

# Compte rendu TP électronique

Julia OUZZINE - Pierre-Emmanuel NOVAC

14 mars 2016

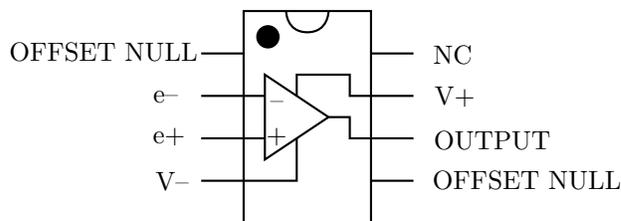
## 1 Introduction

Le but final est de réaliser un fréquencemètre avec l'Arduino. Nous ne développerons pas le programme à utiliser sur l'Arduino mais plutôt le circuit électronique qui réalisera le signal à fournir en entrée de l'Arduino. Nous explorerons donc plusieurs montages à base d'amplificateur opérationnel.

## 2 Amplificateur opérationnel — LM741

Le LM741 est un circuit intégré fournissant un amplificateur opérationnel. Nous allons l'utiliser pour réaliser différents montages. La mise en oeuvre finale en comporte 4. Ce composant possède des caractéristique limitée mais il est très répandu et difficile à endommager. Un composant comme le LM324 serait peut être plus adapté pour le montage final puisqu'il peut s'alimenter sous 5V et propose 4 amplificateurs opérationnels.

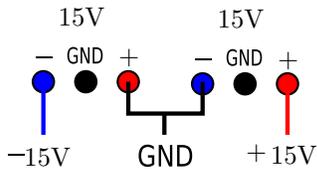
### 2.1 Connexion



1. *Offset null* Non utilisé, compensation de l'offset
2.  $e^-$  Entrée inverseuse
3.  $e^+$  Entrée non inverseuse
4.  $V^-$  Alimentation négative ( $-15V$ )
5. *Offset null* Non utilisé, compensation de l'offset
6. *Output* Sortie, notée  $V_s$  dans la suite
7.  $V^+$  Alimentation positive ( $+15V$ )
8. *NC* Non connecté

**Remarque :** Dans la suite, le signal d'entrée sur le montage considéré sera noté  $V_e$ .

## 2.2 Alimentation



Le LM741 doit être alimenté à l'aide d'une alimentation symétrique  $+15V/-15V$ . Nous n'avons pas ce type de matériel, nous la réalisons donc à l'aide de deux générateurs de tension continue  $+15V$  en reliant le + de l'un au - de l'autre, ce point de raccord servant de masse.

## 2.3 Slew rate (vitesse de balayage)

Il correspond à la pente maximale que l'amplificateur opérationnel peut reproduire en sortie. Il est dû à la capacité parasite du composant. On le note  $Sr$  ci-dessous.

$$Sr = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

On a mesuré (lors de la réalisation du montage suiveur) le slew rate au front montant :

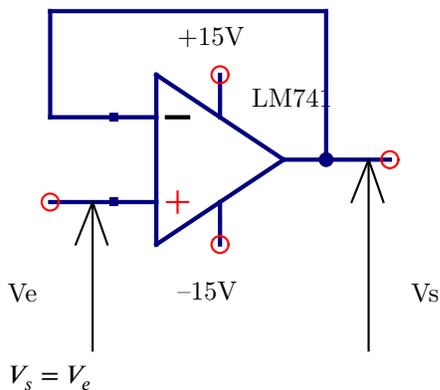
$$Sr = \frac{2,16}{3,8} = 0,57V \cdot s^{-1}$$

Et au front descendant :

$$Sr = \frac{2,74}{5,9} = 0,46V \cdot s^{-1}$$

image : courbe slewrate

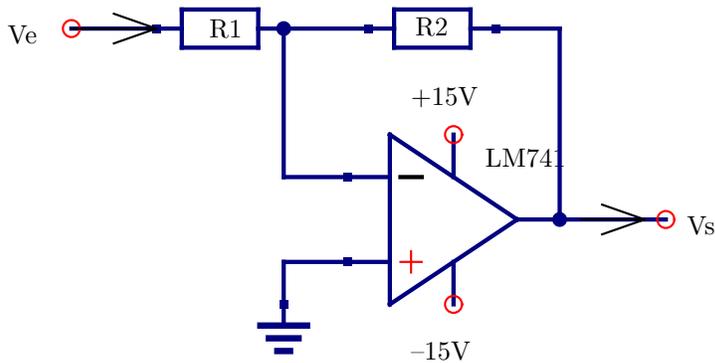
## 3 Suiveur (adaptateur d'impédance)



Ce montage reproduit le même signal qu'il reçoit en entrée sur sa sortie. Il joue le rôle d'adaptateur d'impédance : il dispose d'une forte impédance en entrée (théoriquement infinie, en pratique cela dépend du composant) et d'une faible impédance de sortie (en théorie nulle). Il a donc pour effet de consommer très peu de courant provenant de l'entrée et de fournir un fort courant sur sa sortie (ce courant étant alors prélevé sur son alimentation).

**Effet du slew rate** À partir d'environ 9khz, le signal en sortie ne correspond plus à celui en entrée.

## 4 Inverseur



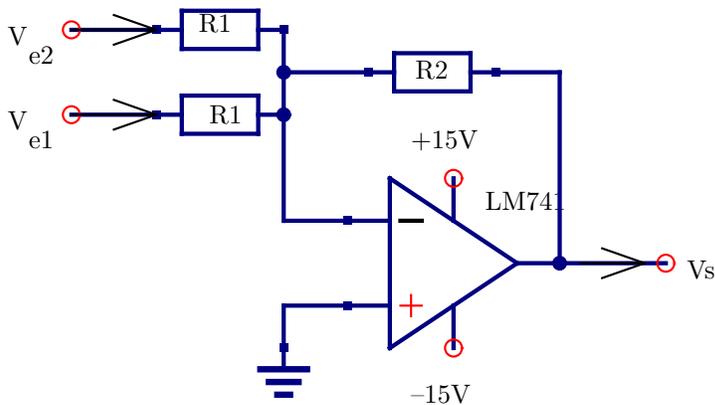
$$R_1 = 1k\Omega$$
$$R_2 = 2,1k\Omega$$

$$V_s = -\frac{R_2}{R_1} V_e = \frac{2,1}{1} V_e \approx -2V_e$$

Ce montage permet d'amplifier le signal sur son entrée.

**Effet du slew rate** Lorsqu'on a en entrée une sinusoïde ou un signal carré, à fréquence élevée la sortie se déforme fortement et ressemble alors à un signal triangulaire. Si on continue à augmenter la fréquence (à  $\sim 70kHz$  par exemple), l'amplitude diminue.

## 5 Sommateur inverseur



$$R_1 = 1k\Omega$$
$$R_2 = 2,1k\Omega$$
$$R_3 = 10k\Omega$$
$$R_p = 10k\Omega \text{ (potentiomètre)}$$

$$V_{e2} = \frac{R_p}{R_p + R_3} 15$$
$$V_s = -\frac{R_2}{R_1} (V_{e1} + V_{e2})$$

Ce montage permet de sommer les deux signaux sur ses entrées. De plus, il peut amplifier le signal suivant la valeur des résistances.

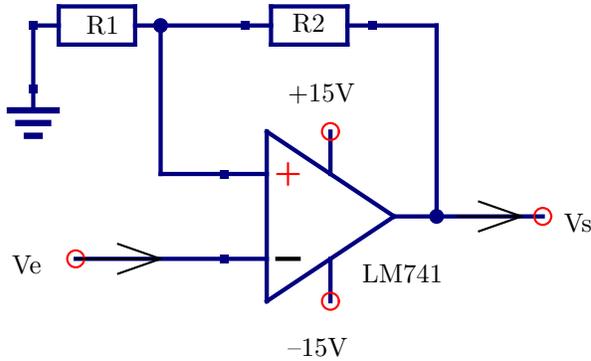
On applique sur l'entrée  $V_{e1}$  un signal sinusoïdal provenant du générateur basse fréquence. On utilise un pont diviseur sur l'entrée  $V_{e2}$  pour générer un signal continu dont on peut faire varier la valeur à l'aide du potentiomètre. Si on augmente la valeur de la résistance, la tension à ses bornes augmente et

inversement. En butée, on a au minimum  $0\Omega$  et au maximum  $10k\Omega$ . On fait alors varier l'entrée  $V_{e2}$  entre 0 et  $2,6V$  (en prenant en compte l'impédance d'entrée du sommateur).

Cela a pour effet de modifier l'offset du signal en sortie qui était à l'origine (sur l'entrée  $V_{e1}$ ) nul. Ainsi on obtient sur la sortie un signal sinusoïdal (entrée  $V_{e1}$  inversée) d'offset compris entre 0 et  $-2,6V$  (entrée  $V_{e2}$  inversée).

On peut connecter notre pont diviseur à l'alimentation  $-15V$  plutôt qu'à l'alimentation  $+15V$  et on obtiendra alors en sortie un offset positif.

## 6 Comparateur à hystérésis inverseur (trigger de Schmitt)



$$R_1 = 1k\Omega$$

$$R_2 = 2,1k\Omega$$

Ce montage ne fonctionne pas en mode linéaire mais en mode saturé : on ne cherche plus à appliquer une transformation sur le signal d'entrée (contre-réaction sur l'entrée inverseuse) mais à l'utiliser en tant que comparateur (contre-réaction sur l'entrée non-inverseuse).

Ce comparateur est dit à hystérésis car l'évolution de la sortie par rapport à l'entrée fonctionne sur un cycle d'hystérésis : le seuil de basculement de la sortie lorsque le signal d'entrée est croissant est différent du seuil de basculement en présence d'un signal décroissant. L'intérêt est de ne pas avoir de multiples basculements de la sortie lorsque l'entrée comporte du bruit autour du seuil de basculement.

**image :** courbes bruit comparateur

Lorsqu'on observe le signal de sortie en fonction du signal d'entrée, on obtient une courbe d'hystérésis qui décrit le fonctionnement de ce comparateur :

**image :** courbe hystérésis

Le seuil de basculement est défini par :

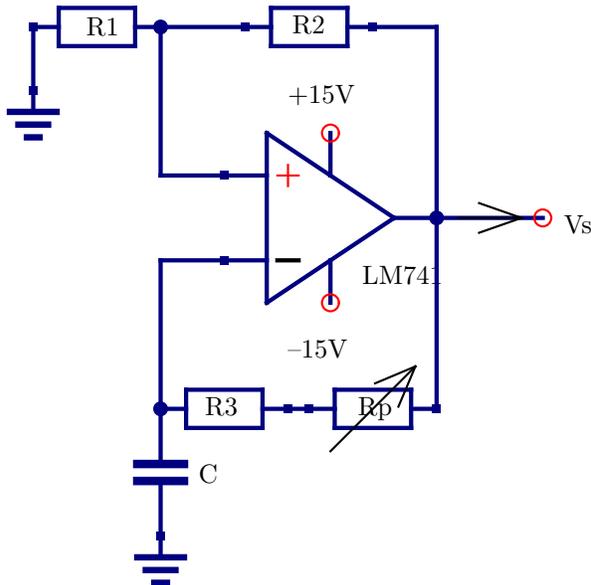
$$V_{th} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_s$$

Or, lorsque  $e_+ > e_-$ ,  $V_s = V_+ = 15V$  et lorsque  $e_+ < e_-$ ,  $V_s = V_- = -15V$ , d'où nos deux seuils de basculement :

$$V_{th} = \pm \frac{R_1}{R_1 + R_2} 15$$

**Effet du slew rate** Ici, lorsque la fréquence est trop élevée ( $> 3kHz$ ), la courbe d'hystérésis observée se déforme et le temps de basculement de la sortie est facilement observable. Si on continue d'augmenter la fréquence, la courbe n'est plus cohérente avec un cycle d'hystérésis et le signal de sortie n'est plus en accord avec le signal d'entrée.

## 7 Multivibrateur astable (générateur de fréquence)



$$\begin{aligned}
 R_1 &= 1k\Omega \\
 R_2 &= 2,1k\Omega \\
 R_3 &= 10k\Omega \\
 R_P &= 10k\Omega \text{ (potentiomètre)} \\
 C &= 10nF
 \end{aligned}$$

Ce montage permet de générer un signal carré (entre  $-15V$  et  $+15V$ ) dont on pourra faire varier la fréquence à l'aide du potentiomètre.

Le fonctionnement est similaire à celui du comparateur à hystérésis, ici l'entrée correspond à la tension au borne du condensateur qui se charge grâce à la sortie de l'amplificateur opérationnel. Celui-ci fonctionnant en mode saturée, sa sortie est toujours  $\pm 15V$ . Pendant la charge du condensateur (sous une tension de  $+15V$ ), la tension à ses bornes va dépasser le seuil positif, la sortie va alors basculer, et le condensateur va se décharger/recharger en inverse (sous une tension de  $-15V$ ) jusqu'à atteindre le seuil négatif qui va faire basculer la sortie, et ainsi de suite.

**image :** courbe multivibrateur

Les valeurs de seuil sont calculées de manière identique au comparateur à hystérésis. On a alors théoriquement  $V_{th} = \pm 5V$ .

Le courant de charge du condensateur est limité par la résistance placée entre la sortie de l'amplificateur opérationnel et le condensateur. Cela a pour effet de régler le temps de charge du condensateur et ainsi la fréquence de basculement de la sortie de l'amplificateur opérationnel. La constante de temps du circuit est définie par :

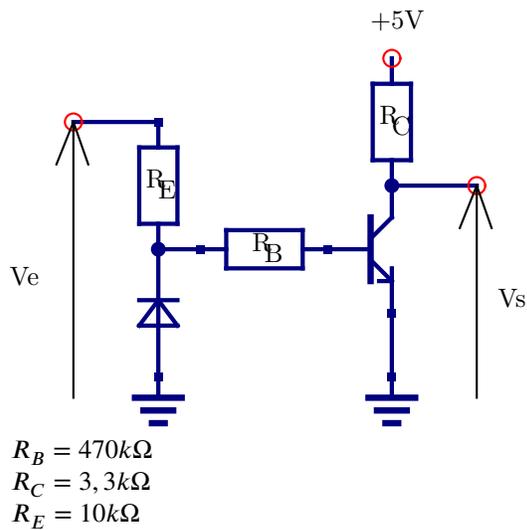
$$\tau = 2(R_3 + R_P)C \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right)$$

Modifier la valeur du potentiomètre fait alors varier la fréquence du signal en sortie. En butée, on mesure :

- à  $R_P = 0$  :  $f_{max} = 4,866kHz$
- à  $R_P = 10k\Omega$  :  $f_{min} = 2,815kHz$

**Effet du slew rate** Si on supprime la résistance  $R_3$ , on peut atteindre des fréquences de fonctionnement plus élevées mais lorsque la fréquence est trop élevée, l'effet est le même que pour le comparateur à hystérésis.

## 8 Mise en forme du signal



Ce montage permet de ramener le signal de  $-15V$  à  $+15V$  à  $0$ – $5V$  pour pouvoir le fournir à l'Arduino (qui risquerait d'être endommagé par le signal d'origine). Il est issu d'un montage émetteur commun utilisé en régime saturé, auquel on a adjoint une diode qui procède à un écrêtage de l'alternance négative pour protéger l'entrée du transistor (qui ne résiste pas à une polarisation trop forte en inverse).

Étant alimenté sous  $5V$ , la tension sur le collecteur du transistor ne peut se situer qu'entre  $0$  et  $5V$ . Celui-ci étant toujours soit saturé, soit bloqué : la tension  $V_{CE}$  est quasi-nulle lorsque l'entrée est positive puisqu'il est très fortement polarisé sous  $+15V$ , et la tension  $V_{CE}$  est maximale lorsque l'entrée est négative ( $V_{BE} \approx -0,6V$ , c'est la chute de tension aux bornes de la diode) puisqu'inférieur au seuil de polarisation du transistor.

## 9 Fréquencemètre

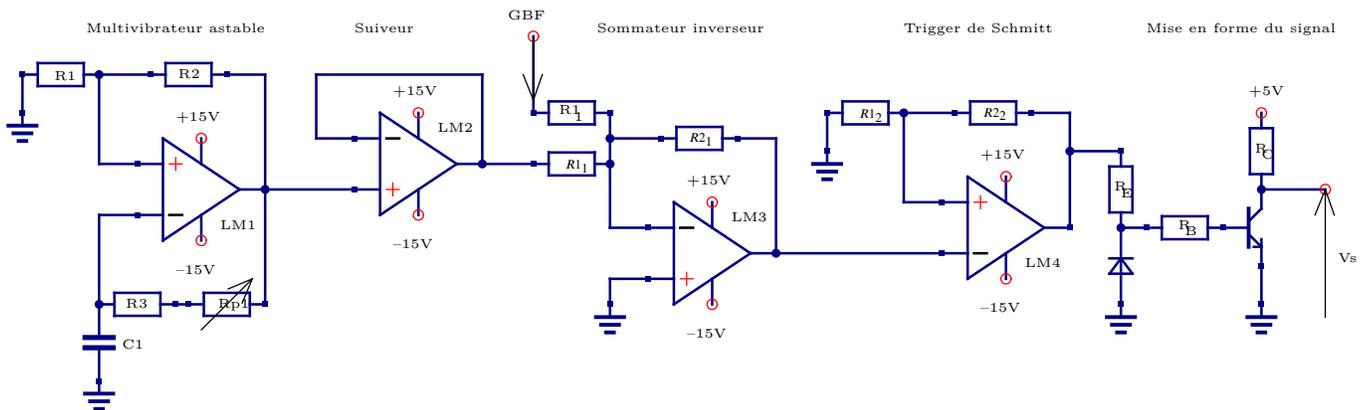
Ce montage permet de mesurer la fréquence d'un signal carré (de  $0$  à  $5V$ ) à l'aide de l'arduino et la présenter sur l'afficheur LCD. Le programme utilisé est très simple (voir Annexe 4.2 Arduino — Mesure d'une fréquence) et l'entrée à utiliser est la n°12.

## 10 Générateur de bruit

Ce montage permet de générer un bruit blanc sur sa sortie à l'aide d'une diode Zener.

Faute de composants adaptés, on utilisera plutôt le générateur basse fréquence pour créer un signal sinusoïdal d'amplitude  $300mV$  et de fréquence bien plus élevée que celle du signal à mesurer.

## 11 Montage final



Ce montage combine les différents éléments vus auparavant.

On génère un signal à l'aide du multivibrateur. On utilise le montage suiveur pour éviter que les caractéristiques du signal soit modifiée par la suite du circuit. Le montage sommateur inverseur est utilisé pour ajouter du bruit provenant du générateur basse fréquence, puis on place le comparateur à hystérésis pour essayer de se débarrasser du bruit rajouté. Le montage avec le transistor permet de se ramener à un signal  $0 - 5V$  compatible avec l'Arduino qui est donc connecté sur la sortie et affiche la fréquence mesurée.

**Multivibrateur** Le multivibrateur utilise désormais un condensateur de  $100nF$ . On calcule les valeurs théoriques :

1.  $f_{max} = 721Hz$
2.  $f_{min} = 361Hz$

Les valeurs mesurées sont les suivantes :

1.  $f_{max} = 718Hz$
2.  $f_{min} = 343Hz$

**Sommateur inverseur** Le sommateur inverseur utilise désormais  $R_2 = R_1 = 1k\Omega$ . Le signal n'est donc pas amplifié ni atténué.  $V_s = -(V_{e1} + V_{e2})$ .

**Générateur de bruit** On génère du bruit avec le générateur basse fréquence. On produit un signal sinusoïdal de fréquence  $20kHz$ , d'amplitude  $300mV$  et d'offset nul.

**Comparateur à hystérésis** Il sert à éliminer le bruit généré sur notre signal, il faudra donc prendre un seuil supérieur à  $\pm 150mV$ . On donne  $R_2 = 33k\Omega$ , on cherche un rapport de  $\frac{1}{100}$  par rapport à l'alimentation (de  $15V$ ). Il faut donc choisir  $R_1 = 330\Omega$ .

Pour visualiser l'effet du comparateur à hystérésis, on peut supprimer sa résistance  $R_2$  et le transformer en comparateur classique. La fréquence mesurée sera alors incorrecte et instable. L'effet est le même si on augmente l'amplitude du bruit généré par le générateur basse fréquence (en gardant la résistance  $R_2$ ) puisqu'il se trouvera au dessus du seuil du comparateur.

## 12 Conclusion

On peut mesurer des fréquences comprises entre  $30Hz$  et  $40kHz$ . Au delà de  $40kHz$ , la marge d'erreur est trop grande pour que le résultat soit convenable. À moins de  $30Hz$ , le résultat ne correspond pas du tout à la réalité (valeur négative, ou de plusieurs centaines de  $Hz$ , etc...).

En comparant sur l'oscilloscope le signal généré par le multivibrateur et le signal en entrée de l'arduino, on observe qu'ils sont correctement en phase même si leur forme et leur amplitude n'est pas identique.

## 12.1 Limitations et sources d'erreurs

On imagine qu'il est impossible de mesurer une fréquence excédant l'horloge de l'Arduino (voir Annexe 4.2 Arduino — Mesure d'une fréquence). En réalité, la fréquence maximale est bien inférieure : l'implémentation de `pulseIn()` ne repose pas sur une unique instruction qui prendrait un cycle d'horloge. La vérification de l'état de l'entrée, la vérification du délai maximal d'attente, l'incréméntation du compteur et le recommencement de la boucle prendraient 16 cycles d'horloge (dans une version récente de la bibliothèque Arduino, 21 cycles auparavant). Cela est sans compter les interruptions possibles du programme. (Voir [https://github.com/arduino/Arduino/blob/master/hardware/arduino/avr/cores/arduino/wiring\\_pulse.c#L26](https://github.com/arduino/Arduino/blob/master/hardware/arduino/avr/cores/arduino/wiring_pulse.c#L26))

D'autre part, le programme utilisé ne permet pas de mesurer de très basses fréquences, déjà par le fait que `pulseIn()` ait un délai d'expiration de 1 seconde par défaut, mais aussi et surtout à cause de l'utilisation d'`int` pour stocker la valeur de retour de `pulseIn()`, ce qui limite donc la valeur à 32768 microsecondes. Dès lors que la durée sera supérieure, la valeur sera faussée et risque d'être négative.

Enfin, dans les hautes fréquences, le programme ne sera pas très efficace puisqu'il procède à des calculs sur des nombres à virgule flottante dont la précision est faible.

## 12.2 Améliorations possibles

Pour corriger le problème dans les basses fréquences, il suffit d'utiliser des `unsigned long` à la place des `int`, et de définir un `timeout` maximal.

Pour le problème des hautes fréquences, on pourrait utiliser la bibliothèque `FreqCount` qui repose sur l'utilisation des interruptions et est optimisée pour avoir un résultat le plus précis possible. (Voir <https://github.com/PaulStoffregen/FreqCount>)

Une autre solution consiste à diviser la fréquence avant l'entrée de l'Arduino, puis la multiplier avant l'affichage. On peut pour cela utiliser un compteur comme le `74HC4060`. Pour plus de flexibilité et pour pouvoir mesurer des fréquences encore plus élevées, on peut aussi utiliser un *prescaler* programmable.

# 13 Annexe

## 13.1 Masse

Ne pas oublier de relier les masses des différents appareils entre elles. De cette manière, tous les appareils ont la même référence pour leur signaux d'entrée/sortie.

## 13.2 Oscilloscope

Dans le cas de l'oscilloscope, ne pas relier la masse correctement amène à observer un signal inexploitable.

### 13.2.1 Trigger

Le déclenchement de la mesure d'un signal par l'oscilloscope se fait toujours sur une unique entrée en fonction d'une valeur seuil et d'un front (montant ou descendant). Il ne faut pas oublier de choisir sur quelle entrée déclencher la mesure si la mauvaise est sélectionnée par défaut, et régler le seuil s'il est incorrect.

### 13.2.2 Mode XY

L'oscilloscope dispose d'un mode XY (à activer en appuyant sur le bouton Mode puis en sélectionnant XY) qui permet de visualiser le signal de sortie en fonction du signal d'entrée. Très utile pour visualiser les courbes d'hystérésis par exemple.

### 13.3 Potentiomètre

Le potentiomètre fonctionne sur le principe d'un " curseur " qu'on déplace entre deux références (les deux pattes externes). La patte du milieu constitue donc le point où la résistance varie par rapport aux deux autres pattes.

### 13.4 Générateur basse fréquence

La sortie TTL du générateur basse fréquence est adaptée pour une utilisation sur un circuit en logique TTL, c'est à dire avec des niveaux de 0 et 5V. Le signal sur cette sortie est donc un signal de même fréquence que la sortie classique, mais carré entre 0 et 5V. Il est donc parfaitement adapté à une utilisation en entrée de l'Arduino.

### 13.5 Arduino

Il faut là aussi ne pas oublier de connecter la masse de l'arduino au reste du montage.

#### 13.5.1 Afficheur LCD

L'afficheur sera connecté de la même manière qu'au premier semestre. Ne pas oublier de régler le potentiomètre du contraste (quasiment en butée).

#### 13.5.2 Mesure d'une fréquence

**image :** courbe entrée+horloge

Pour mesurer la fréquence, on compte le temps que le signal reste à un niveau haut, puis à un niveau bas. On obtient la période totale en additionnant les deux, et il suffit alors de calculer l'inverse pour obtenir la fréquence du signal.

On utilise pour cela la fonction `pulseIn()` d'Arduino, successivement avec le paramètre HIGH puis LOW. Cette fonction peut mesurer des temps entre 10 microsecondes et 3 minutes, mais par défaut elle retournera 0 si aucun signal n'est mesuré au bout d'une seconde.

Cette fonction incrémente un compteur à chaque front de l'horloge tant que le signal d'entrée est à l'état haut (ou bas suivant le paramétrage). La période est alors calculée selon la fréquence de l'horloge (16MHz sur l'Arduino).