

Etude d'un générateur de signal AM à un seul tube à gaz

| SOMMAIRE | Page |
|---|-------------|
| 1. Introduction | 2 |
| 2. Fonctionnement d'un tube à gaz | 3 |
| 2.1 Description et comparaison avec les tubes à vide | 3 |
| 2.1.1 Historique | 3 |
| 2.1.2 Généralités à propos des tubes à gaz | 3 |
| 2.1.3 Différences et similitudes avec les tubes à vide de type diode | 6 |
| 2.2 Etude du fonctionnement du tube à gaz NE2 d'un point de vue physique | 7 |
| 2.2.1 Etude expérimentale de la courbe courant-tension du tube à gaz NE2 | 7 |
| 2.2.2 Estimation de la pression du gaz dans le tube NE2 | 9 |
| 2.2.3 Trajectoires des électrons | 11 |
| 2.3 Etude du tube à gaz NE2 d'un point de vue électrique | 12 |
| 2.3.1 Modélisation du tube à gaz | 12 |
| 2.3.2 Utilisation du tube à gaz en oscillateur à relaxation | 13 |
| 3. Le générateur de signal AM | 15 |
| 3.1 Schéma du générateur de signal AM et photo | 15 |
| 3.2 Description et calcul de la partie alimentation | 16 |
| 3.3 Description de la partie « génération de signal AM » | 17 |
| 4. Conclusion | 19 |
| ANNEXE 1: Explications supplémentaires sur le fonctionnement par pulsations | 20 |
| Références | 25 |
| Révision B | 4 |

1. Introduction

Après l'article « Etude d'un récepteur à un seul tube diode » (cf. référence [1]), dont le but était l'étude d'un tube à vide de type diode, il restait à proposer un montage mettant en valeur un autre type de tube : le tube à remplissage gazeux ou « tube à gaz ». Ces tubes étaient très utilisés à l'époque où les tubes à vides régnaient, en particulier dans les alimentations stabilisées. En dehors de l'éclairage (« tubes néon »,...), ces tubes sont encore utilisés là où l'on souhaite voir un voyant alimenté par le secteur. Une application courante est le petit tube néon qui équipe certains tournevis destinés à savoir si l'on a touché un fil de phase.

A noter que la couleur du plasma dépend du gaz utilisé.

Actuellement, les seuls tubes à gaz encore largement distribués sont les tubes au néon NE2 et toute la famille, ainsi que les équivalents. L'article qui suit se basera donc sur le tube au néon NE2 qui est largement disponible et bon marché.

Par exemple CONRAD propose (à moins de 1/2 Euro) un tube NE2 sous la dénomination « Ampoule Néon standard orange 6x22 mm » et le code produit « 725744 - 62 ».

Ayant proposé précédemment un récepteur AM en ondes longues, un montage proposant un émetteur AM en ondes longues semblait être le sujet idéal. J'ai donc cherché dans la documentation disponible un principe « d'émetteur » AM utilisant ce type de tube et me suis arrêté au montage proposé dans le document en référence [2], en page 90. C'est donc ce schéma qui me servira de modèle.

Comme pour le précédent récepteur AM, le but n'est pas de proposer un montage directement réalisable (cela n'aurait que très peu d'intérêt). Il s'agit, ici, d'une expérimentation, le but étant d'étudier le fonctionnement d'un montage. Je m'appuierai sur la simulation d'un tube à gaz, développée par l'auteur (référence [3]).

Avant de décrire le générateur de signal AM (« émetteur » étant un terme trop fort pour ce montage) au §3, une description du fonctionnement des tubes à gaz est proposée au §2.

Les appareils utilisés par l'auteur dans cet article sont les suivants : voltmètre, ampèremètre, ohmmètre, inductancemètre, capacimètre, générateur BF/HF jusqu'à 2 MHz, fréquencemètre, alimentation en tension continue réglable (0 à 300 V), oscilloscope numérique 8 bits.

Notations

Dans la suite du texte :

- le produit simple est noté « * » ou « . » ou n'est pas noté s'il n'y a pas d'ambiguïté,
- les puissances de 10 sont notées E_x ou 10^x (par exemple 10^{-7} ou E-7),
- la puissance d'une variable est notée $^$ ou avec l'exposant (x^2 ou x^2 , par exemple),
- la racine carrée est noté \sqrt{x} plutôt que $x^{0,5}$ ou $x^{0,5}$
- « \approx » signifie « à peu près »

2.Fonctionnement d'un tube à gaz

2.1 Généralités et comparaison avec les tubes à vide

2.1.1 Historique

Les décharges électriques dans les gaz ont été étudiées dès le 18^{ème} siècle en utilisant des générateurs électrostatiques. L'invention des piles par Volta permit, au début du 19^{ème} siècle, de produire des décharges électriques continues qui furent étudiées par différents physiciens dont Davy, Faraday et un peu plus tard par Crookes. A la fin du 19^{ème} siècle, Paschen étudia les phénomènes de claquage conduisant aux arcs électriques. Au début du 20^{ème} siècle, Townsend expliqua les différents régimes des décharges à faible pression, en particulier, la décharge froide luminescente (alors que l'arc électrique est une décharge « thermique » à fort courant).

Par ailleurs, le gaz néon qui fut découvert en 1898, fit ensuite l'objet d'expérimentations de la part de Georges Claude qui inventa l'éclairage au néon en 1910.

Au 20^{ème} siècle, on étudia les décharges électriques en courant alternatif et à haute fréquence, les décharges à forte pression (à la pression atmosphérique voire plus) ainsi que les micro-décharges permises par le progrès de la miniaturisation.

Les lampes à décharges sont universellement utilisées pour l'éclairage. Différents gaz sont utilisés en fonction du type de lumière souhaité. Mais les décharges électriques sont aussi utilisées dans d'autres domaines comme le dépôt de matière en couche mince ou le dépoussiérage.

Les tubes à gaz furent aussi beaucoup utilisés pour l'électronique : en redressement (tubes « 83 ») ou en stabilisation (tubes « VR 75/30 », « VR 150-30 »...).

Reste aujourd'hui les tubes NE2 ou équivalents utilisés pour la signalisation ou la détection de tension secteur.

2.1.2 Généralités à propos des tubes à gaz

A la page suivante, on trouvera deux photos de tube à gaz néon NE2:

- le premier tube n'est pas alimenté : on remarque que les deux électrodes sont identiques,
- l'autre est en fonctionnement, avec le plasma bien visible autour de l'électrode faisant office de cathode.



Ce tube à gaz est un tube miniature rempli principalement de Néon, avec sans doute un soupçon d'Argon (pour déclencher la décharge à une tension de claquage plus basse). La composition exacte n'est pas spécifiée. La pression, qui n'est pas non plus spécifiée, est située sans doute entre 1 et 10 Torr (1 Torr=133 Pa ou 1,33 mBar). D'après mes simulations, elle serait plutôt située aux alentours de 2,6 Torr.

A l'intérieur du tube NE2, on trouve deux électrodes identiques de 6 mm de longueur et de 0,5 mm de diamètre. Les axes des électrodes sont séparés de 1 mm. Ces dimensions seront utilisées pour la simulation du tube.

Chacune de ces électrodes peut être soit la cathode (reliée au -), soit l'anode (reliée au +). Un courant électronique peut passer de la cathode à l'anode dans le cadre d'une décharge électrique.

Principe général de fonctionnement (voir le schéma plus loin)

Initialement, des électrons sont émis par la cathode non chauffée (dite « froide ») et attirés par l'anode. En effet, dès que l'anode devient positive, elle génère un champ électrique entre cathode et anode qui met en vitesse, vers l'anode, les électrons par attraction coulombienne (le «+ » attirant le «- »).

Nota : des électrons sont produits spontanément dans le gaz par le rayonnement cosmique et la radioactivité naturelle. Cependant, la principale source d'électrons est liée aux photons de la lumière qui peuvent arracher des électrons de la cathode (que l'on appelle alors « photoélectrons ») . A cette fin, celle-ci est recouvert d'une couche d'oxyde de baryum ou de strontium, métaux pour lesquels le travail de sortie n'est pas trop élevé. Pour cette raison, la durée d'établissement de la décharge est plus longue dans l'obscurité complète (voir la référence [4] pour plus de détails).

Si la pression de gaz est suffisamment faible (pas mais trop faible) et la tension sur l'anode supérieure à la tension dite de « claquage » (ou « de disruption » ou « d'amorçage »), les collisions entre les électrons mis en vitesse et les atomes de néon créent des paires ions/électrons. Ces nouveaux électrons créent, à leur tour, d'autres paires, et ceci de façon exponentielle. Il s'agit alors d'une décharge de type « avalanche ». Les ions (+) attirés par la cathode (-), quant à eux, bombardent la cathode et créent pour une fraction d'entre eux, des électrons secondaires qui agissent comme les autres électrons.

Une fois la décharge déclenchée, elle n'est limitée que par le courant maximum délivrée par l'alimentation à travers une résistance (nommée « R » sur la figure en page suivante). La décharge est dite « auto-entretenu » car même si on arrêterait la source d'électrons (les photoélectrons principalement) la décharge ne s'arrêterait pas. La tension aux bornes du tube à gaz se stabilise à la tension dite de « maintien ». Pour arrêter la décharge, il faut baisser la tension d'alimentation au-dessous de la tension dite « d'extinction ».

Pour un tube NE2, les tensions d'alimentation (continues) classiques permettant le claquage puis l'extinction sont respectivement de 70 V et 60 V environ, tandis qu'aux conditions normales de fonctionnement (0,5 mA), la tension de maintien aux bornes du tube à gaz NE2 est d'environ 55 V.

A noter que les tensions de claquage et l'extinction dépendent de la résistance R . Par exemple, expérimentalement, j'ai mesuré (en continu) sur un des tubes de mon stock (mais pas celui utilisé pour le montage):

- avec $R=1$ Mohm, $V_{\text{claquage}}=70,7$ V et $V_{\text{extinction}}=67,2$ V,
- avec $R=0,47$ Mohm, $V_{\text{claquage}}=69,5$ V et $V_{\text{extinction}}=62,3$ V,
- avec $R=0,22$ Mohm, $V_{\text{claquage}}=69,3$ V et $V_{\text{extinction}}=59,2$ V,
- avec $R=0,1$ Mohm, $V_{\text{claquage}}=69,2$ V et $V_{\text{extinction}}=57,5$ V.

Cette variation des deux tensions est due à l'évolution particulière de la tension de maintien du tube NE2 en fonction du courant (cf. §2.2.1).

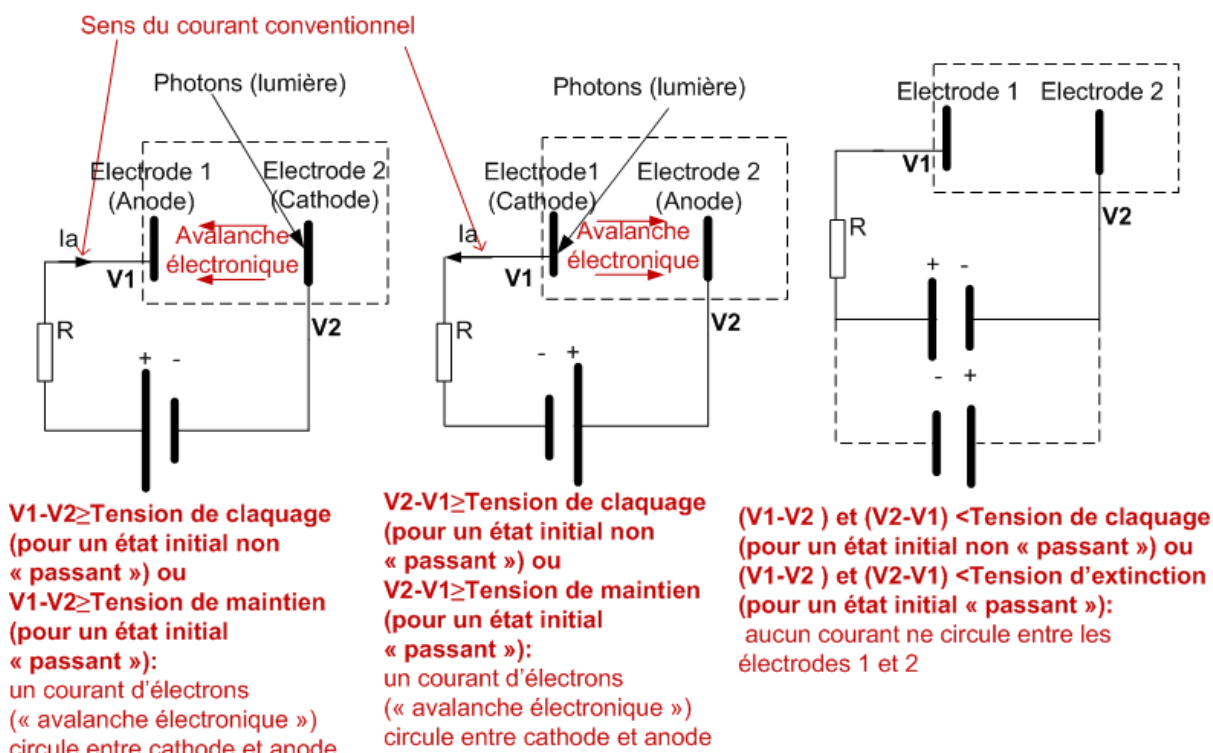
En alternatif, les tensions de claquage et d'extinction dépendent de R mais aussi de la fréquence (voir la référence [4] pour plus de détails).

Dans tous les cas, il y a une certaine dispersion des tensions de claquage et d'extinction d'un tube à l'autre et d'une décharge à la suivante.

Ces tubes à gaz sont utilisables, en décharge, soit en courant continu soit en courant alternatif jusqu'à 10 KHz environ.

Le principe de fonctionnement du tube à gaz est illustré à la figure suivante. Comme dit précédemment, la résistance R est obligatoire et permet de limiter le courant dans le tube à gaz. Le calcul de R se fait suivant la formule :
 $R \text{ (Ohm)} = (\text{Tension d'alimentation (V)} - \text{Tension de maintien (V)}) / \text{Courant I (A)}$
 A noter que la tension de maintien dépend du courant.

Le fonctionnement du tube à gaz



On trouvera les caractéristiques du tube à gaz NE2 en référence [4].

2.1.3 Différences et similitudes avec les tubes à vide de type diode

Dans un tube à vide, la cathode est chauffée entre 900 et 1000°C par un filament en tungstène, alors que dans un tube à gaz la cathode n'est pas chauffée, donc le tube à gaz est utilisable immédiatement.

Dans un tube à gaz les électrodes sont symétriques et donc interchangeables, ce qui n'est pas le cas des tubes à vide.

Dans un cas comme dans l'autre, il y a un courant d'électrons, ce phénomène étant obtenu :

- par la forte émission électronique de la cathode chauffée à 950 °C, pour le tube à vide,
- et par l'avalanche électronique dans la décharge, pour le tube à gaz.

Si dans les 2 cas, l'écoulement de ce courant électronique ne peut se faire que dans un sens (l'aspect « diode » étant commun aux deux), la diode à vide peut redresser des tensions et des courants très faibles à des fréquences très hautes, ce qui n'est pas le cas des tubes à gaz. On ne pourrait donc pas remplacer un tube à vide par un tube à gaz dans une application de redressement HF.

2.2 Etude du fonctionnement du tube à gaz NE2 d'un point de vue physique

En préliminaire, pour plus de détails sur les décharges électriques, on se reportera aux documents en références [5] à [7]. Pour plus de détails sur les tubes à gaz de la famille NE2 on se reportera aux documents en références [2] et [4].

2.2.1 Etude expérimentale de la courbe courant-tension du tube à gaz NE2

La caractéristique électrique d'une décharge est décrite par une courbe courant-tension continue (prise aux bornes du tube à gaz). L'étendue prise en compte dans les documents sur le sujet part d'un courant minimum de 10^{-20} A jusqu'à un courant maximum de 100 A, voire plus.

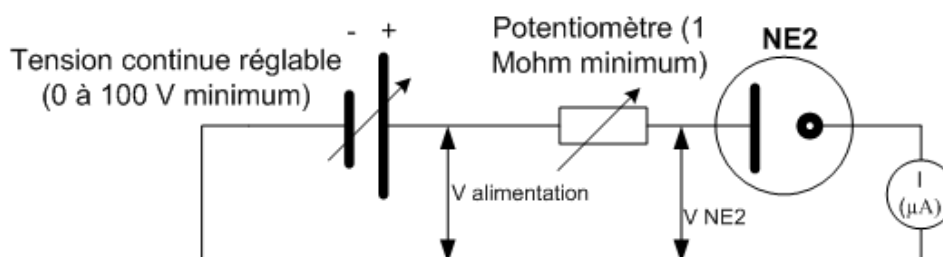
Hormis dans les phases instables, à un courant donné traversant le tube à gaz correspond une seule tension.

Cette courbe courant-tension fait apparaître 3 domaines :

- la « décharge sombre » entre 10^{-20} A et 10^{-6} A. Dans le cadre du fonctionnement du tube NE2, elle ne nous intéresse pas. De toute façon, on ne peut mesurer des courants aussi faibles avec des appareils d'amateur.
- la « décharge luminescente » entre 10^{-6} A et 1 A. C'est elle qui nous intéresse, mais on ne peut pas dépasser 2 mA avec le tube NE2.
- la « décharge d'arc » à partir de 1 A, pour information car ceci ne concerne pas le tube NE2.

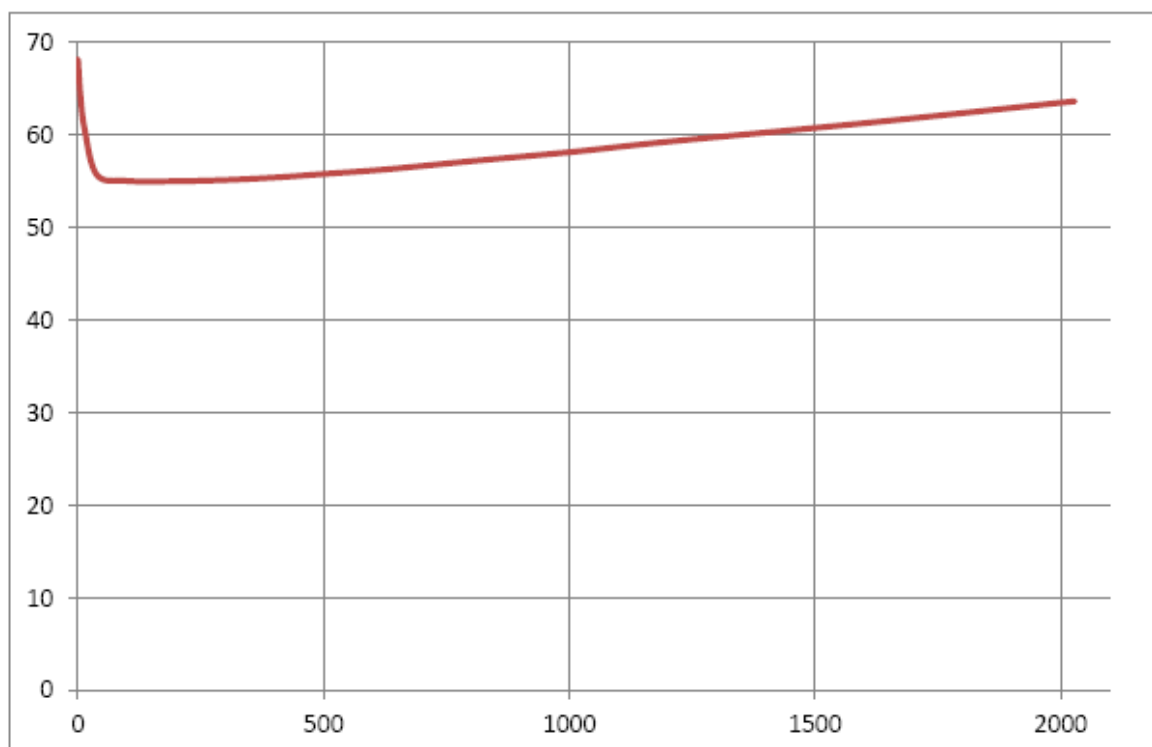
Donc avec une alimentation en tension continue réglable et un potentiomètre, on peut établir un grand nombre de couples tension/courant. C'est ce qui a été fait avec le banc de test suivant.

Le banc de test pour déterminer la courbe courant-tension



Sur la figure suivante, on trouvera les résultats mis sous forme d'une courbe donnant le courant en fonction de la tension aux bornes du tube NE2 (« tension de maintien »), lorsque la décharge est établie.

| Tension d'alimentation (V) | Courant à travers le tube NE2 (microA) | Tension aux bornes du tube NE2 (V) |
|----------------------------|--|------------------------------------|
| 68.2 | 0 | 68.2 |
| 100 | 5 | 64.3 |
| 100 | 13.4 | 60.7 |
| 100 | 38.6 | 55.7 |
| 100 | 100 | 55.04 |
| 100 | 200 | 55.01 |
| 100 | 304 | 55.15 |
| 100 | 406 | 55.43 |
| 100 | 500 | 55.79 |
| 100 | 609 | 56.21 |
| 100 | 697 | 56.64 |
| 100 | 809 | 57.22 |
| 100 | 1008 | 58.19 |
| 100 | 1204 | 59.3 |
| 100 | 1607 | 61.32 |
| 100 | 2029 | 63.66 |



Courant traversant le tube NE2 (abscisse) en fonction de la tension aux bornes du tube NE2 (ordonnée)

On voit que la tension de claquage est de 68,2 V et qu'à 500 microA (soit l'intensité nominale), la tension de maintien est de 55,79 V.

On note que, d'après la courbe :

- de 0 à 60 microA la tension baisse quand l'intensité augmente. C'est le régime dit « subnormal »,
- entre 60 et 300 microA, la courbe est relativement plane. C'est le régime dit « normal »,
- au-delà de 300 microA, c'est le régime dit « anormal » (tension croissante). Le point nominal de fonctionnement (0,5 mA) se place donc au début du régime « anormal ».

2.2.2 Estimation de la pression du gaz dans le tube NE2

La tension de claquage dépend de la pression du gaz et de la distance inter-électrodes (supposées planes et parallèles), suivant la loi de Paschen. Il serait intéressant (pour information) de savoir quelle est la pression du gaz dans le tube NE2 ainsi que sa nature en fonction de la tension de claquage observée.

Mais la courbe de Paschen classique n'est pas vraiment d'application ici car on ignore la nature exacte du gaz et les électrodes du tube NE2 ne sont pas planes. On peut cependant avoir une idée de l'évolution de la tension de claquage en fonction de la pression, en utilisant la simulation de ce tube NE2 (faite avec le programme en référence [3]).

Pour se faire, on supposera une des deux hypothèses sur la nature du gaz:

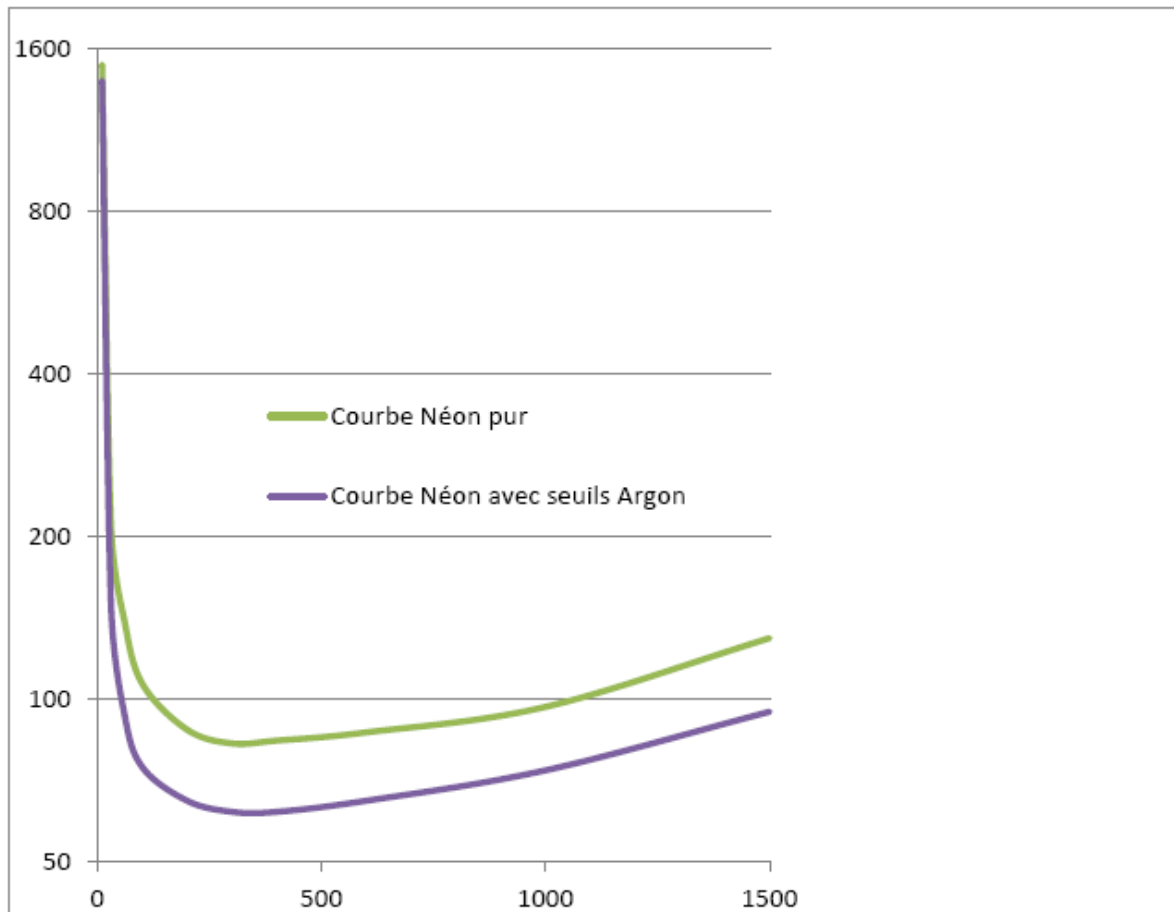
- l'une que le tube NE2 est rempli de gaz néon pur (« Ne »),
- l'autre que le gaz néon contient un peu d'argon (« Ne* »), que l'on traduit, faute de plus d'information, en remplaçant les seuils d'excitation et d'ionisation du néon par ceux de l'argon (qui sont plus bas, l'ionisation étant donc plus facile).

In fine, on trouvera les 2 pseudo-courbes de Paschen à la page suivante.

Sous réserve que l'erreur liée à la modélisation ne soit pas trop grande, on peut en tirer les conclusions suivantes :

- vu que l'on a constaté expérimentalement que la tension de claquage est de 68 V, et qu'avec du néon pur seul, la tension de claquage minimum (de simulation) est de 83 V, mais de 62 V en utilisant les seuils de l'Argon, il y a vraisemblablement un peu d'Argon dans le Néon,
- les minimums de tension de claquage sont obtenus aux environs de 350 Pa (2,6 Torr). Logiquement le constructeur du tube NE2 a dû viser également cette pression.

| Pression du gaz dans le tube NE2 (Pa) | Tension de claquage pour du gaz Néon pur (V) | Tension de claquage pour du gaz Néon avec seuils Argon (V) |
|---|---|---|
| 10 | 1500 | 1400 |
| 30 | 210 | 150 |
| 60 | 140 | 94 |
| 100 | 107 | 75 |
| 200 | 88 | 65 |
| 300 | 83 | 62 |
| 400 | 84 | 62 |
| 600 | 87 | 65 |
| 1000 | 97 | 74 |
| 1500 | 130 | 95 |



Pseudo-courbes de Pashen obtenues par simulation d'un tube NE2
Tension de claquage (en ordonnée) en fonction de la pression (en abscisse)

2.2.3 Trajectoires des électrons

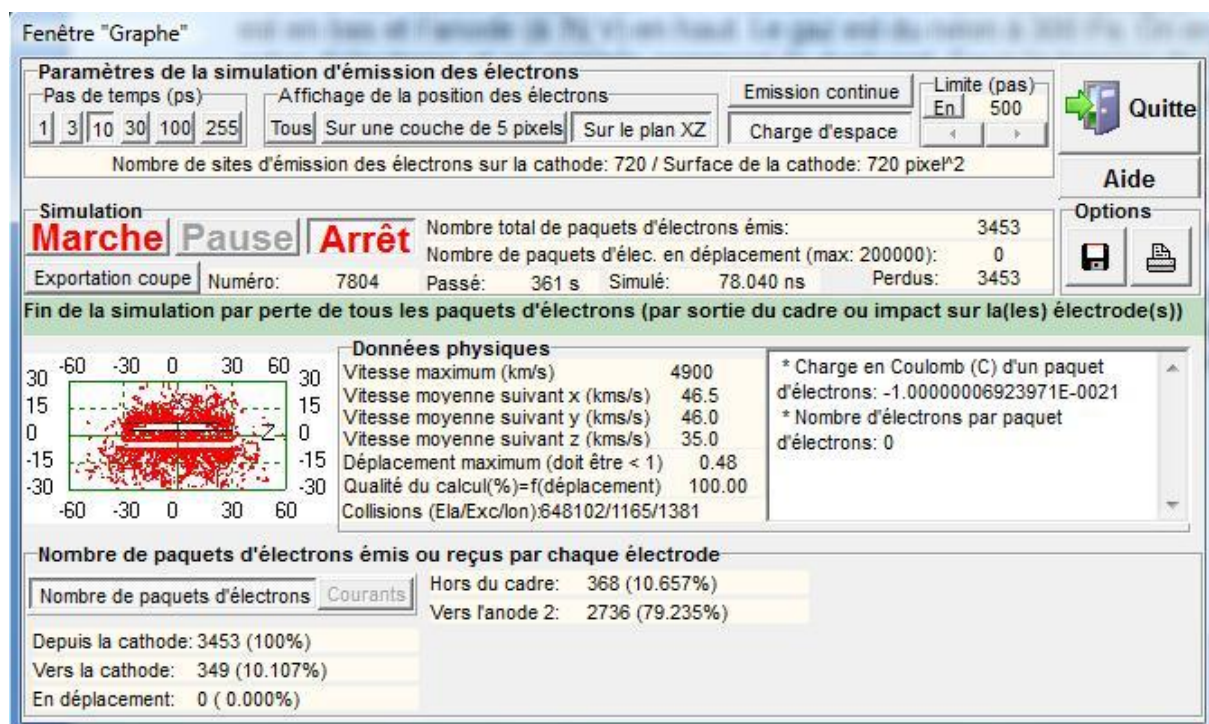
On ne peut tracer chaque trajectoire car il y en a des dizaines (voire des centaines) de milliers. On peut, par contre, avoir une idée de l'ensemble des trajectoires sur une coupe dans le plan longitudinale.

Dans le cas étudié (tension de 70 V, inférieure à la tension de claquage), la cathode est en bas et l'anode (à 70 V) en haut, sur la copie d'écran ci-dessous. Le gaz est du néon à 300 Pa. On envoie une salve d'électrons et on regarde comment ils évoluent. Sous la tension de claquage, la salve n'est pas auto-entretenu et les électrons finissent par tous être absorbés.

On remarque que 79% des électrons vont vers l'anode, 10% retourne à la cathode et 11% s'échappent vers le verre du tube. La très grande majorité des collisions sont élastiques. Les vitesses moyennes des électrons sont relativement faibles (quelques dizaines de km/s).

Pour la copie d'écran ci-dessous, on a supposé la densité minimum de courant (photoélectrons) de $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$, pour une température de cathode de $5500\text{ }^\circ\text{C}$ (correspondant à la « température » de la lumière naturelle). La tension d'anode est fixée à 70 V, celle de la cathode est à 0V. La cathode et l'anode sont agrandies 10 fois.

Nota : on considère que très localement, là où le photon « tombe », la cathode passe à la « température » correspondant à l'énergie du photon. Il ne s'agit pas d'une température de cathode généralisée mais d'une température équivalente vis-à-vis des points percutés par les photons.



2.3 Etude du tube à gaz NE2 d'un point de vue électrique

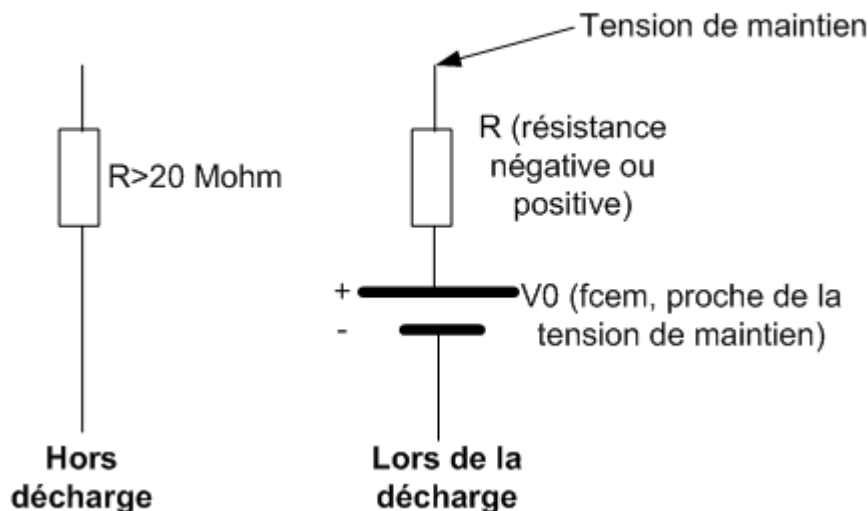
2.3.1 Modélisation du tube à gaz

Avant d'aller plus loin, il faut préciser le comportement d'un tube à gaz en décharge électrique et hors décharge électrique :

- en dehors de toute décharge électrique, le tube NE2 présente entre ses bornes une résistance très grande et supérieure à la résistance mesurable par un ohmmètre, à savoir 20 Mohm,
- lors de la décharge électrique, le tube à gaz NE2 se comporte comme une résistance (R) suivie d'une force contre-électromotrice (« fcem ») V_0 . Dans notre cas, au courant nominal (0,5 mA), on peut facilement déterminer que la résistance est d'environ 3750 Ohms et la f.c.é.m. V_0 de 54 V.
Donc la tension de maintien V_{NE2} , autour du point nominal, est égale à :
 $V_{NE2} (V) = 54 + 3750 \times I (A)$,
- les caractéristiques R et fcem varient en fonction du courant, la résistance R étant, par exemple, négative dans la partie descendante de la courbe « Tension de maintien en fonction du courant » (cf. §2.2.1) puis stable, puis positive.

En résumé, hors décharge le tube à gaz est isolant et lors de la décharge il est conducteur.

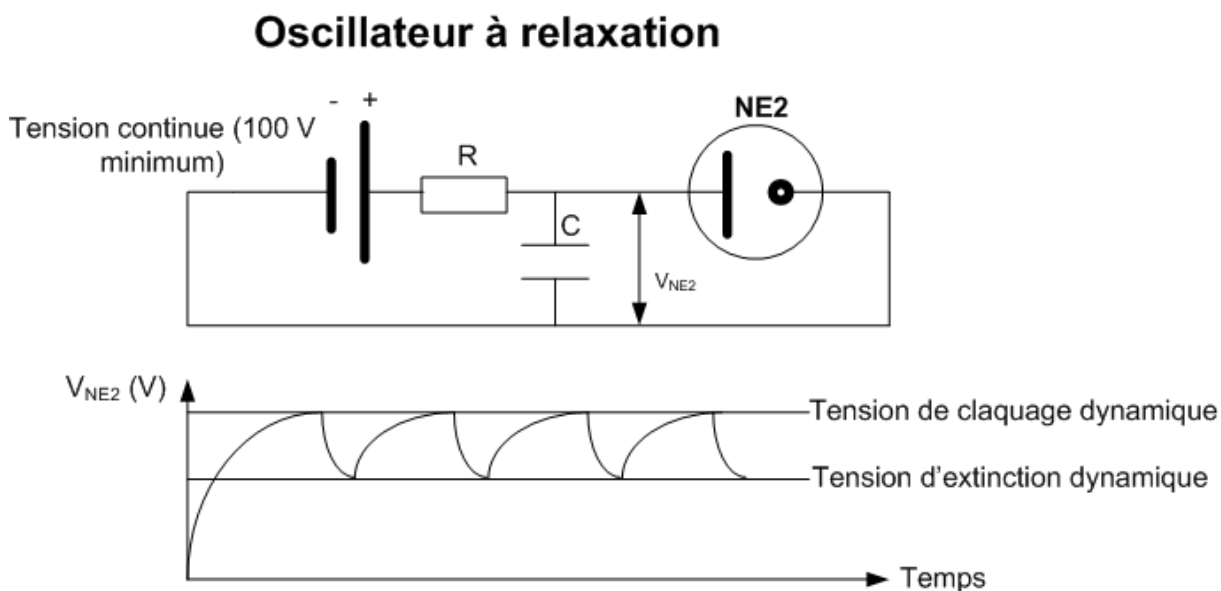
Modèle électrique simple d'un tube à gaz



Pour plus de détails sur des modèles de décharge plus complets, voir les références [4] (page 7) et [7].

2.3.2 Utilisation du tube à gaz en oscillateur à relaxation

Grâce à la différence de tension entre tension de claquage et tension d'extinction, on peut provoquer une oscillation (décharge / arrêt de la décharge) entre ces 2 tensions, suivant le schéma suivant (pour plus de détails, voir la référence [2], à partir de la page 37).



Le fonctionnement est simple. Partant d'une tension nulle partout dans le circuit (tube à gaz bloqué), on applique la tension continue d'alimentation (supérieure à la tension de claquage) au montage.

Le condensateur C va se charger à travers la résistance R. La tension V_{NE2} aux bornes du condensateur C va donc augmenter jusqu'à la tension de claquage. A ce moment le tube à gaz, qui est devenu conducteur, va rapidement décharger le condensateur C jusqu'à la tension d'extinction, à partir de laquelle le tube redevient isolant. Du coup, le condensateur C ne se décharge plus mais se recharge à travers R jusqu'à la tension de claquage et ainsi de suite.

La référence [4] propose en page 16, la formule suivante pour le calcul de la fréquence d'oscillation f :

$$f(\text{Hz}) = 1/(RC \ln((U_{\text{alim}} - \text{tension d'extinction en dynamique}) / (U_{\text{alim}} - \text{tension de claquage en dynamique})))$$

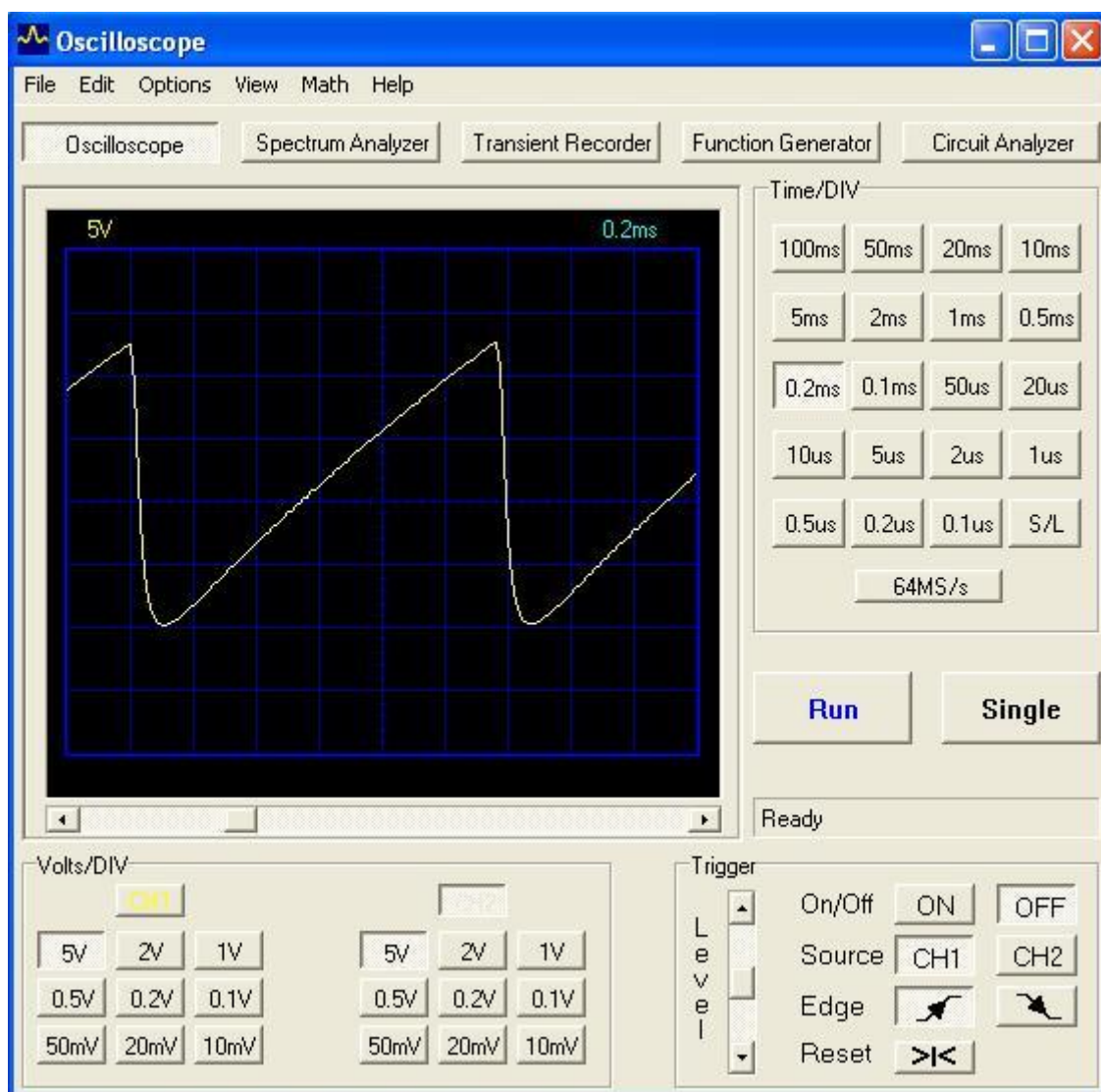
Avec « U_{alim} » pour la tension d'alimentation et « \ln » pour le logarithme népérien.

Les valeurs en dynamique des tensions de claquage et d'extinction (qui dépendent de la fréquence) sont données par la référence [4], à l'aide de courbes en fonction de la fréquence. On peut prendre, par défaut, les valeurs respectives suivantes : 76 V et 52 V.

Cette formule est approximative. Il faut expérimenter pour trouver la valeur de fréquence d'oscillation souhaitée.

Par exemple, pour $U_{\text{alim}}=299$ V, $R=2,2$ Mo et $C=4,7$ nF, on trouve d'après la formule (avec les valeurs par défaut): $f=946$ Hz et dans la pratique plutôt autour de 800 Hz.

Ci-dessous on trouvera une copie d'écran du signal périodique (tension V_{NE2} aux bornes du condensateur C) fourni par le montage avec des valeurs proches de celles données dans l'exemple précédent.



3. Le générateur de signal AM

3.1 Schéma du générateur de signal AM et photo

Le schéma de principe de ce générateur AM est donné ci-dessous. Il est inspiré du montage proposé dans le document en référence [2] en page 90.

Nota : à des fins de démonstration éventuelle (on ne peut pas vraiment l'envisager autrement, la puissance délivrée étant très faible) ou pour être sûr d'identifier le signal émis, il peut, éventuellement, être ajouté un manipulateur Morse pour moduler en CW la transmission AM.

Le signal AM pourra être reçu sur un poste radio standard en AM (bande GO) entre 130 et 200 KHz (la largeur de bande dépendant du condensateur variable). Le récepteur AM devra être très proche du montage (moins de 30 cm)

A noter que le but initial de l'auteur (William G. Miller) était que le montage serve de générateur 455 KHz, à des fins d'alignement de récepteur, sans contact.

Schéma du générateur AM

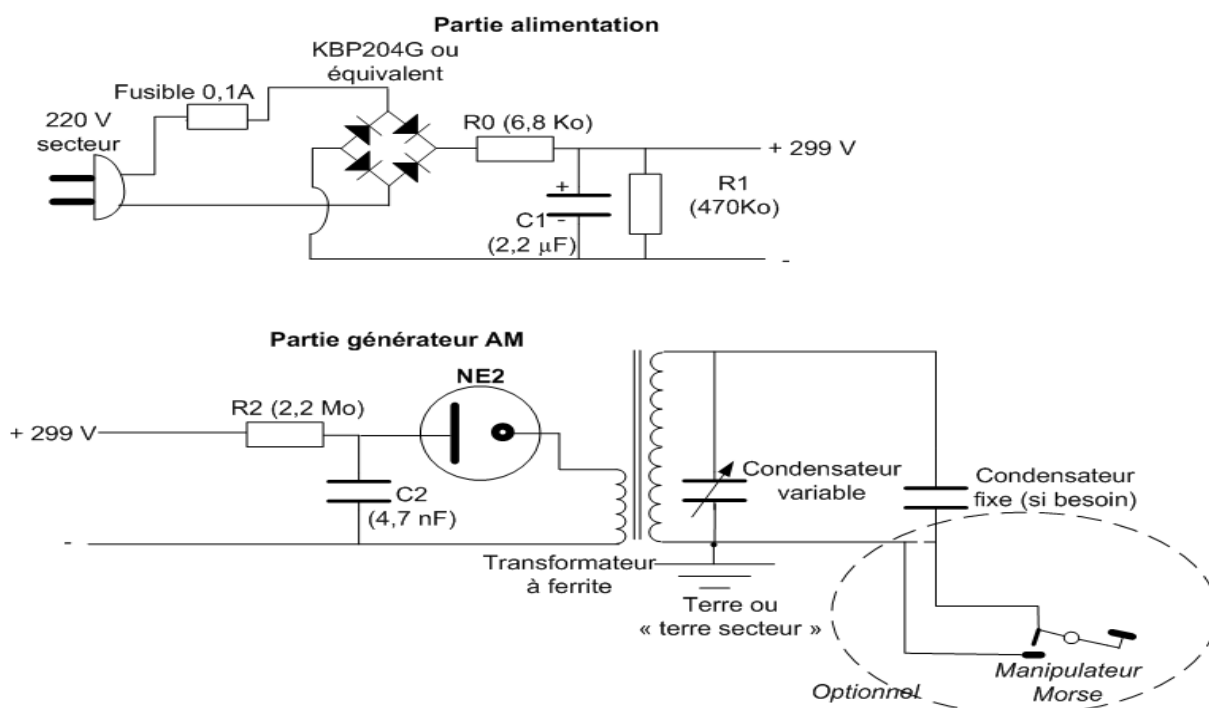
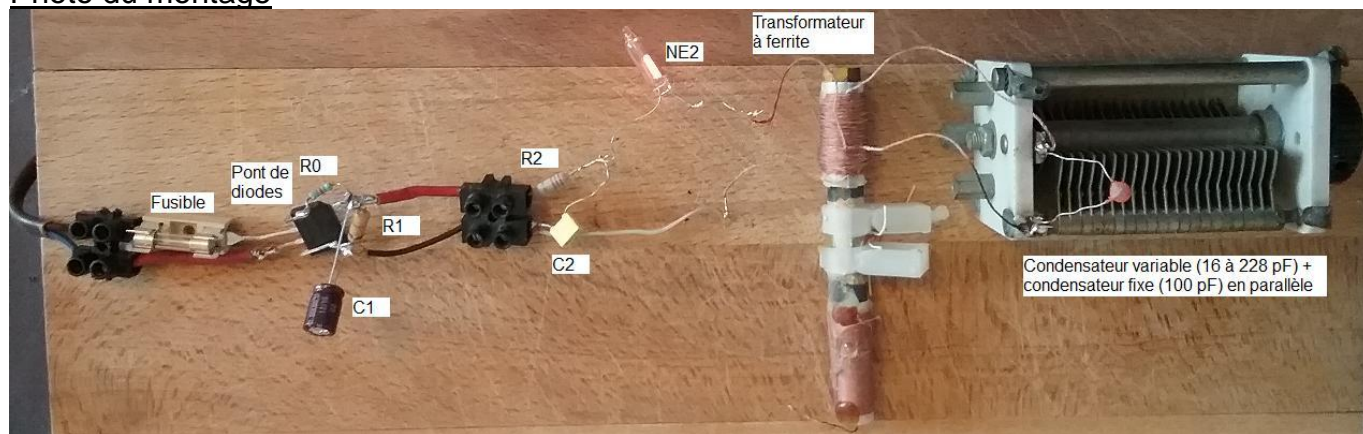


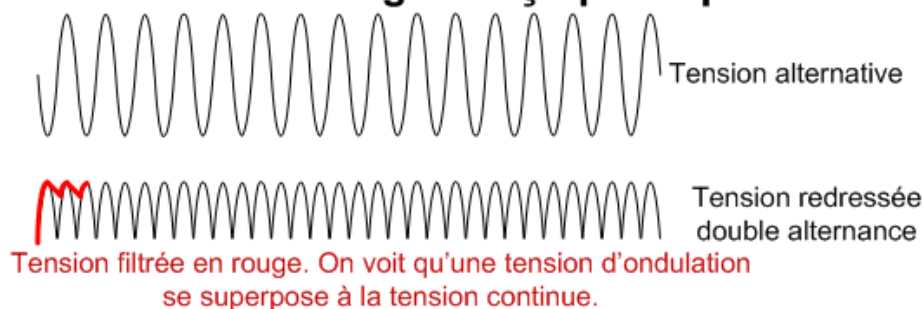
Photo du montage



3.2 Description et calcul de la partie alimentation

Le fusible limite le courant à 0,1 A et fondra en cas de court-circuit du pont de diodes. Ce dernier transforme le courant alternatif en courant redressé double alternance qui est filtré par le condensateur C1.

Redressement du signal reçu par le pont de diodes et filtrage



La tension continue à vide U_c est très proche de la tension de crête de la tension alternative ($U_{\text{efficace}}=230 \text{ V}$) soit $U_c=230\text{V} * \sqrt{2} = 325 \text{ V}$. En première hypothèse, on prend cette valeur. La valeur réelle en charge sera inférieure (on trouvera 299 V).

Le courant I_{NE2} maximum en mA passant à travers le tube à gaz NE2 est de l'ordre de $1000*(U_c-U_{\text{maintien}})/R_2$ soit $I_{\text{NE2}}=1000*(325-55)/2,2\text{E}6=0,12 \text{ mA}$. Le courant I_{NE2} minimum est quasiment nul. Le courant moyen est donc de 0,06 mA.

Par ailleurs, il faut mettre une résistance (R_1) en parallèle de C_1 pour le décharger à l'arrêt. On choisit, a priori, 470 Ko qui fait passer un courant permanent de $325/470=0,69 \text{ mA}$. Au total, le courant maximum absorbé est donc de $I_{\text{max}}=0,69+0,15=0,81 \text{ mA}$ et le courant moyen absorbé de 0,75 mA.

Pour calculer C_1 , la formule traditionnelle pour du 50 Hz est : $C = I_{\text{abs}}/(\eta \cdot U_c)$ avec η le facteur d'ondulation en % (rapport entre la tension d'ondulation crête à crête et la tension continue). On choisit $\eta=1\%$ qui assurera une tension d'ondulation inférieure à 3 V, valeur suffisamment faible vis-à-vis de l'écart entre les tensions de claquage et d'extinction (22 V environ).

On trouve donc $C_1=0,81\text{E}-3/(1*325)=2,5\text{E}-6 \text{ F}$ soit un condensateur de 2,2 μF supportant 400 V.

La capacité C_1 une fois chargée se déchargera dans R_1 , à l'arrêt, en moins de $t=5*R_1*C_1=5,17$ secondes ce qui est acceptable.

La puissance dissipée par R_1 est de $325*0,75\text{E}-3$ ($P=UI$) soit 0,24 W, ce qui n'impose pas de requis sur la résistance.

La résistance R_0 évite que le condensateur, lors de sa charge initiale, ne fasse fondre le fusible qui est calibré à $I_{\text{fusible}}=0,1 \text{ A}$.

On choisit R_0 de façon que le courant maximum de charge de C_1 ne dépasse pas la moitié du calibre du fusible soit $R_0=U_c/(I_{\text{fusible}}/2)$ soit 6500 Ohms, 6800 Ohms dans la pratique. La chute de tension dans R_0 sera de $6800*0,75\text{E}-3=5,1 \text{ V}$ et la puissance dissipée de $5,1*0,75\text{E}-3=3,8\text{E}-3 \text{ W}$, ce qui est négligeable.

Nota : la tension alternative efficace mesurée est de 237 V et la tension continue mesurée est de 299 V.

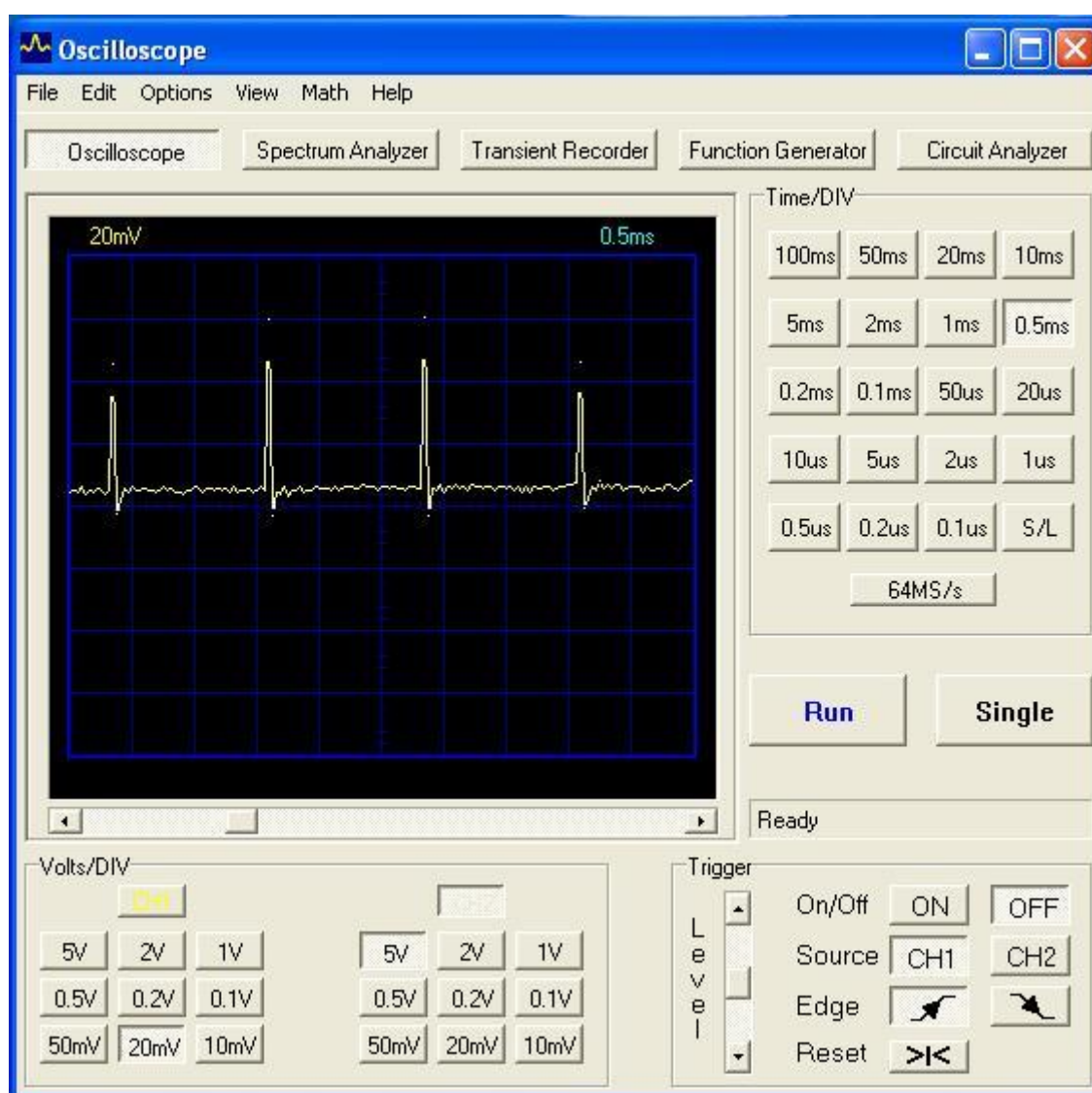
3.3 Description de la partie « génération de signal AM »

Comme indiqué au §2.3.2, avec $R_2=2,2 \text{ Mo}$ et $C_2=4,7 \text{ nF}$, on obtient une fréquence d'oscillation de 800 Hz.

Donc 800 fois par seconde le tube NE2 sera alternativement passant et bloqué.

Sur la copie d'écran suivante, on voit la forme de la tension aux bornes de l'inductance primaire du transformateur à ferrite.

Les pulsations correspondent aux instants où le tube NE2 est conducteur par décharge électrique. On retrouve la période de 1,25 ms correspondant à la fréquence BF de 800 Hz. La hauteur de ces pulsations est indépendante des fréquences HF et BF.



Ce courant pulsé excite le circuit accordé du côté secondaire du transformateur et provoque un train d'ondes amorties à la fréquence de résonance du secondaire.

La décroissance (exponentielle) de la tension produit une onde modulée en amplitude à la fréquence des pulsations et donc à la fréquence de l'oscillateur à

relaxation R2/C2/NE2 (cf. §2.3.2). C'est pourquoi sur un récepteur AM on entend un son à cette fréquence. Le signal produit est périodique mais pas sinusoïdal et donc pas très agréable.

Le transformateur est un bâtonnet ferrite « Grandes ondes/Petites ondes » récupéré sur un ancien poste radio à transistors. On utilise les bobinages de la partie « Grandes ondes ». Le primaire fait 183 μH et le secondaire fait 4,33 mH. Le rapport de transformation (non mesuré) doit être d'un peu moins de 5.

Nota : j'ai testé le fonctionnement avec les bobinages « Petites ondes » (primaire de 120 μH et secondaire de 397 μH). Le résultat est moins bon (signal plus faible), mais ces bobinages sont bien adaptés à un éventuel générateur de signal AM en « Petites ondes ».

Le secondaire forme avec le condensateur variable et, si besoin, le condensateur fixe, un circuit accordé dont la fréquence f est celle donnée par la formule de Thomson: $f=1/(2.\text{Pi}.\sqrt{L.C})$ (avec L l'inductance, C la capacité et f la fréquence de résonance).

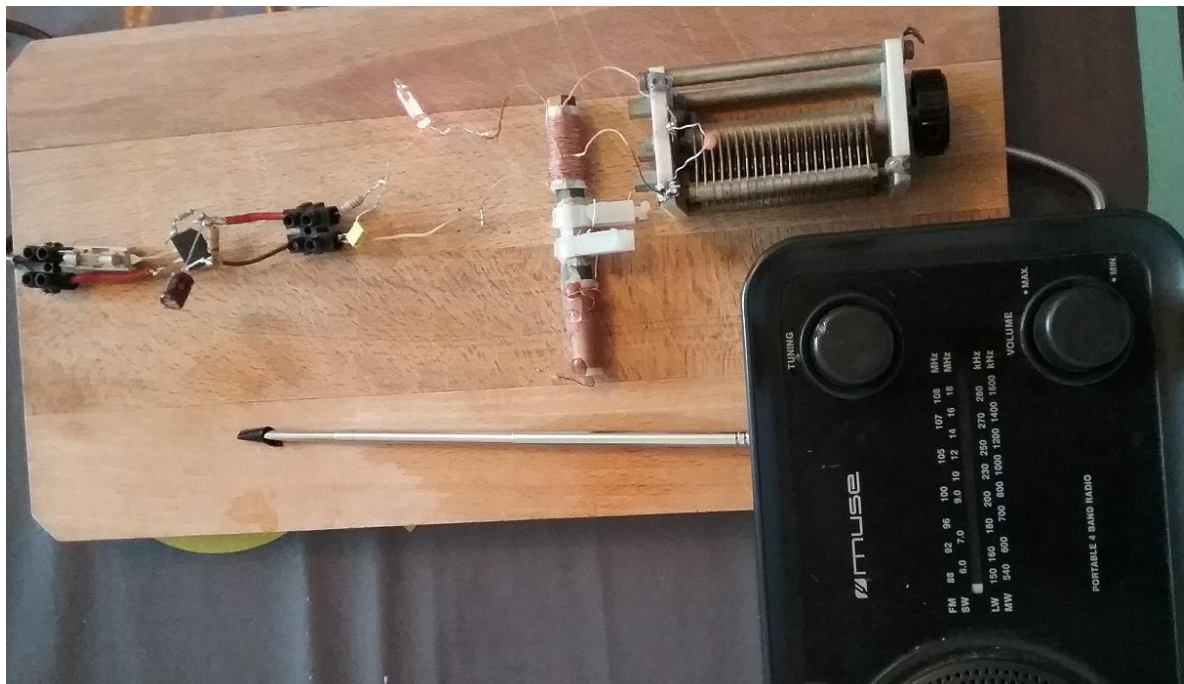
En fonction de la fréquence visée, on pourra, éventuellement, ajouter au condensateur variable, un condensateur fixe. Par exemple, j'utilise un CV permettant une variation entre 16 et 228 pF. J'ai rajouté un condensateur de 100 pF en parallèle pour avoir entre 116 à 328 pF. J'aurais tout aussi bien pu utiliser un CV variable plus standard entre 22 et 492 pF, qui aurait donné une plus grande largeur de bande.

Nota à propos du sens de montage du transformateur HF

On peut se demander s'il vaut mieux avoir un transformateur élévateur ou abaisseur, dans le cadre d'une transmission à très courte distance (moins de 30 cm). En effet, on peut soit transmettre par le champ électrique soit par le champ magnétique, les décroissances de la puissance transmise avec la distance d étant identiques et très rapides (en $1/d^4$).

- si le rapport de transformation m est >1 , U_s sera plus grand que U_p ($U_s \approx U_p.m$). Si m est donc U_s sont très grands, le champ électrique, qui est proportionnel à U_s , sera relativement fort.
- si le rapport de transformation m est <1 , I_s sera plus grand que I_p ($I_s \approx I_p/m$). Si m est faible, I_s sera donc élevé et le champ magnétique, qui dépend de I_s , sera relativement fort.

J'ai testé les 2 possibilités avec un récepteur à transistors standard (voir photo ci-après). La première solution (transformateur élévateur) est la meilleure.



N'étant qu'un générateur de signal et non un émetteur il n'est pas prévu de rajouter une antenne. Il suffira que le récepteur soit placé à proximité du circuit accordé (à moins de 30 cm, comme sur la photo).

On trouvera en Annexe 1 quelques explications supplémentaires sur le fonctionnement par pulsations.

4. Conclusion

A des fins didactiques, ce générateur simple nous a donné prétexte à la description des tubes à gaz et à une utilisation en oscillateur. Peut-être ce montage vous donnera-t-il d'autres idées.

En tout cas, si vous avez des améliorations, des corrections ou des précisions à apporter, proposez-les à la revue.

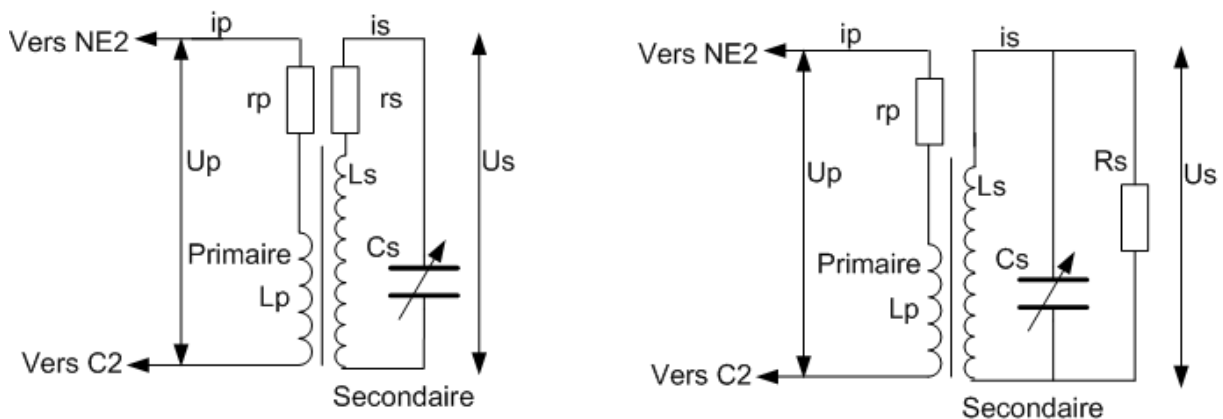
ANNEXE 1

Explications supplémentaires sur le fonctionnement par pulsations

On trouvera ci-après le schéma électrique du transformateur HF (primaire non accordé et secondaire accordé). Concernant le secondaire, on peut transformer la résistance série r_s en résistance parallèle R_s (tel que $R_s \approx r_s \cdot Q^2$ avec Q le facteur de qualité). Les 2 schémas sont équivalents (en fait pas rigoureusement, mais suffisamment pour notre besoin).

Par ailleurs à la résonance, le circuit bouchon formé par L_s et C_s a une impédance qui tend vers l'infini et n'a donc plus d'influence. Il ne reste donc à la résonance que R_s .

Schéma électrique du transformateur HF



Schémas équivalents (si Q grand), avec $R_s = r_s \cdot Q^2$

Le circuit accordé ($R_s/L_s/C_s$) est excité par les pulsations de courant du primaire i_p . Cette variation de i_p est la cause, après chaque pulsation, d'un train d'oscillations amorties.

En effet, la variation du courant primaire i_p durant les pulsations est comme on l'a vu, sur la copie d'écran du §3.3, très rapide. Il s'ensuit que cette pulsation va générer au niveau du secondaire, à travers l'inductance mutuelle M entre primaire et secondaire, une tension induite E_s , de grande largeur de spectre.

Pour la durée de la pulsation, en discrétisant le courant en fonction du spectre de fréquences, on peut écrire, pour la fréquence f_i :

$E_{s_{f_i}} = j \cdot M \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot I_{p_{f_i}}$ avec $j \cdot M \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_i$ la réactance de M et $I_{p_{f_i}}$ le courant du primaire à la fréquence f_i . La tension $E_{s_{f_i}}$ induite par chaque élément de courant $I_{p_{f_i}}$ va alimenter l'impédance $Z_{s_{f_i}}$ du circuit secondaire ($L_s//C_s//R_s$). Pour chaque élément de courant à une fréquence f_i , on peut écrire : $Z_{s_{f_i}} \cdot I_{s_{f_i}} + j \cdot M \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot I_{p_{f_i}} = 0$, « 0 » car le circuit est fermé sur lui-même.

Cette équation n'a de sens que durant le bref instant de la pulsation. Après la pulsation, le circuit secondaire est laissé à lui-même car il n'y a plus de courant induit ($i_p=0$). A partir de l'énergie stockée dans la self et la capacité $W_{s_{f_i}}$, le circuit accordé va évoluer de façon autonome. Plus l'impédance $Z_{s_{f_i}}$ sera faible et plus l'énergie $W_{s_{f_i}}$ va être évacuée rapidement.

En effet, de façon générale et simplifiée, on a $W=P.\Delta t$, avec P la puissance évacuée par R et Δt la durée pour évacuer l'énergie W. Or $P=U^2/R$. D'où $W=(U^2.\Delta t)/R$ donc $\Delta t=(W.R)/U^2$. Plus la résistance R est faible et plus Δt est faible. A la limite pour R très faible, il y a un « court-circuit ».

Partant de là, en supposant que la fréquence de résonance du secondaire soit « f_s », il s'ensuit que hors résonance ($f_i > f_s$), la tension $E_{s_{f_i}}$ va être « court-circuitée » par la faible réactance de $Z_{s_{f_i}}$ ($r_{s_{f_i}}+L_{s_{f_i}}/C_{s_{f_i}}$) dès la disparition de I_p . Par contre, à la résonance ($f_i=f_s$), le circuit bouchon formé par ($C_{s_{f_s}}/L_{s_{f_s}}$) ayant une impédance infinie, il ne restera plus que R_s qui sera très grand.

En effet, on sait que $R_s \approx r_s \cdot Q^2$ avec $Q=L_s.w/r_s$ donc $R_s=(L_s.w)^2/r_s$.

Plus r_s est faible et plus R_s est élevé.

A la résonance, il n'y aura donc pas de « court-circuit » mais une décroissance « relativement » lente de $E_{s_{f_s}}=R_s.I_{s_{f_s}}$

Pour étudier la dynamique de décroissance de ce système, il faut écrire son équation de comportement (à partir du schéma « série »), donc :

$$U_s + L_s.d(i_s)/dt + r_s.i_s + M.d(i_p)/dt = 0$$

On rappelle que $e = L.d(i)/dt$ est issu des lois de Faraday ($e=d\phi/dt$) et de l'auto-induction ($\phi=L.i$).

Durant la phase autonome, le courant i_p est nul donc l'équation se transforme en:

$$U_s + L_s.d(i_s)/dt + r_s.i_s = 0$$

Par ailleurs : $i_s = C_s.d(U_s)/dt$

On rappelle que $Q=CV$ et que $i=dQ/dt$.

Alors l'équation se transforme en :

$$U_s + L_s.C_s.d^2(U_s)/dt^2 + r_s.C_s.d(U_s)/dt = 0$$

Réarrangeons cette équation différentielle du deuxième ordre en divisant par ($L_s.C_s$):

$$d^2(U_s)/dt^2 + r_s/L_s.d(U_s)/dt + U_s/(L_s.C_s) = 0$$

Sans rentrer dans la résolution de ce type d'équation différentielle (que l'on trouve en référence [8]), il faut calculer le taux d'amortissement ξ (« Ksi »). Celui-ci vaut :

$$\xi = (r_s/L_s)/(2\sqrt{1/L_s.C_s}) = r_s.\sqrt{C_s}/(2\sqrt{L_s})$$

Les mesures de L_s et de C_s sont précises car mesurables. Par contre, on n'a pas accès à la vraie valeur de r_s . La seule valeur r_s est la mesure ohmique de L_s , soit 8,6 ohm. Cependant il y a un effet de peau non directement mesurable et la présence de la ferrite qui introduit des pertes (par hystérésis, par exemple), pertes qui sont équivalentes à une résistance en parallèle du circuit accordé. Il faut donc déterminer r_s expérimentalement. C'est ce que l'on va faire comme expliqué dans le nota qui suit.

Nota relatif à la détermination expérimentale de r_s

Pour avoir une estimation réaliste de la valeur de r_s à la fréquence HF, il faut mesurer la bande passante (B) pour une fréquence de résonance donnée ($f_{rés}$), suivant la méthode fournie en référence [10]. On déterminera ensuite le facteur de qualité Q par la formule $Q=B/f_{rés}$.

Comme par ailleurs $Q=L_s.w_{rés}/r_s$ (avec $w_{rés} = f_{rés} \cdot 2\pi$), on en déduit $r_s = L_s.w_{rés}/Q$.

Dans mon cas, pour une fréquence de résonance de 165,18 KHz, la bande passante mesurée à -3 dB est de 5,53 KHz. Le facteur de qualité Q est donc de $165,18/5,53=29,9$. On déduit $r_s=L_s.w/Q=150$ ohm (valeur très différente de la valeur ohmique).

On reprend le calcul de $\xi = r_s \cdot \sqrt{C_s} / (2 \cdot \sqrt{L_s})$ avec $L_s=4,33$ mH, $r_s=150$ ohm et C_s tel que la résonance soit sur 165,18 KHz. En appliquant le formule de Thomson, on trouve $C_s= 1/((2 \cdot \pi)^2 \cdot L \cdot f^2)=214$ E-12 F soit 214 pF. Après calcul, on trouve $\xi =0,017$, donc $\xi < 1$.

Pour $\xi < 1$, le régime est pseudo-périodique. Le terme principal de la décroissance (le « taux de décroissance »), à partir de la tension initiale U_0 que l'on a au tout début de la période autonome, vaut $\exp(-t/T)$ avec $T=2 \cdot L_s/r_s$, soit $\exp(-2 \cdot t \cdot r_s/L_s)$.

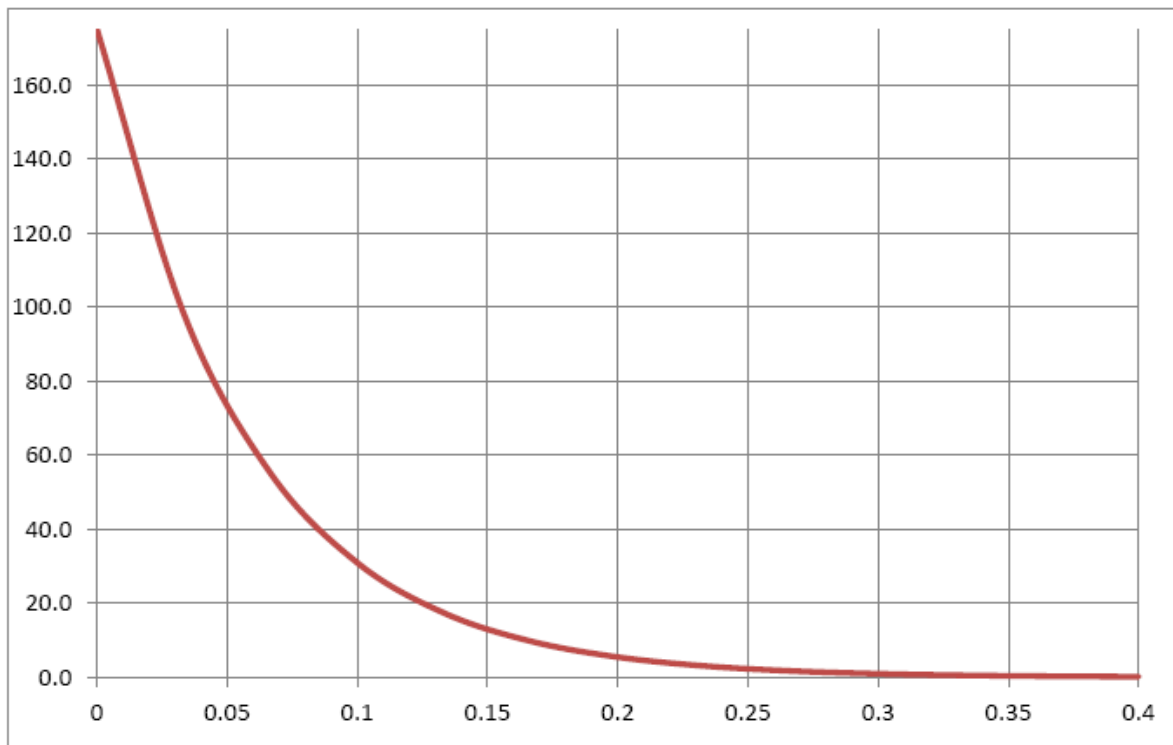
La signification est claire : plus la résistance r_s de l'inductance L_s est grande et plus la décroissance est rapide. Au contraire, une résistance nulle (par hypothèse), donnerait un taux de décroissance $\xi=\exp(0)=1$, donc sans décroissance. Le circuit accordé continuerait à osciller ad infinitum.

Dans notre cas, $T=2 \cdot L_s/r_s=0,0577$ ms

Ci-après, on trouvera la décroissance théorique de l'enveloppe de la tension de sortie normée à $U_0=175$ mV (valeur du premier pic observé au secondaire) pour le cas du montage ($T=0,0577$ ms).

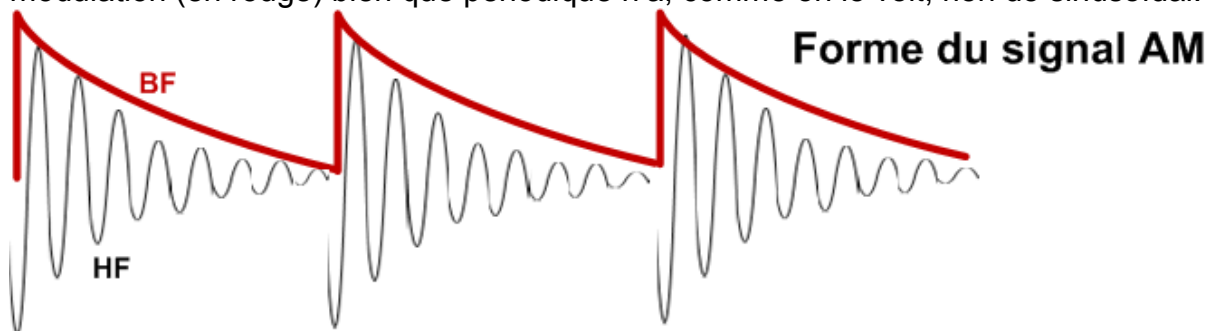
Nota : expérimentalement on note que la valeur U_0 de 175 mV reste à peu près constante quand la fréquence HF varie (en ondes longues).

| t (ms) | U (mV) |
|--------|--------|
| 0 | 175.0 |
| 0.0333 | 98.3 |
| 0.0666 | 55.2 |
| 0.1 | 30.9 |
| 0.1333 | 17.4 |
| 0.1666 | 9.8 |
| 0.2 | 5.5 |
| 0.2333 | 3.1 |
| 0.2666 | 1.7 |
| 0.3 | 1.0 |
| 0.3333 | 0.5 |
| 0.3666 | 0.3 |
| 0.4 | 0.2 |



Décroissance du signal alternatif durant 0,4 ms par pas de 1/3 ms

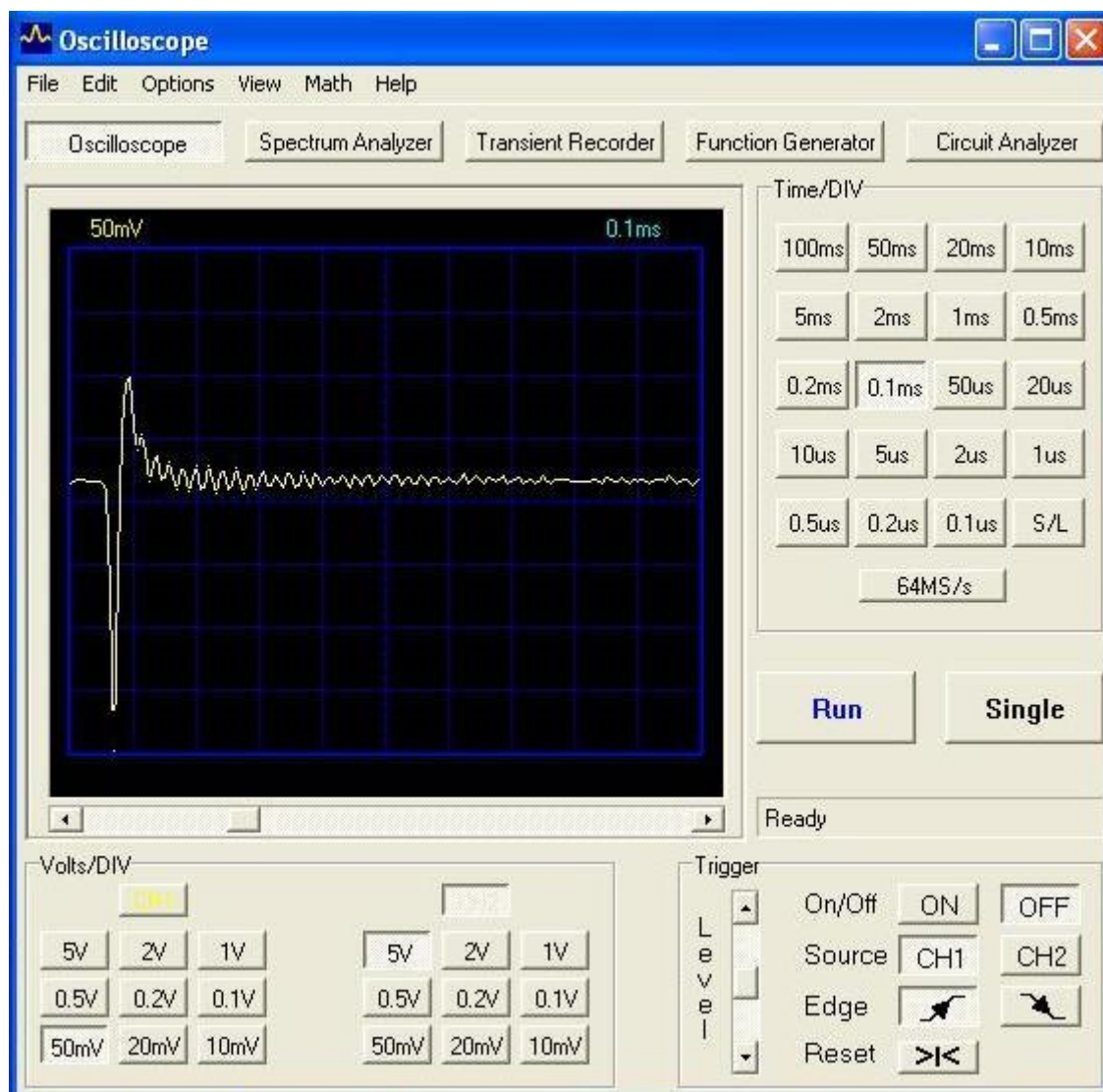
Donc, la forme du signal AM va ressembler à ce qui suit. L'enveloppe de la modulation (en rouge) bien que périodique n'a, comme on le voit, rien de sinusoïdal.



On trouvera ci-dessous une copie d'écran du signal de tension mesuré aux bornes du CV. On retrouve, grosso-modo, la décroissance prévue. En effet, le premier pic a une amplitude de 175 mV. Le deuxième pic qui suit le premier à environ $1/30^{\text{ème}}$ de ms a une tension d'à peu près 83 mV. A $1/30^{\text{ème}}$ de ms, la décroissance théorique (voir plus haut) donne 98 mV, ce qui n'est pas très éloigné de 83 mV.

Nota 1 : le pic primaire ayant une amplitude d'environ 40 mV, le rapport de transformation du transformateur HF est d'environ 4 (175/40).

Nota 2 : le principe d'émission de la HF utilisé ici n'est pas très éloigné de celui de l'éclateur de Tesla. Pour plus de détails sur ce dernier appareil, voir la référence [9].



Références

- [1] « Etude d'un récepteur à un seul tube diode » de l'auteur (F6CTE):
<http://f6cte.free.fr/Etude%20d'un%20recepteur%20a%20un%20seul%20tube%20dio de%20rev.%20B.pdf>
ou revue « Dan OM » Numéro 9, semaine 27 / Juillet 2017
- [2] « Using and Understanding MINIATURE NEON LAMPS » by William G. Miller
(accessible sur Internet)
- [3] « Multiplasma 1.2 » de l'auteur (F6CTE):
http://f6cte.free.fr/MULTIPLASMA_setup.exe
- [4] « Glow lamp manual – Theory – Circuits – Ratings - 2nd edition » edited by
General Electric Company (accessible sur Internet)
- [5] Thèse « Calcul de la courbe de Pashen et la tension de claquage pour les
décharges à gaz rare » de Melle GHALEB Fatiha (accessible sur le Net)
- [6] Thèse « Etude du transfert d'énergie entre un arc de court-circuit et son
environnement : application à l' « Arc tracking » de Hadi EL BAYDA (accessible sur
le Net)
- [7] Thèse « Génération, modélisation et détection des défauts d'arc électrique :
application aux systèmes embarqués aéronautiques » de Jonathan ANDREA
(accessible sur le Net)
- [8] Amortissement physique – Wikipédia :
https://fr.wikipedia.org/wiki/Amortissement_physique
- [9] « Théorie - Bobine de Tesla 1 – Fabuleuse Physique » :
<http://fabuleusephysique.fr/projets/bobine-tesla-1/theorie/>
- [10] « Fréquence de résonance – facteur de qualité » de F6CRP sur :
http://meteosat.pessac.free.fr/Cd_elect/perso.wanadoo.fr/f6crp/elec/ca/freque.htm