



INSTITUT
NATIONAL
des SCIENCES
APPLIQUÉES



Projet de Physique P6-3
STPI/P6-3/2008 – 28



Nom des étudiants

Amira Benslimane

Kenza Kozmane

Jérôme Dos Reis

Maxime Sixdeniers

Enseignant-responsable du projet

Mr Guillotin



**MODULATION ET
DEMODULATION D'AMPLITUDE
POUR LA TRANSMISSION PAR
ONDES HERTZIENNES**



À TAILLE
HUMAINE
À L'ECHELLE
DU MONDE

Date de remise du rapport : 19/06/2008

Référence du projet : STPI/P6-3/2008 – 28

Intitulé du projet : **Modulation et démodulation d'amplitude pour la transmission par ondes hertziennes.**

Type de projet : **expérimentation**

Objectifs du projet :

Le but de ce projet est d'étudier en groupe un phénomène physique qui nous entoure en permanence : la modulation et la démodulation d'amplitude. Au cours de notre travail, nous verrons son application directe pour transmettre des ondes hertziennes. En effet, grâce à la fabrication d'un émetteur et d'un récepteur, l'approche expérimentale nous montrera que les ondes de basses fréquences sont plus facilement transmises à l'aide, d'une part, de la modulation pour émettre et d'autre part, de la démodulation pour recevoir.

TABLE DES MATIERES

Notations, Acronymes.....	5
Introduction.....	6
I. Méthodologie / Organisation du travail.....	7
II. Travail réalisé et résultats.....	9
1) Modulation d'amplitude : création d'un émetteur radio.....	9
2) Démodulation d'amplitude : réalisation d'un récepteur radio.....	13
a) Réception et filtrage : circuit d'accord	
b) Amplification 1	
c) Démodulation	
d) Amplification 2	
Conclusion et perspective.....	17
Bibliographie.....	18
Annexes	
Annexe 1 : Page 5 de la notice du multiplieur AD633.....	19
Annexe 2 : Modulation faible.....	20
Annexe 3 : Modulation normale.....	20
Annexe 4 : Modulation totale.....	21
Annexe 5 : Photo de l'émetteur.....	22
Annexe 6 : Photo du récepteur.....	22

Notations, Acronymes

μ_0 = constante magnétique = $4\pi \times 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$

AM : modulation d'amplitude

FM : modulation de fréquence

MLI : modulation de largeur d'impulsion

GBF : générateur basse fréquence

GHF : générateur haute fréquence

AD633 : multiplieur (voire annexe 1)

f : fréquence ; f_0 : fréquence propre

W : pulsion propre

L : inductance en Henry

C : capacité du condensateur

N : nombre de spires

S : section de la bobine

l : longueur de la bobine en mètres

G.O : grandes ondes

O.E.M : onde électromagnétique

A.O : amplificateur opérationnel

Introduction

Dans la vie de tous les jours, on retrouve différentes sources de radiation. Les fours à micro-ondes, les téléviseurs, les radios, les radars, les écrans d'ordinateur, les téléphones cellulaires et les talkies-walkies ne sont que quelques exemples de ces sources. Chacun à sa façon émet des ondes à différentes fréquences.

L'être humain, lui, est capable de percevoir des sons dont les fréquences sont à peu près comprises entre 20Hz et 20kHz. Pour pouvoir transmettre ces informations sonores, il est nécessaire de moduler, aux fréquences des ondes acoustique (considérée de basse fréquence), l'amplitude d'une onde porteuse dite de haute fréquence (170kHz dans notre cas). On pourra alors facilement émettre cette onde porteuse d'un émetteur, elle sera ensuite capté par un récepteur et démodulé pour retrouver l'information sonore.

Dans un premier temps nous nous attacherons à expliquer et détailler le fonctionnement d'un émetteur dans le cadre de la modulation d'amplitude. Puis, dans un second temps, nous nous consacrerons à l'étude d'un récepteur radio qui nous permettra de démoduler l'amplitude de l'onde émise.

I. Méthodologie / Organisation du travail

Lors de la première séance de projet au début du semestre, nous étions huit élèves pour traiter le sujet « modulation et démodulation AM FM MLI pour la transmission par ondes hertziennes et par fibres ». Nous avons donc formé deux groupes de quatre étudiants, et en accord avec les autres, nous avons décidé de séparer le sujet en deux immédiatement afin que notre groupe s'attache en particulier à la partie émission et réception radio.

Après une vaste présentation du sujet par l'enseignant, il s'agissait de se renseigner un maximum avant de débiter réellement, notamment par l'intermédiaire d'Internet et de documentation scientifique. Cela fût l'activité principale durant les deux séances qui suivirent la présentation du sujet. Après cette tâche indispensable accomplie, nous avons pu passer à une phase plus expérimentale dès la quatrième séance, en accomplissant plusieurs montages, en essayant de réaliser des parties d'émetteur. Cela s'avère être plus difficile qu'on le pensait, c'est pourquoi nous continuons notre recherche d'informations en dehors des heures consacrées au projet, pour pouvoir profiter au maximum du matériel mis à notre disposition dans le laboratoire.

Après avoir récolté un grand nombre de données, on se rend compte que tout reste encore très abstrait, et que les applications de la théorie au projet en lui-même nous sont très vagues. Pour avoir une idée plus précise de ce qu'on peut réaliser, nous faisons appel au professeur, qui nous apporte alors une réponse très claire : l'élaboration d'un émetteur et d'un récepteur radio, à l'aide d'un montage type que nous avons trouvé sur Internet. Il s'agit maintenant de réaliser le montage, et pour cela, il nous reste environ 8 séances.

Ce montage est assez complexe, et nous nous focaliserons partie par partie sur sa fabrication. De nombreux composants sont nécessaires, et la réalisation de ces derniers fait partie du projet. Pendant les heures que nous passons au laboratoire, nous fabriquons donc les résistances adaptées au montage par exemple à l'aide de soudures, ou encore une bobine à l'aide de matériaux de récupération. Le montage prend forme petit à petit, une fois l'émetteur au point, nous finissons par la partie du récepteur, qui n'a pas été facile. Beaucoup d'ajustements et de retouches

ont été nécessaires pendant la réalisation, et n'est que lors de la dernière semaine que nous avons enfin pu achever le montage et que nous avons pu le tester et apprécier le résultat.

Durant tout ce projet de P6-3, nous avons tenu à travailler le plus possible en groupe, ce qui nous semblait plus motivant et enrichissant, de façon à ce que chacun puisse apporter son idée sur toutes les parties du sujet. Il y a juste pour la rédaction du rapport que le partage des tâches s'avéra être obligatoire. C'est pourquoi Maxime et Jérôme se sont occupés de la rédaction de la partie « émission », alors que Kenza et Amira se sont concentrées sur la partie « réception ».

II. Travail réalisé et résultats

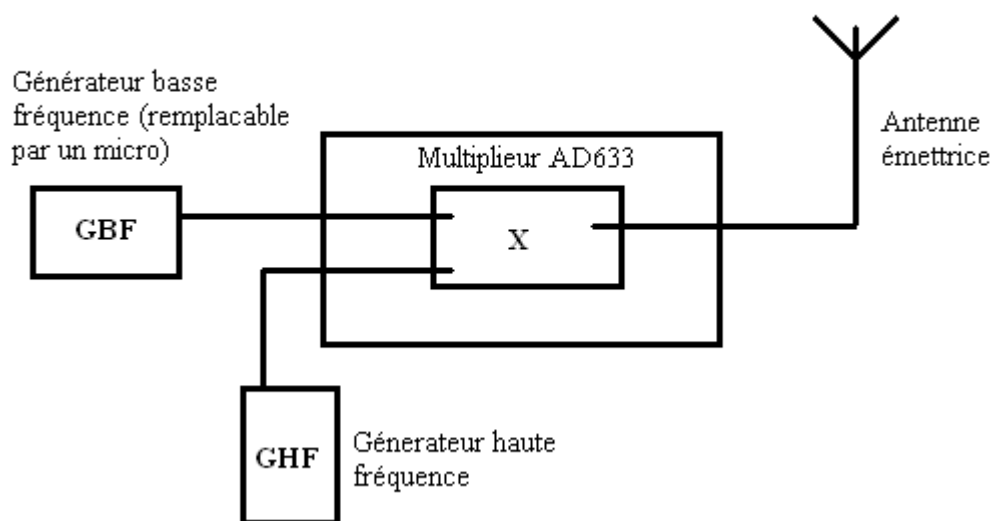
1. Modulation d'amplitude : création d'un émetteur radio

Notre travail va donc constituer en la fabrication de cet émetteur radio, à l'aide de deux générateurs, un multiplieur essentiel pour effectuer la modulation et une antenne émettrice.

Le module émission est donc constitué de deux générateurs. Le premier générateur de l'onde à haute fréquence (appelons le générateur HF) génère donc l'onde porteuse et est indispensable pour arriver à émettre. Le second générateur (générateur BF), en revanche, nous sert à générer une onde de fréquence correspondant à une onde acoustique, nous pourrions donc simplement le remplacer par un microphone puis parler devant pour émettre une onde similaire.

Puis le but va être ensuite d'arriver à multiplier le signal haute fréquence par le signal basse fréquence et ainsi réaliser ce qu'on appelle la modulation d'amplitude. Pour cela nous utilisons un multiplieur – le multiplieur AD633 dans notre cas – qui fait partie des outils servant à moduler une amplitude linéaire sans avoir besoin de recourir à aucun autre composant électronique. C'est sur ce multiplieur que l'on va brancher l'antenne émettrice (un fil dénudé long d'environ un mètre) qui va nous servir à émettre.

Vous pouvez ainsi découvrir sur la page suivante le schéma simplifier d'un émetteur radio.



Nous allons maintenant vous expliquer comment le multiplieur arrive à moduler une onde pour ensuite émettre l'onde de basse fréquence à une fréquence que l'on peut transmettre facilement.

Comme expliqué sur la page cinq de la notice de l'AD633 fourni en annexe 1, les entrées X1 et Y1 du multiplieur sont utilisées respectivement pour brancher le générateur BF (pour la modulation) et le générateur HF (pour l'onde porteuse). Les tensions de ces deux entrées vont être multipliées l'une avec l'autre pour produire un signal à double bande latéral que je décris un peu plus bas. Il faut absolument éviter d'avoir une onde modulée à cent pour cent, car à ce moment là le taux de modulation est égal à un, et ainsi la transmission des informations sonores ne se fait plus. Pour cela, une boucle est créée entre l'entrée Y1 et l'entrée Z du multiplieur. Enfin, on branche le fil dénudée qui nous sert d'antenne sur la sortie W.

Appelons $U(HF)(t)$ la tension émise par le générateur HF, $U(BF)(t)$ la tension émise par le générateur BF et $U(t)$ la tension finalement émise à la sortie W du multiplieur, et que l'on va observer sur l'oscilloscope pour vérifier que l'on obtient bien un signal modulé.

Les deux générateurs sont réglés sur la forme sinusoïdale. C'est pourquoi les tensions émises sont de la forme $U(HF)(t) = A \cos(\omega(HF) \times t)$

$$\text{et } U(BF)(t) = m \cos(\omega(BF) \times t)$$

- $\omega = 2\pi f$ où f est la fréquence sur laquelle est réglée le générateur.

- m est le taux de modulation d'amplitude de l'onde porteuse que l'on règle directement sur le générateur et qui varie entre 0 et 1 : lorsque $m=0$, il n'y a pas de modulation, on observe que la porteuse sur l'oscilloscope ; lorsque $m=1$ on dit que la modulation est à cent pour cent.

Si le multiplieur se contentait seulement de multiplier, on aurait alors $U(t)=U(HF)(t)\times U(BF)(t)$, ce qui correspond à $m=1$ et donc on ne pourrait pas émettre l'onde. C'est pourquoi, comme expliqué précédemment, une boucle est créée entre les entrée Y1 et Z du multiplieur. A ce moment là, on a la relation suivante :

$U(t) = [1 + U(BF)(t)] \times U(HF)(t)$ ce qui nous donne en remplaçant :

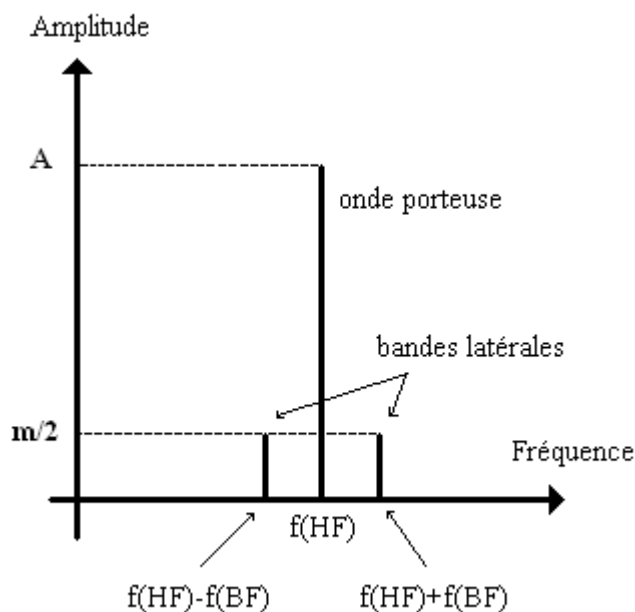
$$U(t) = A \times [1 + m \cos (\omega(BF)\times t)] \times \cos (\omega(HF)\times t)$$

= $A [\cos (\omega(HF)\times t) + m \cos (\omega(BF)\times t) \times \cos (\omega(HF)\times t)]$ soit en utilisant les formules de trigonométrie :

$$U(t) = A [\cos (\omega(HF)\times t)] + m/2 \times [\cos (\{\omega(HF) + \omega(BF)\}\times t) + \cos (\{\omega(HF) - \omega(BF)\}\times t)]$$

$U(t) =$ onde porteuse + bandes latérales

Si au lieu de d'observer $U(t)$ à l'oscilloscope, on branche la sortie W sur synchronie on peut observer la modulation et le spectre de $U(t)$ simultanément. Voilà ce que l'on obtient pour le spectre :



On observe sur les annexes 2, 3 et 4 les différents spectres correspondant aux différentes amplitude choisi en faisant varier un bouton prévu à cette intention sur le générateur HF

- Sur l'annexe 2, on observe une faible modulation, c'est-à-dire qu'il n'y a presque que la porteuse ($U(HF)(t)$) que nous pouvons observer en haut de l'image. En effet, si on observe le spectre en bas de la page, on remarque qu'il y a la bande de la porteuse à 170kHz, mais qu'il n'y a pas de bandes latérales correspondant à la modulation et donc on ne peut pas émettre dans de bonnes conditions : il n'y aura que la porteuse qui va être transmise, mais pas l'onde de basse fréquence qui nous intéresse.

- Sur l'annexe 3, nous avons à faire à une modulation normale, on a augmenté l'amplitude de la tension émise par le générateur HF ($U(HF)(t)$) et on observe bien en haut de l'image la porteuse, mais également la tension $U(BF)(t)$. Sur le spectre on observe bien les deux bandes latérales à $f(HF) - f(BF)$ et $f(HF) + f(BF)$. La modulation d'amplitude correspond donc à l'apparition de ces deux bandes, l'information est contenue dans ces deux dernières.

Une fois le montage correspondant à cette courbe réalisé, nous ne pouvons pas voir la réception de ce signal sur le récepteur car il n'était pas encore créé. Nous avons donc utilisé une radio réglée sur la fréquence à laquelle on émettait (174kHz) qui est un peu supérieure aux fréquences des radios usuelles comme France-Inter pour être sûr de recevoir notre signal.

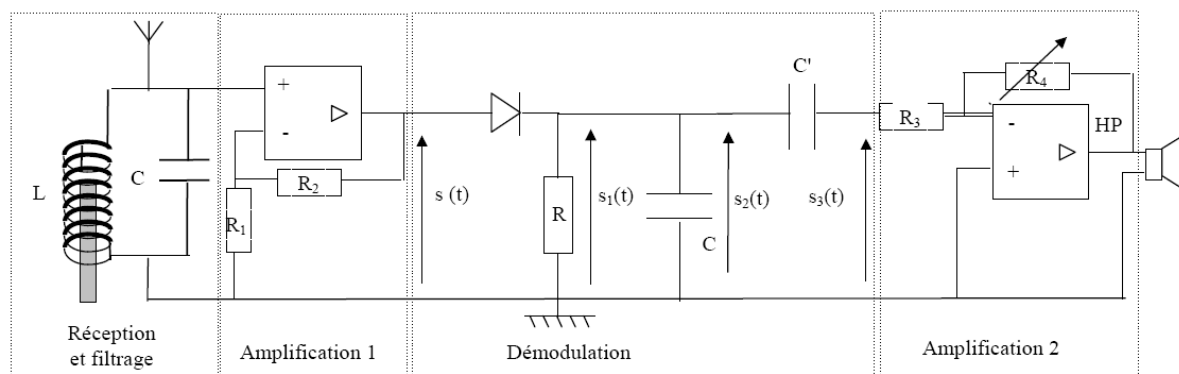
- Enfin, sur l'annexe 4, la modulation est totale. L'information ne passe plus et on ne peut pas, comme dans le cas de la modulation faible, bien émettre. En effet, à ce moment là, on ne peut plus moduler aux fréquences acoustiques l'amplitude de l'onde porteuse et donc on n'a plus de moyen de transmettre l'onde de basse fréquence.

2. Démodulation d'amplitude : réalisation d'un récepteur radio

Les signaux formés par les ondes électromagnétiques sont captés par une antenne. Celle-ci, quelle qu'elle soit, reçoit de nombreux signaux qu'il faut différencier. Un récepteur doit donc être capable de :

- sélectionner, parmi les nombreux signaux, le signal désiré ;
- amplifier ce signal afin de permettre son traitement ultérieur ;
- démoduler le signal, qui est modulé en amplitude, en fréquence, en phase ou de type numérique, afin de récupérer une copie fidèle du signal original, appelé signal modulant.

Afin de respecter les différentes étapes nous avons choisi de réaliser le montage ci-dessous :



a) Réception et filtrage : circuit d'accord

Les ondes électromagnétiques émises engendrent dans l'antenne de réception des signaux électriques de mêmes fréquences.

Le dipôle LC, appelé circuit sélectif ou circuit d'accord joue le rôle de filtre passe-bande :

- sa fréquence centrale doit être réglable de façon à pouvoir changer de réception.
- la bande passante doit être suffisamment étroite pour ne transmettre que le signal sélectionné.

- la bande passante doit être suffisamment large pour permettre la transmission de l'ensemble du signal. Pour un signal sonore complet, la bande passante du filtre doit transmettre les signaux entre $F_p - f_{\max}$ et $F_p + f_{\max}$.

Un bon choix des valeurs de L et de C permet de sélectionner les tensions engendrées dans le circuit dont les fréquences correspondent à des stations radios comme France inter (164kHz), RTL (254kHz), Europe 1 (182kHz), RMC (214kHz).

Pour un condensateur de capacité $C=100\text{nF}$, on a du choisir la valeur qu'il faut donner à l'inductance variable L pour que la fréquence propre du circuit parallèle corresponde à la fréquence de France inter.

Afin de réaliser la bobine :

On a d'abord trouvé la fréquence propre du circuit d'accord

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L.C}}$$

Ensuite on a trouvé la valeur d'inductance pour ce même circuit :

$$L = \frac{1}{4.\pi^2.f_0^2.C}$$

avec $f_0 = F = 10 \text{ KHz}$

$$L = \frac{1}{4.\pi^2.(10.10^3)^2.100.10^{-9}} = 2,5.10^{-3} \text{ H} = \mathbf{2,5 \text{ mH}}$$

Nous en avons alors déduit le nombre de spires grâce à la formule :

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}$$

Pour les valeurs correspondantes à la section et la longueur, nous avons découpé et renforcé un rouleau en carton de longueur 10 cm et de rayon 2 cm. Le nombre de spires obtenues est de 230.

Pour finaliser notre bobine, on a donc entouré le rouleau avec le fil de cuivre.

A l'intérieur de celle-ci on a placé un bâton de ferrite de perméabilité élevée par rapport à l'air afin d'augmenter le champ magnétique créé par le courant circulant dans la bobine.

Le circuit d'accord ne permet pas de capter les stations radio en GO [150 kHz-255 kHz] car la fréquence la plus grande que l'on puisse capter est 44 kHz.

L'ordre de grandeur de la capacité C qu'il faudrait alors utiliser pour capter les stations en radio en GO (avec $F=200$ kHz et $L=2$ mH)

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L} = \frac{1}{4\pi^2 (200 \cdot 10^3)^2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 3,2 \cdot 10^{-10} \text{ F}$$

Il faut donc une capacité voisine de 0,3 nF ; on a donc utilisé un condensateur de 1 nF

Le rôle du circuit d'accord de l'étage "réception et filtrage" est sélectionner parmi toutes porteuses des radios celle dont la fréquence est égale à la fréquence propre du filtre passe-bande: $f_0 = F$.

b) Amplification 1

Grâce à un A.O non inverseur, on amplifie le signal.

Les résistances que nous avons utilisées sont de $R1 = 1$ kOhm et $R2 = 10$ kOhm

Lors d'un premier essai nous n'avons pas observé une bonne amplification. Etant donné que pour pouvoir démoduler un signal l'amplification doit être bien accentuée, nous avons augmenté la résistance.

Nous avons donc remplacé la résistance de 10 kOhm par une de 100 kOhm ; l'amplification n'était toujours pas satisfaisante. Nous avons essayé à nouveau avec une résistance de 200 kOhm. Toujours pas de résultat !

Après réflexion (et intervention de notre encadrant) avons réalisé dans un premier temps un premier circuit tampon (le même que l'initial) suivi d'un deuxième composé d'une résistance de 1 kOhm ainsi qu'une autre de 5 kOhm.

Le rôle du circuit tampon est d'éviter que le deuxième circuit prélève du courant sur la bobine.

Nous avons enfin pu obtenir un circuit bien amplifié prêt pour une démodulation.

Le fait d'avoir mis le circuit émetteur sur le même pupitre que le circuit récepteur à causé des problèmes de rayonnement. Nous avons donc pris un autre pupitre où nous avons placé notre circuit émetteur.

c) Démodulation

Rôle de la démodulation :

Dans un récepteur radio, l'antenne reçoit l'O.E.M. en provenance de l'émetteur et la convertit en signal électrique. Ce signal attaque un dipôle (L, C) parallèle accordé sur la fréquence F de la porteuse; aux bornes du condensateur apparaît une tension modulée en amplitude, de la forme $u(t) = A(t) \cdot \cos Wt$. L'amplitude A (t) du signal modulé varie avec la fréquence f du signal modulant qui renferme le message.

La démodulation consiste à récupérer l'information transmise en supprimant la porteuse pour ne conserver que l'enveloppe A(t) du signal modulé; cette opération est réalisée à l'aide d'une diode et d'un filtre (R, C).

Le rôle du condensateur C ' de l'étage "démodulation" est de supprimer la tension de décalage du signal modulant.

Pour notre montage nous avons utilisé une diode de détection au germanium car elle est de capacité parasite moins grande et de tension de déblocage moins élevée par rapport à une diode au silicium, une résistance $R1 = 1k\Omega$, deux condensateurs $C = 1$.

d) Amplification 2

Il s'agit du même montage que celui de la première amplification a un haut-parleur près.

Le signal obtenu, débarrassé de sa composante continue puis amplifié, est alors appliqué à un haut-parleur; le message peut être écouté...

Malheureusement nous n'avons pas pu réaliser cette partie du montage étant donné que nous n'avons pas pu nous procurer un haut-parleur.

Conclusion

Après un semestre de recherches et d'expérimentations, notre objectif de départ qui était de réaliser un émetteur et un récepteur radio a finalement été atteint.

Nous avons donc réussi à observer une modulation et une démodulation grâce aux montages décrits précédemment, que nous avons créé et amélioré au cours des séances. L'apogée de notre travail fut d'avoir réussi à capter France Inter !

Par ailleurs, le travail de groupe nous a permis de nous motiver mutuellement et d'échanger nos doutes quant aux résultats obtenus. De plus, il nous a appris à remettre en question nos résultats afin de nous réorienter en cas de fausse route.

Ce projet de Physique nous aura servi à utiliser nos connaissances théoriques dans ce domaine pour les appliquer et les développer dans une approche expérimentale.

Bibliographie

<http://montblancsciences.free.fr/terms/physique/specialite/p10spe.htm>

<http://udppc.grenoble2004.free.fr/TELECH/atelier17%20telecom.doc>

<http://labotp.org/TPSpePhy/11physpe.pdf>

<http://www.unicaen.fr/ufr/sciences/capes/Physique/Montage97-98/numero28.pdf>

http://phychim.net/classe_T4S/cahier_textes/mars/Recepteur.doc

<http://tboivin.free.fr/specialite/doc/modulation.doc>

<http://tboivin.free.fr/specialite/doc/demodulation.doc>

AD633

the basis of voltage controlled integrators and oscillators as will be shown later in this Applications section. The transfer function of this circuit has the form

$$I_O = \frac{1}{R} \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10V} \quad \text{(Equation 7)}$$

Linear Amplitude Modulator

The AD633 can be used as a linear amplitude modulator with no external components. Figure 10 shows the circuit. The carrier and modulation inputs to the AD633 are multiplied to produce a double-sideband signal. The carrier signal is fed forward to the AD633's Z input where it is summed with the double-sideband signal to produce a double-sideband with carrier output.

Voltage Controlled Low-Pass and High-Pass Filters

Figure 11 shows a single multiplier used to build a voltage controlled low-pass filter. The voltage at output A is a result of filtering, E_C . The break frequency is modulated by E_C , the control input. The break frequency, f_b , equals

$$f_b = \frac{E_C}{(20V)\pi RC} \quad \text{(Equation 8)}$$

and the rolloff is 6 dB per octave. This output, which is at a high impedance point, may need to be buffered.

The voltage at output B, the direct output of the AD633, has same response up to frequency f_1 , the natural breakpoint of RC filter,

$$f_1 = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{(Equation 9)}$$

then levels off to a constant attenuation of $f_1/f_2 = E_C/10$.

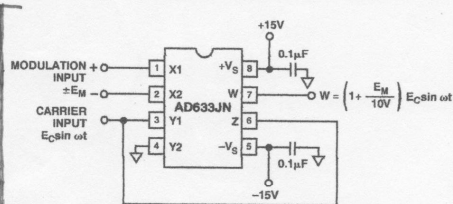


Figure 10. Linear Amplitude Modulator

For example, if $R = 8 \text{ k}\Omega$ and $C = 0.002 \text{ }\mu\text{F}$, then output A has a pole at frequencies from 100 Hz to 10 kHz for E_C ranging from 100 mV to 10 V. Output B has an additional zero at 10 kHz (and can be loaded because it is the multiplier's low impedance output). The circuit can be changed to a high-pass filter Z interchanging the resistor and capacitor as shown in Figure 12 below.

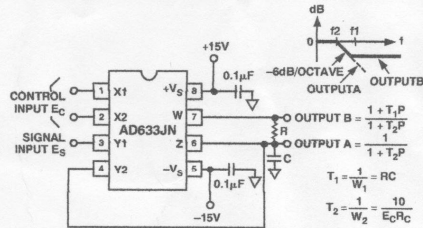


Figure 11. Voltage Controlled Low-Pass Filter

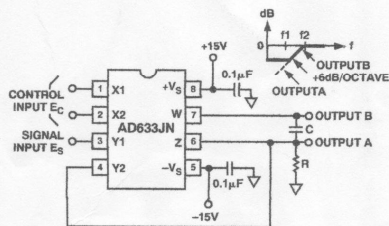


Figure 12. Voltage Controlled High-Pass Filter

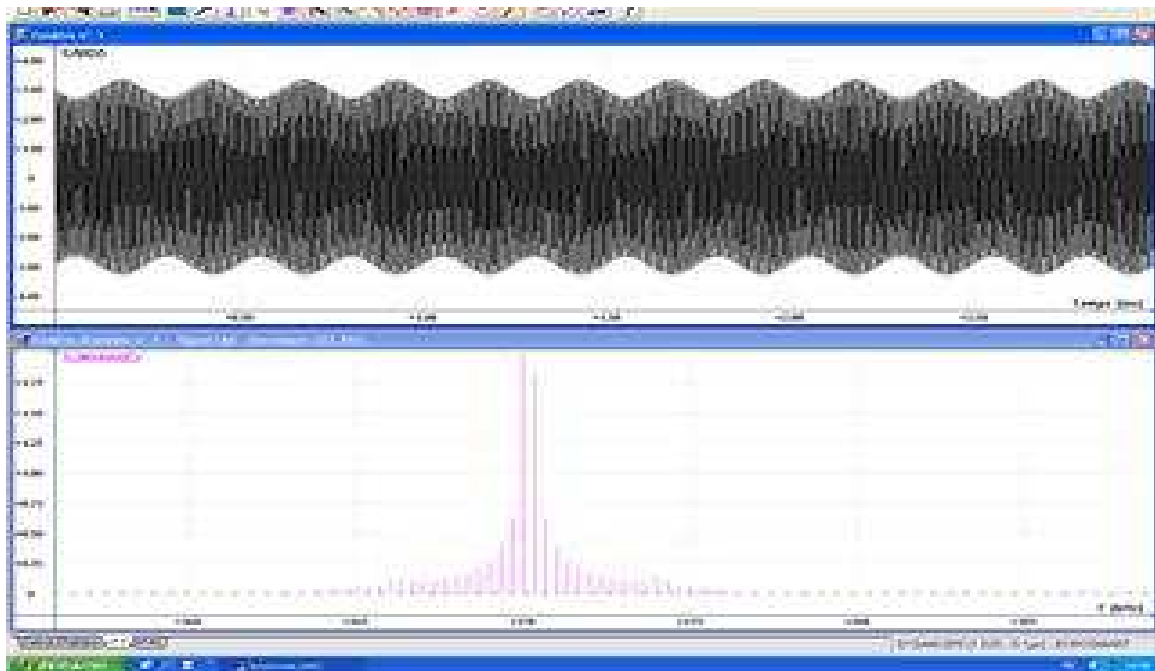
Voltage Controlled Quadrature Oscillator

Figure 13 shows two multipliers being used to form integrators with controllable time constants in a 2nd order differential equation feedback loop. R_2 and R_5 provide controlled current output operation. The currents are integrated in capacitors C_1 and C_2 , and the resulting voltages at high impedance are applied to the X inputs of the "next" AD633. The frequency control input, E_C , connected to the Y inputs, varies the integrator gains with a calibration of 100 Hz/V. The accuracy is limited by the Y-input offsets. The practical tuning range of this circuit is 100:1. C_2 (proportional to C_1 and C_3), R_3 , and R_4 provide regenerative feedback to start and maintain oscillation. The diode bridge, D_1 through D_4 (1N914s), and Zener diode D_5 provide economical temperature stabilization and amplitude stabilization at $\pm 8.5 \text{ V}$ by degenerative damping. The output from the second integrator ($10 \text{ V sin } \omega t$) has the lowest distortion.

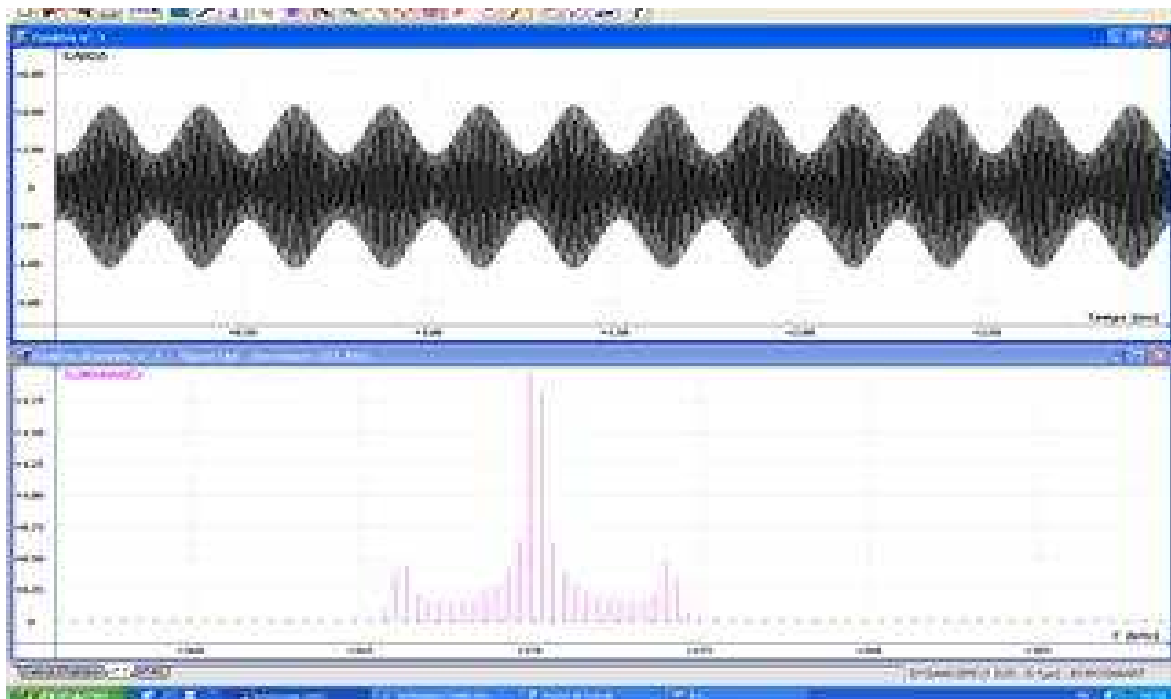
AGC AMPLIFIERS

Figure 14 shows an AGC circuit that uses an rms-dc converter to measure the amplitude of the output waveform. The AD633 and A_1 , 1/2 of an AD712 dual op amp, form a voltage controlled amplifier. The rms dc converter, an AD736, measures the rms value of the output signal. Its output drives A_2 , an integrator/comparator, whose output controls the gain of the voltage controlled amplifier. The 1N4148 diode prevents the output of A_2 from going negative. R_8 , a 50 k Ω variable resistor, sets the circuit's output level. Feedback around the loop forces the voltages at the inverting and noninverting inputs of A_2 to be equal, thus the AGC.

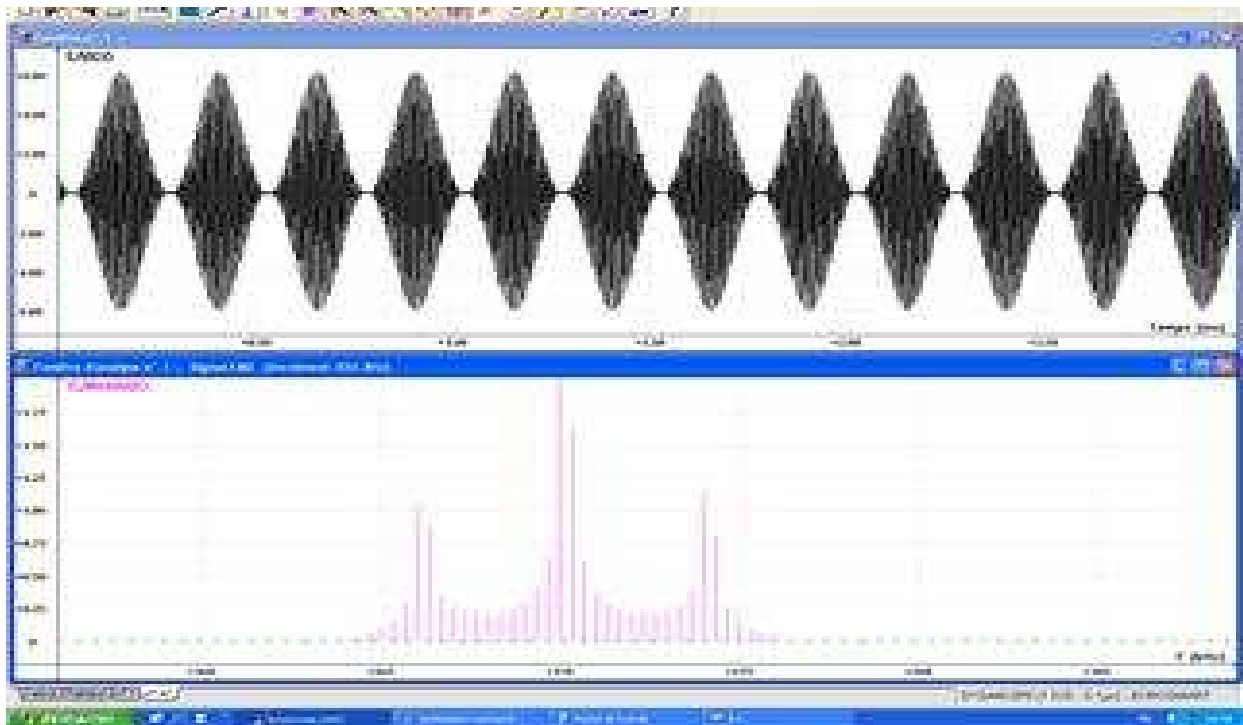
Annexe 2

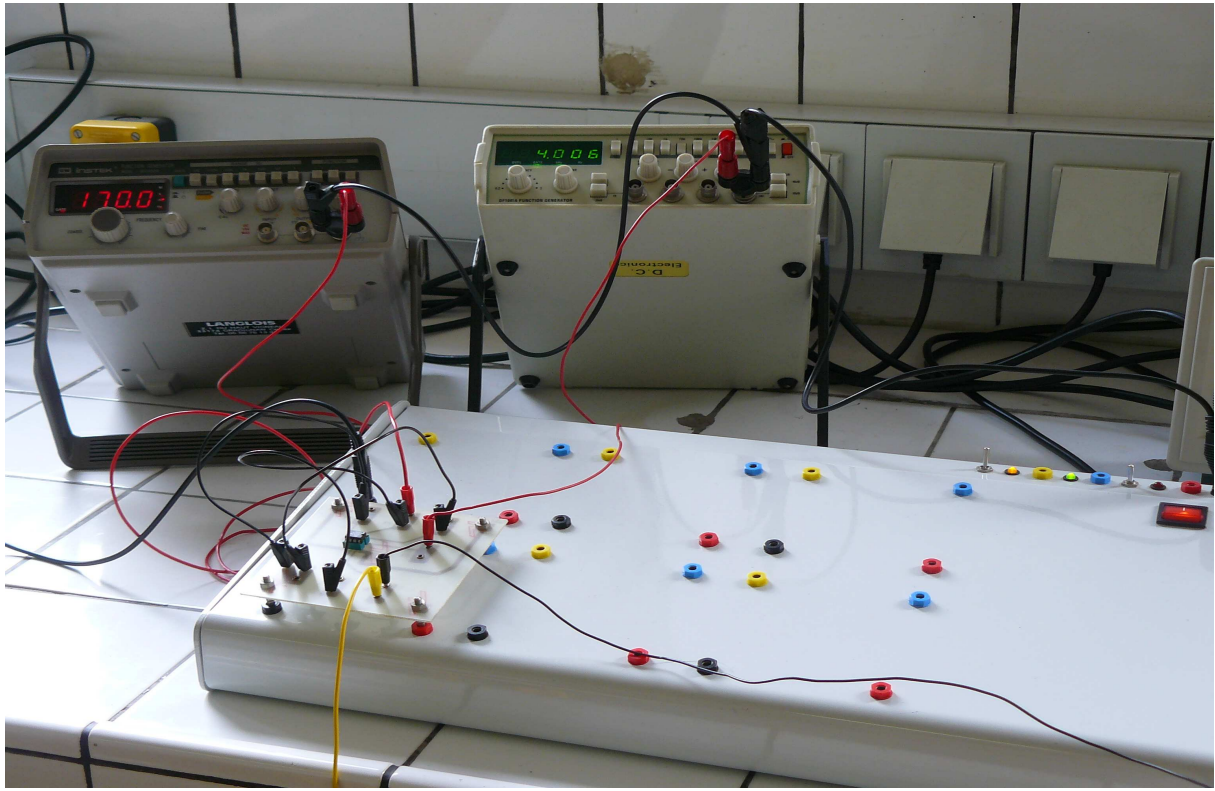


Annexe 3



Annexe 4



Annexe 5Annexe 6