

Mesure d'intervalles de temps. Application à la télémétrie par ultrasons.

Olivier Martin - Emilien Schultz

1^{er} mai 2010

Table des matières

1	Nature et mesure du temps en électronique	2
1.1	Le temps d'un circuit électronique	2
1.2	Réalisation de la seconde (d'un signal)	3
1.2.1	Présentation	3
1.2.2	Réalisation	3
1.2.3	Limites	4
2	Mesure d'intervalle de temps : principe de la télémétrie par ultrason	5
2.1	Principe de la télémétrie par ultrason	5
2.2	Génération d'une onde ultrason	5
2.3	Application à la mesure de la célérité du son	6
3	Réalisation de la chaîne de mesure	7
3.1	Etude des différents éléments	7
3.2	Montage complet	7

Résumé

Ce montage se construit autour de la notion de mesure du temps dans un circuit électronique. Cette mesure du temps est en réalité une mesure d'intervalles de temps à travers l'utilisation d'une horloge qui permet de recréer l'élément de base du temps pour le circuit. Cette notion d'un temps quantifié face à un temps analogique sera illustré à travers la réalisation d'un télémètre à ultrasons, qui pour mesurer des distances mesure des intervalles de temps.

Introduction

Les circuits électroniques, à partir du moment où il doivent faire intervenir la notion de temps, que ce soit un moment de décision ou un décompte doivent être en mesure d'avoir un équivalent de ce que nous, humains, ressentons comme tel. Une rapide étude de la nature du temps met en évidence que concevoir l'écoulement du temps de manière objective revient à mesurer des intervalles d'un processus périodique : que ce soit la désintégration des atomes de césiums d'une horloge atomique ou les espace entre les coups d'aiguille d'une horloge. Pour implémenter cette notion de temps sur un circuit électronique, il faut donc créer ce quantum de temps qui servira à faire le décompte. C'est le rôle de l'horloge, qui comme un métronome va créer le tempo auquel va évoluer l'ensemble du dispositif. Ce temps généré par une horloge, que nous pouvons qualifier de représentation quantifiée du temps, ne va donc pas être isomorphe au temps intuitif que nous qualifierons d'analogique.

Ce montage par son intitulé présente un double objectif : l'accent est porté sur la mesure d'intervalles de temps, avec une application à la télémétrie par ultrason. Le fil directeur porte sur la nécessité de mesurer des intervalles de temps à travers un circuit qui introduit une quantification, les contraintes introduites, leur implémentation, ainsi que les limites. La démarche choisie est la suivante : dans un premier temps nous allons nous intéresser à ce temps numérique qui conduit à la nécessité de l'horloge, avec laquelle nous allons fabriquer la seconde. Puis à travers une application qu'est la télémétrie par ultrason que nous allons développer d'abord d'un point de vue physique, puis d'un point de vue plus électronique nous allons pouvoir observer les relations qu'entretiennent temps analogique et temps numérique.

1 Nature et mesure du temps en électronique

Cette partie est un préambule à toute application de mesure d'intervalles de temps en électronique.

1.1 Le temps d'un circuit électronique

En électronique, nous sommes tentés de séparer deux types de circuits quand il s'agit de traiter la notion de mesure d'intervalles de temps : le cas des circuits dits analogiques et le cas des circuits numériques. Les premiers ne faisant pas intervenir un traitement numérique du signal comme les autres : cycles de calculs, ... En effet, le temps passé pour un phénomène physique peut s'exprimer autant en nombre de coups d'horloge que par la valeur finale prise par une capacité se déchargeant. Des deux grandeurs, il est possible de remonter au temps du phénomène. Dans le premier cas, en connaissant le quantum de temps, on obtient l'intervalle total, dans le second cas, en connaissant la dynamique de la décharge il est possible pour l'observateur de remonter au temps écoulé. Puis avec un affichage adéquat, obtenir l'intervalle. Toutefois, la mesure du second système n'est possible que déclanchée par un phénomène extérieur : n'ayant pas de chronologie propre, il n'est possible d'effectuer des mesures de temps que de phénomènes 'déclancheurs' (par exemple, il n'est pas possible de faire clignoter une diode à chaque seconde). En résumé, si la mesure du temps peut se faire en numérique comme en analogique, l'horloge seule permet de recréer une chronologie propre au système qui ne dépendra pas des événements extérieurs.

L'horloge s'impose donc comme un élément de base pour l'autonomie du système. Si elle ne permet pas de mesurer un temps absolu, elle permet de mesurer des intervalles de temps entre des événements sous la forme d'un décompte de quantum de base. Ce quantum va imposer les limites de l'horloge : en effet, le circuit ne pourra rien mesurer sous le temps du quantum utilisé. D'autre part une dérive en fréquence de cette horloge va entraîner une dérive de la chronologie interne du circuit, avec toutes

les conséquences concernant l'interface entre temps du circuit et temps extérieur. Suivant les applications, des horloges peuvent aller de l'horloge à quartz jusqu'à l'horloge atomique basée sur la transition d'état hyperfin du césium, à une fréquence de 9 192 631 770 Hz.

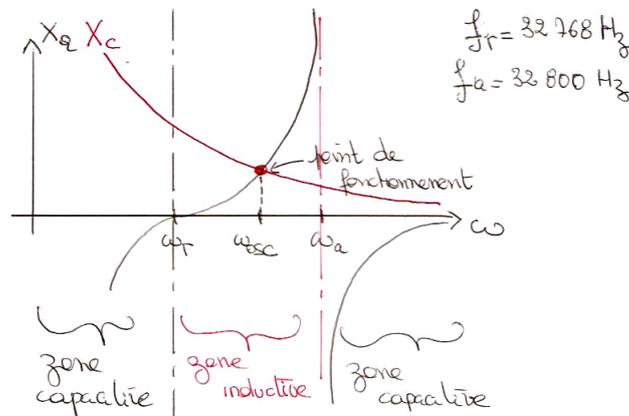
Dans l'optique de faire le lien entre temps numériques et temps analogiques, nous avons réalisé un oscillateur qui va permettre d'obtenir la seconde.

1.2 Réalisation de la seconde (d'un signal)

1.2.1 Présentation

Principe Pour fabriquer la seconde, nous allons donc partir d'une horloge oscillant à une fréquence suffisamment rapide pour limiter les erreurs, puis en comptant le nombre de quantum suffisant pour obtenir la seconde il va être possible de la recréer. L'horloge réalisée est une horloge à quartz. Le quartz utilisé est un quartz 32,768 kHz. Cela signifie que le quantum de temps va être de $30.5 \mu s$ environ. Pourquoi cette fréquence particulière? justement parce qu'elle permet de recréer la seconde: en effet, si on remarque que $2^{15} = 32768$, et qu'il est facile de réaliser des compteurs, il découle que la seconde s'obtient facilement.

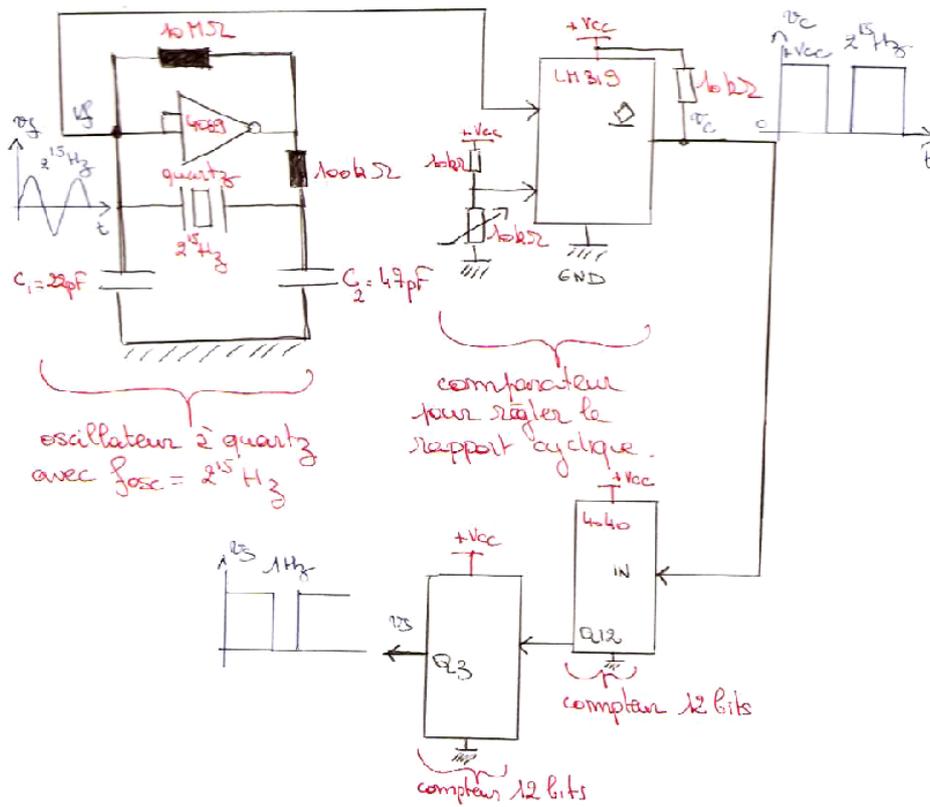
Oscillateur Réaliser un oscillateur nécessite de satisfaire la condition d'instabilité pour le système bouclé, autrement appelé la condition de Barkhausen. Il faut donc un très fort gain (utilisation d'une porte inverseuse) et d'un circuit bouchon avec une rétroaction en phase. Ce circuit bouchon est réalisé avec le quartz, et les capacités sont choisies pour que la somme des réactances $X_{C_1} + X_{C_2} + X_Q = 0$ (point de fonctionnement).



La seconde Pour fabriquer la seconde à partir du temps fabriqué par l'horloge, il faut diviser la sortie de l'horloge par 2^{15} , ce qui revient à compter sur un compteur 15 bits.

1.2.2 Réalisation

La structure complète est la suivante :



Le gain est réalisé avec une porte inverseuse. Un circuit de mise en forme est réalisé pour obtenir un signal crête à crête et non plus quasi sinus, ceci pour travailler avec des signaux logiques usuels. Le compteur est réalisé à l'aide de deux compteurs 12 bits.

Montrer les formes d'ondes

Déplacer la led pour visualiser différents temps

1.2.3 Limites

Faire la mesure de la fréquence réelle : oscilloscope ou fréquencemètre.

Cette fréquence diffère de celle attendue car le quartz n'ayant pas une résonance parfaite, la fréquence dépend de la valeur des capacités, y compris celles parasites. Une erreur sur la fréquence en fonction du point de polarisation peut aller jusqu'à 32 Hz, ce qui correspond à une erreur de 1 ms.

Pour cette partie, on peut utiliser le compteur agilent qui permet de faire des mesures précises.

Conclusion

Cette partie avait pour objectif de ressituer la notion de temps dans un circuit électronique. A notre échelle, nous avons restitué la seconde. Cependant pour mesurer des phénomènes dont le temps caractéristique est proche de celui de la période d'horloge, le temps numérique pourra ne plus correspondre au temps analogique. Un intervalle de temps sera mesuré en comptant le nombre de coup d'horloge entre un signal initial et un signal final.

Pour aller plus loin

Dans le cadre de la mesure d'intervalle de temps, il serait possible de creuser du côté dual de la fréquence face au temps, illustrer les mesures de temps par mesure de fréquence.

2 Mesure d'intervalle de temps : principe de la télémétrie par ultrason

2.1 Principe de la télémétrie par ultrason

Qu'est ce que la télémétrie? Cela correspond à la mesure de distances sans contact. Cette mesure de distance s'opère par mesure du temps de vol d'une onde. Le temps de vol est défini comme le temps entre l'envoi de l'onde et son retour après réflexion sur la cible. Différentes ondes peuvent être utilisées, électromagnétiques comme mécaniques. L'inconvénient des ondes électromagnétiques à notre échelle est leur très grande célérité qui rend difficile les mesures de temps. Nous allons nous intéresser à la télémétrie réalisée par ultrasons, qui est grandement répandue : citons l'écholocation des chauve-souris ou la robotique (capteurs de position), ou encore avec un laser pour la mesure de la distance Terre-Lune.

La question suivante est : pourquoi les ultrasons? Les ultrasons sont les ondes acoustiques situées à des fréquences supérieures à 20 kHz. Dans notre cas nous allons utiliser des ondes à une fréquence de 40 kHz. Ces ondes présentent de nombreuses propriétés : en plus d'être inaudible et inoffensives, elles sont faciles à produire et à capter. Elles se réfléchissent bien et ne se diffractent pas trop : leur longueur d'onde est de 1 cm environ, ce qui permet de ne pas provoquer trop de parasitage. Elles sont donc toutes indiquées pour être utilisées comme 'palpeur'.

Une étude des ondes acoustiques dans l'air permet d'exprimer, sous certaines conditions, la vitesse de l'onde en fonction du coefficient adiabatique, de la constante spécifique du gaz R_s et de la température T :

$$c = \sqrt{\gamma R_s T}$$

Pour l'air, on a $\gamma = 1.4$ et $R_s = 287 J/kg/K$, pour une température de 20 degrés, on a $c=343$ m/s .

La situation est donc la suivante : un train d'onde est émit à l'instant t_1 , traverse une distance L , se réfléchit sur une cible, revient à l'instant t_2 . Elle aura parcourue au total une distance $2.L$ pendant un temps $T = t_2 - t_1$. Connaissant la vitesse du son, il est possible de revenir à l'intervalle de distance L par mesure de l'intervalle de temps T . Pour donner des ordres de grandeurs que nous allons retrouver tout à l'heure, pour $L = 2$ m, on va avoir $T = 11.7$ ms. Pour le vocabulaire, le front montant du train d'onde envoyé est appelé le start, et le front montant de l'onde reçue est appelé le stop. L'intervalle de temps qui nous intéresse est entre le start et le stop.

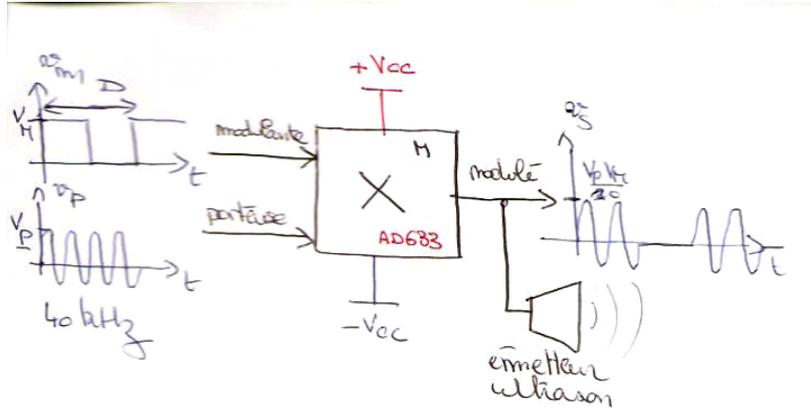
Faire un schéma au tableau

Dans un premier temps, nous allons donc nous intéresser à la mesure de distance par mesure d'intervalles de temps.

2.2 Génération d'une onde ultrason

Pour ces premières mesures, nous allons utiliser directement le GBF comme générateur du signal à 40 kHz, et deux transducteurs mécaniques/électriques qui vont servir respectivement d'émetteur et de récepteur. Le récepteur a directement intégré un étage d'amplification. Il est possible de voir ces deux structures comme des antennes. Les cornets permettent d'en amplifier la directivité. Caractérisons qualitativement cette structure.

Caractéristiques d'émission Nous allons envoyer des trains d'ondes. Ceci peut être réalisé directement en modulation ASK par les générateurs, ou en utilisant un multiplieur avec en entrée la porteuse à 40 kHz (du GBF ou d'un oscillateur) et la modulante (signal rectangulaire) de l'ordre de la dizaine de Hz (ce montage permet de visualiser la porteuse et la modulante à part). Le schéma du modulateur est le suivant



Mettre en évidence la directivité de l'antenne, les lobes secondaires

Le mode Burst (rafale) des GBF est bien adapté pour cela ici.

Caractéristiques de la réception La réception est un transducteur qui se comporte aussi comme un circuit résonant à la fréquence 40 kHz. Le tracé du diagramme de Bode permet de calculer son facteur de qualité (Bode pas mis) :

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{40000}{4700} = 8.5$$

Ce qui permet de dire que les perturbations dues à l'environnement sont limitées. En regardant la forme du signal capté et en zoomant sur le début du train d'onde reçu, on observe le transitoire correspondant à notre transducteur excité (envoi et réception) qui introduit un retard. Cette erreur systématique est de l'ordre de $2.T_{40kHz}$ environ. D'autre part, sur le train d'onde, on peut observer les échos.

Mettre en évidence le phénomène des échos ou de la diffraction

D'autre part, des conditions s'appliquent sur la modulante : pour pouvoir mesurer correctement les intervalles de temps, il ne faut pas que les échos du train précédent avec un nouveau train : cela impose une limite haute de fréquence en fonction des longueurs que l'on cherche à mesurer.

Attention, le Bode mesuré est celui de l'ensemble émetteur – récepteur

2.3 Application à la mesure de la célérité du son

Pour établir la vitesse du son dans l'air, on va utiliser des distances déterminées et mesurer le temps de vol de l'onde :

Faire manipulation pour plusieurs distances, jusqu'à une limite max

On établit le tableau suivant

d (m)	0.10	0.50	1	2
t (ms)	1.21	3.15	5.75	11.82

Une erreur est introduite sur la position des transducteurs dans les antennes, d'environ 2 cm par antennes, donc une erreur $\Delta L = 4 \text{ cm}$ environ.

On vérifie bien la relation linéaire entre le temps et la longueur. On obtient une vitesse $c = 338 \text{ m/s}$.

Une fois cette relation bien établie, il est donc possible de passer de la mesure de l'intervalle de temps à la mesure de la distance séparant l'émetteur au capteur, ou comme on le retrouve le plus souvent quand le capteur est à côté de l'émetteur, deux fois la distance séparant l'obstacle du système.

Application de cette relation à la mesure de distance

Maintenant que nous avons établi le principe de la mesure de distance par ultrasons, nous proposons de réaliser une partie du montage. L'émetteur et le récepteur sont côte-à-côte, l'un envoyant une onde contre un obstacle et l'autre recevant la réflexion de cette onde.

Mettre schéma

3 Réalisation de la chaîne de mesure

Dans cette troisième partie nous allons réaliser une partie d'un montage de télémétrie par ultrasons. La partie câblée correspond à la démodulation du signal si on considère que l'on 'fabrique' une modulation ASK quand on fait une mesure par télémétrie ultrasons. En particulier, cela nous permettra d'insister sur l'information que l'on cherche à extraire du signal capté, sa mise en forme, la forme des courbes, les retards introduits...

3.1 Etude des différents éléments

Le signal que l'on récupère est un signal modulé ASK :

Montrer la forme d'onde

Ce que l'on cherche à détecter, c'est le début de l'onde réfléchie. Du fait que l'on a peu de bruits, il suffit d'extraire l'information liée à la variation du niveau de signal à 40 kHz. L'idée est de transformer le signal analogique reçu en un signal numérique, d'amplitude normalisée, où l'information 40 kHz sera représentée par un signal crête de même fréquence quand elle est présente. Une fois cette 'normalisation' du signal effectuée, et transformée en une information calibrée, il est possible de mettre en oeuvre la stratégie de détection.

Montrer la forme d'onde

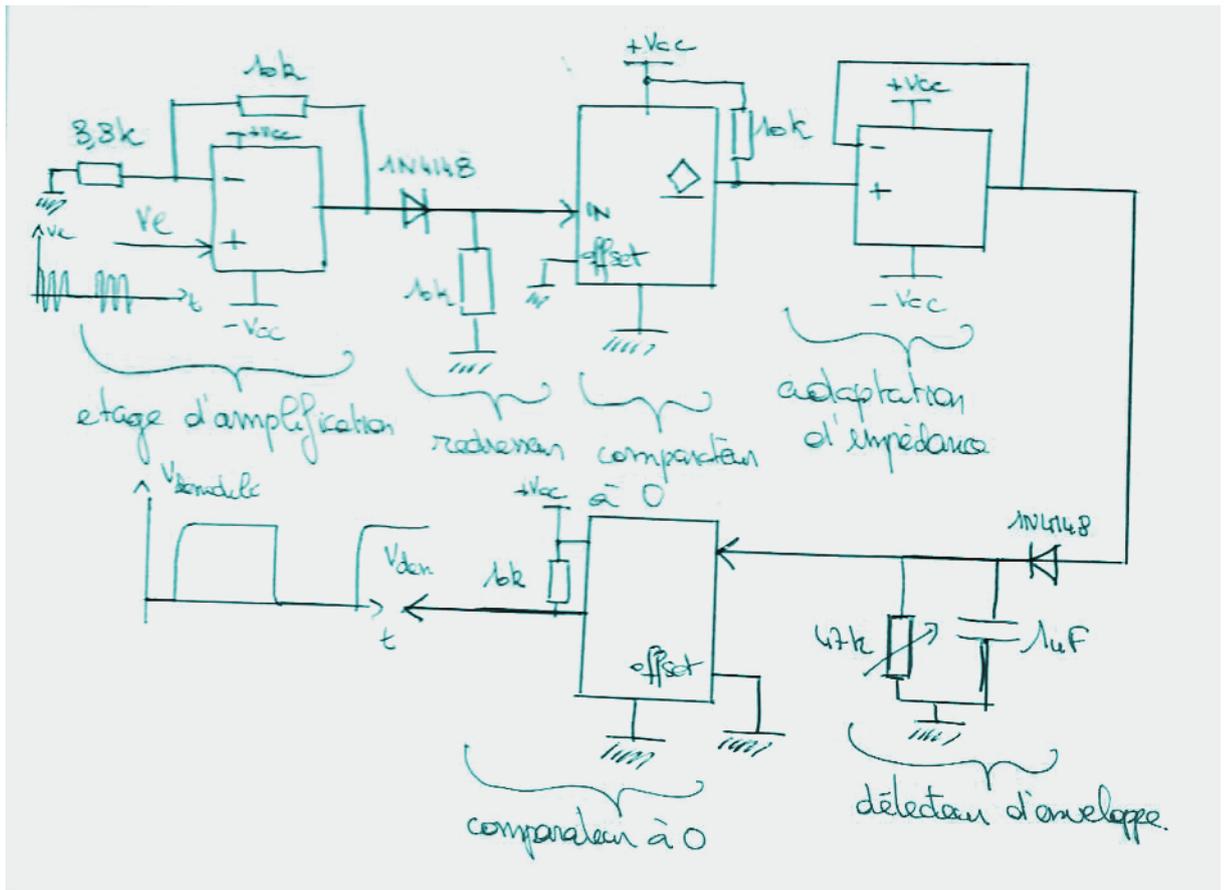
La stratégie de détection doit être robuste au bruit, même si dans notre cas il y en a peu. De plus, elle doit si possible éviter les phénomènes d'échos. L'information à détecter est le front du signal reçu. La première idée est d'attendre un certain nombre de périodes avant de décider que c'est bien l'information recherchée et non pas un bruit. Cette idée peut être implémentée de manière numérique (compteur et décision) ou de manière analogique (charge d'une capacité). Il reste donc plus qu'à sortir un signal front montant indiquant la détection de l'onde retour. Ce front est maintenu suffisamment longtemps pour qu'il n'y ait pas un déclenchement intermédiaire. Le retard introduit par le seuil de décision est une erreur systématique que l'on connaît et que l'on peut prendre en compte.

L'étape final est de compter le nombre de top d'horloge entre les deux fronts montant. Nous aurions pu utiliser la plaquette, mais nous avons plutôt utilisé le compteur HP.

3.2 Montage complet

Le schéma complet du montage est :

(Ajouter un schéma bloc standard avec le start et le stop)



Dans ce montage, les blocs utilisés sont relativement simples. Le seul pouvant nécessiter une explication est la gestion du seuil analogique. La solution proposée relève de l'expérimentation : en fonction de la valeur de la capacité, on aura une dynamique de charge sur un signal créneau imposé (à travers la résistance dynamique de la diode), et la résistance parallèle va conditionner la dynamique de décharge quand le signal d'entrée s'annulera, et donc influer sur le temps de maintien du créneau. Une solution plus simple mais sans seuil serait d'utiliser un simple détecteur de crête qui réagit au premier front montant.

Faire une présentation plus poussée de la structure détecteur d'enveloppe, le réglage des deux seuils (charge et décharge)

Montrer le fonctionnement du montage complet, vérifier les résultats obtenus

Vérifier les limites de fonctionnement du montage

Faire des remarques sur la manière de compter l'intervalle de temps, le bilan des erreurs

Mettre en évidence les problèmes de perturbation : utiliser le GBF en mode burst pour envoyer des salves de bruit à 40 kHz

Conclusion

Ce montage aborde la télémétrie par ultrasons sous l'aspect de la mesure d'intervalle de temps. Cet aspect intervient particulièrement lors de la mise en forme des signaux, afin de bien délimiter l'intervalle à mesurer. Cela implique une préparation du signal analogique afin d'en extraire les marqueurs qui permettent de délimiter les intervalles à mesurer par comptage. Il permet aussi d'introduire le principe de la mesure par ultrasons, et de l'implémenter. Nous avons choisi une manière de le faire, d'autres sont possibles (passer par du numériques, Simulink, utiliser la maquette).

Une partie décision et traitement de l'information de l'intervalle de temps mesuré (faire le décompte câblé des coups d'horloge entre le start et le stop) serait dans la continuation du montage.

Une autre approche de ce montage serait de parler d'autres aspects de la mesure d'intervalle de temps : fréquence, période...