u_c)_0 = E' + A$

D'où : $u_c = E' + [(u_c)_0 - E'] e^{-t/RC}$

3.2. Observations

a) Opérer à une fréquence de 100Hz.

Visualiser E' et u_c en fonction du temps, puis après avoir permuté R et C , E' et Ri

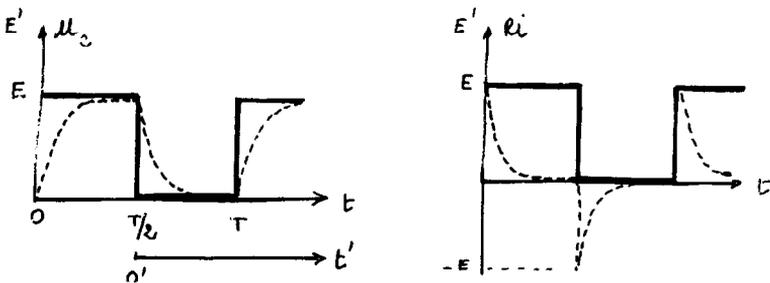


Figure 11

Le condensateur se charge sous la tension E avant $T/2$, et la perd totalement avant T .

– de 0 à $T/2$:

E' : valeur finale de $u_c = E$; valeur initiale $(u_c)_0 = 0$

$$u_c = E (1 - e^{-t/RC})$$

– de $T/2$ à T :

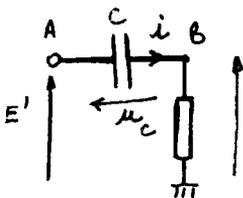
En prenant $T/2$ comme nouvelle origine des temps :

E' : valeur finale de $u_c = 0$; valeur initiale $(u_c)_0 = E$

$$u_c = E e^{-t'/RC}$$

La tension aux bornes du condensateur ne subit aucune discontinuité, même au moment des transitions de la tension d'alimentation du circuit RC.

Par contre, **l'intensité i subit des discontinuités** au moment de ces transitions :



Ri = potentiel de l'armature B du condensateur.

Figure 12

L'armature A subit des discontinuités de potentiel $\left. \begin{array}{l} E \\ 0 \end{array} \right\} \Rightarrow$ l'armature B subit instantanément la même discontinuité :

$$u_c = V_A - V_B \text{ n'en subit pas.}$$

Les charges accumulées sur les armatures du condensateur ne peuvent se modifier de manière brutale. (sinon $i = \frac{dq}{dt}$ serait infini !)

Expression de Ri

$$Ri = E' - u_c$$

- de 0 à T/2 : $E' = E$ $u_c = E (1 - e^{-t/RC})$

$$Ri = Ee^{-t/RC}$$

- de T/2 à T : $E' = 0$ $u_c = Ee^{-t'/RC}$ (nouvelle origine à T/2)

$$Ri = -Ee^{-t'/RC}$$

b) Opérer à des fréquences plus élevées (500 à 1000 Hz)

Procéder de la même façon. Visualiser $\begin{cases} E' \text{ et } u_c \\ E' \text{ et } Ri \end{cases}$

Le condensateur ne peut plus atteindre sa charge maximale (sous la tension E) et ne la perd pas complètement.

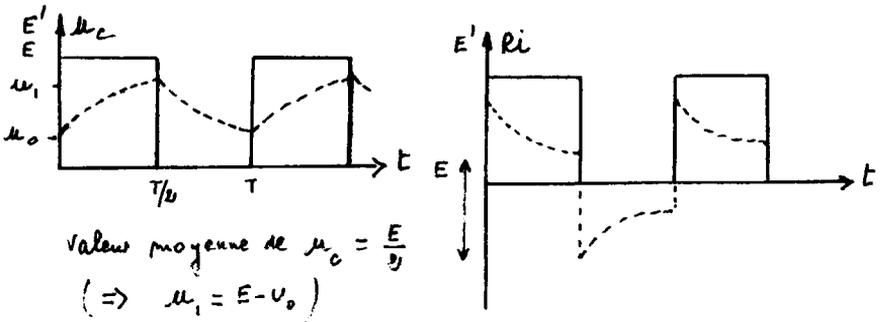


Figure 13

Remarques :

- L'étude expérimentale peut être conduite d'une manière quantitative avec le seul oscilloscope, en s'aidant du quadrillage de l'écran et des étalonnages (en y et base de temps).

En particulier, la détermination de la constante de temps $\tau = RC$ est facile, à partir de la courbe de charge :

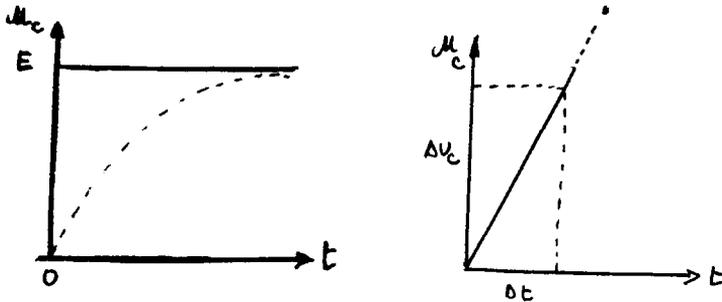


Figure 14

en dilatant les échelles (tension et durées), on observe que la toute première partie de la courbe où $\frac{du_c}{dt} \approx \left(\frac{du_c}{dt}\right)_0 = \frac{E}{RC}$ = coefficient directeur de la droite observée que l'on détermine facilement à partir de l'oscillographe : $\frac{E}{RC} = \frac{\Delta U_c}{\Delta t}$

- Cette partie doit permettre un travail d'équipe avec le mathématicien. Les instructions du programme de mathématiques le soulignent à plusieurs reprises.
- Le GBF n'est pas obligatoire pour faire cette étude. Le multivibrateur de la plaquette proposée est utilisable : choisir une capacité adéquate (pour R fixe) et relier s_2 à l'entrée e_4 .

4. MULTIVIBRATEUR DE TYPE RC À INVERSEURS LOGIQUES

Remarque préalable : le schéma, tel qu'il est proposé dans les commentaires du programme, est souvent mis sous d'autres formes (figure 15) qui ne font pas apparaître la résistance de protection R_p pour les circuits CMOS.

Sur les schémas de la figure 15, * désigne l'emplacement de la résistance de protection de l'entrée de l'inverseur liée à C.

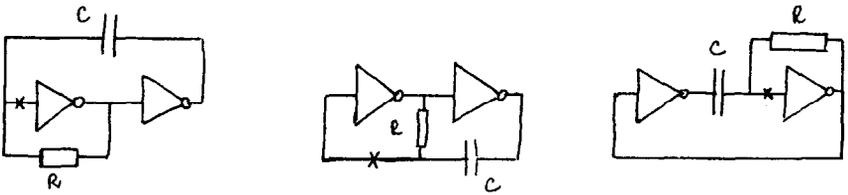
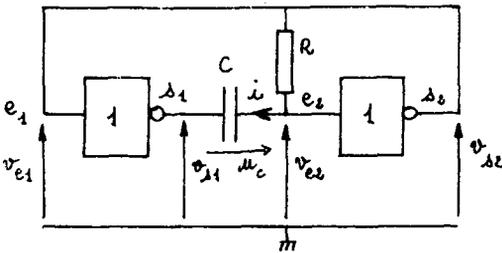


Figure 15

4.1. Analyse de fonctionnement

Les portes 1 et 2 de la maquette sont montées en inverseurs et $R_p = 100 \text{ k}\Omega$. Sa valeur est telle que le courant qui peut la traverser à certains moments ait une intensité toujours négligeable devant i . Nous ne la faisons pas figurer sur le schéma d'étude :



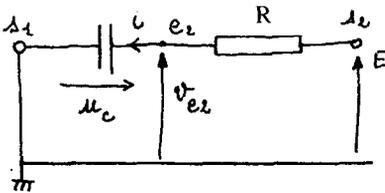
- tension d'alimentation E
 - tension de basculement d'un inverseur
 $V_b = \frac{E}{2}$

Figure 16

a) Hypothèses de départ

$$V_{s2} = V_{e1} = E \Rightarrow v_{s1} = 0 \quad \text{et} \quad v_{e2} < V_b$$

Pour le circuit RC on a la situation :



$$u_c + RC \frac{du_c}{dt} = E$$

Figure 17

Le condensateur se charge sous la tension E :

$u_c = v_{e2}$ et u_c tend vers E .

La tension $u_c = v_{e2}$ va donc passer par la valeur V_b qui va provoquer le basculement des deux inverseurs.

Dès que $v_{e2} > V_b$ $v_{s2} = v_{e1} = 0$ et $v_{s1} = E$

D'où la nouvelle situation : (que nous appellerons 1)

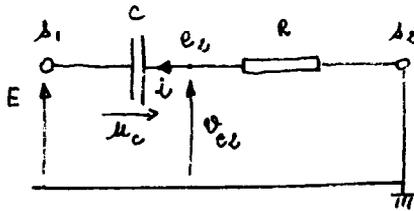


Figure 18

b) Analyse de l'évolution du système dans la situation 1

A l'origine de cette situation que nous prenons comme instant zéro :

– le condensateur est chargé : $(u_c)_0 = \frac{E}{2}$ et $v_{e2} = \frac{E}{2}$

Après le basculement des portes on peut écrire :

$$u_c + Ri = -E$$

$$u_c + RC \frac{du_c}{dt} = -E \quad \text{avec } v_{e2} = u_c + E$$

La tension u_c évolue exponentiellement de la tension $\frac{E}{2}$ vers la valeur finale théorique $-E$:

Il en résulte que v_{e2} se déduit de u_c par l'addition de E .

La courbe v_{e2} se déduit de celle de u_c par une translation égale à E .

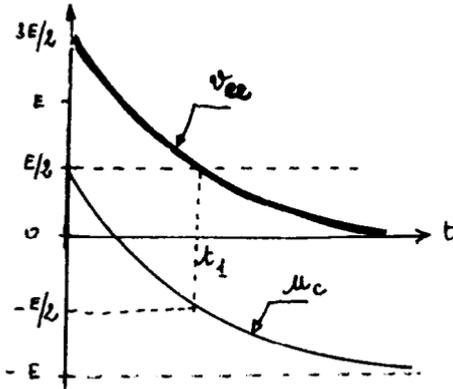


Figure 19

Mais dès que v_{e2} franchit la valeur $V_b = \frac{E}{2}$ à l'instant t_1 , il y a basculement de la porte 2 entraînant celui de la porte 1.

D'où une nouvelle situation que nous appelons 2.

c) **Analyse de la situation 2**

Prenons t_1 comme nouvelle origine des temps :

- le condensateur est chargé : tension initiale $(u_c)_0 = -\frac{E}{2}$.

A l'instant $t_1 + \varepsilon$:

$$v_{s2} = v_{e1} = E \quad v_{s1} = 0$$

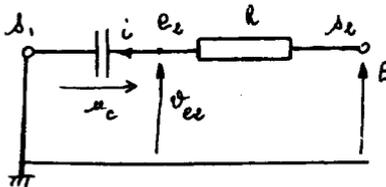


Figure 20

$$v_{e2} = u_c \quad \text{et} \quad u_c + RC \frac{du_c}{dt} = E$$

Le condensateur se charge sous la tension E depuis la valeur $-\frac{E}{2}$

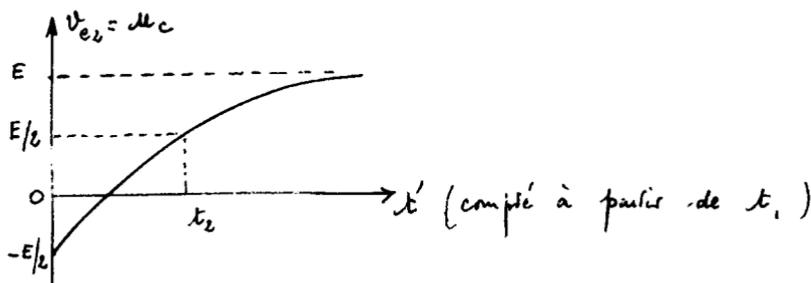


Figure 21

A l'instant t_2 , $u_c = v_{e2}$ franchit la limite v_b qui conduit au basculement et à la situation 1 etc...

d) Évolutions de l'ensemble du système

Sur la page suivante sont rassemblées les évolutions des différentes tensions (v_{s2} , v_{s1} , v_{e2} , u_c) et R_i .

On remarquera les discontinuités dans toutes les tensions (et en particulier de R_i c'est-à-dire i) sauf celle aux bornes de C .

e) Détermination des durées t_1 et t_2 de chaque phase

Dans la phase 1 :

$$u_c = -E + \left[\frac{E}{2} + E \right] e^{-t/RC} = -E + \frac{3E}{2} e^{-t/RC}$$

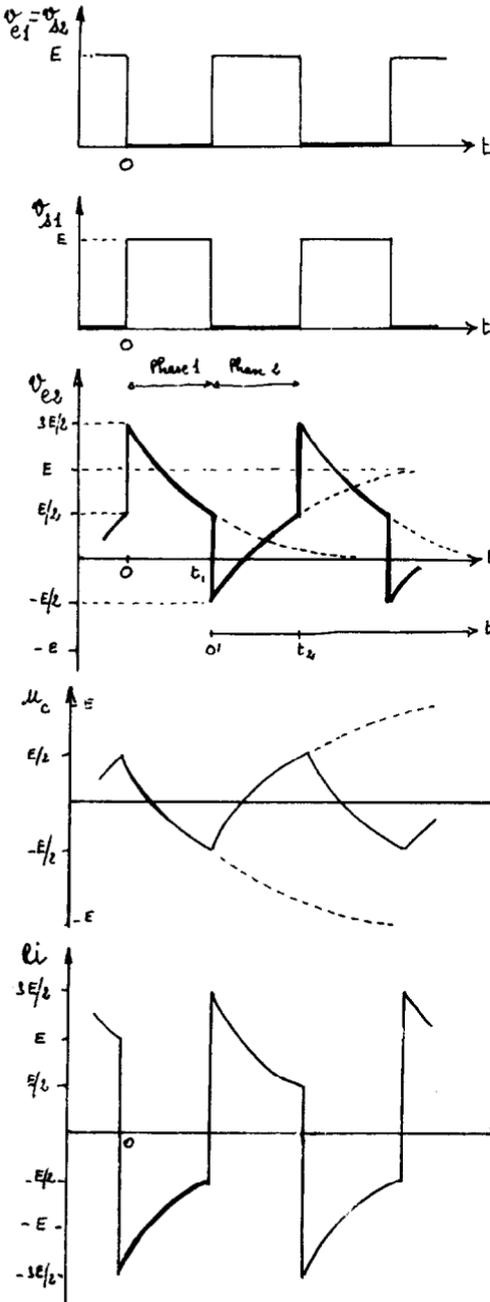
Au temps t_1 nous aurons :

$$-\frac{E}{2} = -E + \frac{3E}{2} e^{-t_1/RC}$$

$$1 = 3e^{-t_1/RC} \quad \text{d'où} \quad t_1 = RC \ln 3$$

De la même façon dans la phase 2 :

$$u_c = E + \left[-\frac{E}{2} - E \right] e^{-t'/RC} = E - \frac{3E}{2} e^{-t'/RC}$$



v_{s1} et v_{s2} subissent les mêmes discontinuités d'amplitude E .

Par rapport à la masse, v_{s1} et v_{e2} sont les potentiels des armatures du condensateur.

$u_c = v_{e2} - v_{s1}$
 il n'y a pas de discontinuité de la tension aux bornes de C (donc pas de discontinuité dans la charge q).

«Phase 1» : $R_i = -v_{e2}$

«Phase 2» : $R_i = -v_{e2} + E$ (d'où les discontinuités égales à $2E$).

Figure 22

Le basculement a lieu pour t_2 tel que $u_c = \frac{E}{2}$:

$$\frac{E}{2} = E - \frac{3E}{2} e^{-t_2/RC}$$

$$1 = 3e^{-t_2/RC} \Rightarrow t_2 = RC \ln 3$$

Les durées t_1 et t_2 sont les mêmes :

La période du multivibrateur est alors :

$$T = 2RC \ln 3 \approx 2,2 RC$$

Remarque : cette étude a été faite en supposant d'emblée que $V_b = \frac{E}{2}$. La valeur exacte du seuil de basculement peut toujours s'écrire $V_b = \alpha E$

La charge du condensateur évolue alors entre les tensions αE et $-(1 - \alpha) E$.

La période s'écrit alors :

$$T = RC \left(\ln \frac{1 + \alpha}{\alpha} + \ln \frac{2 - \alpha}{1 - \alpha} \right)$$

si $\alpha \neq 0,5$, les durées t_1 et t_2 sont différentes.

f) Rôle de la résistance de protection

Lors des commutations, la tension v_{e2} (entrée de la porte n°2) prend une valeur supérieure à E ou inférieure à 0 . Dans ces conditions le circuit de protection des entrées entre en fonction pour limiter la tension d'entrée réelle de la porte à $E + 0,7 \text{ V}$ ou à $-0,7 \text{ V}$; si une grande résistance R_p n'était pas mise en série, le courant ainsi dérivé serait important et non négligeable devant i .

5. EXPÉRIENCES AVEC LE MULTIVIBRATEUR

On maintiendra $E = 10 \text{ V}$ pour la tension d'alimentation.

5.1. **Observation du fonctionnement : $R = 10 \text{ k}\Omega$ $C = 47 \text{ nF}$.**

- Relever les oscillogrammes en fonction du temps :

v_{s2} et v_{s1}

v_{s1} et v_{e2} desquels on pourra déduire u_c , en particulier en utilisant la touche «ADD» pour réaliser $u_c = v_{e2} - v_{s1}$.

- Noter la tension de basculement V_b , les durées de chaque phase et la période T . ($T \approx 1 \text{ ms}$ - $f \approx 1 \text{ kHz}$)
- Comparer avec la valeur théorique obtenue par application de la relation $T = 2,2 RC$ ou la relation exacte.
- **Mise en forme de la tension de sortie :**

Il peut se faire que la tension v_{s2} ne soit pas tout à fait rectangulaire (la caractéristique de transfert d'un inverseur n'est pas idéale, et sa résistance de sortie n'est pas nulle).

On observe des «angles arrondis».

En utilisant un inverseur supplémentaire en sortie, on obtient un signal bien rectangulaire. Deux inverseurs en série permettent d'obtenir des signaux en opposition (figure 23).

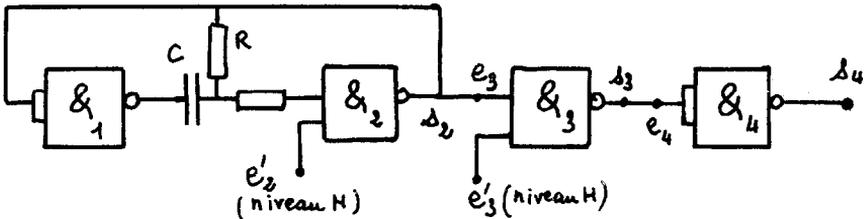


Figure 23

observer v_{s2} et v_{s3} puis v_{s2} et v_{s4}

- En reprenant le multivibrateur seul, le faire débiter sur une résistance variable ($10 \text{ k}\Omega$).

Constaté que le débit du multivibrateur entraîne une modification de la période.

- Reprendre l'expérience en interposant un inverseur en sortie :

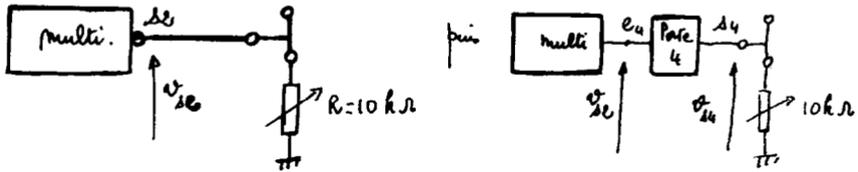


Figure 24

L'interposition d'un inverseur en sortie permet d'adapter l'impédance : le multivibrateur ne débite pas lui-même dans la résistance de charge, son fonctionnement n'est pas perturbé.

– Blocage du multivibrateur

Reprendre le montage utilisé pour la mise en forme de la tension de sortie (figure 23).

Les portes NON-ET n° 2 et 3 possèdent 2 entrées e'_2 et e'_3 qui lorsqu'elles ne sont pas utilisées sont en fait au potentiel haut de l'alimentation par l'intermédiaire d'une résistance de 47 kΩ.

$$\text{Dans ces conditions : } s_2 = \overline{e_2 \cdot e'_2} \text{ soit ici } s_2 = \overline{e_2}$$

$$s_3 = \overline{e_3 \cdot e'_3} \text{ soit } s_3 = \overline{e_3}$$

elles fonctionnent bien en inverseur.

Si e'_2 et e'_3 sont reliées à la masse, leur potentiel passe au niveau 0 :

⇒ $s_2 = 1$ de même que s_3 , et ceci quelque soit le niveau de l'autre entrée e_2 ou e_3 .

Expériences :

a) mettre e'_2 au niveau 0, e'_3 au niveau haut. Le multivibrateur ne fonctionne plus.

Visualiser v_{e2} , v_{s2} , v_{s3} et v_{s4} .

b) Remettre e'_2 au niveau haut, et e'_3 au niveau bas. Le multivibrateur fonctionne normalement, mais les sorties s_3 et s_4 sont bloquées au niveau 1 et zéro respectivement.

Application : brancher entre masse et e_3 un GBF, délivrant un signal rectangulaire d'amplitude $E = 10$ V.

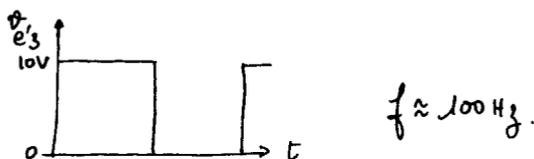


Figure 25

Observer v_{e3} et v_{s3} et v_{e4} et v_{s4} (train d'impulsions), (en cas d'instabilité d'image, retoucher légèrement la fréquence du GBF).

5.2. Expériences complémentaires

a) Remplacer la résistance R par l'ensemble suivant :

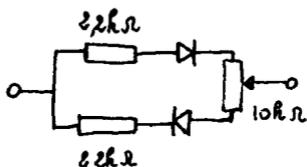


Figure 26

la charge du condensateur s'effectuera à travers deux résistances différentes : on obtient un signal à rapport cyclique variable.

b) Production d'un son

En prenant $R = 2,2$ k Ω et pour C les multiples de $0,1$ μ F d'une boîte de capacités à commutateur, les fréquences du signal obtenu s'échelonnent de 200 Hz (avec 1 μ F) à 2 kHz pour $0,1$ μ F.

Pour commander un haut-parleur et régler le niveau sonore, on pourra utiliser un ampli de puissance sommaire à l'aide d'un transistor :

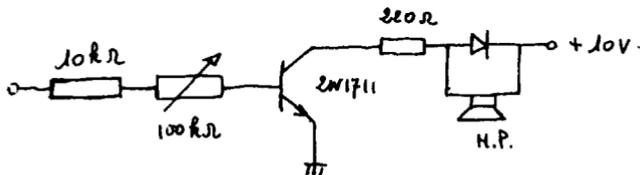


Figure 27

En remplaçant la résistance $R = 2,2 \text{ k}\Omega$ par une LDR, on pourra moduler le son par la lumière arrivant sur la LDR.

ANNEXES

Portes logiques

Technologie CMOS

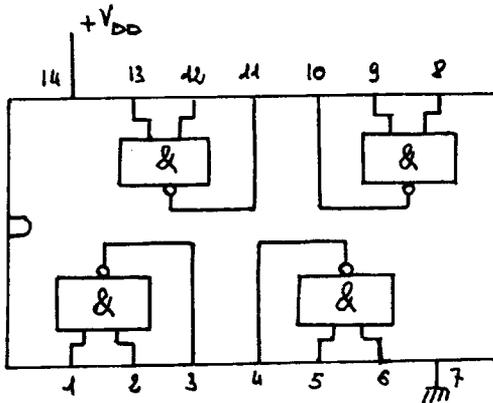


Figure 28

Quadruple porte NON-ET (ou NAND) à 2 entrées 4011 B.

le brochage des quadruples

NON-OU (ou NOR ou NI) : 4001 B et OU Exclusif (ou EXOR) : 4070 B est identique.

– La tension d'alimentation $+V_{DD}$ peut se situer dans la plage de 3 à 15 V.

- Les entrées sont protégées par un circuit du type :

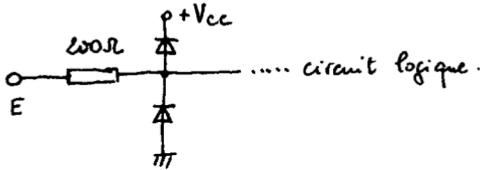


Figure 29

- Dans un montage :
 - mettre les entrées non utilisées à un potentiel défini ($+V_{DD}$ ou la masse)
 - mettre sous tension avant d'appliquer un signal de commande. Inversement débrancher le signal de commande avant de couper l'alimentation.
 - Ne pas insérer ni enlever un circuit sous tension.
- Hors-montage, les broches du circuit doivent être mises en court-circuit à l'aide d'une mousse conductrice ou d'une feuille d'aluminium. Pas de polystyrène !

- Brochage du sextuple inverseur CMOS 4069 B.

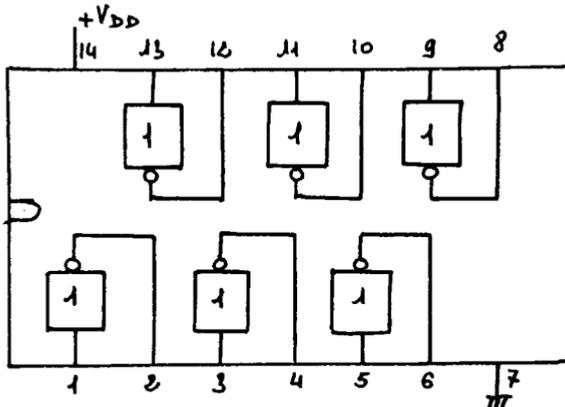


Figure 30

Technologie HCMOS

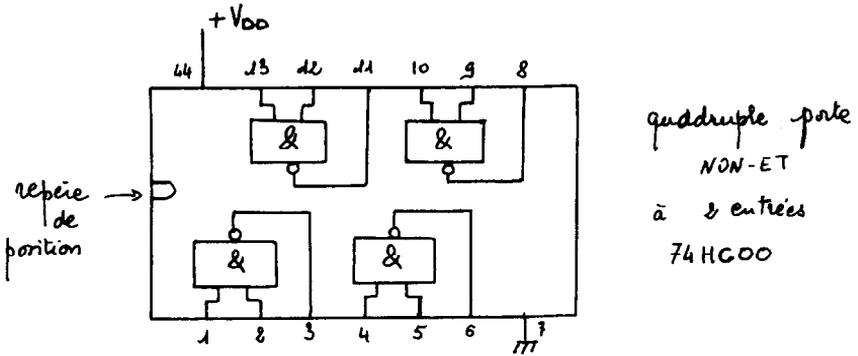


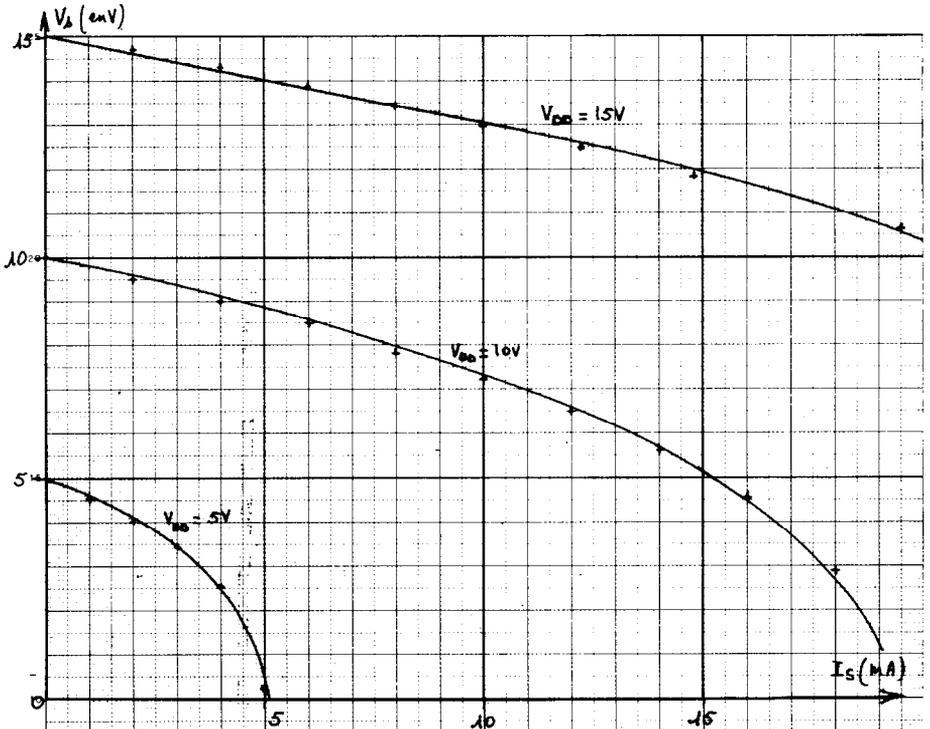
Figure 31

Le brochage des quadruples

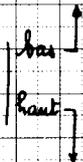
NON-OU 74 HC 02, OU exclusif 74 HC 86 est le même.

– La tension d'alimentation V_{DD} doit se situer dans la plage de 2 à 7 V.

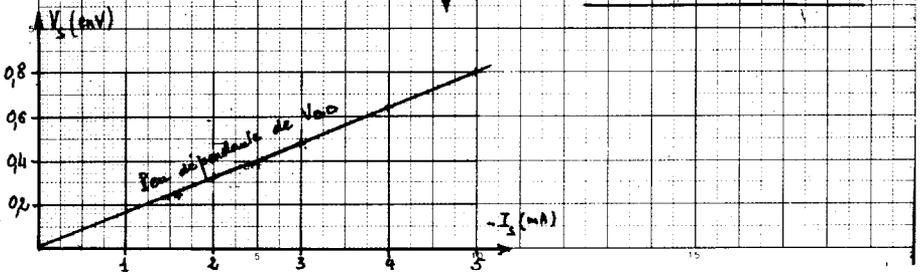
– Les recommandations précédentes pour les CMOS restent valables.

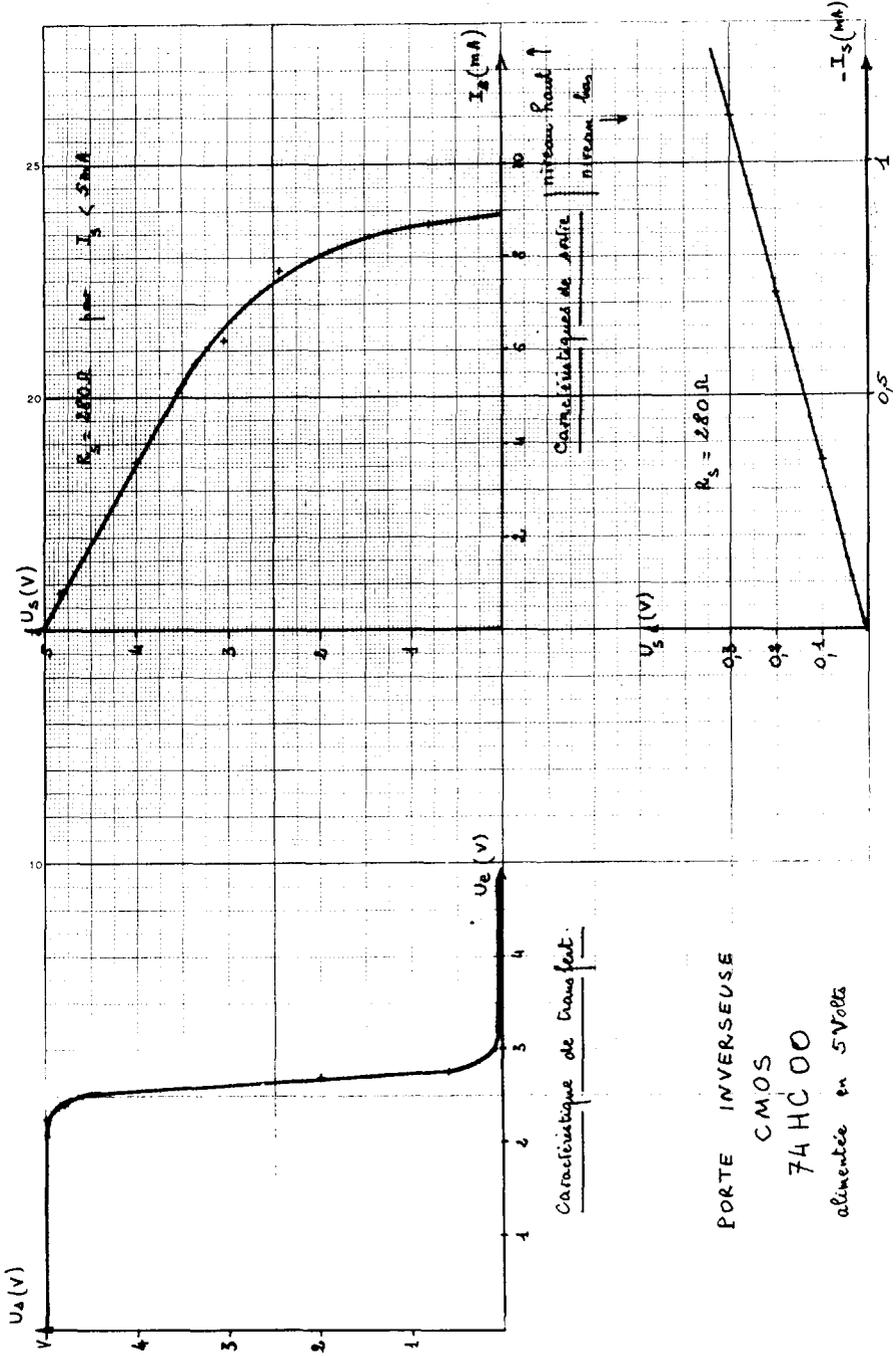


entree au niveau



Caractéristiques de sortie
d'une porte inverseuse
CMOS 4011B





PORTE INVERSEUSE
 CMOS
 74HC00
 alimentée en 5Vols