

# Maquette pédagogique pour l'enseignement des oscillateurs en électronique analogique.

Pierre-Marie Martin, Stéphane Girod, Paul Laurent, Marc Le Roy  
Pierre-Marie.Martin@univ-brest.fr  
IUT de Brest, Département GEII, Rue de Kergoat CS 93837 BREST cedex3

**RESUME :** Cet article présente une maquette pédagogique simple et bon marché (estimée à une trentaine d'euros) destinée à l'enseignement de l'électronique analogique. Elle permet en particulier d'étudier des fonctions de base telles que les oscillateurs et les générateurs de fonctions sur une séance de trois heures. Cette manipulation a été réalisée dans le cadre de l'enseignement des travaux pratiques du module EN3 « Fonctions associées au traitement et à la transmission de l'information » [1] du programme de la filière Génie Electrique et Informatique Industrielle des IUT. Elle vient en complément des cours et des travaux dirigés. Cette unité d'enseignement est suivie par tous les étudiants de 2<sup>ème</sup> année du département GEII de l'IUT de Brest. Face à l'avènement du tout numérique dans les programmes d'enseignement actuels, il semble important pour nous électroniciens, de sensibiliser les étudiants à la mesure de signaux analogiques et à la compréhension de phénomènes physiques sur des composants électroniques élémentaires étudiés en 1<sup>ère</sup> année. Les futurs techniciens mettent en pratique des notions théoriques telles que le démarrage d'un oscillateur, le rôle d'un amplificateur, le rôle d'un réseau de réaction ou l'intérêt d'une contre-réaction. Ils peuvent aussi évaluer les limitations dues aux composants, discuter de la qualité d'un signal, observer des distorsions et proposer des solutions pour améliorer ce signal. Les calculs préparatoires et les résultats de mesure seront ensuite vérifiés par la simulation à l'aide du logiciel professionnel @Altium Designer [2] utilisé dans notre département. Les étudiants d'IUT sont demandeurs car ils apprécient le côté concret de la manipulation qui leur permet de mieux comprendre les notions théoriques vues en cours et en travaux dirigés. De plus, ils ont été eux mêmes acteurs de ce travail car cette maquette didactique est le fruit de projets tutorés menés par les étudiants de 1<sup>ère</sup> année. L'évaluation de cet enseignement comporte deux parties : un compte-rendu classique par binôme que les étudiants nous remettent à la fin de la séance et un petit contrôle écrit d'un quart d'heure sur table, sans document, en fin de séance.

**Mots clés :** travaux pratiques, électronique analogique, oscillateur, générateur de fonctions, mesure, simulation, réglage

## 1 INTRODUCTION

Les oscillateurs constituent l'une des fonctions de base de l'électronique analogique enseignées en DUT GEII deuxième année. Ils sont utilisés pour cadencer le fonctionnement des systèmes d'horloge (horloges de circuits numériques, montres, ...). Ils peuvent également être utilisés pour fabriquer directement des signaux classiques de test en électronique (générateurs analogiques) ou pour fabriquer des porteuses en télécommunication [3]. La maquette pédagogique présentée dans cet article a permis de compléter la série de TP EN3 d'électronique générale en 2<sup>ème</sup> année, avec pour objectif que les étudiants fassent le lien avec toutes les notions théoriques enseignées en cours et en TD. La première partie du TP consiste à étudier de manière complète un oscillateur à pont de Wien pour générer un signal sinusoïdal. Bien entendu, les oscillateurs à quartz sont étudiés par ailleurs mais le choix de cet oscillateur dans le cadre de travaux pratiques, est lié au fait qu'il permet de revoir en grande partie le programme d'électronique de première année du GEII, comme cela a été fait par ailleurs, sous forme de projets [4]. L'oscillateur à pont de Wien très utilisé dans l'enseignement de l'électronique analogique, est un dispositif assez ancien et bien connu mais qui a les avantages d'être facile à mettre en œuvre et d'être très pédagogique. Dans un second temps, après avoir discuté de la qualité de ce signal sinusoïdal, les étudiants fabriquent un signal carré à l'aide d'un circuit comparateur puis un signal triangulaire à l'aide d'un circuit in-

tégrateur pour constituer au final un générateur de fonctions étudié au préalable en TD [5]. Toutes les mesures sont effectuées à l'aide d'un oscilloscope numérique quatre voies permettant de visualiser tous les signaux dans le domaine temporel et d'effectuer une analyse FFT dans le domaine spectral. Tout au long de la manipulation, les calculs préparatoires et les résultats de mesures sont confrontés à la simulation à l'aide du logiciel @Altium Designer qui est un puissant logiciel de CAO électronique très utilisé dans l'industrie. La petite évaluation d'un quart d'heure sous forme de QCM proposée aux étudiants en fin de séance, permet à l'enseignant de vérifier très rapidement si les connaissances minimales sont acquises et d'avoir un retour sur la compréhension de la manipulation. L'évaluation est bien sûr complétée par la remise du compte-rendu de TP en fin de séance. Après de brefs rappels théoriques sur les oscillateurs, nous présentons dans cet article la maquette pédagogique réalisée par les étudiants à l'IUT puis nous détaillons le déroulement du TP. Pour illustrer la manipulation, les valeurs des composants sont données et les résultats de mesures et de simulations obtenus sont présentés et discutés. Un petit bilan sur le retour des étudiants est évoqué avant de conclure.

## 2 RAPPELS SUR LES OSCILLATEURS

### 2.1 Rappels théoriques

Un oscillateur est un circuit électronique permettant d'obtenir un signal sinusoïdal de sortie de fréquence  $F_0 = 1/T_0$  en l'absence de toute excitation extérieure

(cf. figure 1). Le circuit ne reçoit en entrée que des tensions continues servant à l'alimentation du circuit (polarisation des différents composants actifs).

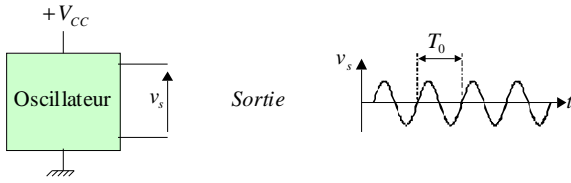


fig 1 : schéma de principe d'un oscillateur

La méthode d'étude va consister ici à décrire le système sous la forme d'un système bouclé et à en exploiter les conditions d'instabilité. L'oscillateur produit à sa sortie un signal quasi-sinusoidal, de faible distorsion harmonique et de période stable. Il est en général décomposé sous la forme d'un amplificateur  $A$  et d'un réseau de réaction  $\beta$  (cf. figure 2).

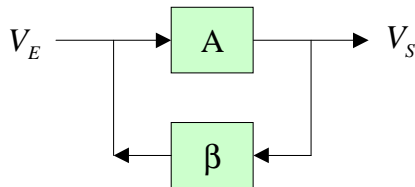


fig 2 : système bouclé

A la pulsation d'oscillation  $\omega_0$ , la condition de Barkhausen  $A\beta=1$  est la condition de maintien des oscillations ce qui implique la double équation :  $Arg(A\beta)=0$  et  $|A\beta|=1$ ,  $A$  et  $\beta$  étant des fonctions complexes.

### 2.2 Oscillateur à pont de Wien

L'oscillateur à pont de Wien peut être identifié à un réseau de réaction, constitué par l'association d'un couple condensateur-résistance en série et d'un autre couple condensateur-résistance en parallèle (voir figure 3). La partie amplificateur peut être réalisée avec un montage à base de transistor ou tout simplement avec un amplificateur opérationnel monté en non inverseur comme dans l'exemple de la figure 3.

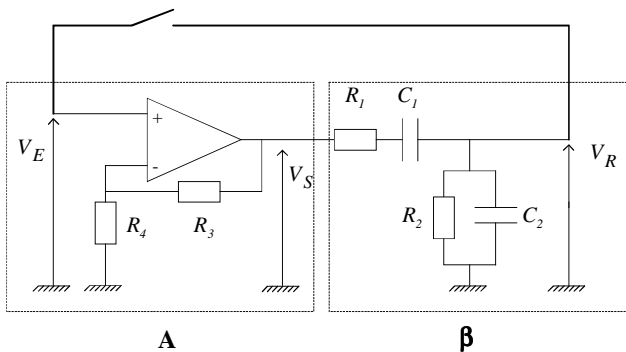


fig 3 : schéma de l'oscillateur à pont de Wien

La fonction de transfert de l'amplificateur  $A$  s'exprime ici par la formule du montage non inverseur classique :

$$\frac{V_S}{V_E} = A = 1 + \frac{R_3}{R_4}$$

L'oscillation se produira à la pulsation  $\omega_0 = 2\pi F_0$  pour laquelle la fonction de transfert du filtre est réelle ( $\beta \in \mathbb{R}^+$ ) car  $A \in \mathbb{R}^+$ . La fonction de transfert du réseau de réaction est donnée par la formule :

$$\beta = \frac{R_2 C_1 p}{1 + (R_2 C_1 + R_1 C_1 + R_2 C_2) p + R_1 C_1 R_2 C_2 p^2}$$

et le comportement en fréquence d'une telle fonction de transfert est celui d'un filtre passe-bande.

La condition d'oscillation de Barkhausen permet alors de déterminer la pulsation :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$$

pour laquelle :  $\beta(\omega_0) = |\beta_{max}| = \frac{R_2 C_1}{R_2 C_1 + R_1 C_1 + R_2 C_2}$

La condition sur l'amplification est alors :  $\frac{R_3}{R_4} = 2$  si

$R_1 = R_2$  et  $C_1 = C_2$ .

### 3 PRESENTATION DE LA MAQUETTE

La maquette « oscillateur » a été entièrement réalisée à moindre coût à l'IUT par des étudiants en projets tutorés avec l'aide du technicien et est présentée sur la photographie suivante :

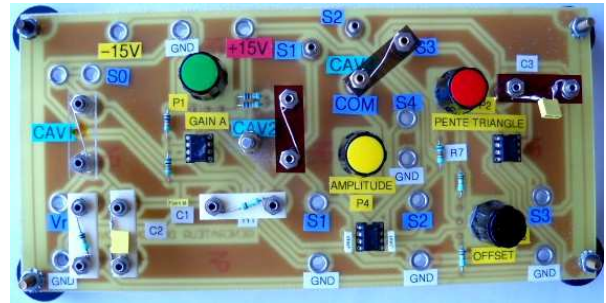


fig 4 : photographie de la maquette oscillateur

#### 3.1 Schéma de l'oscillateur

Le schéma de la figure 5 a été choisi pour réaliser l'oscillateur à pont de Wien : on retrouve bien le réseau de réaction  $R_1, C_1$  en série et  $R_2, C_2$  en parallèle. Le potentiomètre  $P_1$  permet d'avoir un réglage plus fin du gain  $A$ , et les deux résistances  $R_5$  et  $R_6$  en parallèle permettent d'obtenir une valeur particulière précise, non normalisée dans la série  $E12$ . Remarquons ici l'utilisation de deux diodes tête-bêche  $D_1$  et  $D_2$  pour l'aide au démarrage des oscillations

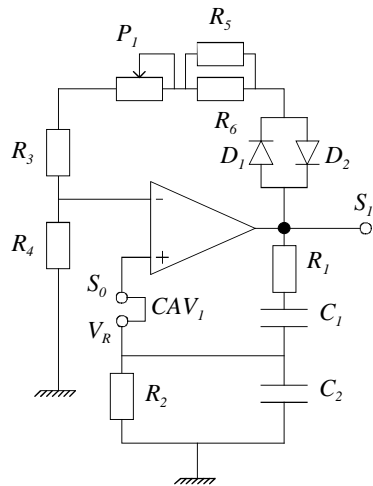


fig 5 : schéma électrique de l'oscillateur à pont de Wien en boucle fermée

### 3.2 Schéma du générateur de fonctions

Le schéma complet de la figure 6 permet de générer un signal sinusoïdal en  $S_1$ , un signal carré en  $S_2$  et un signal triangulaire en  $S_3$ .

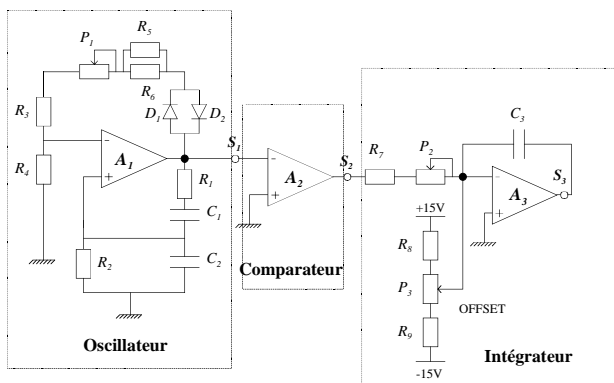


fig 6: schéma complet du générateur de fonctions

Les deux circuits de base suivants ont été rajoutés : un simple comparateur à AOP pour le signal carré et un intégrateur pour le signal triangle. Le potentiomètre  $P_2$  agit sur la pente du triangle tandis que le potentiomètre  $P_3$  agit sur l'offset de l'AOP pour obtenir un signal triangulaire sans saturation. Le choix du signal de sortie se fait en insérant un cavalier entre les bornes COM et  $S_1$  ou  $S_2$  ou  $S_3$  (voir photographie de la figure 4) ; le potentiomètre  $P_4$  permettant un réglage de l'amplitude. Les valeurs des composants seront détaillées au paragraphe 4.

## 4 DEROULEMENT DU TP

### 4.1 Banc de mesures

Le banc de mesures est présenté sur la figure 7. Cette manipulation nécessite une double alimentation continue, un générateur BF pour l'étude en boucle ouverte,

un oscilloscope 4 voies et éventuellement un multimètre

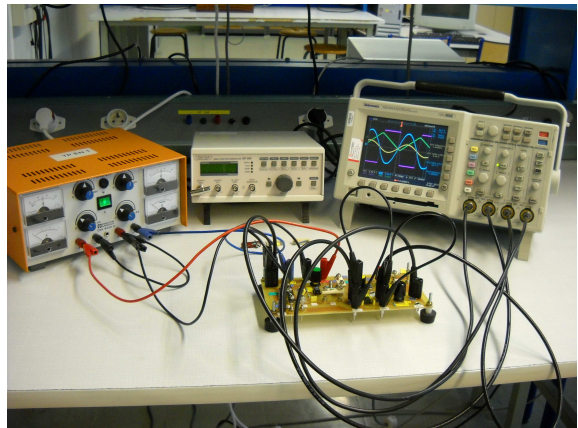


fig 7 : photographie du banc de mesures

### 4.2 Travail préparatoire

Quatre exercices sont proposés en travail préparatoire afin de mieux appréhender la manipulation :

#### 4.2.1 Etude de l'oscillateur à pont de Wien

A partir du schéma en boucle ouverte de la figure 8, il faut déterminer l'expression du gain  $A$  puis calculer les valeurs minimum et maximum de ce gain

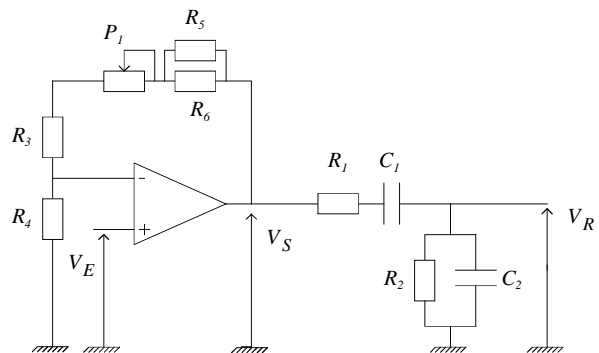


fig 8 : oscillateur en boucle ouverte avec  $R_3=R_4=R_5=R_6=10\text{ K}\Omega$  et  $P_1$  variant de 0 à  $10\text{ K}\Omega$

Les étudiants calculent ensuite la fréquence d'oscillation  $f_0$  et la valeur du  $\beta_{\max}$  pour les deux jeux de résistances et de condensateurs suivants :

	$R_1$	$C_1$	$R_2$	$C_2$
Cas (a)	$10\text{ K}\Omega$	$1\text{ nF}$	$100\text{ K}\Omega$	$10\text{ nF}$
Cas (b)	$100\text{ K}\Omega$	$1\text{ nF}$	$100\text{ K}\Omega$	$1\text{ nF}$

#### 4.2.2 Etude du comparateur à AOP

Les étudiants tracent la caractéristique de transfert du comparateur à AOP proposé et en déduisent le type de comparateur utilisé ici (avec seuil, sans seuil, inverseur, non inverseur ?).

### 4.2.3 Etude de l'intégrateur à AOP

Les étudiants déterminent la fonction de transfert d'un montage intégrateur classique à AOP en utilisant la transformée de Laplace.

### 4.2.4 Valeur du « slew-rate » de l'ampli op

Les circuits précédents mettent en œuvre des amplificateurs opérationnels, dont une des caractéristiques importantes est le « slew-rate ». Ce terme qualifie la vitesse maximum de montée du signal de sortie et est exprimé en  $V/\mu s$ . C'est une donnée constructeur et une notice est mise à la disposition des étudiants pour rechercher cette grandeur [6].

### 4.3 Etude pratique en boucle ouverte

On se place dans la configuration de la figure 8 en insérant les bons cavaliers sur la platine.

#### 4.3.1 Etude du gain A

Un signal sinusoïdal est injecté à l'entrée  $S_0$  et les étudiants mesurent à l'oscilloscope le gain  $A$  pour ses deux valeurs extrêmes et les comparent avec la théorie pour vérifier la concordance des résultats. Ils mesurent également le déphasage et vérifient si la valeur est conforme à la théorie.

#### 4.3.2 Etude de la fonction de transfert $\beta$

Pour les différents cas proposés, les étudiants règlent la fréquence du générateur BF à la fréquence  $F_0$  calculée lors du travail préparatoire puis mesurent le gain et la phase de  $\beta$  et les comparent avec leurs calculs. Les étudiants recherchent ensuite de manière expérimentale la fréquence centrale du filtre en utilisant de manière judicieuse le mode XY de l'oscilloscope.

#### 4.3.3 Simulation sous @Altium

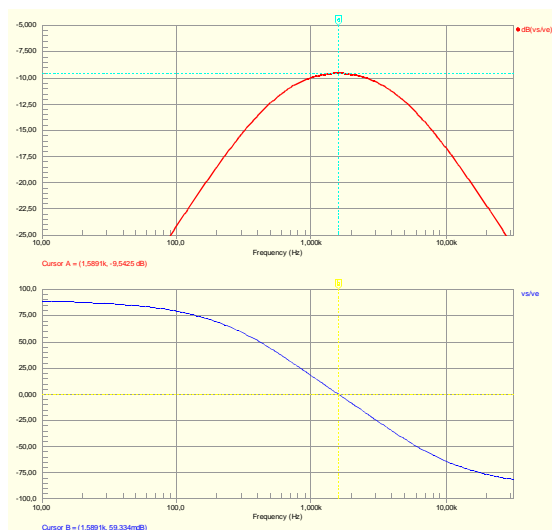


fig 9 : courbes de Bode sous @Altium

A ce stade de la manipulation, un premier exercice de simulation est demandé. Pour gagner du temps, le schéma est déjà réalisé et les étudiants simulent direc-

tement le comportement en fréquence du réseau de réaction comme illustré sur la figure 9.

L'exploitation des courbes de Bode leur permettent ensuite de répondre à quelques questions sur la valeur de la fréquence pour laquelle l'argument de  $\beta$  est nul et la valeur du gain maximum correspondant. Ils comparent ces valeurs avec la préparation et les résultats de mesure.

### 4.4 Etude pratique en boucle fermée

#### 4.4.1 Schéma sans diode

On se place maintenant dans la configuration de la figure 10 où la boucle est fermée directement sans ajout de diodes

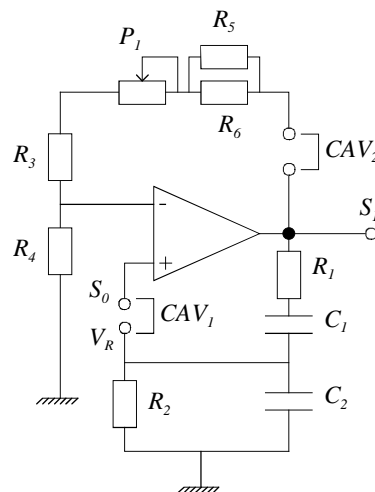


fig 10 : oscillateur en boucle fermée

Le but de cette manipulation est de vérifier que l'oscillateur oscille bien sans générateur externe avec la nécessité de régler le gain via le potentiomètre  $P_1$ . Pour chaque cas de figure (a et b) du travail préparatoire, l'observation des signaux à l'oscilloscope permet de conclure sur la réalisation de cet objectif (en définitive, seul le cas b permet d'y arriver). A ce niveau de la manipulation, le réglage du gain permettant le démarrage des oscillations est très pointu et il est difficile de régler l'amplitude du signal sinusoïdal.

#### 4.4.2 Schéma avec diodes

Les étudiants réalisent ensuite le schéma de la figure 5 en y incluant les diodes tête-bêche afin d'observer les différences éventuelles sur les signaux obtenus. Ils portent une attention toute particulière sur le démarrage des oscillations et sur le réglage de l'amplitude avant de conclure sur le rôle des diodes. Dans le cas où il y a bien oscillation, les étudiants sont amenés à discuter de la qualité du signal en effectuant une analyse fréquentielle FFT à l'oscilloscope avec et sans diodes. Ils peuvent notamment évaluer le taux de distorsion du signal en relevant les amplitudes du fondamental et des harmoniques. Ils doivent ensuite proposer d'autres solutions électroniques vues en cours et en TD pour améliorer la qualité du signal.

### 4.4.3 Mesures à l'oscilloscope

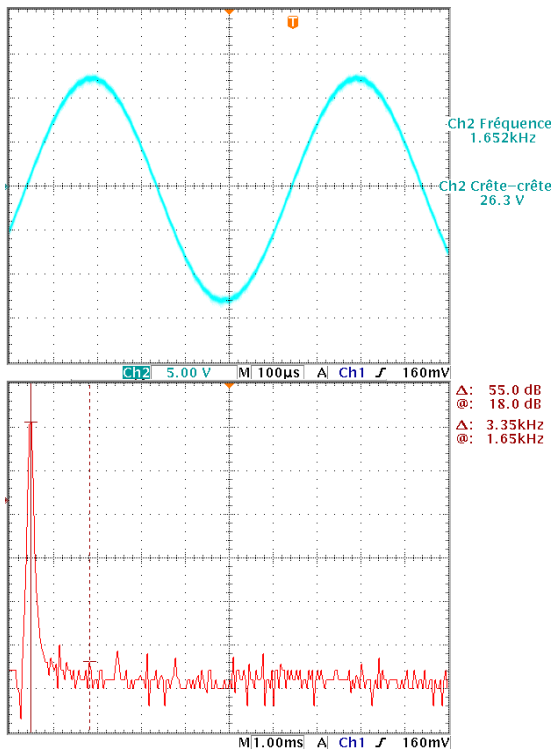


fig 11.a et 11.b : réponse temporelle et analyse FFT du signal de sortie  $S_1$  du pont de Wien sans diode

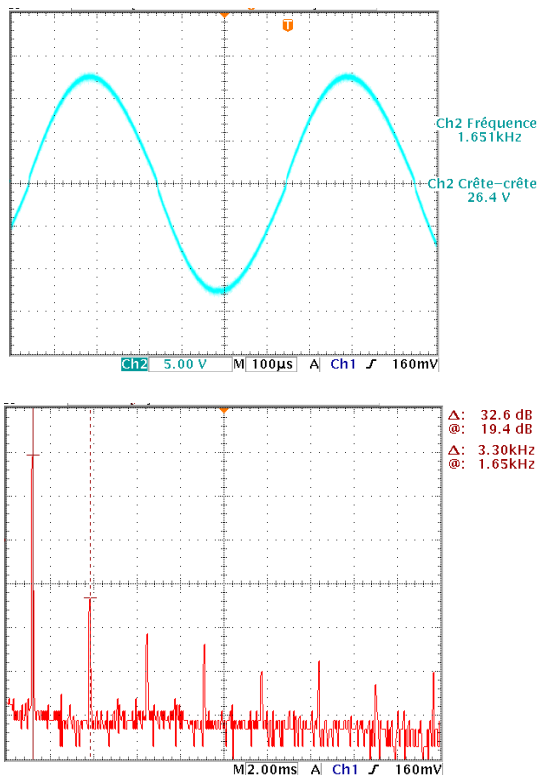


fig 12.a et 12.b : réponse temporelle et analyse FFT du signal de sortie  $S_1$  du pont de Wien avec diodes

Les figures précédentes correspondent à la mesure du signal de sortie  $S_1$  (réponse temporelle et analyse fréquentielle FFT) de l'oscillateur à pont de Wien dans le cas où l'oscillation est bien présente. Les figures 11.a et 11.b correspondent au schéma sans diode et les figures 12.a et 12.b au schéma avec diodes. Remarquons sur ces dernières figures les distorsions de croisement liées aux seuils des diodes et les conséquences sur le spectre du signal de sortie.

### 4.4.4 Simulation sous @Altium

Un deuxième exercice de simulation est demandé à ce niveau et là encore, le schéma de l'oscillateur à pont de Wien avec diodes est déjà réalisé.

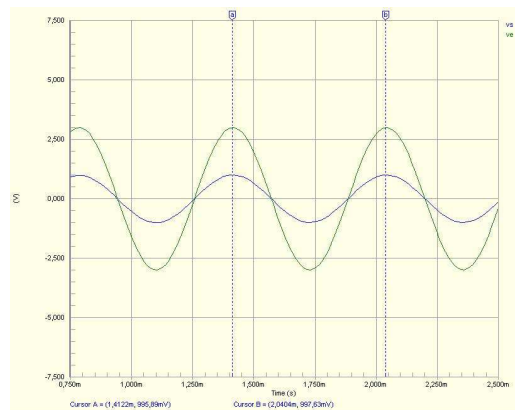


fig 13 : réponses temporelles des signaux  $S_0$  et  $S_1$  de l'oscillateur à pont de Wien sous @Altium

Les étudiants effectuent cette fois-ci une analyse temporelle (voir figure 13) puis une analyse FFT et relèvent le taux de distorsion du signal de sortie.

Ils comparent ensuite la réponse temporelle et le spectre avec les résultats de mesure et notent la durée du régime transitoire avant établissement du régime permanent.

### 4.5 Etude du générateur de signaux

On se place enfin dans le cas du schéma complet de la figure 6 (avec  $R_7=68K\Omega$ ,  $R_8=R_9=100K\Omega$ ,  $C_3=1nF$ ,  $P_2$  variant de 0 à 470 K $\Omega$  et  $P_3$  variant de 0 à 10 K $\Omega$ ) pour réaliser le générateur de fonctions. A l'aide du travail préparatoire, les étudiants doivent identifier les différents circuits qui permettent d'obtenir les trois signaux : sinus, carré et triangle puis mesurent les signaux aux différentes sorties  $S_i$  (cf. figure 14). Une attention particulière est portée sur le réglage de l'offset de l'AOP  $A_3$  pour obtenir un signal triangulaire sans saturation. Une observation précise du signal carré permet de mesurer la pente à l'origine et de la comparer avec le « slew-rate » constructeur. Le potentiomètre  $P_2$  permet également de régler la pente du signal triangulaire obtenu sans distorsion, offrant ainsi la possibilité de mesurer les pentes maximum et minimum de ce signal.

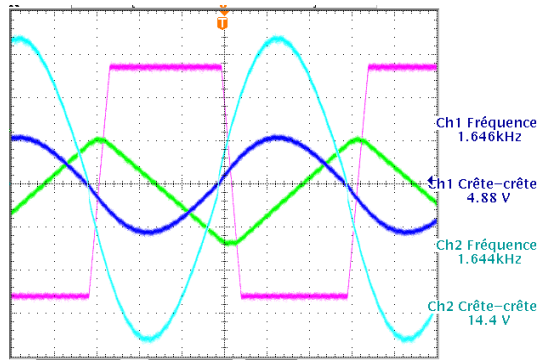


fig 14 : mesures temporelles à l'oscilloscope des signaux  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$  du générateur de fonctions

A nouveau, les différents signaux de sortie du générateur de fonctions sont simulés sous @Altium (cf. figure 15) et comparés avec la mesure.

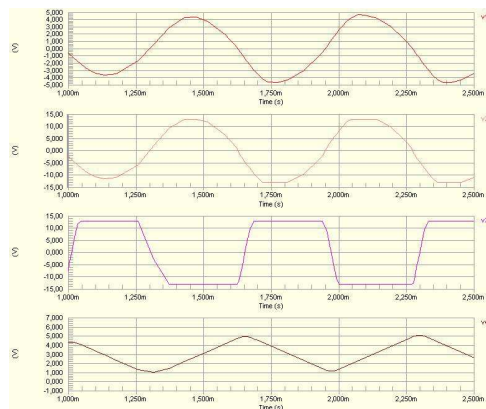


fig 15 : simulations temporelles des signaux  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$  du générateur de fonctions sous Altium

Le TP se termine par la mesure des amplitudes minimum et maximum de chacun des trois signaux grâce au réglage du potentiomètre  $P_4$ .

## 5 EVALUATION / RETOUR DES ETUDIANTS

Cette manipulation a été mise en place récemment (octobre 2011) et les premiers retours sont positifs. Les étudiants apprécient de pouvoir comprendre de manière concrète par la mesure et la simulation des principes théoriques qui à nous enseignants, paraissent simples mais qui pour certains d'entre eux sont trop abstraits.

Le texte du TP est parfois jugé un peu long comme bien souvent en électronique analogique (3 h en TP cela passe très vite) et certains étudiants sont parfois frustrés de ne pas pouvoir aller au bout de la manipulation. La plupart d'entre eux éprouvent quelques difficultés à effectuer les réglages nécessaires à l'obtention de bons résultats. Cela nous conforte dans l'idée de maintenir de l'électronique analogique en instrumentation.

## 6 CONCLUSION

La maquette pédagogique présentée dans cet article, a permis d'introduire une formation pratique à très faible

coût sur les oscillateurs en électronique analogique, qui n'existait pas jusqu'à présent à l'IUT GEII de Brest. Cette manipulation permet aux étudiants d'utiliser des appareils de mesure de base tels que l'oscilloscope pour effectuer des mesures très courantes comme le gain, le déphasage et d'interpréter les réponses temporelles et fréquentielles des signaux observés. En outre, les étudiants manipulent plusieurs fonctions électroniques essentielles étudiées en première année telles que l'amplification, le filtrage, la comparaison, l'intégration ... qui sont toutes présentes sur la même maquette, afin de réaliser une fonction plus complète abordée en deuxième année. Ils ont accès aux différents composants sur la platine : résistances, condensateurs, diodes, circuits intégrés, potentiomètres pour réaliser les différents schémas de la manipulation. Ils mettent également en évidence quelques imperfections dans les montages et doivent apporter des solutions d'amélioration. Ils utilisent enfin le simulateur d'un logiciel professionnel de CAO en électronique (@Altium Designer), qui leur permet de confronter mesures, simulations, calculs théoriques et données constructeur. Toutes les compétences acquises ou confortées dans cette manipulation de TP sont à notre sens indispensables pour un futur technicien en électronique.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'ensemble des étudiants ayant participé à l'élaboration de cette maquette et notamment Mademoiselle Shi Wei étudiante à l'IUT GEII de Brest.

**NB :** Le PCB de la maquette oscillateur, les fichiers de simulation et le texte du TP sont disponibles sur demande auprès du département GEII de l'IUT de Brest.

## Bibliographie

- [1] Marc Le Roy, Paul Laurent, Pierre-Marie Martin, cours/TD/TP EN3, 2<sup>ème</sup> année IUT GEII Brest "Fonctions associées au traitement et à la transmission de l'information".
- [2] <http://www.altium.com/>
- [3] Gérard Couturier, "Les oscillateurs en électronique, de la piézoélectricité aux oscillateurs à quartz", *Ellipses, collection Technosup* (2005).
- [4] P. Lagonotte, J.P. Le Bourg, T. Doget et J.P. Allard, "Projet de synthèse de l'électronique analogique : réalisation d'une balance à jauges de contrainte", *J3eA, Vol. 4, Hors-Série 2, 20* (2005)
- [5] Thomas-L Floyd, "Électronique : composants et systèmes d'application", 5<sup>ème</sup> édition, *Goulet (Reynald)* (2004)
- [6] <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/ua741.pdf>