THEORIE DES CIRCUITS DU CHANGEMENT DE FREQUENCE

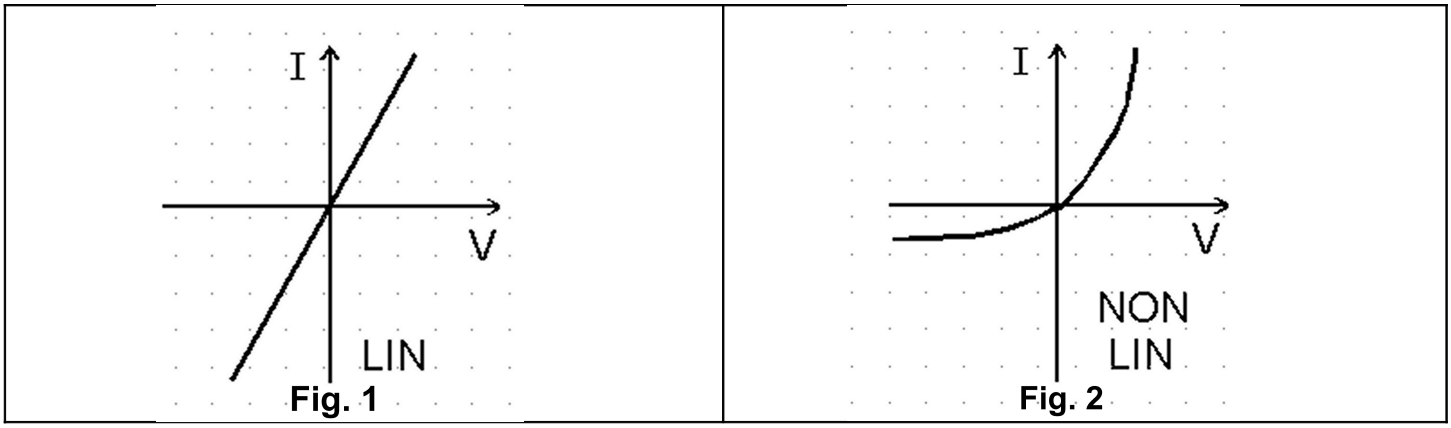
Généralités : éléments linéaires et non linéaires
L'addition linéaire des signaux
Circuit de type A
Circuit de type B
Formules de Mac Laurin
La porte analogique
Le circuit de conversion à diode type A
Le circuit de conversion à diode type B
Le modulateur de Cowan
Le modulateur en anneau
L'hétérodyne à détection grille
La modulation par la plaque

THEORIE DES CIRCUITS DU CHANGEUR DE FREQUENCE

Dans cette deuxième partie on évoque les circuits permettant d'obtenir le changement de fréquence en effectuant **la multiplication** du signal d'antenne $\mathbf{v_a}$ par celui de l'oscillateur local $\mathbf{v_o}$.. Une structure réalisant une vraie multiplication analogique existe sous forme intégrée depuis les années 70, à base de **paires différentielles** couplées, La radio exploite de façon générale la propriété des éléments non linéaires, à savoir la déformation du spectre des signaux qui leur sont appliqués. La fig. 1 montre **un élément linéaire**, la résistance R est constante quel que soit le courant I=V/R. Si l'excitation est sinusoïdale, v=V.sin(ωt) , le courant i est également sinusoîdal. La fig.2 montre **un élément non linéaire** I=f(V). Excité par une sinusoïde, il donne un courant de forme compliquée dont la valeur est **"calculable"** par la fameuse formule de Mac Laurin (qui date du 18ème siècle !):

$$i = a_0 + a_1 \cdot v + a_2 \cdot v^2 + a_3 \cdot v^3 + \ldots$$

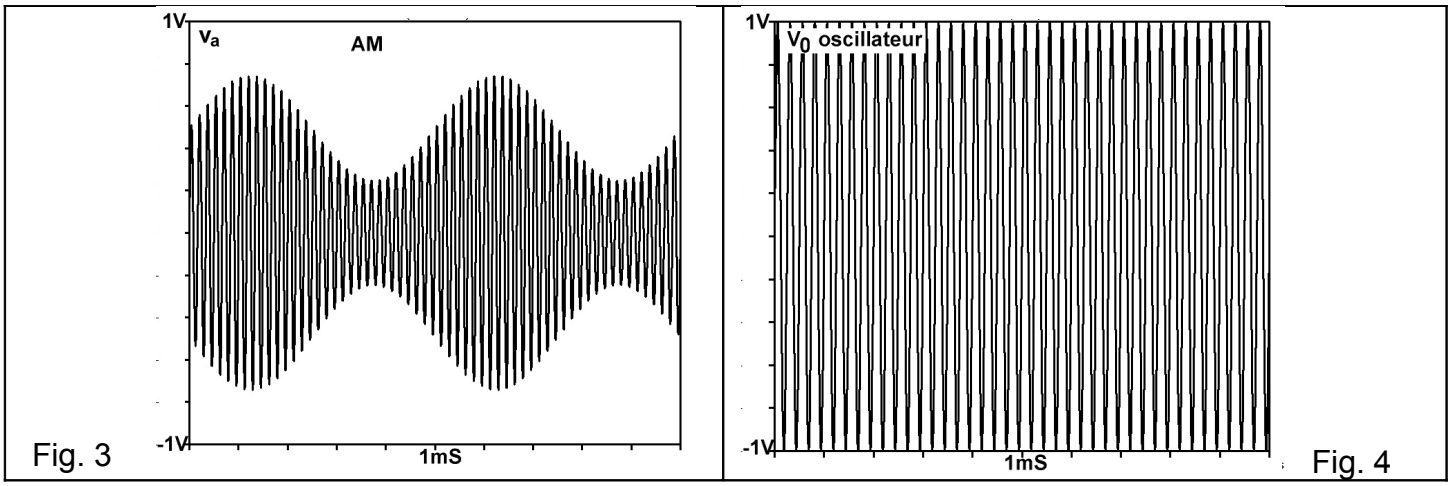
Les coefficients a_n sont dépendants de la nature de l'élément non linéaire.
Dans le circuit de la fig. 5 on additionne linéairement un signal modulé en amplitude $\mathbf{v_a}$ avec celui de l'oscillateur $\mathbf{v_o}$.



$$v_a + v_0 = (1 + V_m \cdot \sin \omega_m \cdot t) \cdot V_a \sin \omega_a \cdot t + V_o \cdot \sin \omega_o \cdot t$$

$$i = f(v_a + v_0) \qquad v_s = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot (v_a + v_0)$$

F_a fréquence de la porteuse, F_m fréquence de la modulation, F_0 fréquence de l'oscillateur.



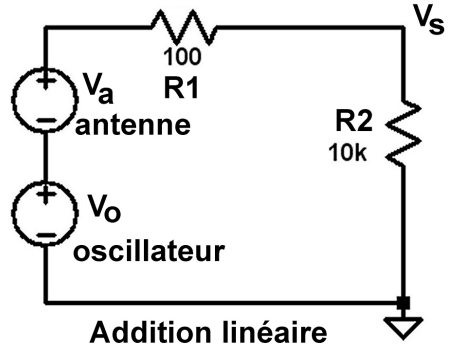


Fig. 5

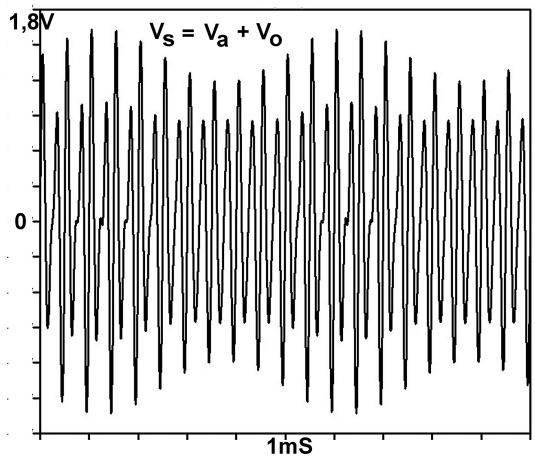


Fig. 6

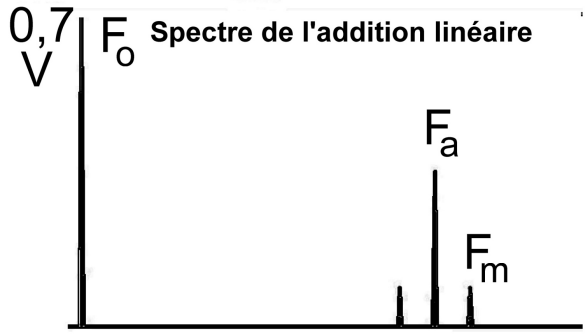


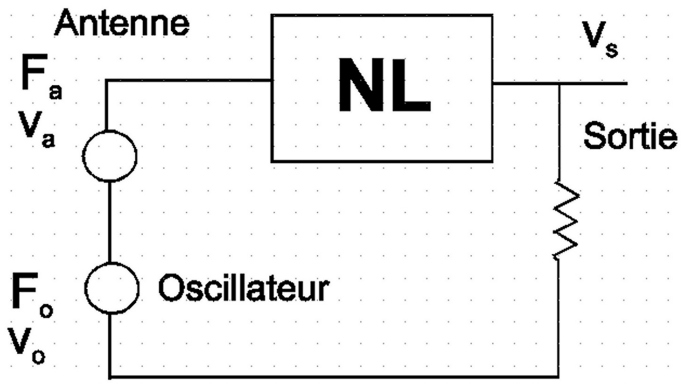
Fig. 7

La somme est appliquée au circuit linéaire. Le spectre montre bien que le courant conserve la forme de la somme. **Il n'y a pas de changement de fréquence** car les termes résultant du produit

$F_a + F_o$ ou $F_a - F_0$

n'apparaissent pas dans le spectre. Dans son ouvrage de 1927 P. Berché affirmait le contraire: c'était une erreur.

De façon générale, on rencontre **deux structures** de base pour les circuits de changement de fréquence: le type A où l'on applique la somme des signaux v_a et v_0 au circuit non linéaire (fig.8) et le type B où on les applique séparément, la superposition se faisant alors dans le circuit non linéaire lui-même (fig. 9).



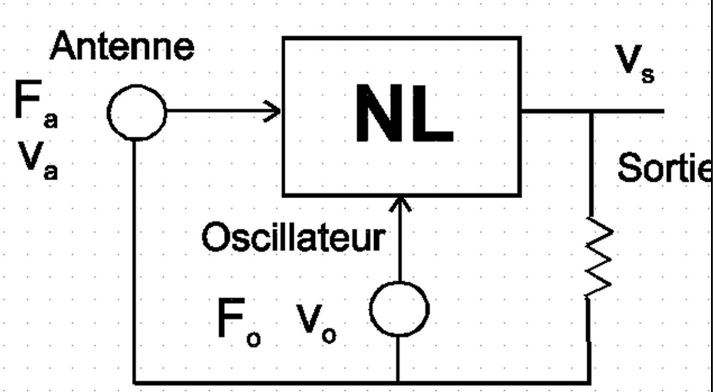


Fig.8 Type A **Fig.9 Type B**

Pour le type A: $v_s = f(v_a + v_0)$ $v_s = a_0 + a_1 \cdot (v_a + v_0) + a_2 \cdot (v_a + v_0)^2 + \ldots$

Le terme au carré donne:

$$(v_a + v_0)^2 = v_a^2 + v_0^2 + 2 \cdot (1 + V_m \cdot \sin\omega_m \cdot t) \cdot V_a \cdot \sin\omega_a \cdot t \cdot V_0 \cdot \sin\omega_0 \cdot t$$

$$v_a \cdot v_0 = (1 + V_m \cdot \sin\omega_m \cdot t) \cdot V_a \cdot \sin\omega_a \cdot t \cdot V_0 \cdot \sin\omega_0 \cdot t$$

Il apparaît **le produit $v_a * v_0$** , donc le changement de fréquence.

Pour le type B, la solution est donnée par la formule de Mac Laurin à deux variables:

$$v_s = f(v_a, v_0) \qquad v_s = a_0 + a_1 \cdot v_a + b_1 \cdot v_0 + a_2 \cdot v_a^2 + b_2 \cdot v_0^2 + c \cdot v_a \cdot v_0 + \ldots$$

Expression où apparaît également le **produit $v_a * v_0$** , c'est-à-dire le changement de fréquence.
Cette multiplication obtenue indirectement est mise en oeuvre dans la TSF en exploitant les propriétés de **non linéarité** des éléments tels que diodes, triodes, bigrille, pentodes, etc… et, aujourd'hui, des transistors. Dans une diode à vide, la non linéarité se définit par sa caractéristique statique où le courant plaque ne varie pas proportionnellement à la tension aux bornes : **la courbe Ip=f(Vpk) n'est pas une droite** et présente même une très forte dissymétrie de conduction. Dans la triode on trouve cette non linéarité au niveau de la **diode grille-cathode** et au niveau encore du **courant plaque Ip=f(Vgk,Vpk).** Les systèmes à multiplication indirecte sont les plus économiques à réaliser, ce qui explique leur utilisation quasi universelle dans la TSF et la Radio d'aujourd'hui.
Voici quelques exemples de circuits changeurs:

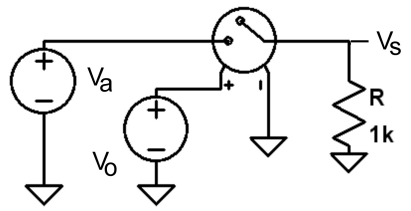


Fig.10 Circuit de type B. Interrupteur ou porte analogique commandé par la tension v_0.

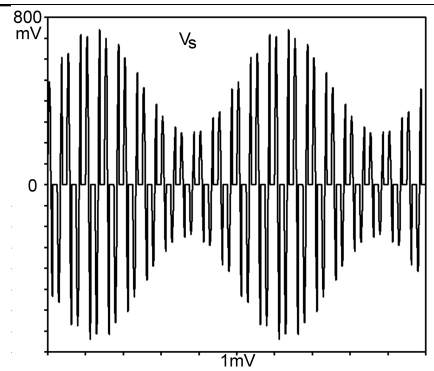


Fig.11

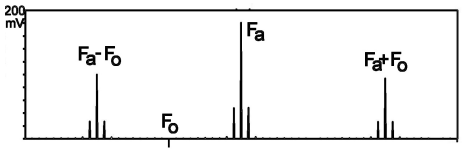


Fig.12
La porte effectue le produit par 0 ou 1.

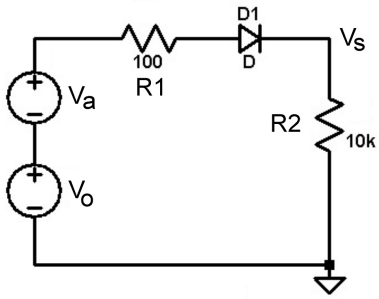


Fig.13 Circuit à diode, type A.

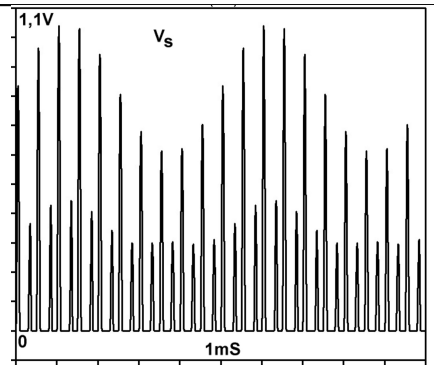


Fig.14

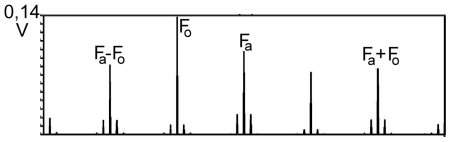


Fig.15
La non linéarité génère des fréquences supplémentaires qui seront éliminées par le filtre moyenne fréquence.

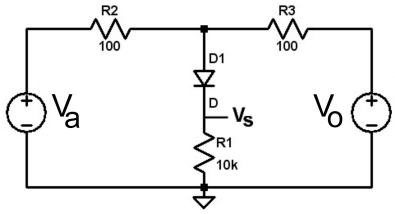


Fig.16 Circuit à diode, type B

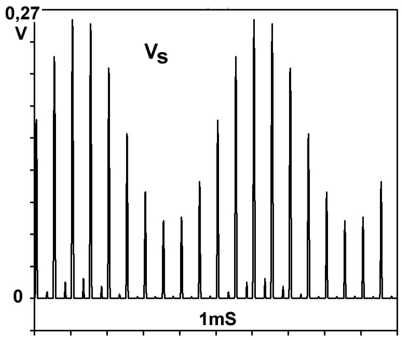
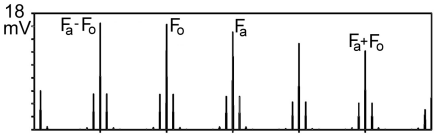


Fig.17



. Fig.18

Dans les circuits changeurs à diode, la galène aurait pu servir d'élément non linéaire. Mais l'instabilité de son contact la condamnait d'avance…

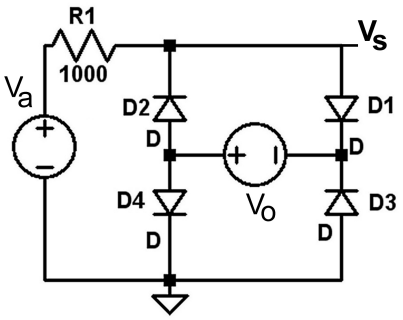


Fig.19 Modulateur de Cowan, porte analogique moderne.

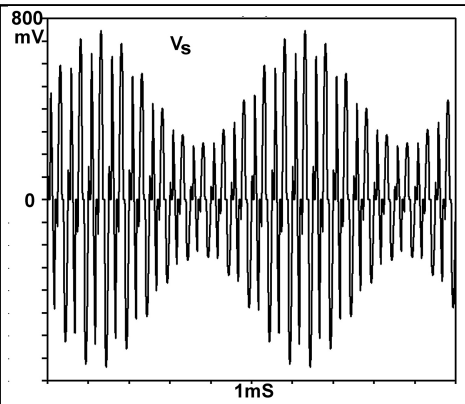


Fig.20

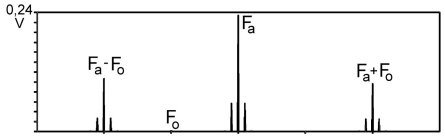


Fig.21
Circuit de type B : le modulateur de Cowan, équivalent à une porte analogique.

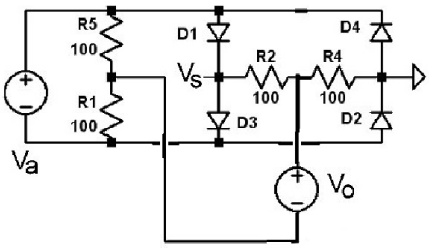


Fig.22 Modulateur en anneau, utilisé dans la radio moderne.

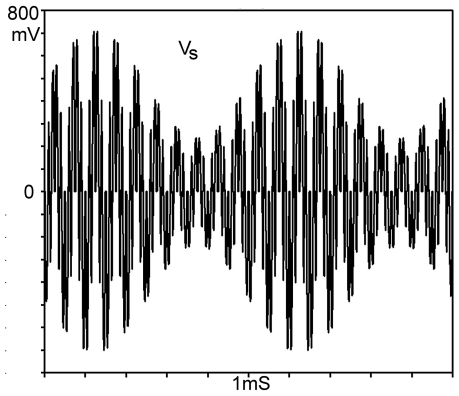


Fig.23

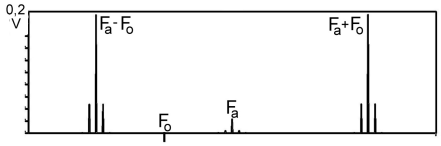


Fig.24
Cirtcuit de type B : le modulateur en anneau, très performant, car il élimine la porteuse et l'oscillation locale.

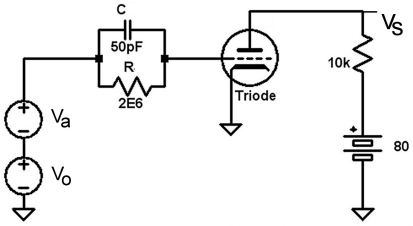


Fig.25

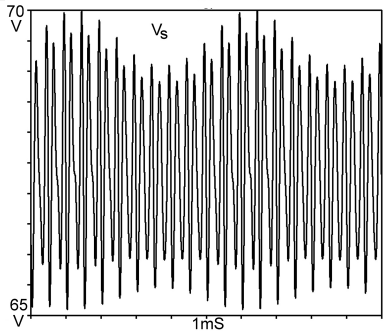


Fig.26

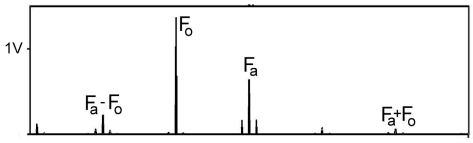
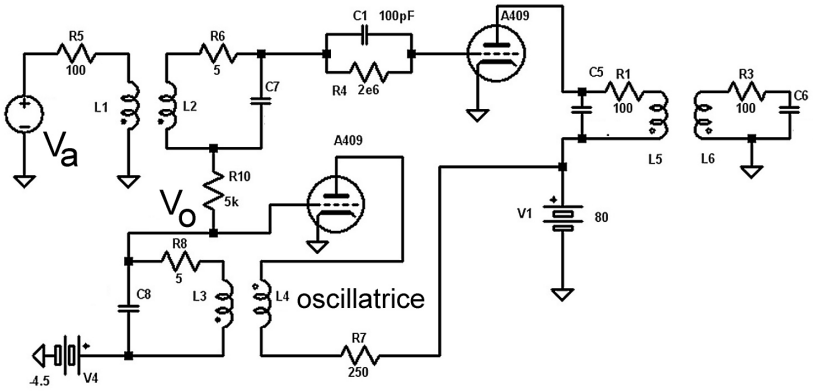


Fig.27
Circuit de type A , célèbre dans les années 1920, appelé "hétérodyne à détection grille" (ou 1ère détection, selon L. Lévy).

Fig.28

Un exemple de réalisation de la fig.25 à deux lampes triodes dont une oscillatrice locale et l'autre en détection par la grille. Le transformateur moyenne fréquence isole par résonance la raie F_a-F_0.



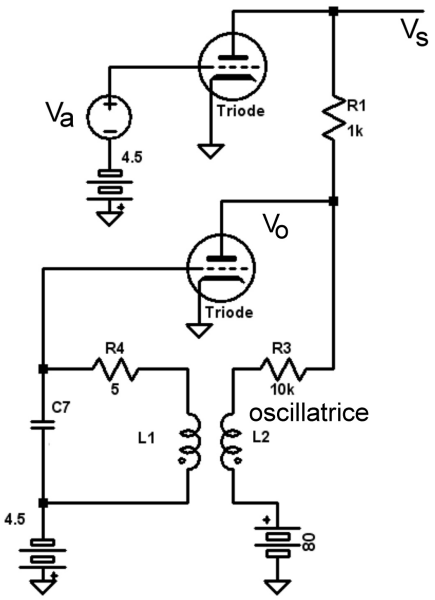


Fig.29
Modulation par la plaque

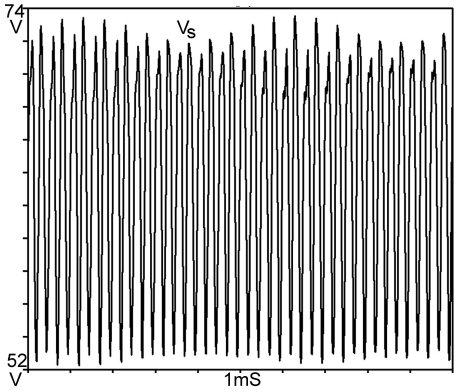


Fig.30

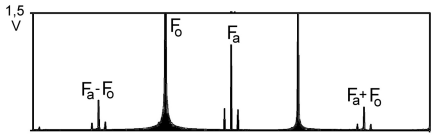
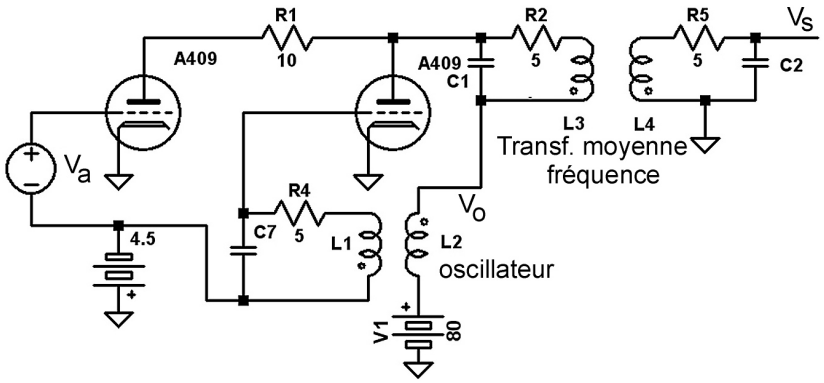


Fig.31
Circuit de type B : modulation par la plaque (inspiré de Jouaust). Ce circuit annonce les futurs systèmes à lampes multiélectrodes des années 1930 et suivantes, utilisant les octodes, puis les triodes-hexodes jusque dans les années 1960.

Fig.32

Un exemple de réalisation de modulation par la plaque avec transformateur moyenne fréquence à la sortie.
Quand il s'agit de la bigrille, le système s'apparente au procédé de modulation et c'est la non linéarité de la bigrille qui fera apparaître le terme produit v_a . v_0 .



A la sortie de l'élément "mélangeur" non linéaire **on place toujours un filtre passe-bande** dit "moyenne fréquence" pour isoler les raies $F_a + F_o$ ou $F_a - F_0$ résultant du produit du signal de l'antenne par celui de l'oscillateur local. Le récepteur de TSF est un analyseur de spectre…

En conclusion, l'explication théorique du principe de la translation de fréquence par non linéarité a donc peut-être commencé en… 1715, avec la fameuse formule des polynômes de Newton-Taylor et celle de Mac Laurin en 1742, précédées par l'invention du calcul infinitésimal par Newton et Leibniz au 17ème siècle, suivies ensuite par la notion de spectres de fréquence de Fourier en 1812, sous Napoléon 1er... Les mathématiciens donnent le vertige avec leur capacité à s'élever en hélicoptère au-dessus de nous. Mais même s'ils nous font signe pour nous indiquer le chemin à suivre, ils ne proposent pas de moyens de transport concrets et nous errons à pied **pendant des siècles**, en bas... Les concepts théoriques sont donc en place **bien avant** l'invention de la TSF, laquelle va leur offrir un vaste champ d'application que les ingénieurs d'aujourd'hui retrouvent dans leurs logiciels de simulation électronique depuis les années 1960. La vérité : bien que les outils théoriques soient hautement développés, lorsqu'il s'agit de s'en servir pour connaître la valeur numérique d'une tension ou d'un courant, de voir leur forme sur un écran, et bien, sur le papier, on est confronté assez rapidement à des **calculs inextricables** dont seuls les logiciels de simulation nous permettent d'émerger.

G. Salvini