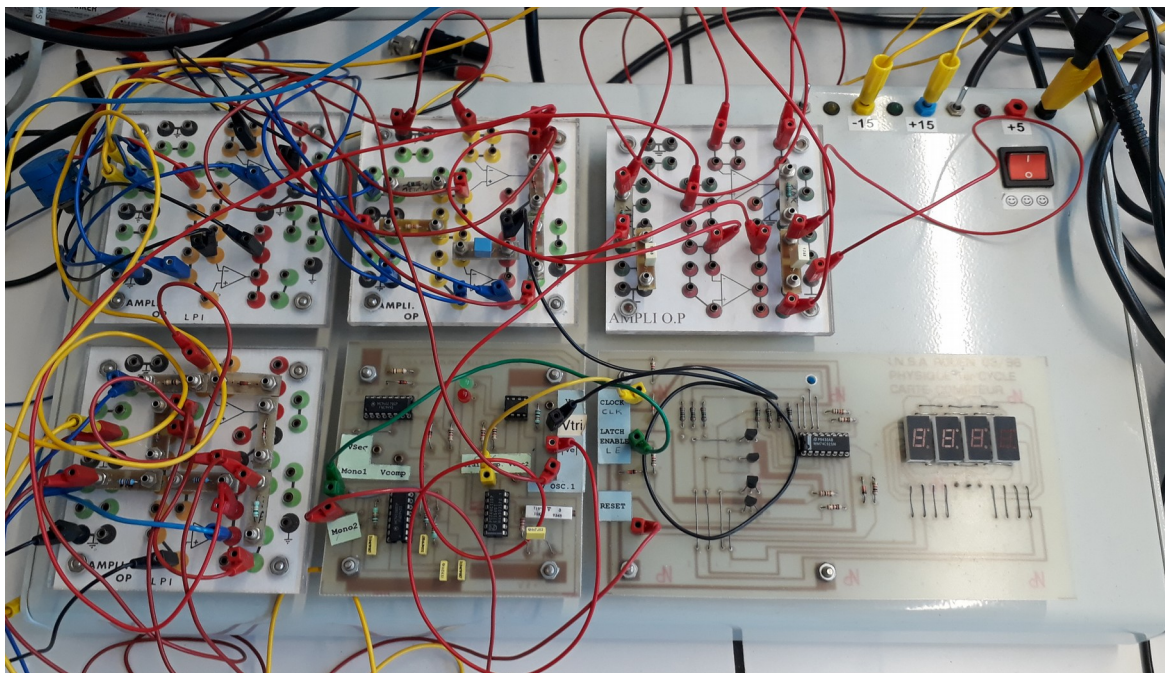


# ÉTUDE ET RÉALISATION D'UN MULTIMÈTRE NUMÉRIQUE



**Etudiants :**

**Anselme GEULIN**

**Lucas POTIN**

**He WANG**

**Sunhao MENG**

---

**Enseignant-responsable du projet :**

**François GUILLOTIN**

*Cette page est laissée intentionnellement vierge.*

---

Date de remise du rapport : **19/06/2017**

Référence du projet : **STPI/P6/2017 – N°31**

Intitulé du projet : **ETUDE ET REALISATION D'UN MULTIMETRE NUMERIQUE**

Type de projet : **Expérimental**

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

Notre projet avait pour objectif d'étudier et de réaliser les différentes fonctions d'un multimètre. Pour cela, nous sommes partis d'un sujet de TP « Voltmètre numérique » de l'EC P7 où il a fallu comprendre la théorie, le montage et les différentes fonctions électroniques afin de le modifier pour qu'il puisse mesurer une tension alternative ainsi qu'une intensité continue et alternative. D'un point de vue pédagogique, l'objectif était de se reposer sur nos bases d'électricité P3 afin d'acquérir des connaissances en électronique qui nous saurons utiles ultérieurement.

Mots-clefs du projet : **Multimètre, tension, courant, alternatif**

Si existant, n° cahier de laboratoire associé : **Non**

## TABLE DES MATIERES

1. Introduction.....	5
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	6
3. Travail réalisé et résultats.....	7
3.1. Principe du convertisseur analogique à simple rampe.....	7
3.2. Mesure d'une tension continue par réalisation d'un voltmètre numérique.....	9
3.2.1. Opérateur valeur absolue.....	9
3.2.2. Générateur de la rampe et horloge de séquençement.....	11
3.2.3. Carte comparateur et séquençement.....	15
3.2.4. Carte compteur.....	15
3.3. Mesure d'une tension alternative.....	19
3.4. Mesure d'une intensité continue.....	23
3.5. Mesure d'une intensité alternative.....	24
4. Conclusions et perspectives.....	27
5. Bibliographie.....	28
6. Annexes.....	29
6.1. Schéma électrique de la carte « comparateur/séquençement ».....	29
6.2. Opérateurs, fonctions ou portes logiques de base.....	30

## 1. INTRODUCTION

Durant ce semestre, nous avons pu, par le biais de l'EC P6, nous intéresser au fonctionnement ainsi qu'à la réalisation d'un multimètre numérique.

Nous nous sommes orientés vers ce sujet, car le multimètre est un outil basique, que l'on manipule depuis des années pendant les TP. Toutefois, ce dernier restait pour nous une boîte noire : nous n'avions aucune idée des principes permettant d'obtenir une valeur numérique affichée sur l'écran du multimètre.

Durant ce projet, nous avons eu deux objectifs. Tout d'abord, il nous a fallu comprendre la théorie du multimètre, c'est à dire à la fois les différents moyens permettant de calculer une tension ou une intensité et ainsi obtenir l'information voulue, mais également le fonctionnement d'une carte convertisseur analogique-numérique, pour transformer cette information en une nouvelle, lisible par l'utilisateur.

Nous avons ensuite tenté de retranscrire cette théorie, par le biais de la maquette de TP de monsieur Guillotin, concernant la mise en oeuvre d'un voltmètre numérique.

Ce rapport a donc pour but de retracer notre travail au long de ce semestre. Dans un premier temps, nous étudierons le principe de la carte CAN. Nous parlerons ensuite des différents composants constituant le reste de notre montage, qui permettront de transformer notre signal pour permettre des mesures. Enfin, nous tenterons d'élargir ce modèle, notamment en calculant des tensions et des intensités de courant alternatifs.

## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Nous avons durant les premières séances travaillé tous ensemble afin de câbler et de comprendre la fonction de chaque composant et fonction présents sur la maquette du TP voltmètre numérique de Mr Guillotin (EC P10 2010). Cette première étape a duré la première partie du semestre afin d'acquérir la culture électronique nécessaire pour comprendre le fonctionnement des différentes cartes entre elles et les transformations des signaux. Une fois le voltmètre pour une tension continue réalisé, nous avons réfléchi à comment adapter cette maquette pour qu'elle nous permette de mesurer une tension alternative. Nous avons suivi le même raisonnement pour un courant continu puis alternatif. Du point de vue répartition, Sunhao et He se sont occupés de la partie courant tandis que Anselme et Lucas se sont occupés de la partie tension. Pour l'aspect mathématique, Sunhao et Lucas ont réalisés les principaux calculs. Lors de ces séances, nous avons reçu l'aide de notre professeur encadrant, Mr Guillotin qui nous a fourni des documents annexes et nous a expliqué les notions mal comprises ou floues.

Durant ce projet, nous avons majoritairement communiqué par mail pour échanger nos parties et schémas. Nous nous sommes bien entendu et avons apprécié le sujet qui a permis de travailler de de bonne condition malgré que le créneau était sur la dernière heure de la semaine.

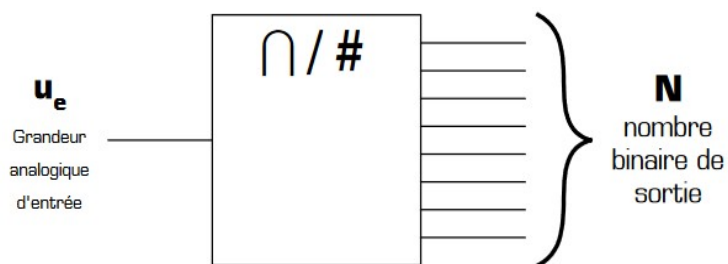
En ce qui concerne la rédaction du projet, nous avons dû nous adapter par rapport aux difficultés en français de Sunhao et He. Le rapport a été exclusivement rédigé par Anselme et Lucas, pour les parties de Sunhao et He nous nous sommes basés sur ce qu'il nous ont envoyés en français que nous avons corrigés.

### 3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

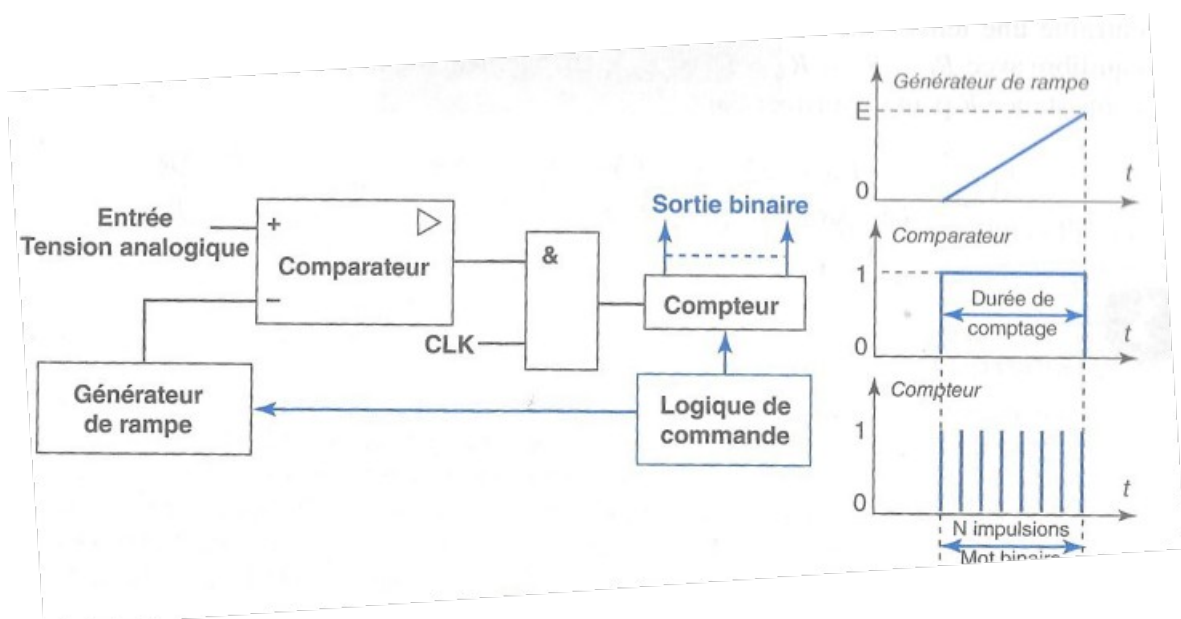
#### 3.1. Principe du convertisseur analogique numérique à simple rampe

Un convertisseur analogique numérique (CAN ou ADC en anglais) est un dispositif électronique permettant de transformer une grandeur analogique  $U_e$  en un nombre binaire  $N$ , proportionnel à la grandeur d'entrée  $U_e$ . La grandeur d'entrée à convertir est généralement une tension électrique.

La transformation du signal analogique continu en signal discret s'effectue de manière régulière, à la fréquence d'échantillonnage. La valeur numérique de sortie est généralement proportionnelle au rapport entre la grandeur analogique d'entrée et la valeur maximale du signal d'entrée. C'est le principe d'un multimètre.



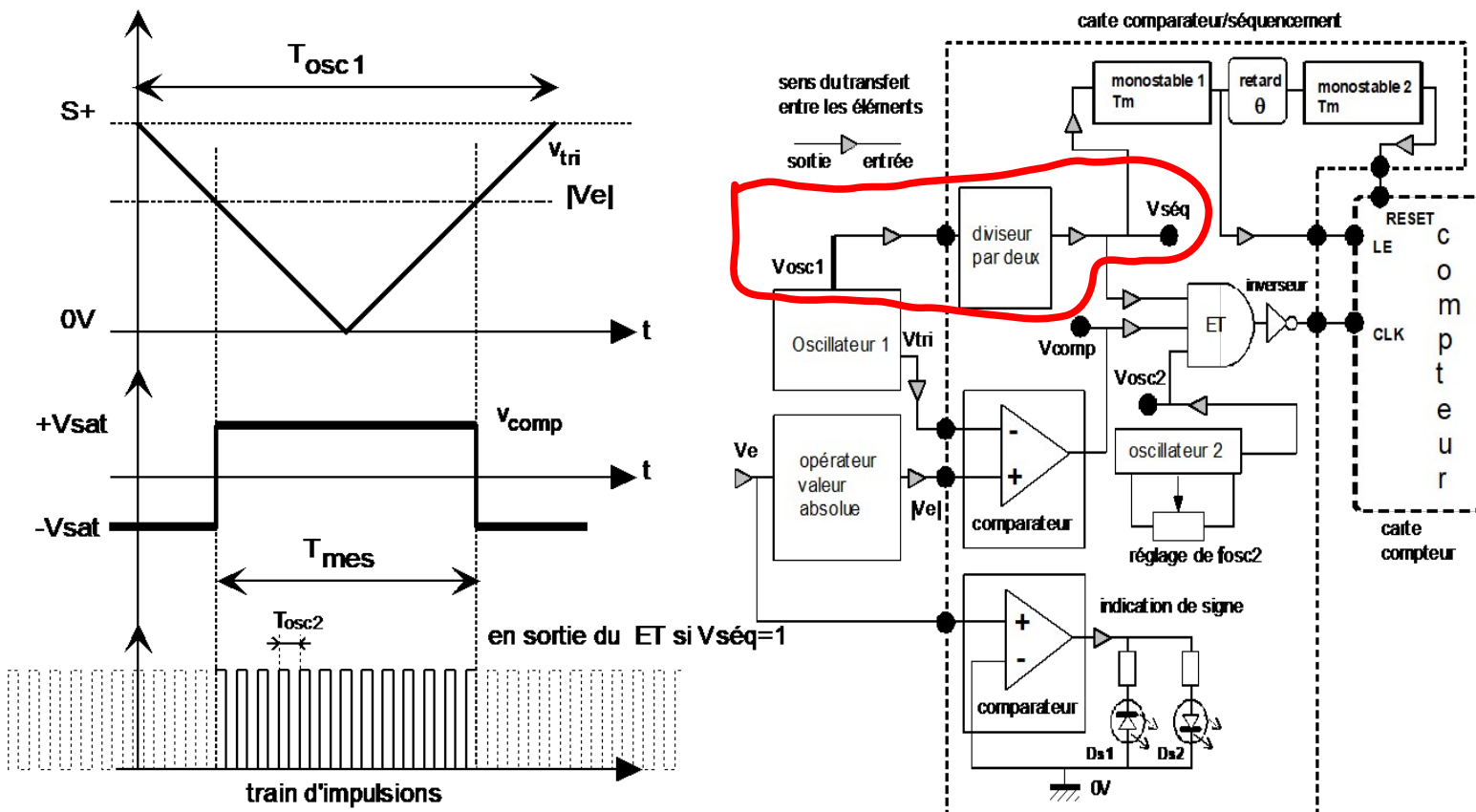
Le convertisseur utilisé pour la maquette du TP voltmètre numérique de Mr Guillotin (EC P10 2010) est un convertisseur à intégration à simple rampe. La résolution de ce convertisseur ou quantum correspond à la plus petite variation de tension appliquée au signal d'entrée qui varie sur la valeur binaire en sortie. Ici pour 6V on a 600 impulsions donc pour 1V on a 10mV « d'incertitude » sur la valeur affichée.



Le principe d'un CAN à simple rampe est que la tension à convertir est comparée à une simple rampe (linéaire et en fonction du temps). Cette rampe est produite par la charge du condensateur à courant constant. Tant que la tension de la rampe est inférieure à la tension à mesurer, on compte les impulsions délivrées par une horloge.

Dans le montage, la rampe correspond à  $V_{tri}$ , tension au motif triangulaire qui est issue de l'oscillateur 1 qui est un oscillateur à relaxation. Il est le générateur de rampe. La tension à convertir est la tension  $|V_e|$  qui va être comparée à la rampe. Tant que  $|V_e|$  est inférieure à  $V_{tri}$ , on compte les impulsions qui sont délivrées par l'oscillateur 2. Celui ci détient le rôle d'horloge. La fréquence  $T_{osc1}$  est nécessairement plus grande que  $T_{mes}$  pour augmenter la précision et la résolution de la mesure.

Ce principe n'est valable que pour des tensions continues et positives. Il faut donc généraliser ce principe pour des tensions positives et négatives. Il faut donc faire la valeur absolue d'une tension négative pour qu'on puisse la convertir. De plus il nous faut un comparateur avec deux diodes pour avoir le signe de la tension mesurée en plus de sa valeur binaire. La particularité de ce montage est qu'il est périodique : en effet sur ce genre de CAN il n'est effectué qu'une seule mesure, ensuite il faut relancer manuellement via un interrupteur la mesure. Ici plus besoin d'interrupteur, le signal de séquençement  $V_{seq}$  a ce rôle de chef d'orchestre et permet que ce système soit périodique via un diviseur par deux de fréquence. La porte ET dépend de  $V_{seq}$  : si  $V_{seq}$  vaut 0 alors la porte est bloquée. La périodicité dépend uniquement de  $V_{seq}$ , l'ensemble fonctionne donc en deux états. Lorsque  $V_{seq} = 1$ , le comptage a lieu. Lorsque  $V_{seq} = 0$ , on assiste à la mémorisation et la réinitialisation du compteur en arrière plan des afficheurs.

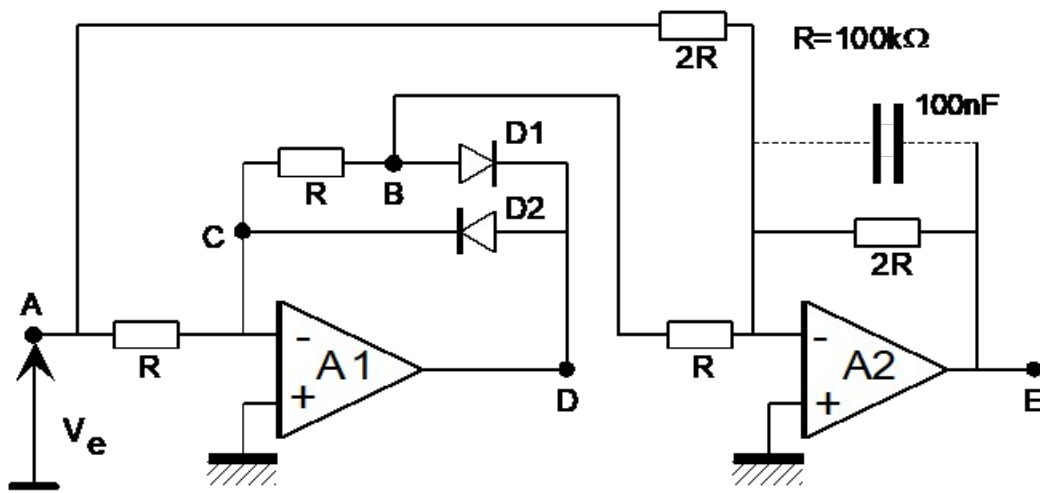




### 3.2. Mesure d'une tension continue par réalisation d'un voltmètre numérique

Un voltmètre numérique est un appareil qui permet de mesurer la tension ou différence de potentiel électrique entre deux points. C'est une grandeur dont l'unité de mesure est le volt. Dans notre cas, nous avons étudié et réalisé un voltmètre numérique comportant deux parties à deux sous ensembles. Dans une première partie nous avons l'oscillateur de base fournissant l'horloge de séquençement et la rampe puis nous avons l'opérateur donnant la valeur absolue d'une tension. Dans la deuxième partie, nous avons la carte comparateur séquençement avec la carte compteur comportant un afficheur 7 segments pour lire la valeur de la tension entre deux points considérés.

#### 3.2.1. L'opérateur valeur absolue

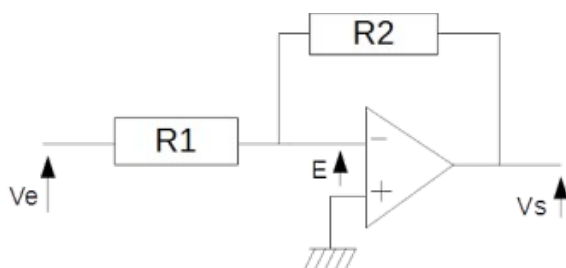


Voici le schéma du circuit intégré qui permet d'obtenir la valeur absolue d'une tension d'entrée  $V_e$ . Il est composé de 5 résistances, deux diodes, deux amplificateurs opérationnels avec un condensateur optionnel qui permet d'éliminer d'éventuels parasites par un effet de filtrage passe bas.

Tout d'abord intéressons nous à l'AOP A1 qui est un amplificateur inverseur. C'est à dire que la tension de sortie  $V_s$ , ici au point D, est inversée par rapport à l'entrée (multipliée par -1). Dans notre montage, les résistances sont de même valeur donc il n'y a pas de gain,  $V_s$  n'est ni amplifiée ni atténuée.

On considère cet AOP parfait afin de déterminer la relation d'entrée-sortie.  $E = 0V$ , ce qui implique que :

$V_+ = V_- = 0V$  Grâce au théorème de Millmann on obtient :



$$V_- = \frac{(VeR_2 + VsR_1)}{(R_1 + R_2)}$$

$$0 = VeR_2 + VsR_1$$

$$VsR_1 = -VeR_2$$

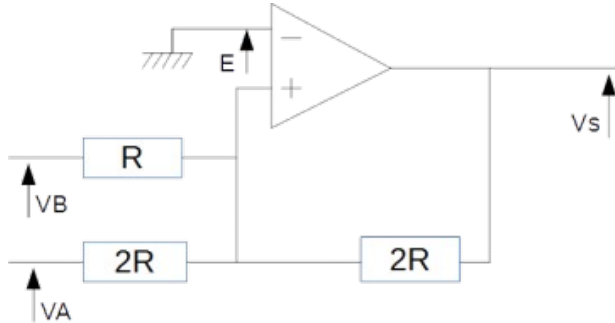
$$Vs = -Ve \frac{R_2}{R_1}$$

Par exemple, si nous prenons 5V en entrée, on aura en sortie -5V et inversement.

Pour A2, cet amplificateur est un amplificateur sommateur c'est à dire qu'il fait la somme des tensions en entrée. Dans notre cas, on somme  $V_a$  et  $V_b$  en fonction des résistances du circuit.

On considère cet AOP parfait afin de déterminer la relation d'entrée sortie.  $E = 0V$ , ce qui implique que :

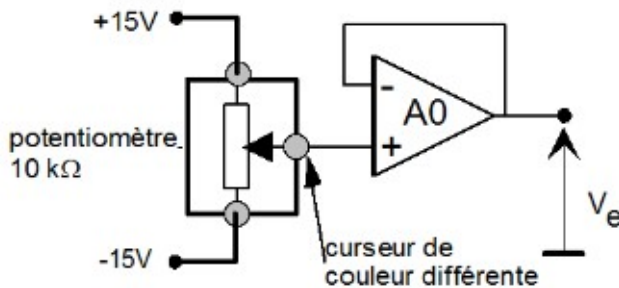
$V_+ = V_- = 0V$  Grâce au théorème de Millmann on obtient :



$$V_- = \frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_s}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

$$\frac{V_s}{R_3} = -\left(\frac{V_1}{R_1}\right) - \left(\frac{V_2}{R_2}\right)$$

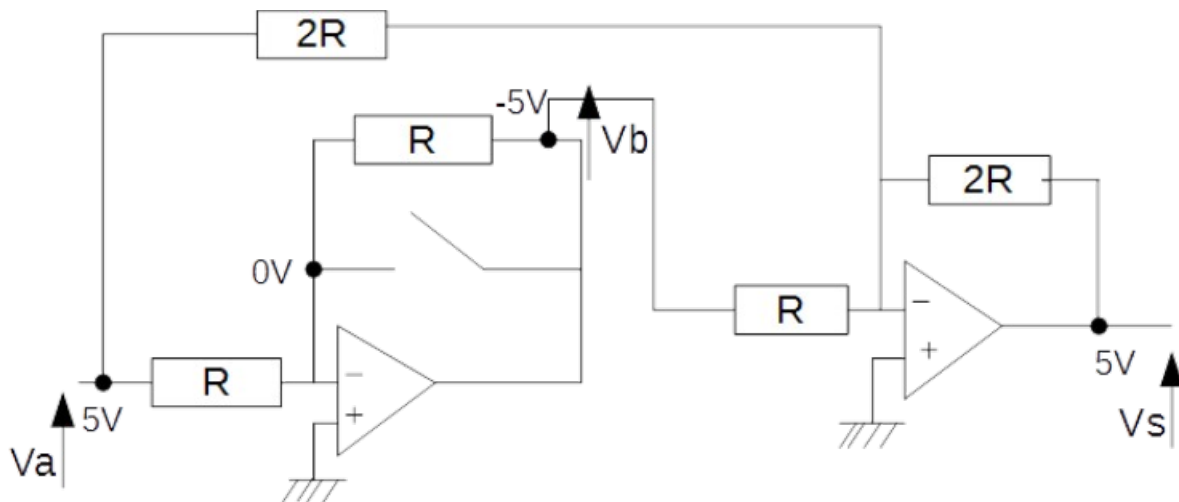
$$V_s = -V_B\left(\frac{2R}{R}\right) - V_A\left(\frac{2R}{2R}\right)$$

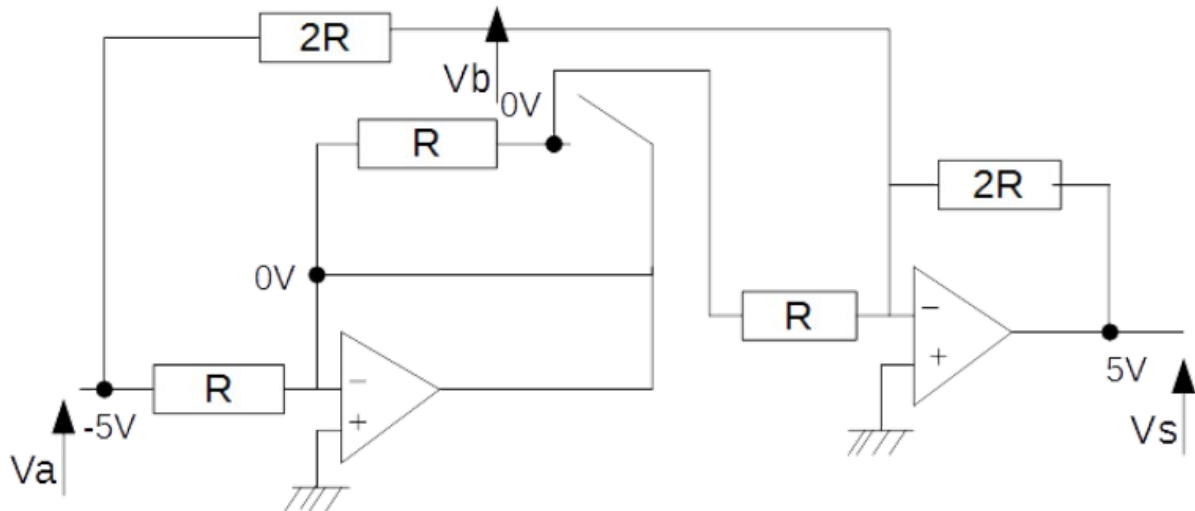


De plus, il faut considérer deux cas pour cet opérateur, le cas où le potentiomètre délivre une tension positive et le cas où il définit une tension négative.

Le montage est composé de deux diodes qui sont tantôt passantes et tantôt bloquées selon le signe de la tension mesurée. Une diode passante est une source de tension de 0.6V matérialisée par un fil sur les schémas suivants tandis qu'une diode bloquée est équivalente à un interrupteur ouvert.

On obtient donc comme schéma général dans chaque cas :



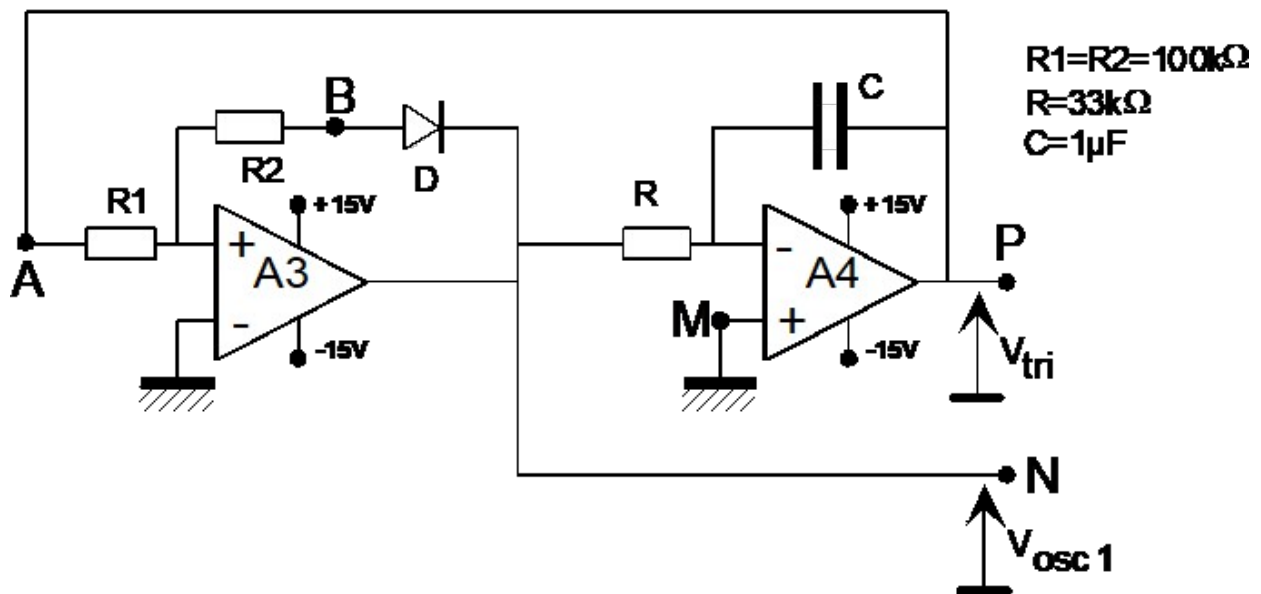


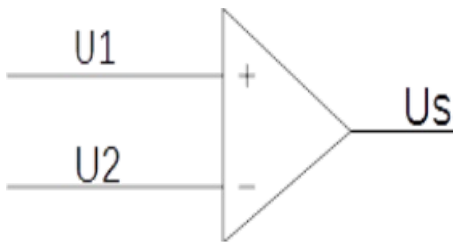
Par exemple, si nous prenons le premier schéma, nous avons une tension d'entrée positive  $V_e = 5V$ , on obtient alors via la relation démontrée plus tôt pour un amplificateur sommateur  $V_s = (-5)(-2) - 5 = 5V$

De même, si nous prenons le schéma ci dessus, c'est à dire dans une configuration où la tension d'entrée est négative :  $V_e = -5V$ , nous obtenons  $V_s = 0(-2) - (-5) = 5V$

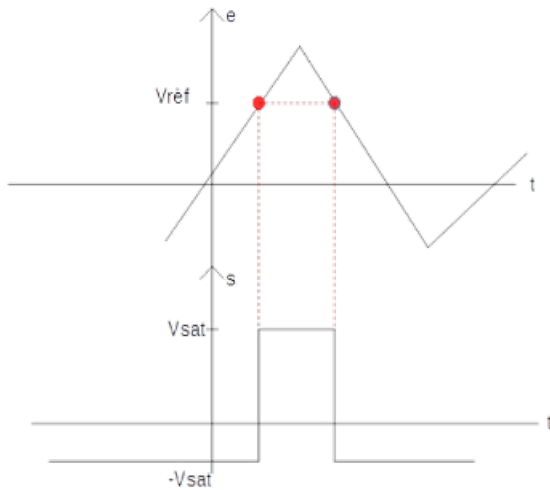
### 3.2.2. Générateur de la rampe et horloge de séquencement

L'oscillateur présent est un oscillateur à relaxation. Il permet la génération de signaux périodiques carrés et triangulaires. Il est composé d'un comparateur à hystérésis ou Trigger de Schmidt (non inverseur) (A3) qui est bouclé avec un intégrateur (A4). En sortie du comparateur, nous obtenons  $V_{osc 1}$  qui est un créneau. Ce signal est ensuite transformé en signal triangulaire,  $V_{tri}$ , via l'intégrateur puis il est réinjecté à l'entrée du comparateur.





Commençons par le principe du montage comparateur, si nous appliquons deux tensions U1 et U2 aux bornes des entrées, nous allons étudier le signe de la différence. Lorsque U1 est supérieur à U2, la tension en sortie de l'AOP Us prend la valeur de la tension de saturation de même signe, soit idéalement 15 V. Si U1 est inférieur à U2 alors la sortie de l'AOP Us prend la valeur de saturation de même signe soit idéalement -15V. La sortie ne peut prendre que ces deux valeurs.



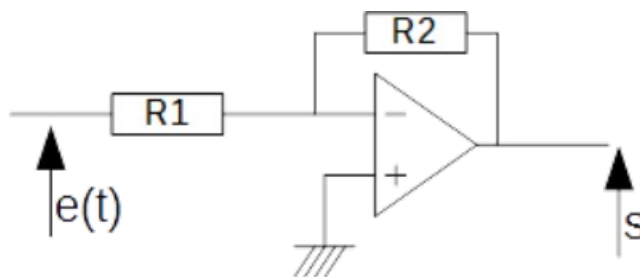
Prenons l'exemple pour un comparateur à un seuil de commutation Vrèf, on obtient donc ces courbes où dès que Vrèf est obtenue, la sortie +Vsat est activée jusqu'à sa désactivation par l'obtention de Vrèf une nouvelle fois (activation de -Vsat).

Notre comparateur est un comparateur à hystérésis non inverseur c'est à dire que la tension variable au cours du temps est branchée sur l'entrée non inverseuse, l'entrée +. Dans notre montage, Vrèf = 0V, on compare donc la tension d'entrée e(t) à la masse, ce qui revient à étudier le signe de cette tension. Il y a deux valeurs de la tension d'entrée qui provoque le changement d'état de la sortie, deux seuils de commutation. Si la sortie est à +Vsat, c'est le seuil S- qui est activé, Si la sortie est à -Vsat, c'est le seuil S+ qui est actif. De plus la tension d'entrée est issue de l'intégrateur. Donc  $\forall t: -V_{sat} \leq e(t) \leq +V_{sat}$

On a donc la relation suivante:  $V_s \approx V_{sat} \times \text{signe}(e - V_{ref})$  qui n'est pas fonction de la sortie.

On suppose l'AOP idéal donc  $E=0V$  ce qui implique que  $V_+ = V_- = 0V$

Grâce au théorème de Millmann on obtient :



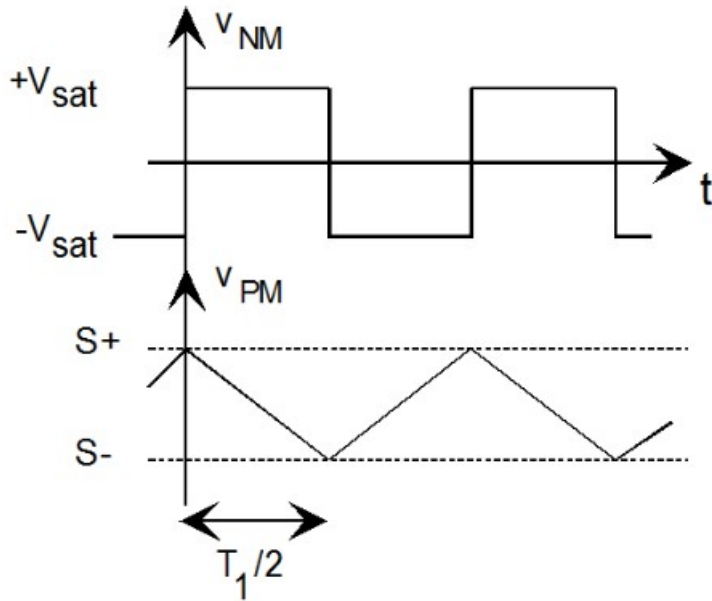
$$V_+ = \frac{\frac{e}{R_1} + \frac{s}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

$$V_+ = \frac{R_2 e + R_1 s}{R_1 + R_2}$$

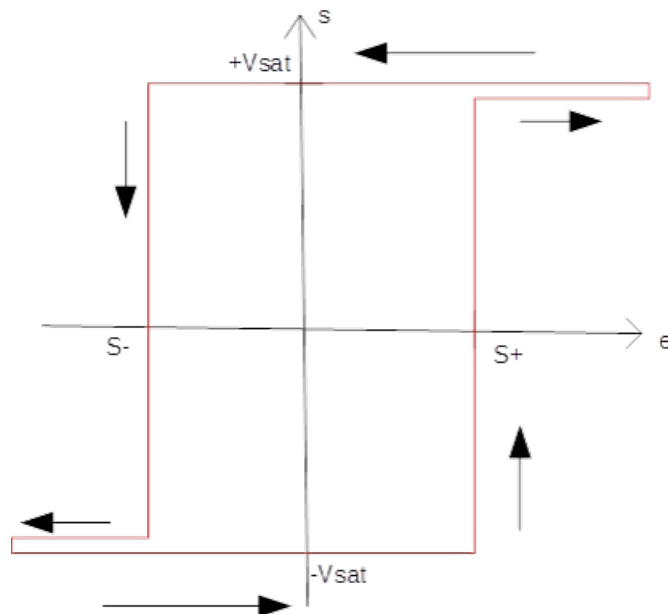
$$0 = R_2 s + R_1 s$$

Dans le cas où  $s = +V_{sat}$  et  $e = S_-$  on a comme seuil de commutation :

$$S_- = -\frac{R_1}{R_2} (+V_{sat}) \quad \text{Dans le cas inverse :} \quad S_+ = -\frac{R_1}{R_2} (-V_{sat})$$

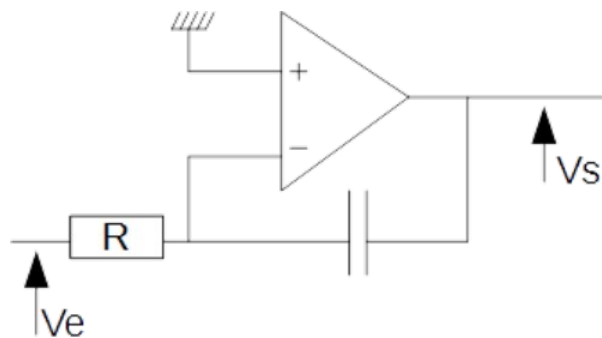


On obtient donc ces signaux où en pratique les valeurs de saturation sont proches de 13,6V et -13,6V.

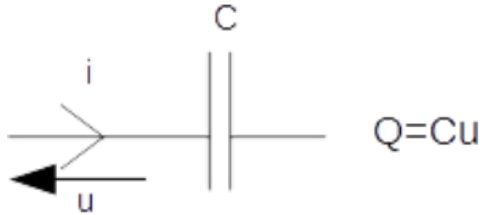


On peut aussi tracer le signal en sortie en fonction du signal en entrée pour résumer.

Passons maintenant à l'intégrateur, il a pour signal de sortie l'intégrale de son signal d'entrée. Ici en entrée, nous avons un signal créneau qui est transformé en signal triangulaire.



Déterminons la relation d'entrée- sortie :



$$i = \frac{dQ}{dt} = c \frac{dU}{dt} = \frac{e}{R}$$

Comme  $s = -u$  on a :

$$i = -c \frac{ds}{dt}$$

$$\int_0^t e dt = \int_0^t -RC \frac{ds}{dt} dt = (s(t)) - s(0) = -\frac{1}{RC} \int_0^t e(t) dt$$

On remarque que la tension de sortie sera l'intégrale de la tension d'entrée multiplié par un gain de  $-\frac{1}{RC}$

Dans notre cas la relation d'entrée-sortie est  $-\tau \frac{d}{dt}[e(t)] = s(t)$  ou encore  $-\tau \left[ \frac{S^- - S^+}{\frac{T_1}{2}} \right] = +V_{sat}$

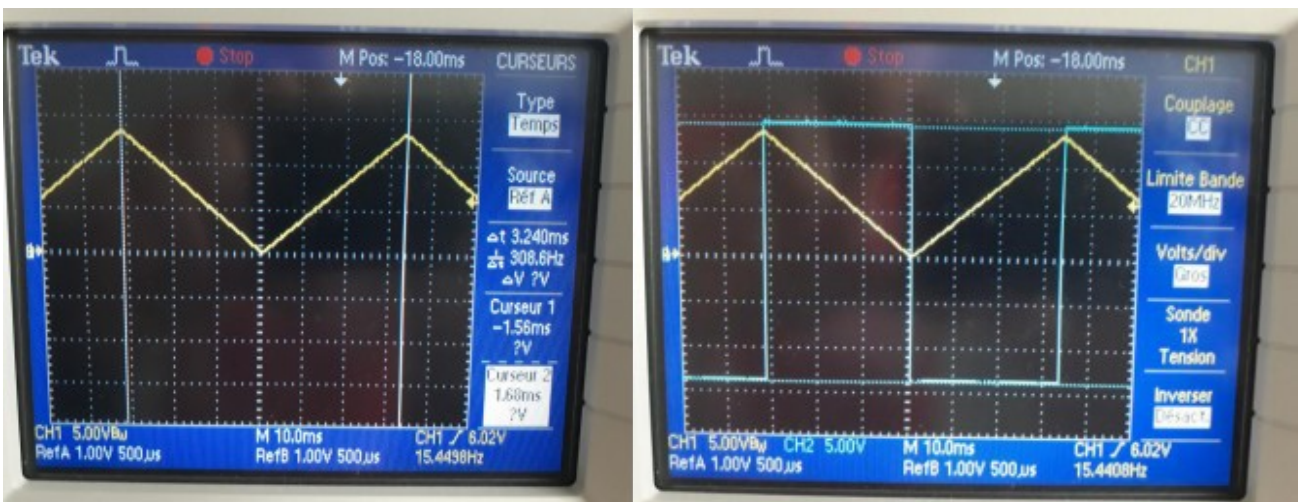
$$s_+ - s_- = -\frac{R1}{R2} (2V_{sat})$$

La fréquence du signal triangulaire est de :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{-V_{sat}}{2(S_+ - S_-)\tau} = \frac{-V_{sat}}{\frac{R1}{R2} (-4V_{sat})\tau} = \frac{1}{4\tau \frac{R1}{R2}} = 7.5Hz$$

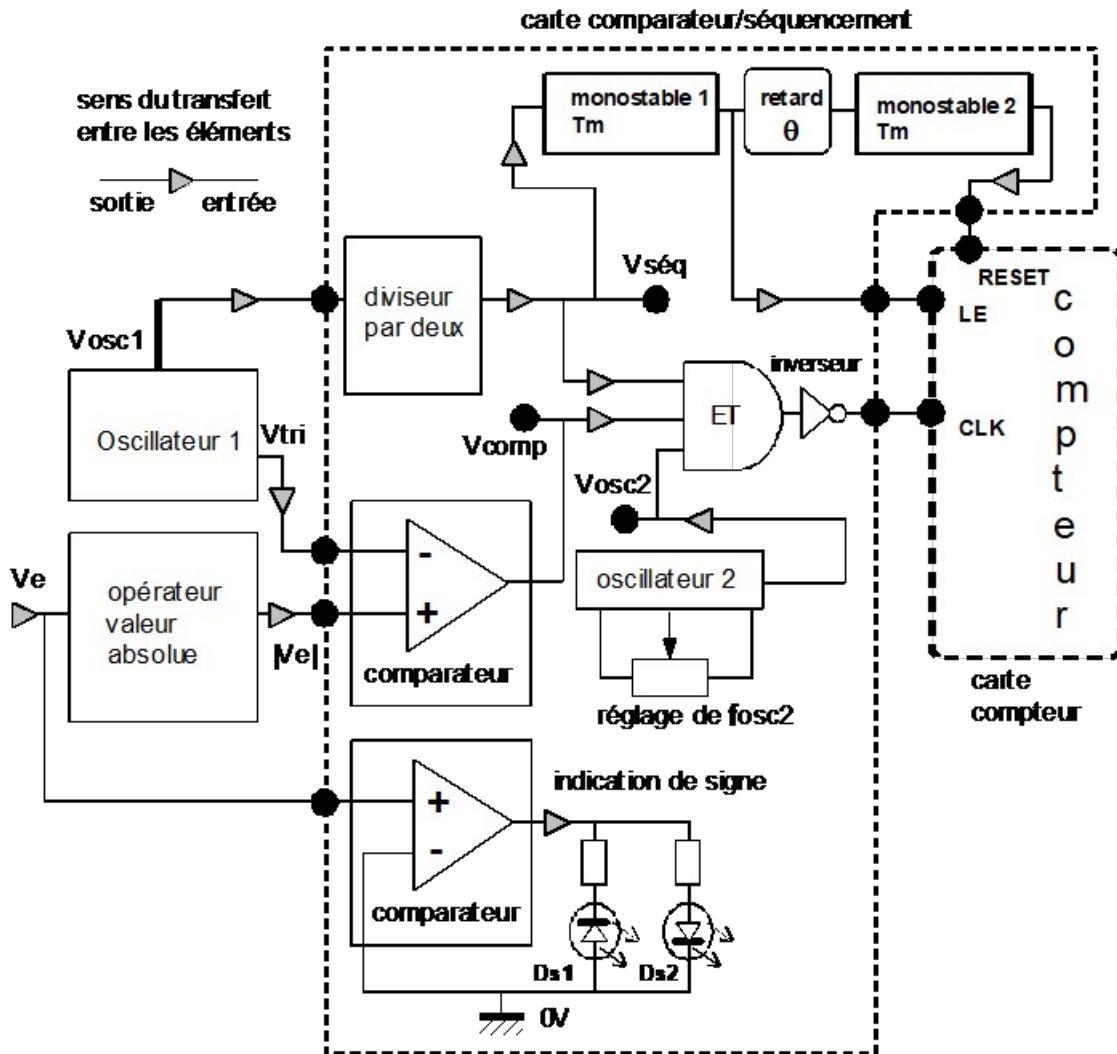
La diode présente permet de fixer  $S^-$  à 0V comme valeur de référence ce qui double la fréquence soit 15 Hz.

Expérimentalement, nous obtenons ces courbes:



On observe bien que la fréquence du signal est de l'ordre de 15Hz ainsi que pour le signal carré nous avons pour valeur de saturation 13,8 et -13,8V.

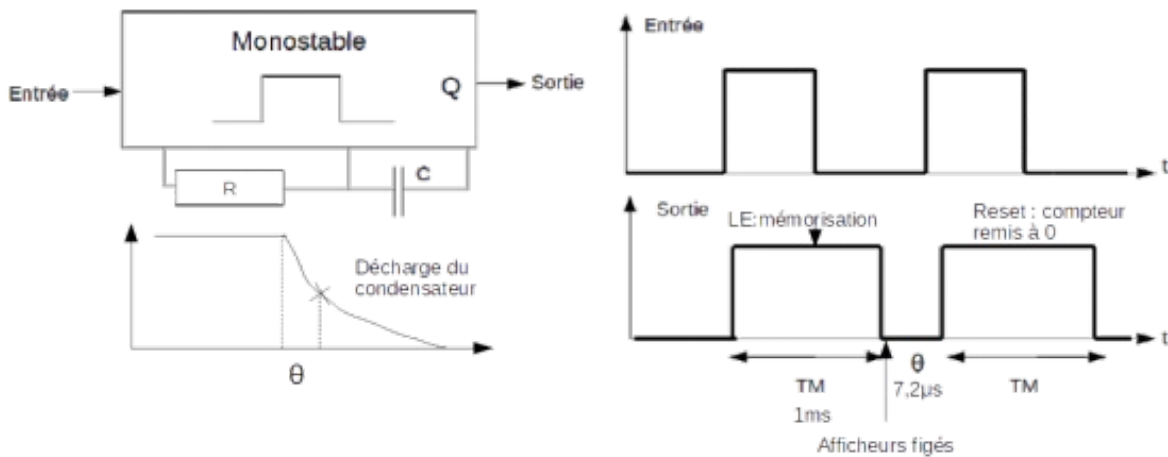
**3.2.3. Carte comparateur et séquençement**



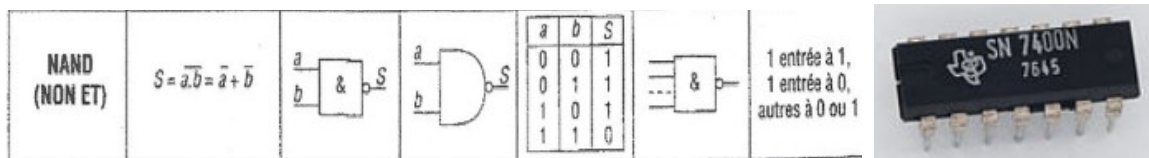
Voici le schéma fonctionnel de l'ensemble. En ce qui concerne la carte comparateur et séquençement, elle est composée de deux fonctions monostables, d'une fonction diviseur par deux et d'une fonction ET. De plus un comparateur permet d'indiquer le signe de la tension via 2 diodes  $D_{s1}$  et  $D_{s2}$ .

En ce qui concerne la fonction monostable, elle génère une impulsion d'une durée déterminée qui est réglée par un circuit "RC", ici  $T_m$ . Cette impulsion est déclenchée par un changement de niveau en entrée du monostable soit par un front montant soit par un front descendant, ici un front descendant. Nous avons placé un retard  $\theta$  grâce à un circuit RC entre les deux monostables de façon à avoir deux impulsions, de largeur  $T_m$ , séparées par un temps  $\theta$ . Le circuit a un temps de réponse de l'ordre de la nanoseconde ce qui lui laisse largement le temps d'effectuer ses fonctions.

Les monostables sont des 4538 redéclenchables, mais ici c'est option n'a pas de rôle, de chez « national semi conductor ».



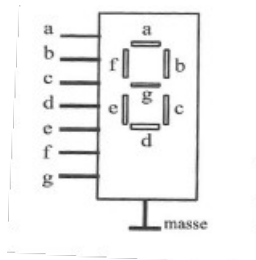
Pour la fonction ET, si une des trois entrées est à zéro alors la sortie est à zéro. L'inverseur n'a ici aucune action fonctionnelle. Nous avons utilisé un "et inverseur" (porte NAND) car le circuit intégré comporte trois portes en entrée, la dernière porte nous servant pour réaliser l'oscillateur. De plus la fonction "NON ET" est l'opérateur universel qui permet de reconstituer tous les autres opérateurs.



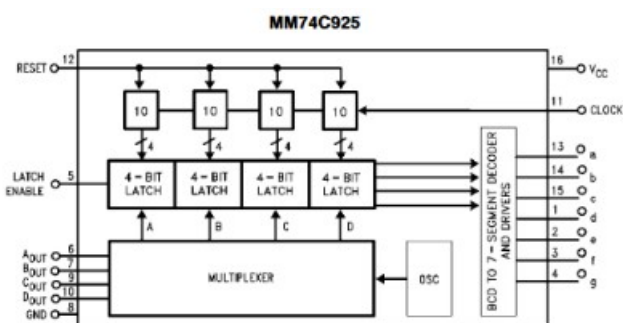
La fonction diviseur par deux permet d'obtenir un signal carré Vseq dont la fréquence est la moitié de celle du signal triangulaire. Il y a deux phases de fonctionnement. Si Vseq = 1, la porte ET devient alors passante et le train d'impulsions est alors envoyé vers le compteur. Si Vseq = 0 la porte ET est bloquée au zéro.

**3.2.4. Carte compteur**

La carte compteur présente la fonction compteur qui a pour entrée: CLK, LE et RESET. Pour afficher les chiffres, on utilise 4 afficheurs 7 segments. La valeur de la tension est affichée par transcodage entre le code binaire et le code permettant d'allumer les segments.



Prenons l'exemple suivant: si en a,b,c,d,e et f nous avons 1 et 0 en g, il sera affiché 0.



Le compteur est le circuit intégré MM74C925 de chez "National Semiconductor". On y retrouve les différentes entrées avec un multiplexeur qui permet la gestion de l'affichage. En effet si on fige les afficheurs, on remarque que un seul de ces afficheurs fonctionne. Le multiplexeur a donc le rôle de faire la rotation de l'affichage de sorte qu'à l'oeil nu on voit les 4 afficheurs allumés en même temps.



L'entrée CLK (clock= horloge) a pour fonction de compter les transitions montantes du train d'impulsion qui est envoyé via  $V_{seq} = 1$ .

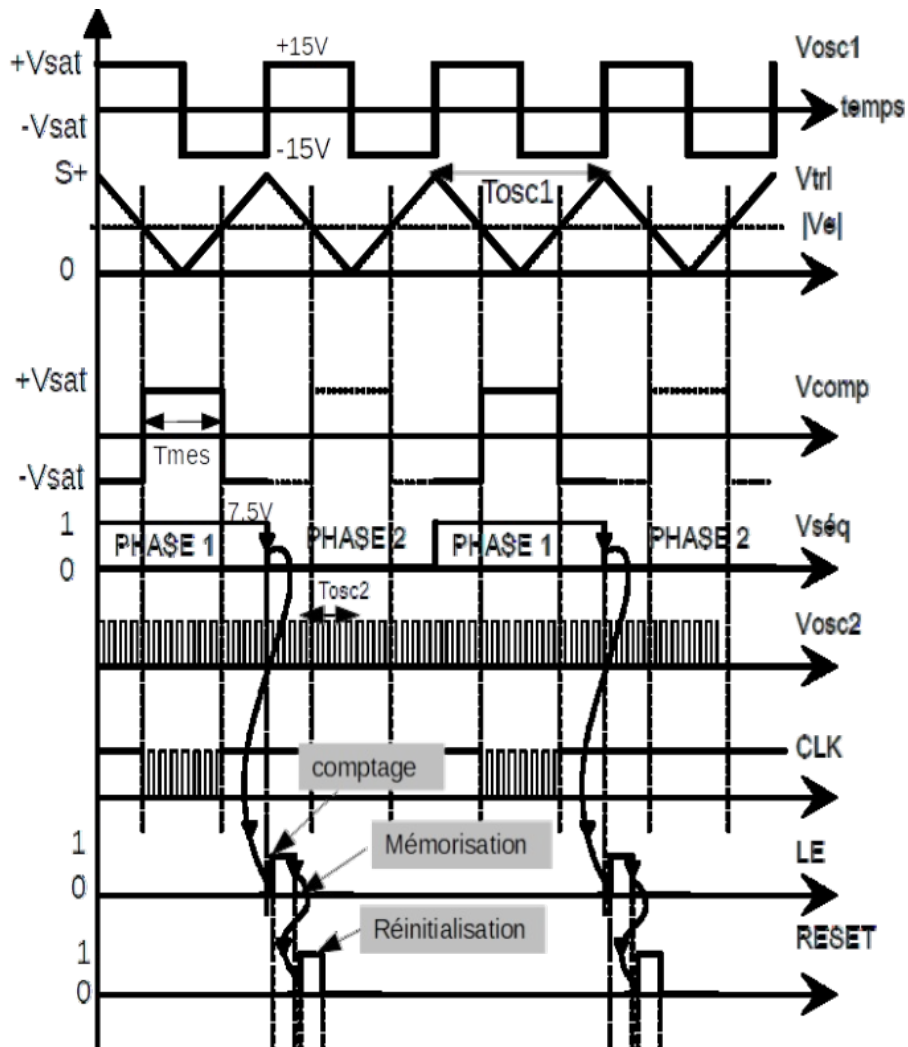
L'entrée LE (latch enable) a pour fonction de valider les mémoires tampon de sortie vers les afficheurs. Lorsque cette entrée est à 1, le contenu du compteur est visualisé en temps réel sur les afficheurs. Lorsque cette entrée passe à 0, les afficheurs sont figés sur la dernière valeur mémorisée lors du passage au 0.

L'entrée RESET (réinitialisation) a pour fonction de réinitialiser la mémoire des afficheurs quand cette entrée est mise à 1.

De plus lorsque la fonction ET est à 0, l'entrée CLK passe à 0, les impulsions ne passent plus ce qui fige le compteur. L'impulsion LE provoque ainsi l'envoi sur les afficheurs du résultat du comptage des impulsions contenues dans le train. Ensuite l'impulsion RESET remet le compteur au zéro, mais les afficheurs restent figés sur le comptage qui vient d'être fait. La remise au zéro du compteur se fait donc en arrière plan. Sur les afficheurs, on voit seulement se succéder les différents résultats du comptage.

Étudions maintenant les différents signaux pour déterminer le nombre d'impulsions dans le train et la valeur théorique de la fréquence de  $V_{osc2}$ . Comme on peut le voir dans le schéma suivant nous avons :

$$N = \frac{T_{mes}}{T_{osc2}} \qquad \frac{S_{+0}}{T_{osc1}} = \frac{|V_e| - 0}{T_{mes}}$$



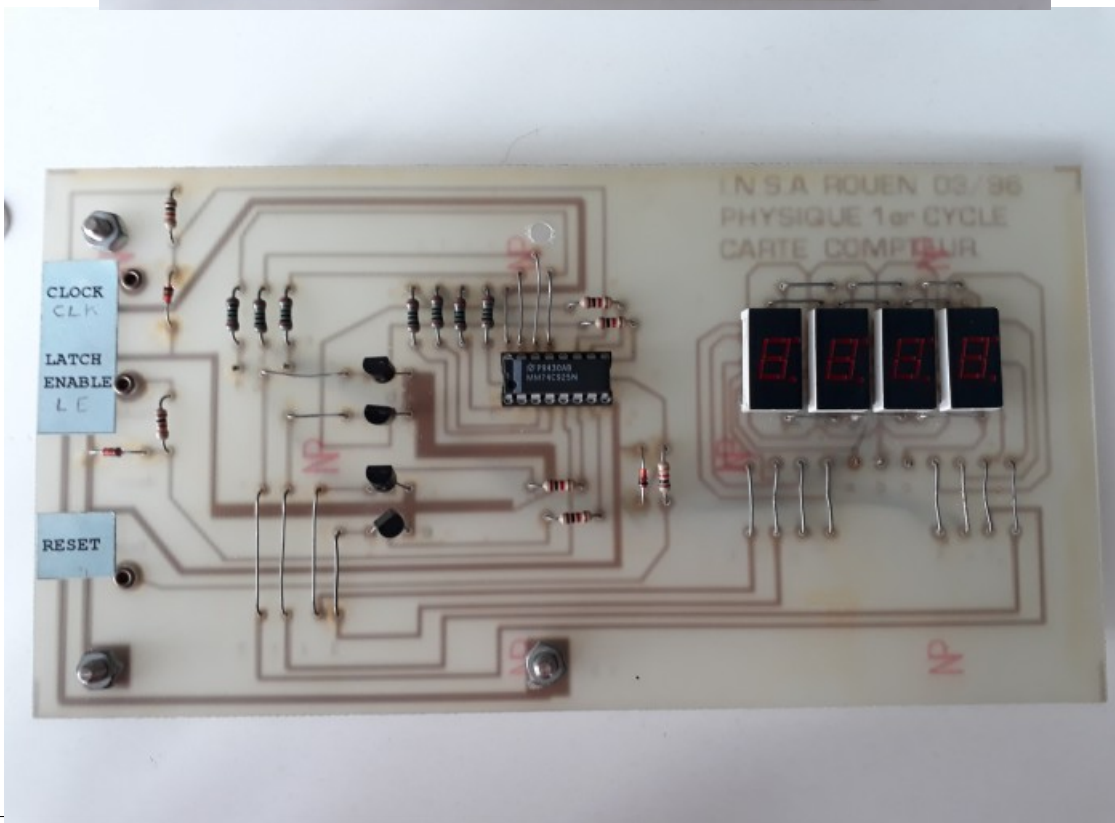
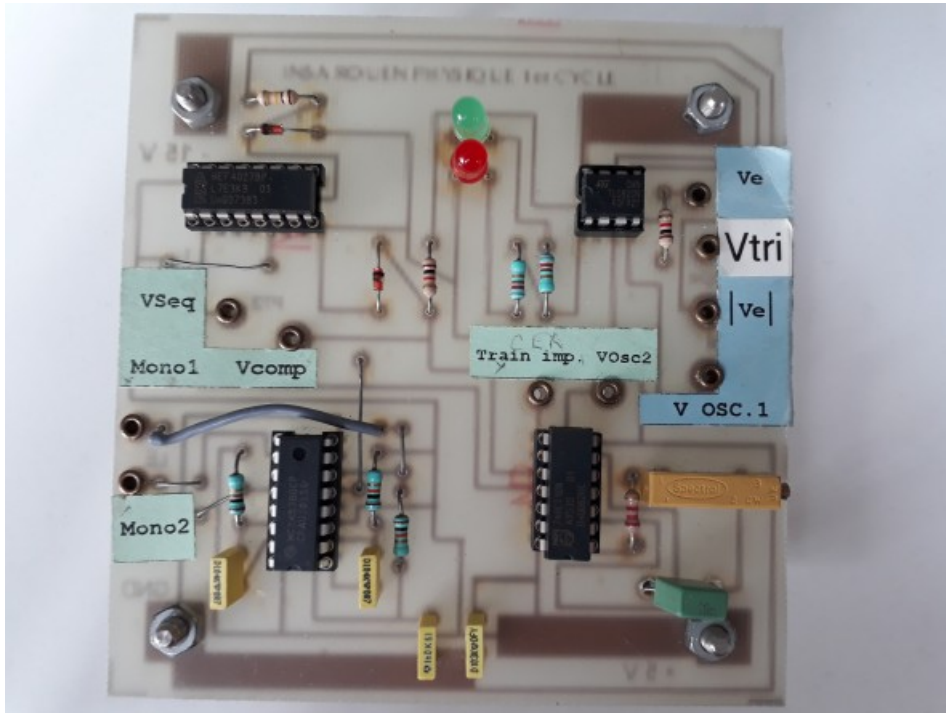
On obtient donc pour  $N = 600$  impulsions,  $|V_e| = 6\text{ V}$ ,  $S_+ = 13.6\text{ V}$  et  $T_{osc1} = 15.47\text{ s}$ . En pratique, on obtient 19KHz, de plus, le seul paramètre variable est  $S_+$ .

$$T_{mes} = \frac{T_{osc1} |V_e|}{S_+}$$

$$T_{osc2} = \frac{T_{osc1} |V_e|}{S_+ N}$$

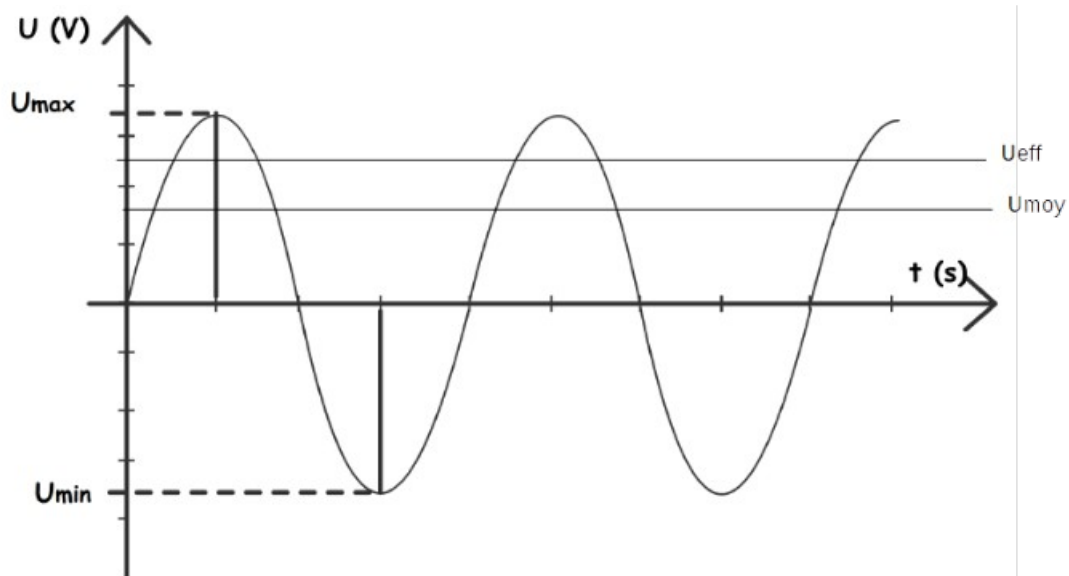
$$f_2 = \frac{1}{S_+ N} |V_e|$$

$$f_2 = 21\text{KHz}$$



### 3.3. Mesure d'une tension alternative

Dans cette partie, nous allons étudier le cas d'une tension alternative sinusoïdale et les modifications du montage qui suivent afin de mesurer la tension efficace de ce signal. Tout d'abord, commençons par quelques définitions, une tension alternative sinusoïdale est la tension que l'on trouve sur les prises de secteurs, elle est représentée par une succession de vagues alternativement situées en dessous et au dessus de l'axe des abscisses. Les variations de cette tension peuvent être décrite par la fonction sinus. La tension maximale d'un signal est la tension correspondant au point le plus haut du motif et inversement pour la tension minimale. La valeur efficace  $U_{eff}$  correspond à la tension continue ayant les mêmes effets (dissipation d'énergie sous forme de chaleur) dans une résistance. La tension moyenne correspond à la moyenne sur une période de la tension.



La relation entre la valeur moyenne  $U_{moy}$  et la tension maximum  $U_{max}$  est pour un signal de la forme  $U(t) = a \cos(\omega t)$ :

$$\begin{aligned} \langle U \rangle_t &= \frac{1}{T} \left( \int_0^T |U_{Max} \cos(\omega t)| dt \right) \\ \langle U \rangle_t &= \frac{1}{T} \left( \int_0^T |U_{Max} \sin(\omega t)| dt \right) \\ \langle U \rangle_t &= \frac{2}{T} \left( \int_0^{T/2} U_{Max} \sin(\omega t) dt \right) \\ \langle U \rangle_t &= \frac{-2}{T} \left[ \frac{U_{Max} \cos(\omega t)}{\omega} \right]_0^{T/2} \\ \langle U \rangle_t &= \frac{-2}{T} \left( \frac{-2U_{Max}}{\omega} \right) = \frac{4U_{Max}}{2\pi} = \frac{2}{\pi} U_{Max} \end{aligned}$$

De même pour la relation entre la valeur efficace  $U_{eff}$  et la tension maximum  $U_{max}$ , nous avons :

$$U_{eff} = \sqrt{\left( \frac{1}{T^2} \int_0^T U_{Max}^2 \cos^2(\omega t) dt \right)}$$

$$U_{eff} = \sqrt{\left( \frac{1}{T^2} \int_0^T U_{Max}^2 \left( \frac{1 + \cos(2\omega t)}{2} \right) dt \right)}$$

$$U_{eff} = \sqrt{\left( \frac{1}{T^2} \int_0^T \left( \frac{U_{Max}^2}{2} + \frac{U_{Max}^2 \cos(2\omega t)}{2} \right) dt \right)}$$

$$U_{eff} = \sqrt{\left( \frac{1}{T^2} \int_0^T \left( \frac{U_{Max}^2}{2} + \frac{U_{Max}^2 \cos(2\omega t)}{2} \right) dt \right)}$$

$$U_{eff} = \sqrt{\left( \frac{1}{T^2} \left[ \frac{U_{Max}^2}{2} t + \frac{U_{Max}^2 \sin(2\omega t)}{4\omega} \right]_0^T \right)}$$

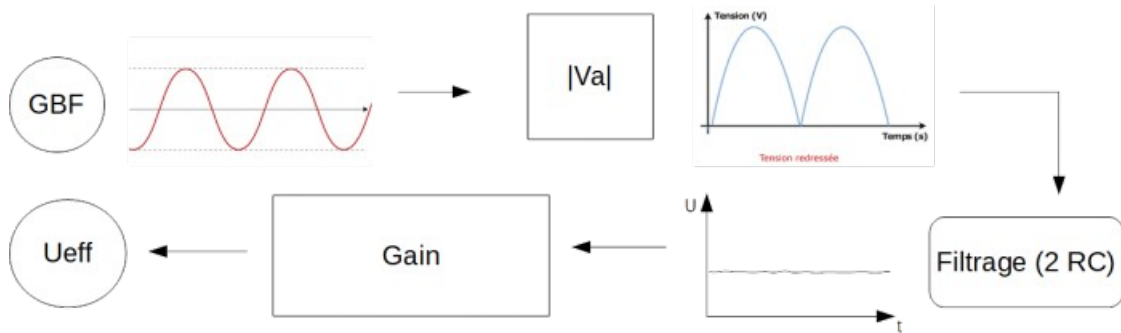
$$U_{eff} = \sqrt{\left( \frac{1}{T^2} \frac{U_{Max}^2}{2} T^2 \right)}$$

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{U_{Max}^2}{2}} = \frac{U_{Max}}{\sqrt{2}}$$

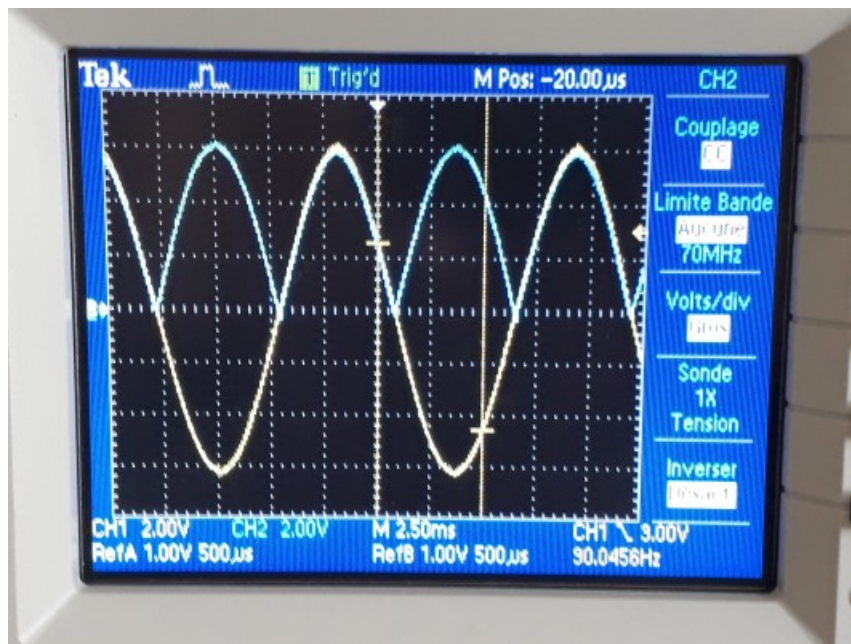
On obtient finalement la relation :

$$U_{eff} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{moy} = 1.11 U_{moy}$$

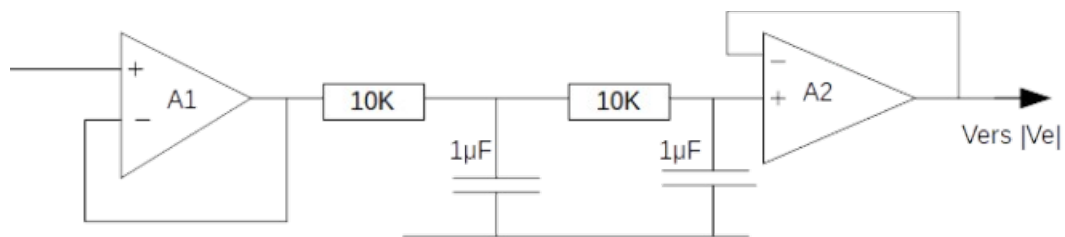
La tension alternative sinusoïdale est délivrée par un GBF. La stratégie ici pour mesurer cette tension efficace est dans un premier temps de redresser le courant alternatif via la fonction valeur absolue déjà présente dans notre voltmètre. Puis nous allons filtrer ce signal redressé afin d'avoir la valeur moyenne de ce signal sinusoïdal via deux filtres RC passe-bas. Pour finir, nous allons utiliser un AOP amplificateur non inverseur pour rectifier la valeur moyenne avec un gain de sorte à obtenir la valeur efficace. La valeur efficace étant toujours supérieure à la valeur moyenne, le coefficient sera forcément supérieur à 1.



En sortie du GBF, le signal sinusoïdal a une fréquence d'environ 90Hz, il est ensuite redressé via la fonction valeur absolue décrite plus haut. A l'oscilloscope on peut observer ceci :

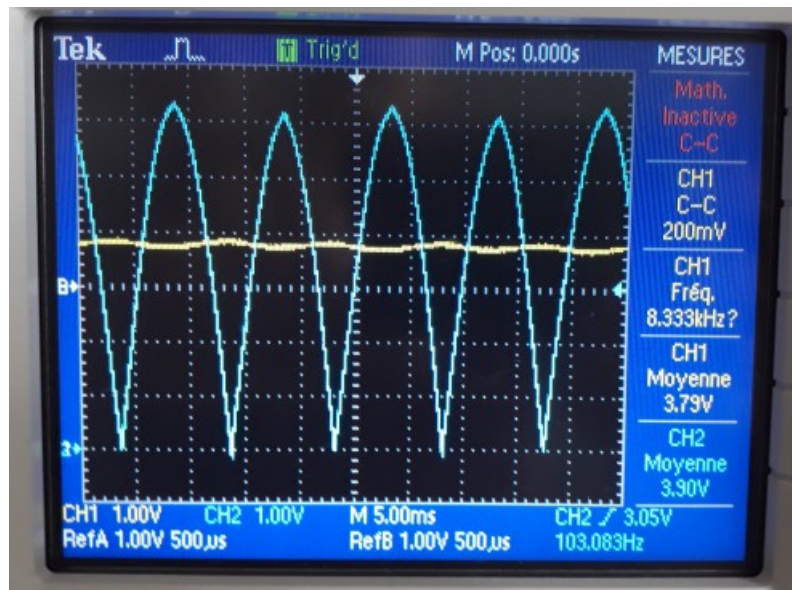


Ensuite le signal redressé est filtré par deux filtres passe-bas successifs :



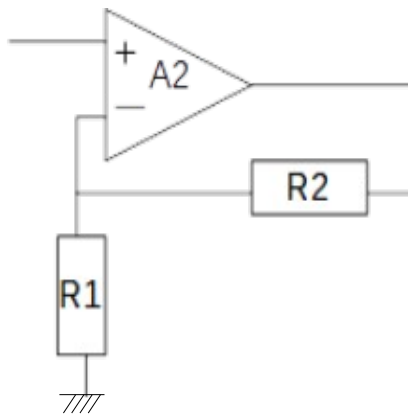


On obtient ainsi un signal presque linéaire qui correspond à la valeur moyenne en tension du signal  $u(t)$ .



Pour finir, nous arrivons à l'étape finale où il faut convertir via un gain cette tension moyenne en valeur efficace. Pour cela, nous reprenons notre AOP A2 que l'on configure en amplificateur non inverseur via le montage suivant.

On considère cet AOP parfait afin de déterminer la relation d'entrée sortie.  $E = 0V$ , ce qui implique que  $V_+ = V_- = 0V$   
Grâce au théorème de Millmann on obtient :



$$V_- = V_s \left( \frac{R_1}{(R_1 + R_2)} \right)$$

$$V_e = V_s \left( \frac{R_1}{(R_1 + R_2)} \right)$$

$$V_s = V_e \left( \frac{(R_1 + R_2)}{R_1} \right)$$

$$V_s = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_e$$

Il nous faut donc

$U_{eff} = 1,11 U_{moy}$ , il suffit de prendre  $R_2 = 10K\Omega$  et  $R_1 = 100K\Omega$

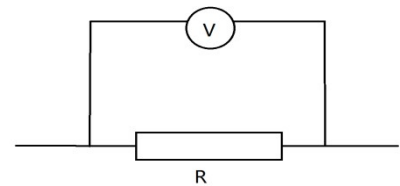
### 3.4. Mesure d'une intensité continue

Nous allons donc dans cette partie, réaliser un ampèremètre à partir du voltmètre précédent. Il nous faut donc convertir un courant continu en tension continue pour réutiliser notre circuit précédent.

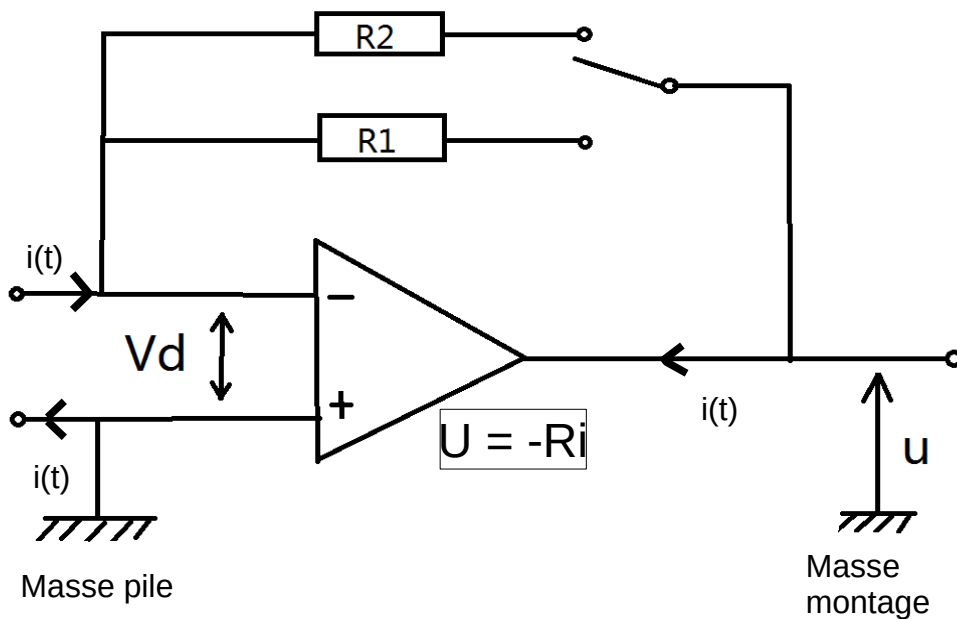
Pour calculer le courant continu, nous pouvons utiliser la loi d'ohm: dans un circuit, l'intensité du courant passant par un conducteur est proportionnelle à la tension entre les deux extrémités du conducteur, et inversement proportionnelle à la résistance du conducteur.

$$I = \frac{U}{R}$$

Voici ci dessous un montage simple pour calculer une tension :



Dans notre expérimentation, on utilise le circuit ci dessous:



En utilisant ce circuit, on peut mesurer le courant plusieurs fois en modifiant la valeur des résistances R1, R2... pour ainsi améliorer la précision du calcul.

Par la loi d'ohm, on a  $u = -R_k i_k, k = 1, 2, \dots$

On a alors R connue, puisque fixée et U connue, puisque calculée avec le voltmètre. On peut donc aisément déduire i avec la loi d'Ohm.

Ce montage est valide pour des courants ne dépassant pas la capacité de l'AOP qui est de 30 mA, pour dépasser cette valeur il faudra utiliser par exemple une résistance supplémentaire dans le montage

De plus, il faut réaliser ce montage avec deux masses différentes. En effet un ampèremètre se branche en série et si nous avons les deux mêmes masse il y aura un court circuit. Pour ainsi éviter se problème, nous avons pris la masse d'une pile classique.

### 3.5. Mesure d'une intensité alternative

En suivant le même raisonnement que pour la tension, pour le courant alternatif, il nous faut utiliser de nouveaux outils puisque l'intensité oscille entre une valeur positive et négative. Nous devons alors calculer la valeur effective de l'intensité du courant et la valeur moyenne de l'intensité du courant.

La formule de l'intensité d'un courant alternatif est

$$i = i_{\text{crete}} \sin(\omega t)$$

Pour calculer la valeur moyenne, il faut calculer l'intégrale de cette fonction entre 0 et T, puis diviser par la période, c'est à dire T. Ici, nous allons redresser le signal, donc les valeurs négatives deviendront positives. Il est nécessaire de faire ceci, sinon la moyenne vaudrait logiquement 0. Nous allons donc devoir intégrer une valeur absolue.

$$\langle i \rangle_t = \frac{1}{T} \left( \int_0^T |i_{\text{crete}} \cos(\omega t)| dt \right)$$

$$\langle i \rangle_t = \frac{1}{T} \left( \int_0^T |i_{\text{crete}} \sin(\omega t)| dt \right)$$

$$\langle i \rangle_t = \frac{2}{T} \left( \int_0^{\frac{T}{2}} i_{\text{crete}} \sin(\omega t) dt \right)$$

$$i_{\text{moy}} = \frac{2}{\pi} i_{\text{crete}}$$

$$\langle i \rangle_t = \frac{-2}{T} \left[ \frac{i_{\text{crete}} \cos(\omega t)}{\omega} \right]_0^{\frac{T}{2}}$$

$$\langle i \rangle_t = \frac{-2}{T} \left( \frac{-2i_{\text{crete}}}{\omega} \right) = \frac{2}{\pi} i_{\text{crete}}$$



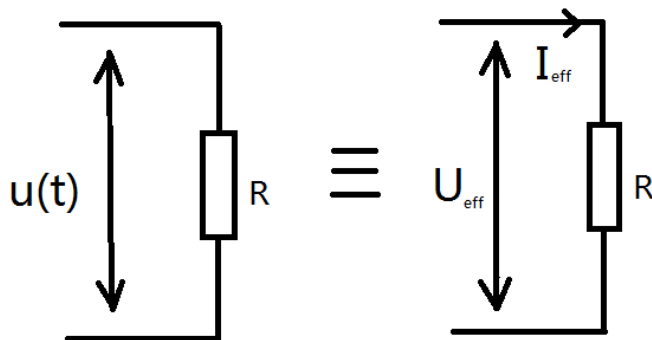
L'intensité effective du courant est défini par l'effet thermique du courant.

Par définition, un courant alternatif et un courant continu traversant respectivement la même résistance, si la quantité de chaleur produite des deux courants dans le même temps est égale, alors la valeur du courant continu est la valeur efficace du courant alternatif.

La notion de valeur efficace est liée à l'effet Joule dans une résistance «R»

Donc on peut remplacer  $u_i$  par  $U_{eff}$  et inversement. Ils ont la même puissance sur une même résistance.

$$P_{active} = U_{eff} I_{eff} = \frac{U_{eff}^2}{R} = \langle u(t)i(t) \rangle$$



$$Q = P_{active} t = \langle u(t)i(t) \rangle t$$

On calcule la valeur efficace en dessous:

$$i_{eff} = \sqrt{\left( \frac{1}{T^2} \int_0^T i_{crete}^2 \cos^2(\omega t) dt \right)}$$

$$i_{eff} = \sqrt{\left( \frac{1}{T^2} \int_0^T i_{crete}^2 \left( \frac{1 + \cos(2\omega t)}{2} \right) dt \right)}$$

$$i_{eff} = \sqrt{\left( \frac{1}{T^2} \int_0^T \left( \frac{i_{crete}^2}{2} + \frac{i_{crete}^2 \cos(2\omega t)}{2} \right) dt \right)}$$

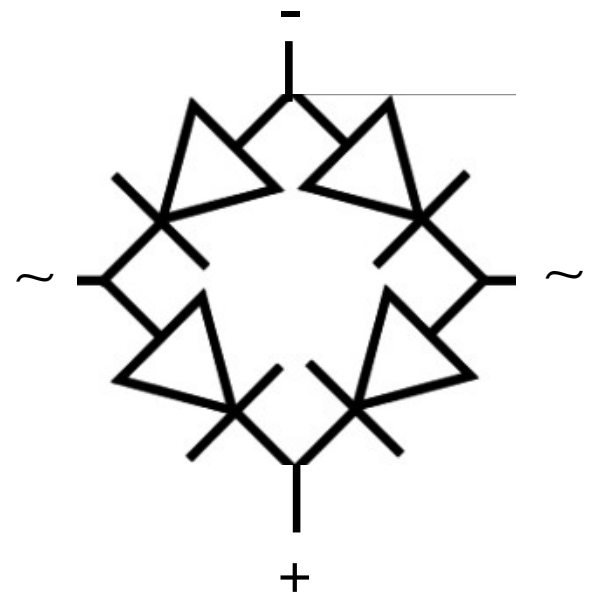
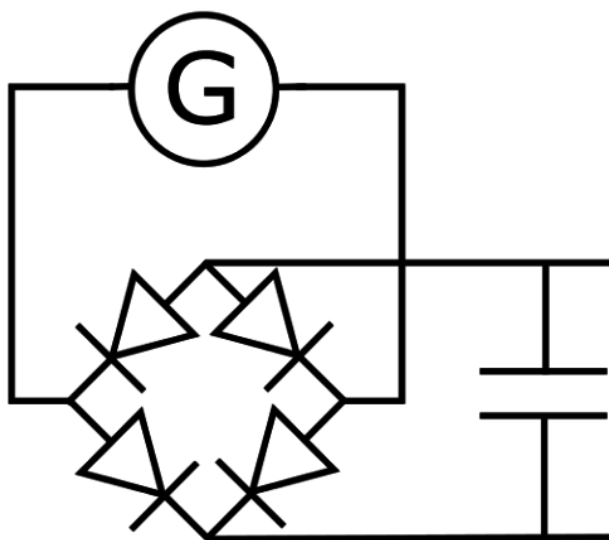
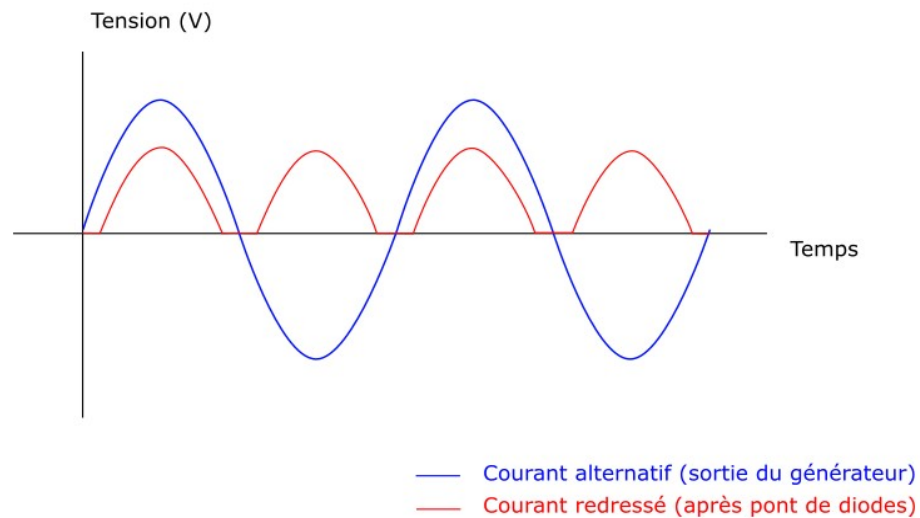
$$i_{eff} = \frac{i_{crete}}{\sqrt{2}}$$

$$i_{eff} = \sqrt{\left( \frac{1}{T^2} \left[ \frac{i_{crete}^2}{2} t + \frac{i_{crete}^2 \sin(2\omega t)}{4\omega} \right]_0^T \right)}$$

$$i_{eff} = \sqrt{\left( \frac{1}{T^2} \frac{i_{crete}^2}{2} T^2 \right)}$$

$$i_{eff} = \sqrt{\frac{i_{crete}^2}{2}} = \frac{i_{crete}}{\sqrt{2}}$$

Pour passer d'un courant alternatif à un courant continu. Il faut redresser le courant. Redresser le courant c'est en fait passer d'un courant alternatif qui change perpétuellement de sens à un courant qui ira tout le temps dans le même sens. Pour cela, on peut utiliser un pont de diode ou un pont redresseur. Il est très simple à réaliser. Cependant, les diodes provoquent une chute de tension de l'ordre de 0,8V par diode. Ce qui donne au total une chute de 1,6V puisque le courant peut emprunter son signe par deux diodes. Cette baisse de tension n'est pas négligeable. On obtient donc un courant alternatif redressé. De plus, il faut lisser ce courant, le filtrer par le même montage que pour la tension alternative ou par l'ajout d'un condensateur à la sortie du pont de diode. Nous avons notre courant continu que l'on peut ensuite convertir comme la partie précédente.



#### 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Pour conclure, ce projet physique aura été très enrichissant tant sur le point de vue physique que sur le plan humain. Nous avons pu démystifier un appareil électronique que l'on utilise depuis le collège. Ce projet nous a permis d'utiliser et d'acquérir de nouvelles connaissances en électricité mais surtout en électronique que ce soit au niveau des différentes fonctions et composants mais aussi par rapport au principe d'un convertisseur analogique numérique. De plus, nous avons développé notre esprit de communication et d'organisation afin de mener à bien ce projet et travailler en groupe. La communication s'est amélioré au fur et à mesure des séances, se faire comprendre et être compris était l'obstacle le plus difficile. Cela nous a aussi beaucoup apporté sur la gestion du temps.

Par rapport aux objectifs fixés, nous n'avons pas pu tous les atteindre dû à un manque de temps et de connaissances en électronique qui à dû être comblé. La partie de conversion d'un courant alternatif en courant continu n'a pas été vu de manière expérimentale. Par rapport aux perspectives, pour la poursuite de ce projet, elles sont nombreuses. Les multimètres de nos jours ont énormément de fonctionnalité que l'on peut découvrir et réaliser de manière expérimentale via un projet P6 dans les années à venir.

Pour finir, nous souhaitons remercier Mr François Guillotin pour les connaissances transmises et l'aide qu'il nous a fourni tout au long de ce semestre ainsi que l'INSA qui nous a permis de travailler sur ce projet via ce module. Nous avons beaucoup apprécié travailler sur ce projet. De plus nous souhaitons à Mr Guillotin une bonne retraite paisible, bien méritée et pleine de belles choses.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

[1] Albert Paul Malvino, David J. Bates, "Principes d'électronique - 8<sup>e</sup> édition", *Sciences Sup*, novembre 2016.

[2] Datasheet des monostables :

lien internet : <http://pdf1.alldatasheet.fr/datasheetpdf/view/50871/FAIRCHILD/CD4538.html>

(valide à la date du 14/06/2016)

[3] Datasheet du circuit intégré du compteur :

lien internet : <https://media.digikey.com/pdf/data%20sheets/fairchild%20pdfs/mm74c925-28.pdf> (valide à la date du 14/06/2016).

[4] Datasheet du diviseur par deux :

lien internet : <https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/cd40/cd4027bms.pdf>

(valide à la date du 14/06/2016).

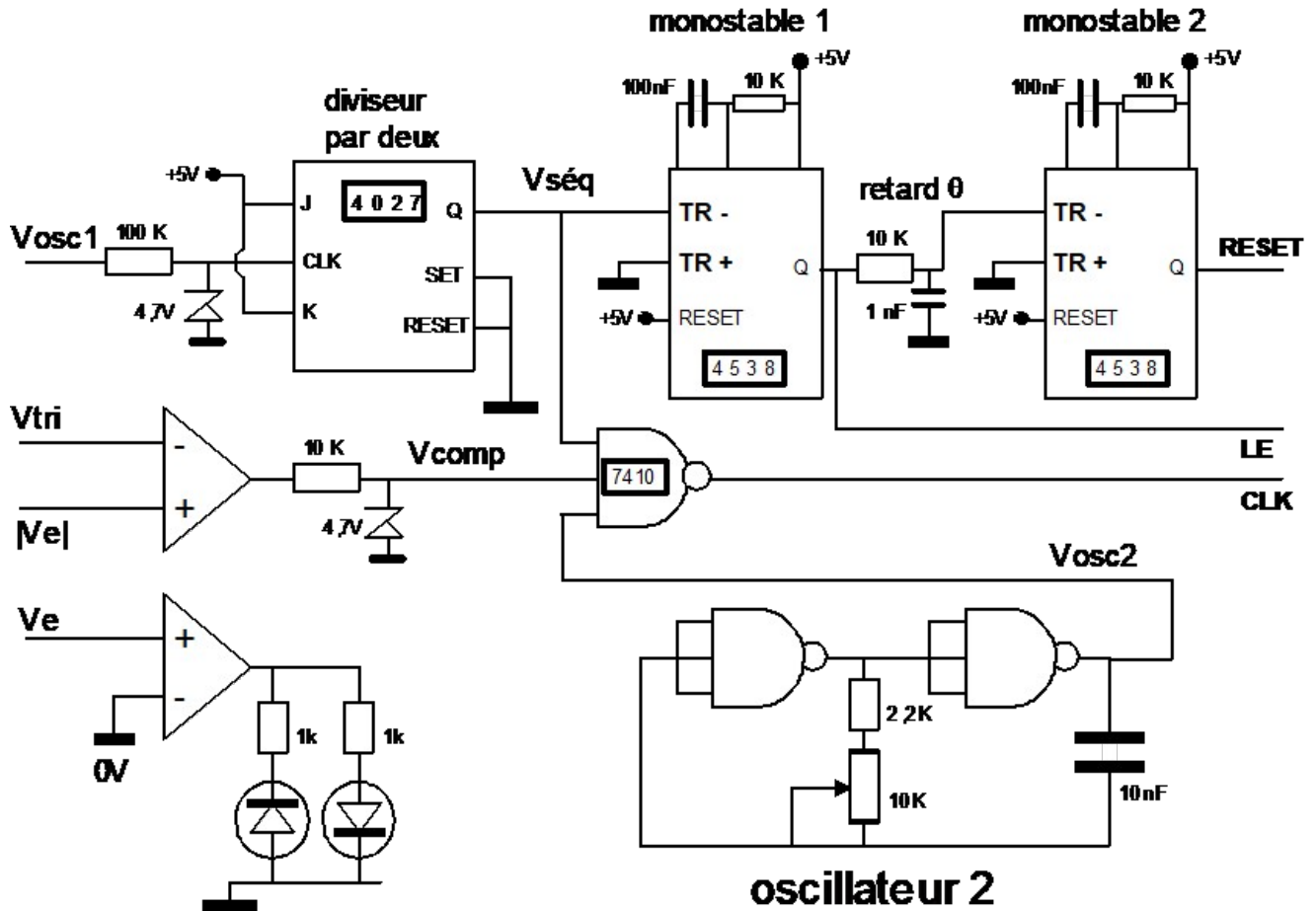
[5] Datasheet de la porte NAND :

lien internet : <http://pdf1.alldatasheet.fr/datasheet-pdf/view/7823/NSC/7410.html>

(valide à la date du 14/06/2016).

## 6. ANNEXES

### 6.1. Schéma électrique de la carte « comparateur/séquenceur »



alimentations: ampli. op. sous +15V/-15V

les autres circuits (logiques) sous +5V

## 6.2. Opérateurs, fonctions ou portes logiques de base

Ils permettent de manipuler les variables booléennes précédentes et de réaliser les diverses opérations de l'algèbre de Boole.

Mis à part les opérateurs OUI et NON, tous les autres peuvent traiter deux ou plusieurs variables d'entrées. Dans tous les cas on obtient une seule variable de sortie.

Opérateur ou fonction	Cas de 2 variables $a$ et $b$				$n$ variables																
	équation logique	symboles usuels		table de vérité	symbole	$s = 1$ si															
		AFNOR	ASGS																		
<b>OUI</b>	$S = a$			<table border="1"><tr><td>a</td><td>S</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td></tr></table>	a	S	0	0	1	1											
a	S																				
0	0																				
1	1																				
<b>NON</b>	$S = \bar{a}$			<table border="1"><tr><td>a</td><td>S</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table>	a	S	0	1	1	0											
a	S																				
0	1																				
1	0																				
<b>OU</b>	$S = a + b$			<table border="1"><tr><td>a</td><td>b</td><td>S</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	a	b	S	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1		une entrée à 1, autres à 0 ou 1
a	b	S																			
0	0	0																			
0	1	1																			
1	0	1																			
1	1	1																			
<b>ET</b>	$S = a.b$			<table border="1"><tr><td>a</td><td>b</td><td>S</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	a	b	S	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1		toutes les entrées à 1
a	b	S																			
0	0	0																			
0	1	0																			
1	0	0																			
1	1	1																			
<b>inhibition</b>	$S = \bar{a}.b$			<table border="1"><tr><td>a</td><td>b</td><td>S</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	a	b	S	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0		entrées inhibées à 0, autres à 1
a	b	S																			
0	0	0																			
0	1	1																			
1	0	0																			
1	1	0																			
<b>NAND (NON ET)</b>	$S = \overline{a.b} = \bar{a} + \bar{b}$			<table border="1"><tr><td>a</td><td>b</td><td>S</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	a	b	S	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0		1 entrée à 1, 1 entrée à 0, autres à 0 ou 1
a	b	S																			
0	0	1																			
0	1	1																			
1	0	1																			
1	1	0																			
<b>NI NOR (NON OU)</b>	$S = \overline{a + b} = \bar{a}.\bar{b}$			<table border="1"><tr><td>a</td><td>b</td><td>S</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	a	b	S	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0		toutes les entrées à 0
a	b	S																			
0	0	1																			
0	1	0																			
1	0	0																			
1	1	0																			
<b>OU EXCLUSIF</b>	$S = a \oplus b$			<table border="1"><tr><td>a</td><td>b</td><td>S</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	a	b	S	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0		1 seule entrée à 1, autres à 0
a	b	S																			
0	0	0																			
0	1	1																			
1	0	1																			
1	1	0																			
<b>identité logique</b>	$S = \overline{a \oplus b}$			<table border="1"><tr><td>a</td><td>b</td><td>S</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	a	b	S	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1		toutes les entrées au même état, 0 ou 1
a	b	S																			
0	0	1																			
0	1	0																			
1	0	0																			
1	1	1																			

13. Opérateurs logiques de base.