

Laboratoire d'électronique : Convertisseurs A/N et N/A

MASUR Jonathan

GRAIGNIC Anthony

GOSSELIN Paul

1 L'amplificateur accordé

1.1 Description

On considère l'amplificateur accordé décrit Fig. 1.

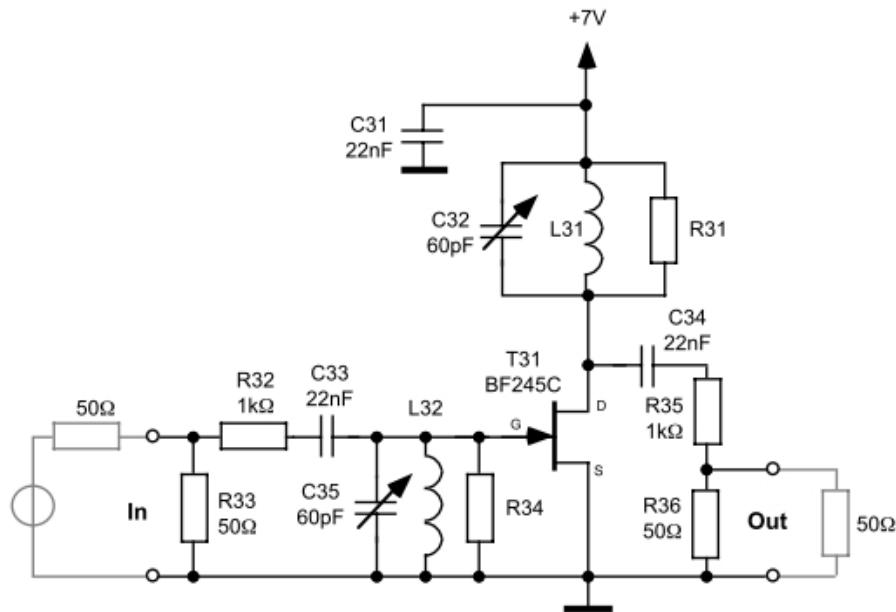


Figure 1

1.2 Questions et calculs

1) Les deux circuits résonnantes sont couplés via un couplage actif.

2) On couple deux filtres d'ordre 1, formant ainsi un filtre d'ordre 2.

Si le facteur de qualité de chacun des circuits résonants est le même, on obtient donc un facteur de qualité global de :

$$Q_{tot} = \frac{1}{\sqrt{2^{1/2} - 1}} Q = 1,554Q$$

3) Les condensateurs C_{33} et C_{34} permettent uniquement de couper de très basses fréquences, hors de notre domaine d'intérêt. On peut donc les ignorer.

Les filtres restants en amont et en aval du JFET sont tout deux constitués d'une inductance et d'une capacité en parallèle, liées à une tension de référence. Ce sont deux passe-bande d'ordre 2 : l'ordre est de 1 de chaque côté de la fréquence de résonance, donnant donc lieu à des pentes de ± 20 dB/décade de part et d'autre de cette fréquence.

En couplant ces deux filtres, on obtient donc un filtre passe-bande d'ordre total 4. On trouve de part et d'autre de la fréquence de résonance f_0 un ordre 2, soit des pentes de +20 dB/décade et -20 dB/décade respectivement en-dessous et au-dessus de f_0 .

4) Afin d'obtenir une bande passante à -3dB s'étendant de $f_1 = 13$ MHz à $f_2 = 15$ MHz, le facteur de qualité total doit être de :

$$Q_{tot} = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$

avec $f_0 = 14$ MHz, soit :

$$Q_{tot} = 7$$

Cela correspond pour chaque circuit résonant à un facteur de qualité de :

$$Q = \sqrt{2^{1/2} - 1} \quad Q_{tot} = 4,505$$

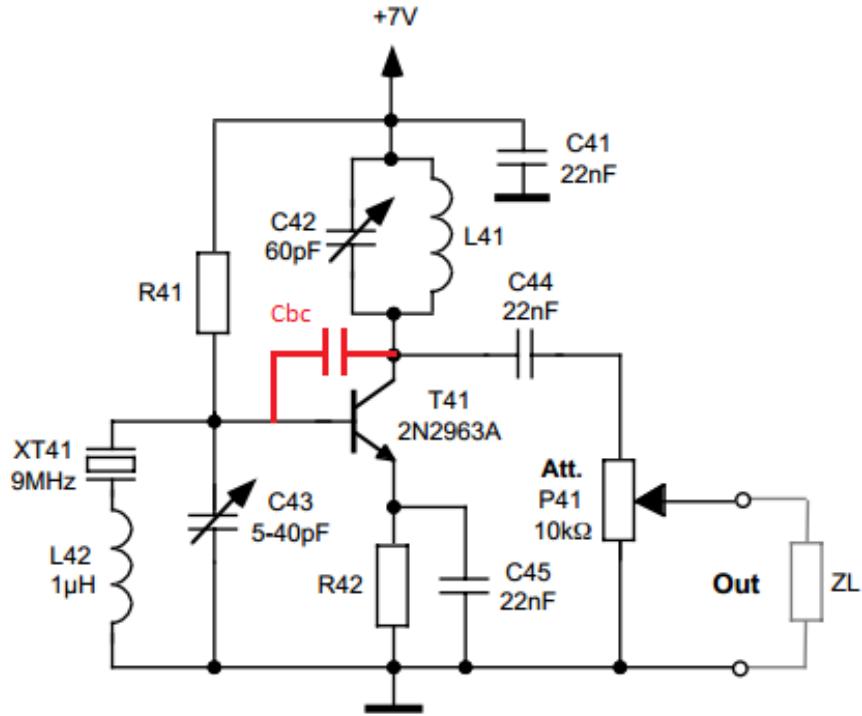
2 L'oscillateur à quartz

2.1 Description

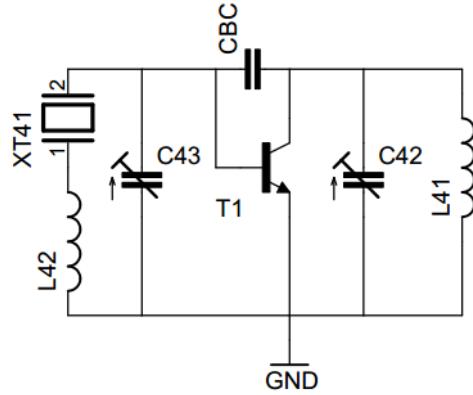
To do

2.2 Questions et calculs

1) La réaction positive s'effectue par le condensateur parasite C_{bc} qui se trouve entre le collecteur et la base du transistor.



L'oscillateur est de type Colpitts, c'est à dire que la réaction positive est réalisée par un diviseur capacitif. Si on considère le schéma petits signaux (suppression des composantes continues servant à polariser le transistor), on obtient le schéma suivant :

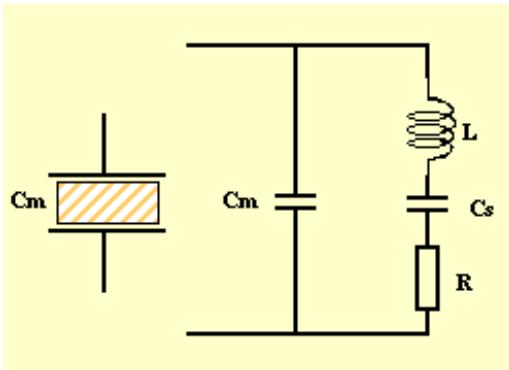


On voit alors que le circuit de charge est un filtre passe-bande formé par L_{41} et C_{42} . Les fréquences seront toutes atténuerées, sauf celles proches de la fréquence de résonance f_0 , où $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{41} \cdot C_{42}}}$. En admettant qu'à l'enclenchement du circuit, il y a du bruit blanc sur la base du transistor, ce bruit blanc inclut toutes les fréquences y compris f_0 . Il ne restera plus que f_0 à la sortie, qui sera alors ré-injectée dans la base par le diviseur formé par C_{BC} et C_{43} .

La condition pour que l'oscillation démarre est que le gain du transistor doit être plus grand que l'atténuation du diviseur captatif. La branche avec le quartz n'est pas nécessaire pour l'apparition d'une oscillation. Cependant elle sert à sélectionner une fréquence particulière de façons plus précise.

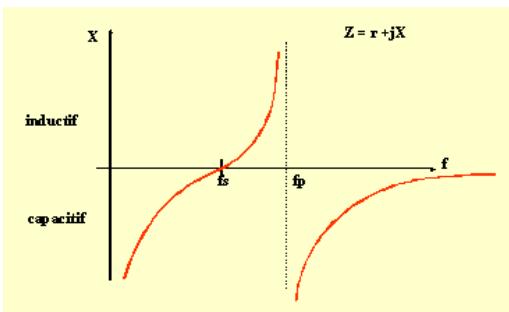
En effet, le quartz agit comme un filtre supplémentaire, et son facteur de qualité Q est très largement plus élevé que celui d'un filtre à composant LC (qui présentent des imperfections électromécaniques).

Le quartz peut être modélisé de la façon suivante :¹



Il a alors deux fréquences de résonances : $f_p = \frac{1}{2\pi \cdot L_s \cdot C_s}$ et $f_s = \frac{1}{2\pi \cdot L_s \cdot C_{eq}}$, où $C_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_m}}$. Ces deux fréquences sont en général très proches l'une de l'autre.

Le quartz est capacitif sur toutes les plages de fréquences sauf dans la bande très étroite qui se trouve entre f_p et f_s ²:



Le quartz a un comportement inductif à la fréquence d'oscillation, qui est donc toujours comprise entre f_p et f_s .

Il est nécessaire que le résonateur L_{41} et C_{42} soit accordé à une fréquence très proche de celle du quartz, sinon les deux filtres vont s'annuler réciproquement et il n'y aura pas d'oscillations.

2) Le condensateur C_{42} a peu d'influence sur la fréquence de sortie. En effet, changer son réglage changera f_0 , mais le filtre réalisé par le Quartz ayant un facteur de qualité beaucoup plus grand, c'est lui qui sera déterminant pour la fréquence des oscillations. Si C_{42} est mal réglé, nous aurons simplement une atténuation de l'amplitude des oscillations, ou carrément un arrêt de l'oscillateur.

En revanche, le réglage de C_{43} vient affecter directement le quartz et va donc avoir un effet direct sur la fréquence d'oscillation.

3) Le fait de brancher une charge à la sortie va diminuer le facteur de qualité du résonateur L_{41} et C_{42} et donc affecter le rapport de force entre ce filtre et le quartz. Plus la résistance de charge est faible, plus le facteur de qualité baisse donc plus la fréquence sera proche de celle du Quartz, ce qui est l'idéal.

4) On fait une analyse en grand signaux, c'est à dire que toutes les inductances sont des court-circuits, et les capacités ainsi que le quartz sont circuits ouverts.

¹Source : www.acedim.com/Formatronic/Electro2/oscillateur/lequartz.html

²Source : <http://www.acedim.com/Formatronic/Electro2/oscillateur/oscilaquartz.html>

Le courant de repos I_c de $1mA$ doit circuler dans le collecteur et l'émetteur du transistor. On désire avoir $1V$ sur l'émetteur, d'où la valeur de R_{42} :

$$R_{42} = \frac{U_e}{I_c} = \frac{1V}{1mA} = 1k\Omega$$

Puis, le courant circulant dans la base du transistor, et donc dans R_{41} est β fois plus petit que I_c . Le facteur β varie fortement avec la température et d'un transistor à l'autre, cependant on peut pour ce transistor estimer que $\beta \simeq 100$ d'où :

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{1mA}{100} = 10\mu A$$

La tension entre la base et l'émetteur est identique à celle d'une diode en conduction $U_j \simeq 0.7V$, d'où :

$$R_{41} = \frac{U_{R41}}{I_b} = \frac{V_{cc}-U_b}{I_b} = \frac{V_{cc}-U_j-U_e}{I_b} = \frac{7V-0.7V-1V}{1mA} = 530k\Omega$$

Nous prenons donc une valeur normalisée de $470k\Omega$, arrondie en dessous car il vaut mieux que I_b et I_c soient un peu plus grands que prévu (le transistor conduit mieux) que l'inverse.

5) La sortie, qui se trouve sur le collecteur du transistor, peut osciller librement entre la tension d'émetteur, qui est de $1V$ et la tension d'alimentation, qui est de $7V$. Il est donc possible d'avoir jusqu'à $6V$ d'amplitude en sortie.

La fréquence de résonance de la charge au collecteur est donnée par :

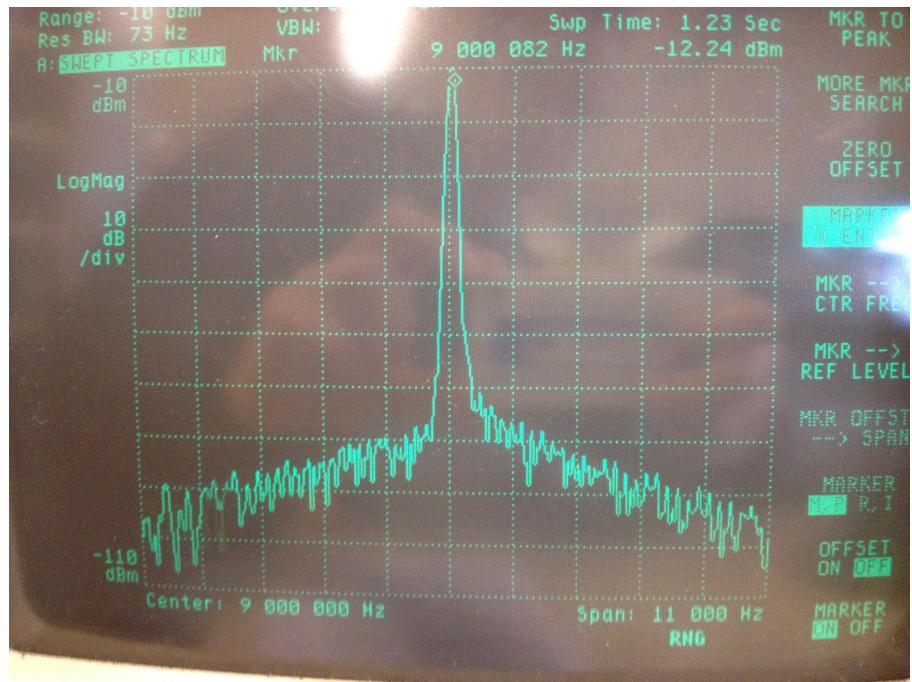
$$\textbf{6)} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{41} \cdot C_{42}}} \Rightarrow L_{41} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 \cdot C_{42}} = \frac{1}{(2\pi \cdot 9 \cdot 10^6)^2 \cdot 60 \cdot 10^{-12}} = 5.22\mu H$$

On a utilisé la valeur normalisée la plus proche, c'est à dire $5.6\mu H$

2.3 Mesures

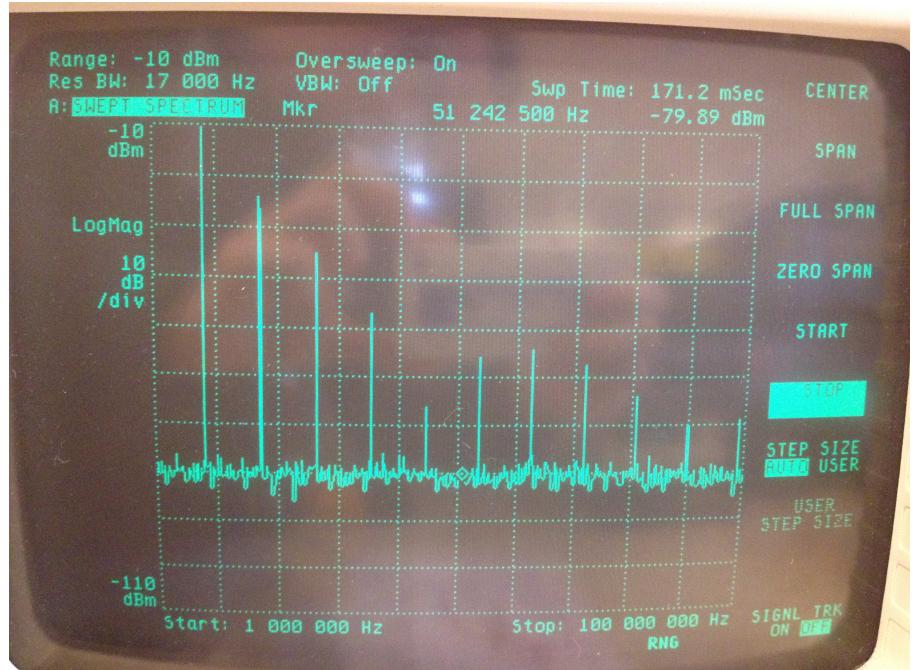
1,2)

3) Spectre de sortie autour de la fondamentale à $9MHz$:



4) Réglage de P41 : On constate que, lorsqu'on monte le curseur, la fréquence augmente. Augmenter le curseur revient à charger plus la sortie donc à diminuer le facteur de qualité du résonateur de sortie. Apparemment notre quartz à une fréquence propre un peu plus élevée que 9MHz mais le réglage a été établi de manière à ajuster la fréquence. Le fait de diminuer le facteur de qualité diminue l'influence du réglage sur la fréquence, d'où un rapprochement à la fréquence propre du quartz c'est à dire une augmentation.

5,6) Spectre de sortie de 1MHz à 100MHz :



On constate que le quartz à de nombreuses harmoniques, qui s'observent sur la sortie malgré le filtre de sortie L_{41} et C_{42} . Sans l'effet de ce filtre, l'intensité de toutes les harmoniques serait probablement presque égal. Il est donc possible de faire osciller ce circuit à une autre fréquence avec le même quartz, en changeant les composants. On peut alors choisir une harmonique sur laquelle on vient s'accorder avec le quartz : Le filtre LC donne une grossière approximation de la région où les oscillations vont démarrer tandis que le quartz règle précisément la fréquence.

3 Mélangeurs

3.1 Introduction

Les mélangeurs sont des circuits qui permettent de multiplier deux signaux sinusoïdaux. D'après la formule d'addition des sinus :

$$\sin(\omega_1 \cdot t) \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) = \frac{1}{2} \cdot (\cos((\omega_1 - \omega_2) \cdot t) - \cos((\omega_1 + \omega_2) \cdot t))$$

Pour un montage idéal, nous avons donc une première composante fréquentielle en $\omega_1 - \omega_2$ et une deuxième en $\omega_1 + \omega_2$

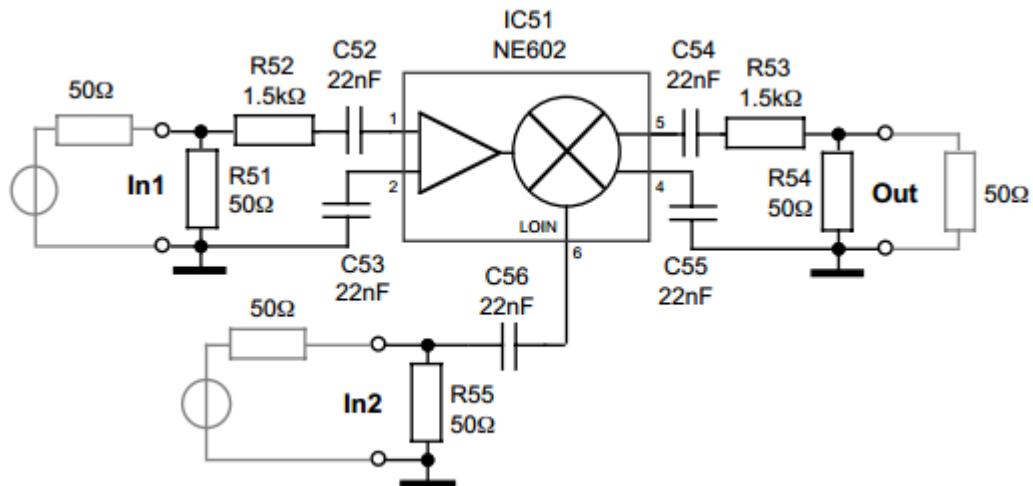
Il est alors possible par filtrage d'éliminer l'une de ces deux composantes, typiquement $\omega_1 - \omega_2$, afin de ne garder que la composante en $\omega_1 + \omega_2$.

Ceci est utile pour réaliser plusieurs types de modulation et de démodulation.

En pratique, la multiplication va présenter des non linéarités, nous aurons donc des harmoniques de ω_1 et de ω_2 en entrée du système. Ainsi, nous avons des composantes à toutes les fréquences : $m \cdot \omega_1 + n \cdot \omega_2, \forall m, n \in \mathbb{Z}$

3.2 Mélangeur à circuit intégré NE602

La multiplication des signaux IN1 et IN2 est faite par le circuit intégré NE602. Il s'agit d'un multiplicateur à 4 quadrants, c'est à dire que la sortie est valable pour toutes les combinaisons possibles des signes des tensions IN1 et IN2 (+, +), (+, -), (-, +) et (-, -). Il n'y a donc aucunement besoin de polariser les entrées avec une composante continue, d'où un montage très simple.



3.2.1 Questions et calculs

1)

L'impédance d'entrée sur l'amplificateur différentiel (broches 1 et 2) est d'environ $1.5k\Omega$ ³. Idem pour les sorties sur les broches 4 et 5. Les résistances R_{51} , R_{52} , R_{53} et R_{54} servent à adapter l'impédance du câble d'antenne 50Ω vers le circuit intégré.

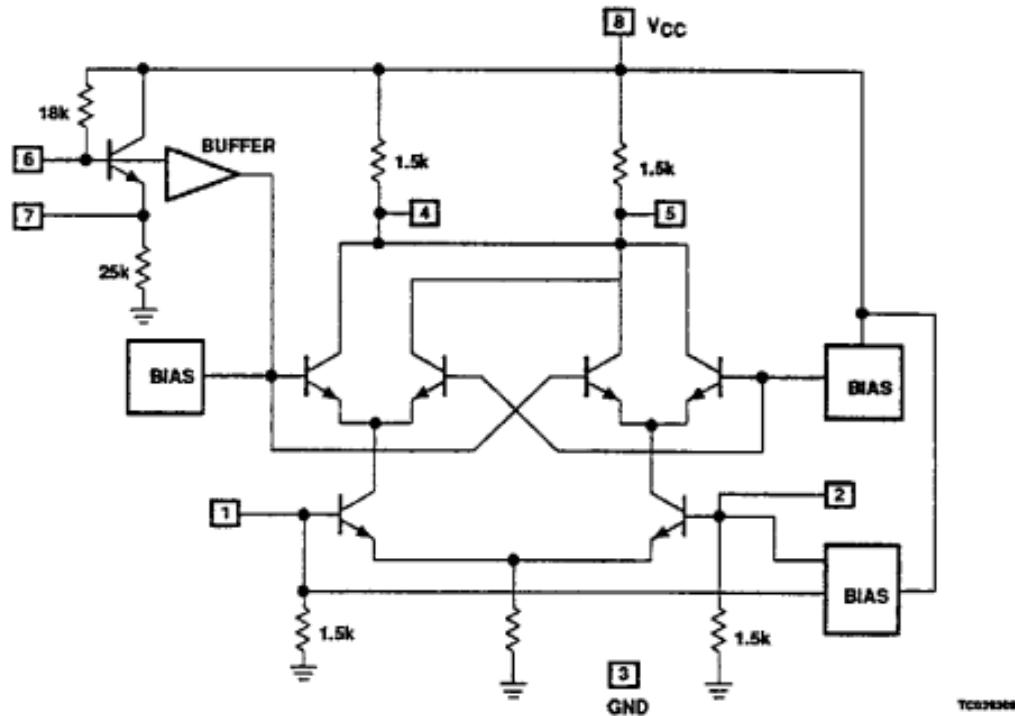


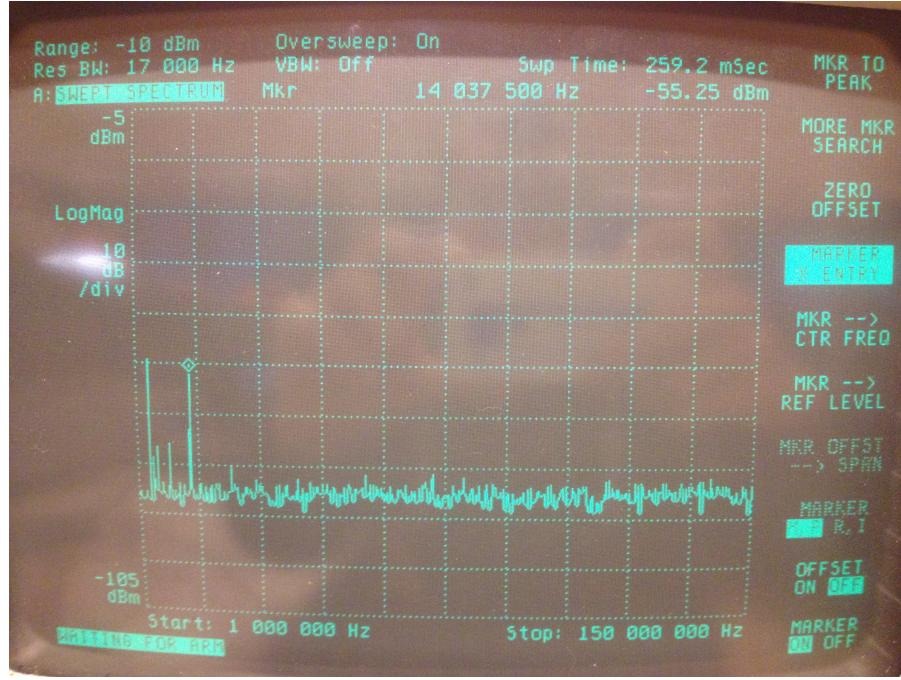
Figure 2. Equivalent Circuit

2) Le circuit a été prévu pour fabriquer un oscillateur avec les broches 6 et 7, cependant on n'utilise pas cette fonctionnalité, car nous avons notre propre oscillateur. L'amplitude doit être au moins de $200mV$ pour simuler un oscillateur local, qui n'est pas amplifié à l'intérieur du circuit, contrairement à l'entrée des broches 1 et 2 qui simule une antenne et qui est amplifiée en interne.

3.2.2 Mesures

1) Spectre de sortie :

³Voir datasheet du composant NE602



2,3,4)

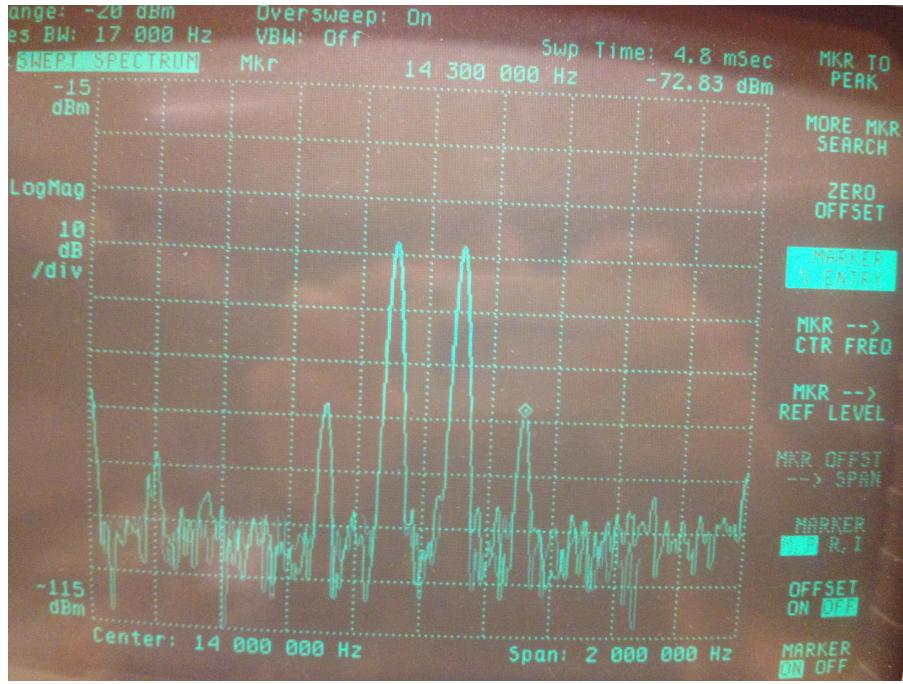
- Gain de conversion : 13.3 dB
- Point de compression de 1dB : -8.2 dBm
- Point d'interception du 3ème ordre : 6.55 dBm

A noter qu'il y a une perte de puissance considérable à cause du changement d'impédance. On perd la moitié du signal d'entrée utile sur le diviseur formé par R_{in} et R_{51} , soit -6 dB. On perd une grande partie de la puissance de sortie à cause du diviseur formé par R_{53} et R_{54} , les pertes sont de :

$$Pertes = 20 \cdot \log\left(\frac{R_{54}/R_{out}}{(R_{54}/R_{out})+R_{53}}\right) = 20 \cdot \log 2525 + 1500) \simeq -35.7 \text{ dB}$$

Nous avons donc, en réalité, 41.7 dB de plus que ce que nous indique l'appareil.

Voici le spectre de sortie d'un signal double ton d'amplitude -8 dBm (l'appareil voit -35.7 dB de moins, soit -43.7 dBm):



Le pic de l'harmonique 3 est à -72.8 dBm pour l'appareil, c'est à dire en réalité $-72.8 + 35.7 = -37.1$ dBm. On peut alors calculer le taux de distorsion d'inter-modulation d'ordre trois, c'est le point qui satisfait l'équation :

$$y = -37.1 + 3 \cdot (y + 8) \Rightarrow y = 6.55 \text{ dBm}$$

3.3 Le mélangeur doublement équilibré à diodes

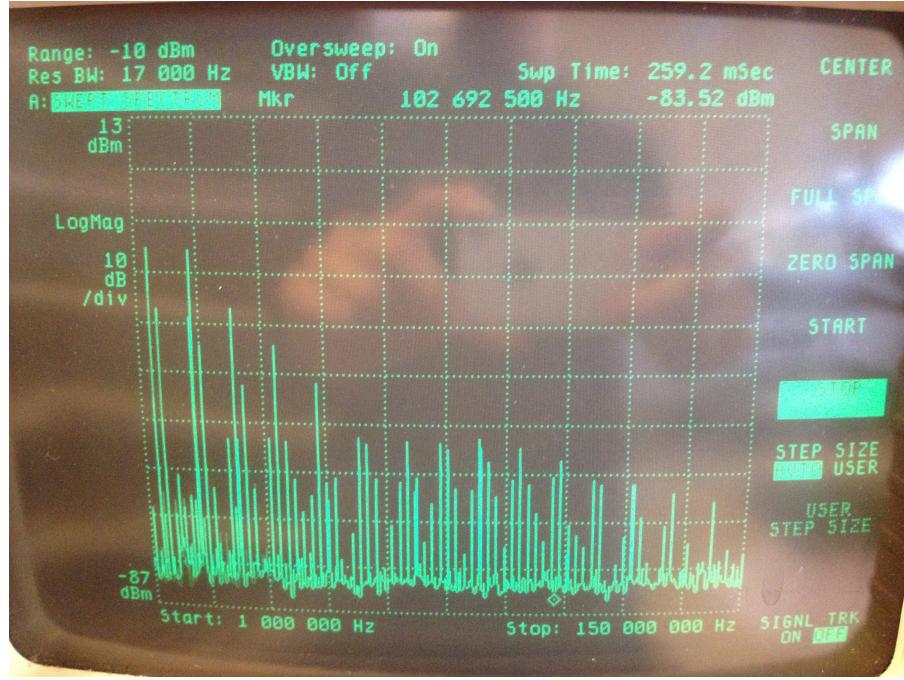
Ce mélangeur Schottky fonctionne comme un commutateur grâce à son pont de diode. Lors des alternances positives du signal d'entrée LO, les D2 et D4 conduisent et l'entrée RF se retrouve en phase par rapport à la sortie IF. Lors des alternances négatives du signal LO, D1 et D3 conduisent et l'entrée RF est en inversion de phase. IF est donc le produit du signal RF par le signe du signal LO.

3.3.1 Questions et calculs

- 1)** Chaque entrée (RF et LO) dispose d'une isolation galvanique avec la sortie IF. Ce type d'isolation permet de transmettre un signal entre 2 circuits électroniques qui n'ont pas forcément les mêmes niveaux de tensions et masses. On garantit ainsi une excellente isolation et indépendance entre les entrées et sortie dans notre cas.

3.3.2 Mesures

- 1)** On applique sur IN2 qui est le Local Oscillator une sinusoïde à 5MHz d'amplitude 0.5 Veff et sur IN1, le signal à transmettre une sinusoïde à 9MHz d'amplitude 100 mVeff. On observe le signal de sortie entre 1 et 150MHz afin d'avoir une vue d'ensemble.

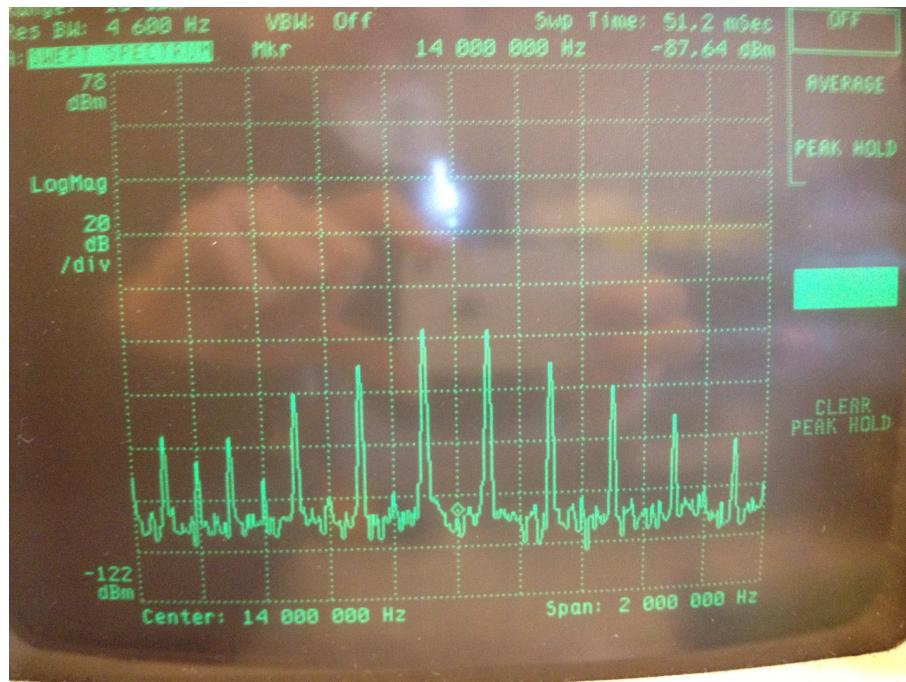


De nombreuses raies apparaissent, celles-ci sont en effet dues aux termes d'ordre supérieur à 1 de la multiplication.

2) En observant de plus près, la zone fréquentielle résultat du mélange qui nous intéresse (autour de 14MHz), on parvient à calculer le gain de conversion. L'amplitude en sortie à 14 MHz mesurée est de -12.5dBm avec un signal d'entrée HF de -7 dBm (0.5 Veff). Le gain de conversion est de -5.5dB.

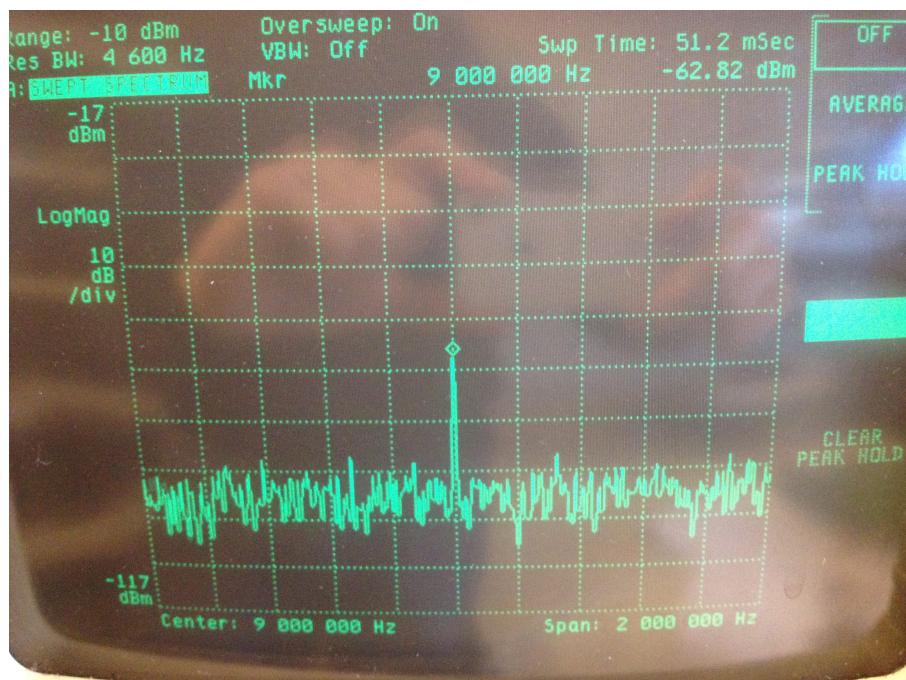
3) On cherche à trouver le point de compression de 1dB. Pour cela, on augmente progressivement l'amplitude du signal d'entrée RF afin d'observer une différence de gain de 1dB avec le résultat de la question précédente. Pour une amplitude d'entrée de 1dBm (0.250 mVeff), la sortie à 14MHz a une amplitude de -5.5dBm, ce qui correspond à un gain de conversion de -6.5 dB.

4) On injecte un signal double ton à l'aide d'un générateur de signaux supplémentaire et d'un sommateur passif de perte 6 dB. On cherche tout d'abord à déterminer le taux de distorsion d'inter-modulation d'ordre trois. En se plaçant à 10 dB en dessous du maximum pour notre signal d'entrée, on obtient le spectre suivant :



Le pic de l'harmonique de troisième ordre est de -32.3 dBm (cheaté). C'est le taux de distorsion d'intermodulation d'ordre 3 (P_{IMR0}). A noter qu'on obtient ici directement l'amplitude du pic car l'isolation est galvanique sans étage d'adaptation qui nous font perdre de la puissance. Ce taux nous permet de calculer directement le point d'interception d'ordre 3 (OIP3) correspondant au croisement entre les approximations linéaires de la fondamentale et de l'harmonique d'ordre 3. $OIP3 = L_{in} + G_{dB} - P_{IMR}/2$ Lin= signal d'entrée en dBm = 1 ici Cours page 5-46

- 5) On mesure l'isolation de l'entrée In2 (LO) vers In1 (RF) en chargeant la sortie avec une résistance de 50 ohms (50.47 exactement). L'entrée IN2 (LO) est observée à l'analyseur de spectre, l'amplitude à la fréquence de 9MHz est de -62.82 dBm.



En enlevant le gain du signal d'entrée IN1 (HF), on obtient un gain et isolation de -67.5 dB, ce qui est correct.

3.4 Le mélangeur à « MOS double-gate »

On s'intéresse maintenant à un autre mélangeur, celui-ci comporte un transistor MOS à double grille. Ces deux grilles sont très utiles et permettent au courant de drain d'être contrôlé par chacune des grilles. Dans notre cas, la grille G1 est légèrement polarisée négativement par rapport à la source, elle est reliée à l'entrée In1, alors que G2 est polarisée positivement grâce au pont diviseur de tension lié à VDD et réalisé par les résistances R76 et R77. Elle est reliée à In2. Le signal In2 (LO) a une amplitude importante et va ainsi faire fortement varier le courant de drain grâce à G2. Le signal In1 (RF) d'une amplitude plus faible, va quand même faire varier le courant de drain du transistor mais le gain d'entrée G1 sera modulé par celui de G2. D'où l'appellation « modulateur d'amplitude » et l'effet de mélange. On retrouve les adaptations d'impédance vers du 50 ohms nécessaires aux appareils de mesures.

3.4.1 Questions et calculs

1) On veut une tension de repos de 1V sur G2. Les résistances R_{76} et R_{77} réalisent un pont diviseur de tension, on a donc :

$$V_G = 1V = R_{77}(R_{77} + R_{76})V_{dd}$$

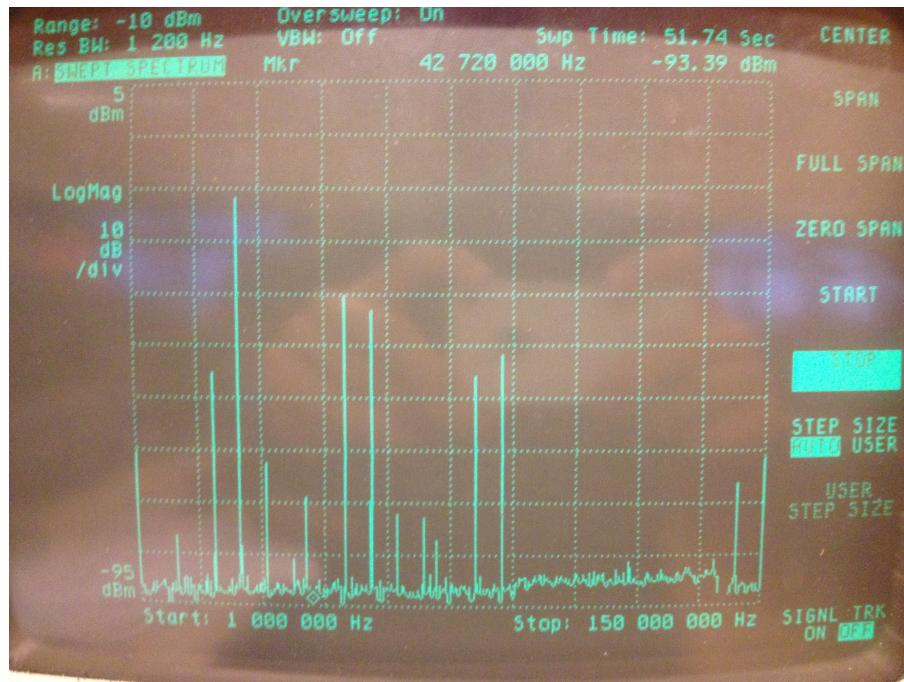
On choisit donc :

- $R_{76} = 3.3k\omega_2$
- $R_{77} = 560\omega_2$

2) L_{72} permet de fixer la composante DC à G1 à la masse. On peut ainsi polariser le transistor comme on le souhaite, négativement dans notre cas. L'absence de cette inductance ne permet pas de contrôler la polarisation du transistor et le signal RF ne serait plus intégralement transmis.

3.4.2 Mesures

1) On applique sur IN2 qui est le Local Oscillator une sinusoïde à 5MHz d'amplitude 1 Veff et sur IN1, le signal à transmettre une sinusoïde à 9MHz d'amplitude 10 mVeff. On observe le signal de sortie entre 1 et 150MHz afin d'avoir une vue d'ensemble.

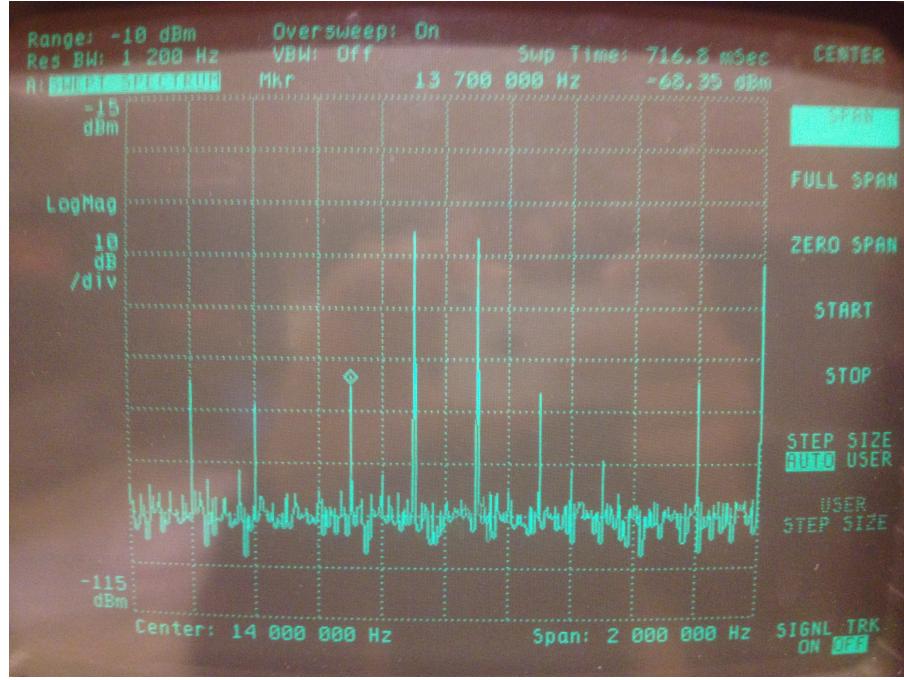


On constate qu'il y a nettement moins de raies qu'avec le mélangeur doublement équilibré, les harmoniques sont mieux atténuerées.

2) On mesure, en zoomant autour des 14 MHz, une amplitude de sortie de -56.63dBm. Il ne faut pas oublier de prendre en compte les étages d'adaptation d'impédance. Le gain de conversion de G1 vers le drain est donc de : $-56.63 + 6 + 35.7 - 13.01 = -30.37$ faux(-27.94 dB)...

3) On utilise la même démarche mise en œuvre pour les autres mélangeurs en augmentant progressivement la tension du signal RF d'entrée. On trouve le point de compression à une amplitude d'entrée de -3.4dBm soit 0.151 Veff.

4) On applique un signal 9MHz double ton, on cherche le taux de distorsion d'inter-modulation d'ordre trois. En se plaçant à 10 dB en dessous du maximum pour notre signal d'entrée, on obtient le spectre suivant :



Le pic de l'harmonique de troisième ordre est de -5.4dBm soit 0.12Veff (après désadaptation). En appliquant la même formule que précédemment, on trouve OIP3=

- 5)** En chargeant la sortie avec une résistance de 50 ohms et observant à l'analyseur de spectre l'entrée IN2, on mesure un pic à 5MHz de -62.8dBm, ce qui correspond à un gain de conversion ou isolation (insertion loss) ici de -75.8 dB.

3.5 Le mélangeur à 1 diode

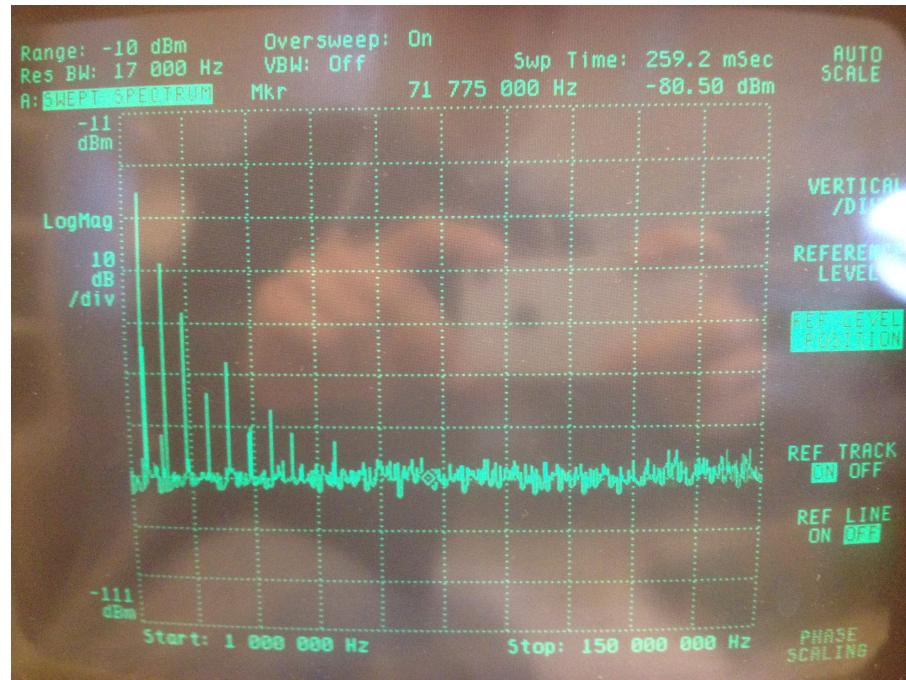
Le mélangeur à une diode est le montage le plus simple et moins onéreux à réaliser parmi tous les mélangeurs étudiés. Mais ces avantages se paient par un spectre dense avec des harmoniques d'amplitude importantes. Les deux signaux d'entrées IN1(RF) et IN2(LO) sont additionnés, on écrète ensuite le résultat grâce à la diode. Ce dispositif est somme toute similaire à un dispositif « hacheur ».

3.5.1 Questions et calculs

- 1)** L_{81} permet de fixer la valeur moyenne ou valeur DC à 0 ce qui permet de faire conduire la diode correctement.
- 2)** Les impédances réelles d'entrée et de sortie sont d'environ 50 ohms. Plus précisément...
- 3)**

3.5.2 Mesures

- 1)** On applique sur IN2 qui est le Local Oscillator une sinusoïde à 5MHz d'amplitude 1 Veff et sur IN1, le signal à transmettre une sinusoïde à 9MHz d'amplitude 10 mVeff. On observe le signal de sortie entre 1 et 150MHz afin d'avoir une vue d'ensemble.



Les harmoniques sont peu nombreuses mais d'amplitude conséquentes ! Tous les signaux supérieurs à environ 50MHz sont filtrés grâce à on sait pas.

- 2)
- 3)
- 4)
- 5)

3.6 Conclusions sur les mélangeurs