

Dossier Mesures :

..... Des oscillateurs vers les générateurs jusqu'aux synthétiseurs !

A/ génération de fréquence (Préambule)

Avant les années 1920, malgré le développement des premiers appareils et systèmes de transmissions, il y avait peu de besoins exprimés dans ce domaine sinon quelques générateurs qui étaient souvent appelés générateurs d'ondes. Ils servaient à régler les tous premiers postes d'émission/réception. Les besoins étaient plutôt orientés pour des fréquences relativement basses car les mesures effectuées étaient surtout orientées sur les liaisons phoniques ou tests téléphoniques. L'intérêt des générateurs a commencé à se faire plus pressent au début des années de la grande guerre comme on l'appelait pour les liaisons radio.

Par la suite, la radio a commencer à créer des besoins mais c'est surtout les prémices de la deuxième guerre mondiale et l'évolution des techniques radios qui ont nécessité des appareils pour simuler certaines fonctions; parmi celles-ci la génération et la mesure des fréquences.

Ce sont ces deux sujets que je me propose d'aborder avec vous. Pour commencer nous allons parler des générateurs et d'appareils utilisant des lampes bien entendu.

Qui dit générateur dit oscillateur qui en est le cœur. Je vous propose de parler des différents types d'oscillateurs et des principes utilisés en sachant que cela n'est pas exhaustif.

* Les principaux circuits sont en basses Fréquences :

Oscillateurs RC : standard ou type pont de Wien ou déphasage.

Oscillateurs LC

Oscillateurs à battement

* les principaux circuits en Moyennes ou Hautes Fréquences :

Oscillateurs LC

Oscillateurs à quartz

1/ oscillateurs RC

Dans une lampe dont la cathode est à la masse, il se produit une inversion de phase entre l'entrée et la sortie. Si on incorpore entre plaque et grille un réseau introduisant à la fréquence « F » un déphasage de 180° le montage travaillera en réaction et oscillera sur la fréquence « F » à condition que le gain de l'étage soit supérieur aux pertes apportées par le réseau. Il est facile d'utiliser un réseau composé seulement de résistances et de capacités. On peut utiliser pour ce réseau soit un filtre passe haut (fig1) ou un filtre passe bas (fig. 2)

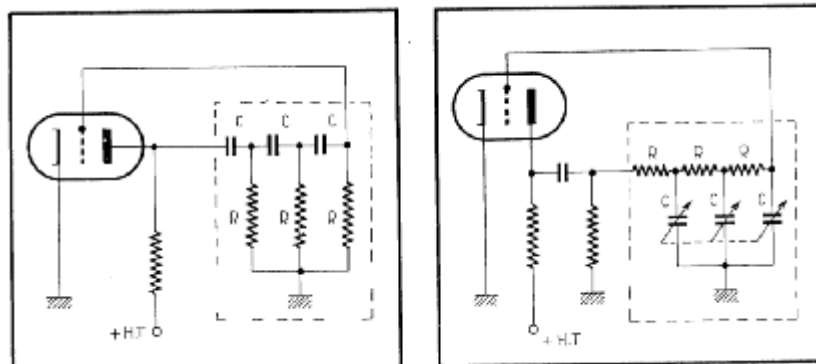


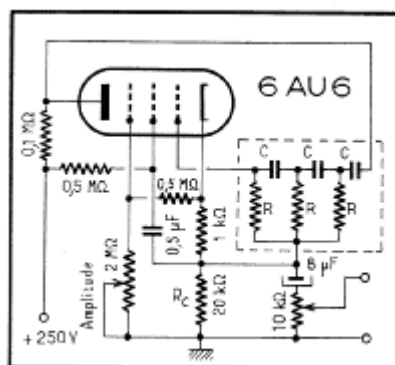
Fig. 1(Avec filtre passe- haut) Fig. 2(Avec filtre passe- bas)

Ces filtres comportent normalement 3 cellules en L, car avec deux cellules l'affaiblissement est souvent trop élevé. La fréquence d'oscillation est voisine de $0,065/CR$ pour la Fig. 1 et $0,39/CR$ pour la Fig. 2

Les pertes sont voisines de 29 dB dans les deux cas. Le montage 1 est bien adapté » aux basses fréquences et le montage 2 peut fonctionner jusqu'à 1 MHz.

L'oscillateur de la Fig. 3 est simple et n'a aucune régulation d'amplitude. Toute variation de gain peut faire décrocher l'oscillation ou augmenter l'amplitude et créer de la distorsion. Pour éviter cela on peut mettre comme sur la fig3 une résistance dans la cathode « R_c » ce qui permet aussi de prélever la fréquence sur une impédance moyenne sans perturber la fréquence.

Fig. 3



Principaux réseaux sélectifs RC

Ce sont des quadripôles présentant un affaiblissement théoriquement infini, pratiquement très élevé à une certaine fréquence « f ». Dans les générateurs BF à RC, on utilise les configurations représentées sur la fig. 4. Le double T, le T ponté et le pont de Wien. Les T peuvent directement s'insérer dans un montage du fait qu'une borne est commune à l'entrée et à la sortie.

Le pont de Wien a quatre bornes distinctes, ce qui commande un montage différent. Avec les désignations indiquées, la fréquence d'affaiblissement infini est $f=1/2\pi RC$ pour le double T et pour le pont de Wien. Pour faire varier « f » il faut faire varier en même temps les 3 résistances ou les 3 condensateurs du double T ce qui nécessite un montage particulier.

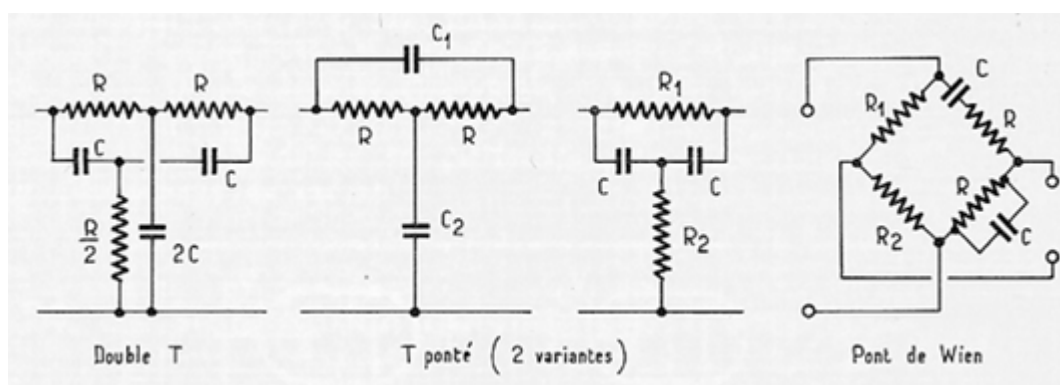


Fig. 4

Pour les générateurs à variation continue de fréquence il est donc préférable d'utiliser les 3 autres réseaux dans lesquels il suffit de faire varier simultanément 2 R ou 2 C.

On a donc le choix entre R et C comme élément variable. Il faut noter que l'utilisation d'un condensateur variable de 2×490 pF est courant et peu coûteux. En assurant une variation parfaitement continue avec une constante égalité entre les sections.

Générateur BF à pont de Wien

Ils constituent la majorité des générateurs utilisés en basse fréquence. Ils sont faciles à réaliser et à moindre coût tout en offrant une bonne stabilité en fréquence et en amplitude. La fig. 5 en montre un schéma type. C'est un amplificateur apériodique à deux étages. V_1 et V_2 attaquent le pont composé d'une branche résistive R_1 et R_2 et d'une branche réactive formant les impédances série Z_s et Z_p .

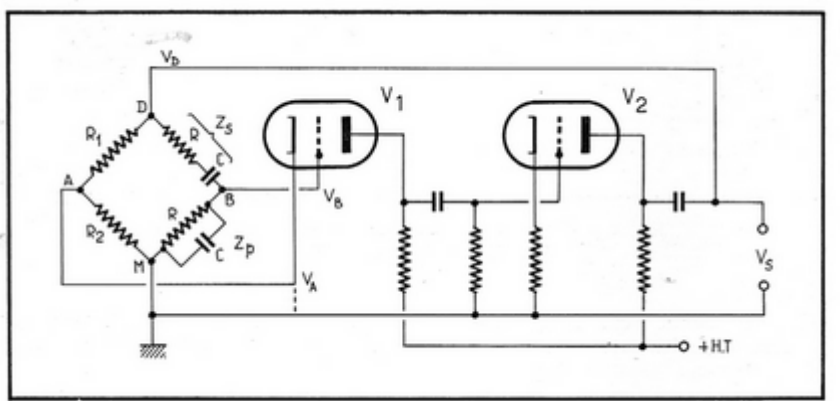


Fig. 5

Le rapport des tensions aux points D et B dépend de la fréquence. Aux basses fréquences Z_s tend vers l'infini et V_D/V_B tend vers zéro. Aux fréquences plus hautes Z_p tend vers zéro et V_b/V_d devient pratiquement nul. Entre ces 2 extrêmes le rapport passe par un maximum correspondant à une fréquence $=1/2\pi RC$ qui est la fréquence disponible en sortie.

Générateur à battements

Ce type de générateur était souvent utilisé dans les années 50 à 60. Aujourd'hui ce principe n'est plus appliqué et les générateurs RC ont depuis longtemps remplacé ces types de produits.

Pour mémoire le fonctionnement de ces générateurs mettait en œuvre deux générateurs à variation continue ou un fixe et un variable suivant les gammes à couvrir et le fabricant.

Les 2 signaux générés sont envoyés dans un mélangeur chargé d'élaborer la différence de fréquence correspondant à la fréquence désirée. Il est suivi d'un filtre chargé d'éliminer les composantes indésirables du signal de sortie.

Ces produits pouvaient couvrir des plages de fréquence de quelques centaines de kilohertz, voir pour certains modèles quelques MHz.

A et B sont les deux oscillateurs. Leurs signaux appliqués à un étage mélangeur, le signal résultant et filtré était ensuite amplifié par un tube de puissance. Ces générateurs étaient souvent équipés d'un indicateur cathodique permettant de contrôler le niveau et d'un atténuateur à résistances pour sélectionner le niveau désiré en sortie.

Le point faible de ces générateurs à battements était la tendance des 2 générateurs à se synchroniser lorsque les 2 fréquences étaient trop voisines. Il fallait éviter le moindre couplage entre ces 2 oscillateurs à l'aide de blindages adaptés et utiliser comme dans le montage ci-dessus un oscillateur ECO à faible niveau.

Dans cet exemple l'oscillateur A est à fréquence fixe avec un trimmer pour régler finement la fréquence mais dans les générateurs plus performants on utilisait des oscillateurs à quartz.

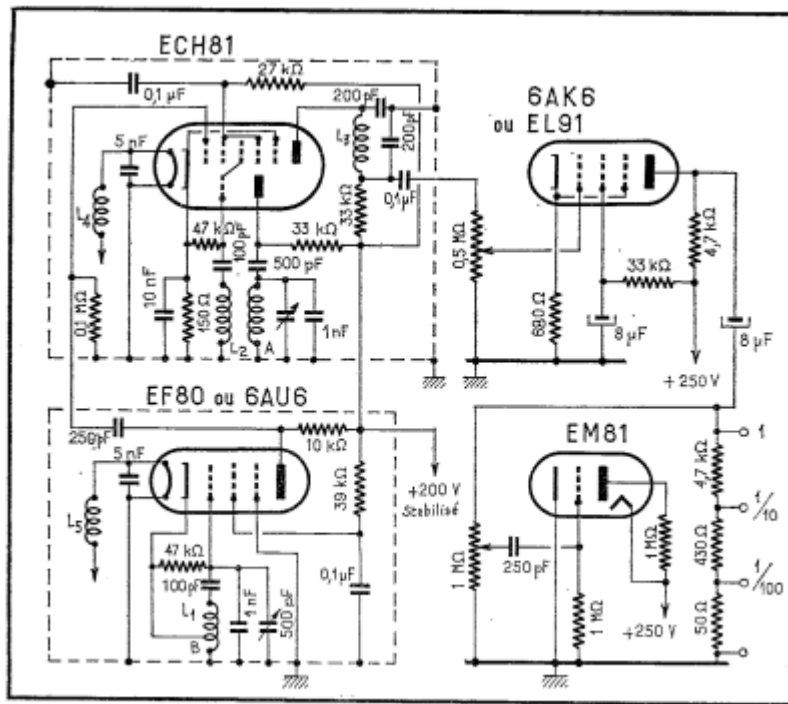


Fig. 6 : Exemple générateur BF à battements

Oscillateurs LC

La fréquence de fonctionnement d'un oscillateur LC est essentiellement déterminée par la fréquence de résonance d'un circuit oscillant composé d'une inductance L et d'un condensateur C .

L'utilisation d'un condensateur variable permet une variation continue et précise de C en particulier dans le générateur HF et VHF.

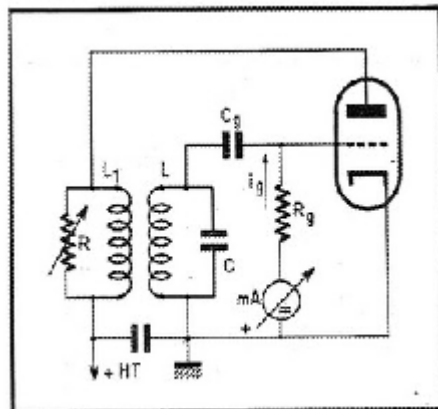


Fig. 7 : oscillateur à grille accordée

Un circuit oscillant « CO » même de bonne qualité présente des pertes (il est amorti par sa résistance qui l'empêche d'osciller et amortit rapidement une oscillation provoquée par un moyen extérieur. Pour réaliser un oscillateur il faut adjoindre au « CO » un amplificateur qui lui fournit une énergie au moins égale à ses propres pertes.

Les différents types d'oscillateurs diffèrent par le mode de réaction utilisé pour compenser leurs pertes. L'oscillation naissante doit être renforcée par de l'énergie appliquée dans le même sens, en phase. Or dans un tube, avec la cathode à la masse il se produit une inversion de phase si on utilise un seul étage. Il faut donc injecter l'énergie en opposition de phase à l'aide d'un enroulement à réaction disposé de façon à inverser la phase pour renforcer l'oscillation (voir l'exemple de la figure 6.)

Quelques exemples de montages d'oscillateurs et d'oscillateurs réputés.

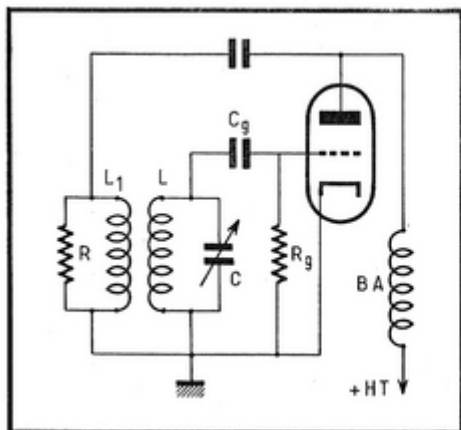


Fig. : 8 Oscillateur à grille accordée plaque alimentée en parallèle

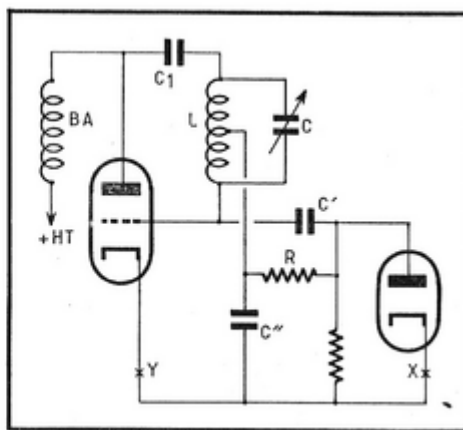


fig. : 9 Oscillateur Hartley avec Cd automatique de niveau

Nota fig. 8 : il est facile de déterminer l'amplitude de la tension d'oscillation aux bornes de L. Le tube fonctionnant en détecteur, le courant aux bornes de Rg fournira la tension de polarisation de la grille soit $V_g = I_g R_g$.

Nota fig 9 : la grille du tube ne conserve que sa fonction amplificatrice. Une diode assure la commande automatique d'amplitude avec la tension prélevée par le condensateur C'

Différents montages fondamentaux d'oscillateurs LC à réaction inductive

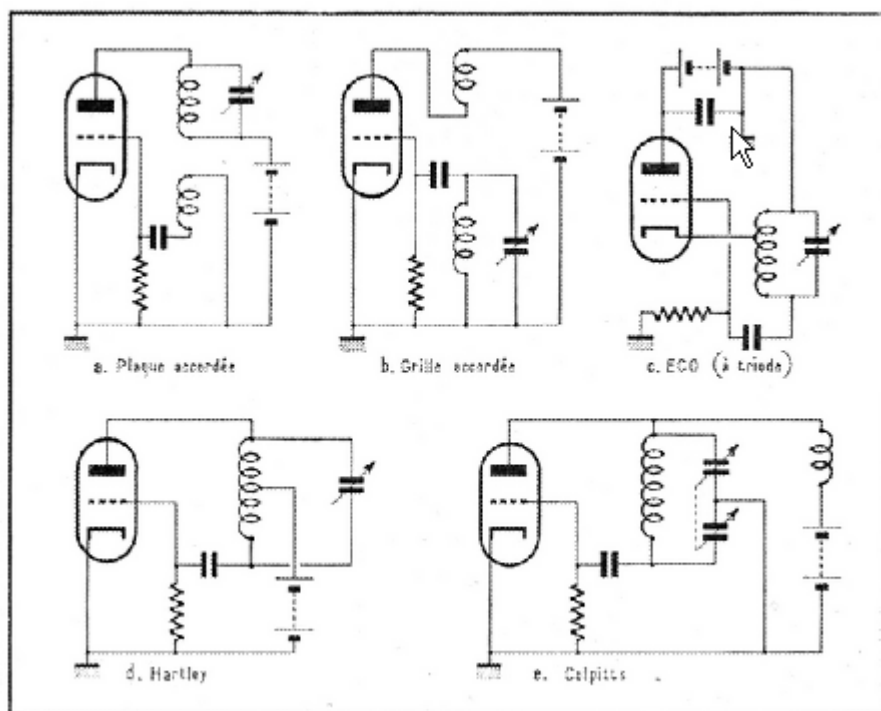


Fig. 10

Les générateurs LC

Ils ont surtout été utilisés dans les gammes HF, UHF et VHF. Ils se sont particulièrement développés dans la période de l'avant guerre vers de 1939 avec des sociétés comme Hewlett-Packard avec des modèles comme le 606A en 1940 qui a été suivi par beaucoup d'autres appareils suite à la deuxième guerre mondiale. Celle-ci a amplifiée les recherches sur les nouveaux équipements : radio, et transmissions longues distances, les radars à ondes courtes (contre les sous-marins en surface) et en hyperfréquences pour l'aviation, les systèmes sonar pour la marine contre les sous marins en plongé, toutes ces applications ont littéralement fait exploser les études et la fabrication de ces générateurs par les grandes sociétés.

Parmi celles-ci on peut rappeler : Rohde et Schwarz société Allemande ; Marconi société Anglaise. Cette impulsion ne s'est pas réduite après la guerre, d'autres sociétés sont apparut comme Férisol en France et bien d'autres que nous ne pourrions pas toutes citer et qui ont participé à l'évolution technologique de ces générateurs. Dans les années 50 un autre appareil typique à connu le succès et a marqué les esprits (le 608A de HP)

Voici quelques vues de ces vieux instruments :



Fig. 11



fig. 12

Les Oscillateurs à quartz.

Nous n'allons pas ici décrire le phénomène fondamental de la piézo-électricité découvert par Pierre et Jacques Curie mais simplement rappeler qu'une lame de quartz soumise à une tension électrique sur un de ses axes voit ses dimensions mécaniques varier sur un autre axe (disons perpendiculaire pour faire simple). Inversement si cette lame de quartz est soumise à des contraintes mécaniques suivant un axe précis, il se développe à ses bornes une faible tension sur l'autre axe. Celle-ci est directement liée à la vitesse de la contrainte mécanique qu'elle subit.

Si cette contrainte est une vibration, celle-ci se propage dans le quartz à une vitesse de 5.500 m/seconde.

A contrario, si un champ électrostatique de haute fréquence est appliqué sur un des axes du quartz il va le faire vibrer et s'il correspond à la fréquence mécanique propre du quartz il y aura résonance comme avec un circuit oscillant mais avec un amortissement 1000 fois plus petit que celui du « CO ».

La fréquence de résonance du quartz dépend de son épaisseur, et de ses caractéristiques de coupe (l'axe suivant lequel il a été taillé) qui détermine :

sa résonance en fondamentale ou en mode harmonique

sa stabilité dans le temps fonction de son coefficient en température

* Le quartz peut résonner en mode série (=) ou en mode parallèle (//)

Circuits typiques d'oscillateurs à quartz

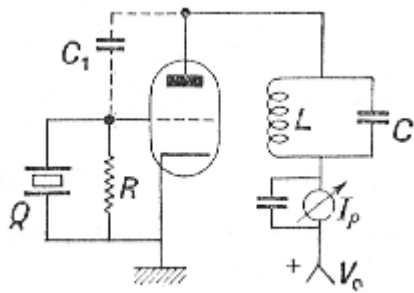


Fig. 13
Montage classique de Pierce
Entretien des oscillations avec
Couplage grille - plaque * (mode //)

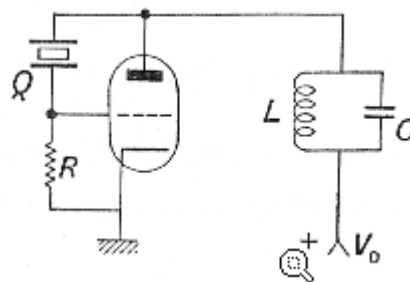


Fig. 14
montage type Pierce
fonctionnant sur la résonance
série du quartz (mode =)

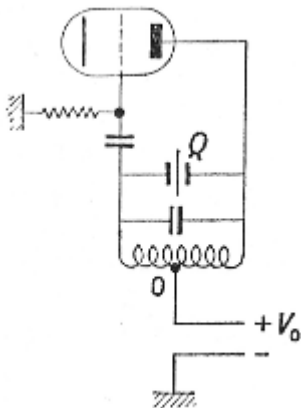


Fig. 15
Ce montage est une variante
suivant le circuit Hartley

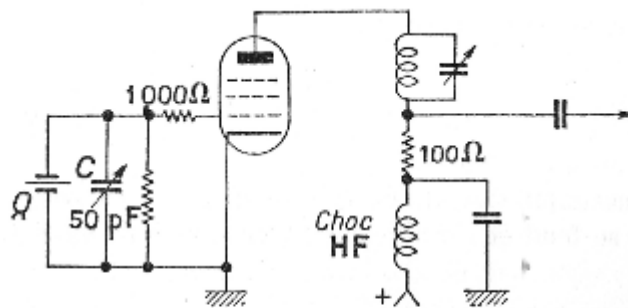


Fig 16

Montage type Miller où C permet de faire
varier légèrement la fréquence

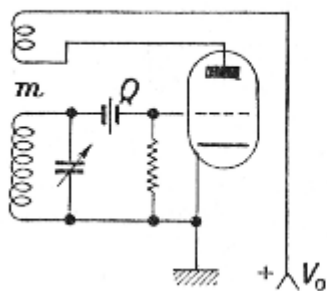


Fig. 17
Montage à faible réaction pour
Eviter l'auto-oscillation de la lampe seule

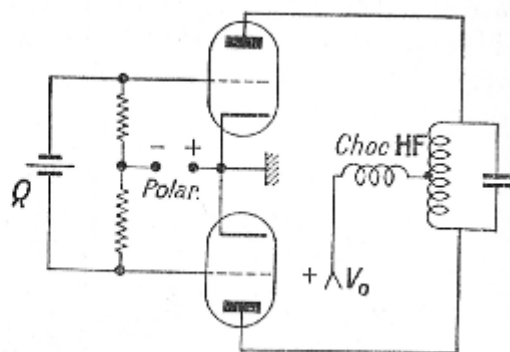


Fig. 18
montage symétrique type push-pull
pour les plus hautes fréquences

Cas particuliers : doubleur de fréquence

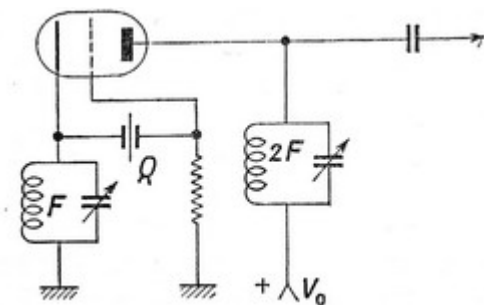


Fig. 19

Exemple type d'un doubleur de fréquence simple, mais on peut accorder le deuxième circuit oscillant sur une autre harmonique pair sans trop de problème.

Oscillateur à quartz multiplicateur de fréquence de rang élevé.

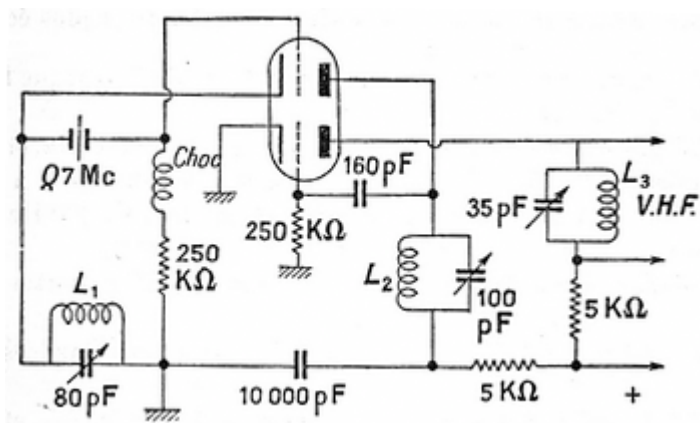


Fig. 20

Si dans cet exemple la fréquence du quartz n'est que de 7 MHz elle n'est pas restrictive, on peut travailler à des fréquences beaucoup plus hautes. La première triode fonctionne en oscillatrice avec réaction en introduisant dans la cathode une impédance élevée grâce au circuit oscillant accordé sur une fréquence légèrement supérieure à celle du quartz. Ce mode permet à la triode de générer de nombreuses harmoniques.

La deuxième triode reçoit la tension riches en harmoniques de la première lampes transmise par le circuit oscillant .Elle travaille alors en multiplicateur de fréquence.

Dans l'exemple ci-dessus le rang 12 est sélectionné avec L3 soit 12 fois plus que la « F du quartz » pour délivrer du 84 MHz.

La stabilité des quartz varie de quelques 10^{-5} /24h pour un simple caillou à quelques 10^{-7} pour un bon pilote à quartz stabilisé en température.

Par contre, les très bons pilotes à quartz thermostatés se situent dans des fourchettes de 10^{-8} à quelques 10^{-10} /24 par heures.

Un chapitre leurs sera consacré dans autre article ou nous parlerons des pilotes hautes stabilité et étalon de fréquence (CEPE,HP, Adret) ainsi que des fréquencemètres.

Comme vous pouvez le remarquer nous parlons ici de stabilité dans le temps et rarement de précision, cela sera également expliquer avec l'article précité ci-dessus.

NOTA 2.

Après ce rappel des différents circuits et oscillateurs, nous vous proposons de comparer les différents types de générateurs, leurs évolutions et les caractéristiques intrinsèques.

A / Ce qu'il faut de suite signaler : quelques soit la qualité des dits générateurs, tous souffrent d'un handicap Ils n'indiquent pas la fréquence réellement délivrée.

B / en fonction de leur utilisation ils peuvent présenter certaines limitations.

C / La plupart des appareils se réfèrent aux oscillateurs décrits précédemment ne sont pas programmables

D / pour beaucoup la résolution en fréquence est limitée

Conclusion : l'évolution, des techniques de communications, des transmissions radio, des radars, des faisceaux hertziens, liaisons satellites..etc, a imposée une recherche poussée pour rendre plus performant les générateurs de fréquence quelques soit leurs fréquences.

Modernisation des appareils :1 / Les premières modifications a consisté :

A / inclure un fréquencemètre dans certain appareils.

*Cela indiquait la fréquence de sortie, mais ne remédiait pas à la dérive de fréquence.

*Cela n'améliorait pas la résolution en fréquence.

B / a utiliser une cavité accordable pour améliorer la pureté spectrale
a associer un fréquencemètre pour contrôler la fréquence.

C / a faire un système d'asservissement par pas avec une source de référence pour avoir plus de précision et améliorer la stabilité. Cela a conduit au développement des premières boucles d'asservissement en fréquence et à la sortie des générateur asservis.

D / a étudier et développer les premiers synthétiseurs de fréquences

L'utilisation de boucles d'asservissement en phase « phase lock » a permit de résoudre beaucoup des problèmes précités.

2/ Générateurs modernes ou générateurs-synthétiseurs de fréquence.

*Ils sont équipés de pilotes à quartz très stables

* Equipés de boucles de phase offrant la résolution désirée en fréquence et la stabilité de toutes les fréquences générées puisque verrouillées sur le pilote à quartz référence de l'appareil (10MHz)

*Ces appareils sont programmables dont utilisables en mesures automatiques (prod ou contrôle)
Ils sont également équipés d'atténuateur de précision.

Un élément clé de qualité et de comparaison est le coefficient de surtension ou qualité des oscillateurs utilisés dans les générateurs : Le fameux « Q » décrit dans tous les manuels. Il détermine entre autre, le niveau des bandes latérales de bruit (en particulier de bruit de phase) relatif au modèle de « Leeson » dont nous parlerons ci après.

III / Etude comparative et description des générateurs

A / Introduction.

La génération de fréquence couvre un domaine très vaste, de quelque milli-hertz à quelques dizaines de gigahertz pour les applications les plus conventionnelles.

Pour faciliter la compréhension et ne pas rendre cette lecture trop fastidieuse nous vous proposons de ne pas parler des générateurs inférieurs à 1MHz qui peuvent utiliser des oscillateurs « RC » « à battement » ou des techniques de déphasage car ils ne présentent pas grand intérêt et sont souvent des appareils bas de gamme. De même pour les instruments travaillant à des dizaines de gigahertz qui sortent un peu de nos pôles d'intérêts **Parlons donc de la gamme «générateurs de 1 MHz à 1Gigahertz »** classée en plusieurs catégories suivant la technique qu'ils utilisent en retenant un critère dont on parle très peu ! Du coefficient de qualité donc de « Q » et pour faire une note d'humour, rassurez vous on ne parle pas de choses cochonnes !

Du facteur « Q » dépend la pureté spectrale près de la porteuse (le spectre de bruit si vous préférez) ainsi que du point de jonction ou ce bruit rejoint le bruit résiduel de l'oscillateur et des autres circuits du générateur.

Insistons bien sur ce point qui est fondamental et qui a été le problème le plus important ces dernières décennies. Un exemple typique, depuis les années 1982, avec le début des radiotéléphones (les premiers radiocom) qui avaient la taille et le poids d'une batterie, et étaient surtout utilisés dans les voitures et pour causes; on était loin des portables actuels ! Puis il y a eu les radiocom 2000 et toutes les évolutions que vous avez connues pour arriver aux « 4G actuel ».

Pour revenir à nos critères la difficulté était de faire tenir beaucoup de canaux de communication dans des bandes de fréquences allouées et souvent restreintes, d'où des canaux étroits.

Donc d'une façon imagée, si le spectre émis a la forme d'un rectangle haut et étroit cela fonctionne mais s'il a la forme d'un triangle isocèle les cotés de ceux-ci (les flancs si cela est plus imagés pour vous) empiètent sur les canaux voisins (ceux de part et d'autres) les conversations peuvent se mélanger ou interférer d'où la nécessité de signaux très propres.

Comme les générateurs servaient aux niveaux des études et de la production ils devaient avoir des caractéristiques encore plus sévères que les produits qu'ils testaient pour en assurer la qualité.

Voilà pour vous situer le besoin et les caractéristiques demandées aux instruments les plus récents. Nous allons maintenant vous donner plus de détails.

Mais avant tout :

Une question souvent posée ? Qu'est ce que c'est un synthétiseur ?

C'est un générateur qui élabore la fréquence avec des techniques numériques.

La fréquence est générée chiffre par chiffre, en général on dit par décade.

La fréquence est très précise et stable car référencée à un pilote à quartz très performant.

Il s'appelle synthétiseur de fréquence s'il ne fait que fournir des fréquences et éventuellement des niveaux

Exemple, des pilotes d'émetteurs (comme ceux utilisés par TDF ou France télécom pour les transpositions des fréquences satellites ou faisceaux hertziens.)

Il s'appelle générateur-synthétiseur de fréquence s'il fournit des modulations et/ou des wobulations indispensables pour toutes les mesures en laboratoires d'études ou sur les bancs de teste automatiques.

B / Différentes catégories de générateurs retenues

- | | |
|--|--|
| 1/ Oscillateur LC (CO [pour circuit oscillant] | = self +capacité à air. |
| 2/ Oscillateur LC (faible Q) | = self+capacité + varicap. |
| 3/ Oscillateur LC (synchronisé sur quartz) | = (idem 2 mais meilleure stabilité en fréquence) |
| 4/ Oscillateur LC (forte surtension, à cavité) | = ex : 608 et 8640 HP, SMDU de RS ; |
| 5/ Oscillateur LC (forte surtension, à cavité) | = asservit en F , idem 4, avec meilleure stabilité. |
| 6/ synthétiseur (tout type) | = synthèse de fréquence. |
| 7/ générateur-synthétiseur type 7100 AE | = aussi appelé générateur cohérent en phase. |

C / représentation de 2 types de signaux pour imager le bruit près de la porteuse

Spectre d'un générateur LC type 606.

Spectre d'un synthétiseur 6100

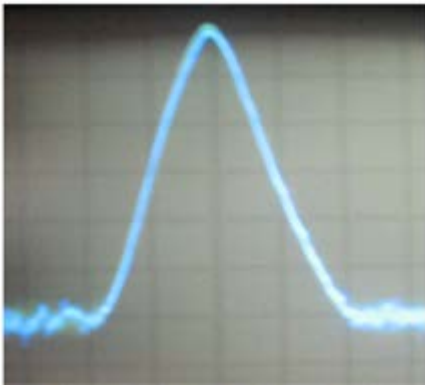


FIG 21

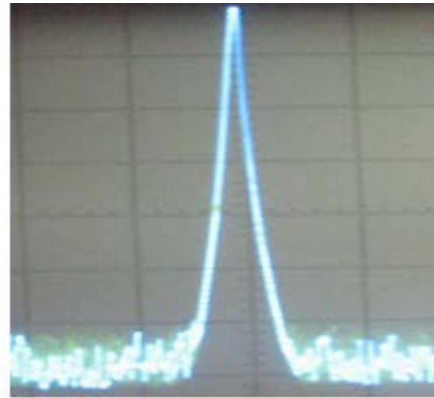


FIG 22

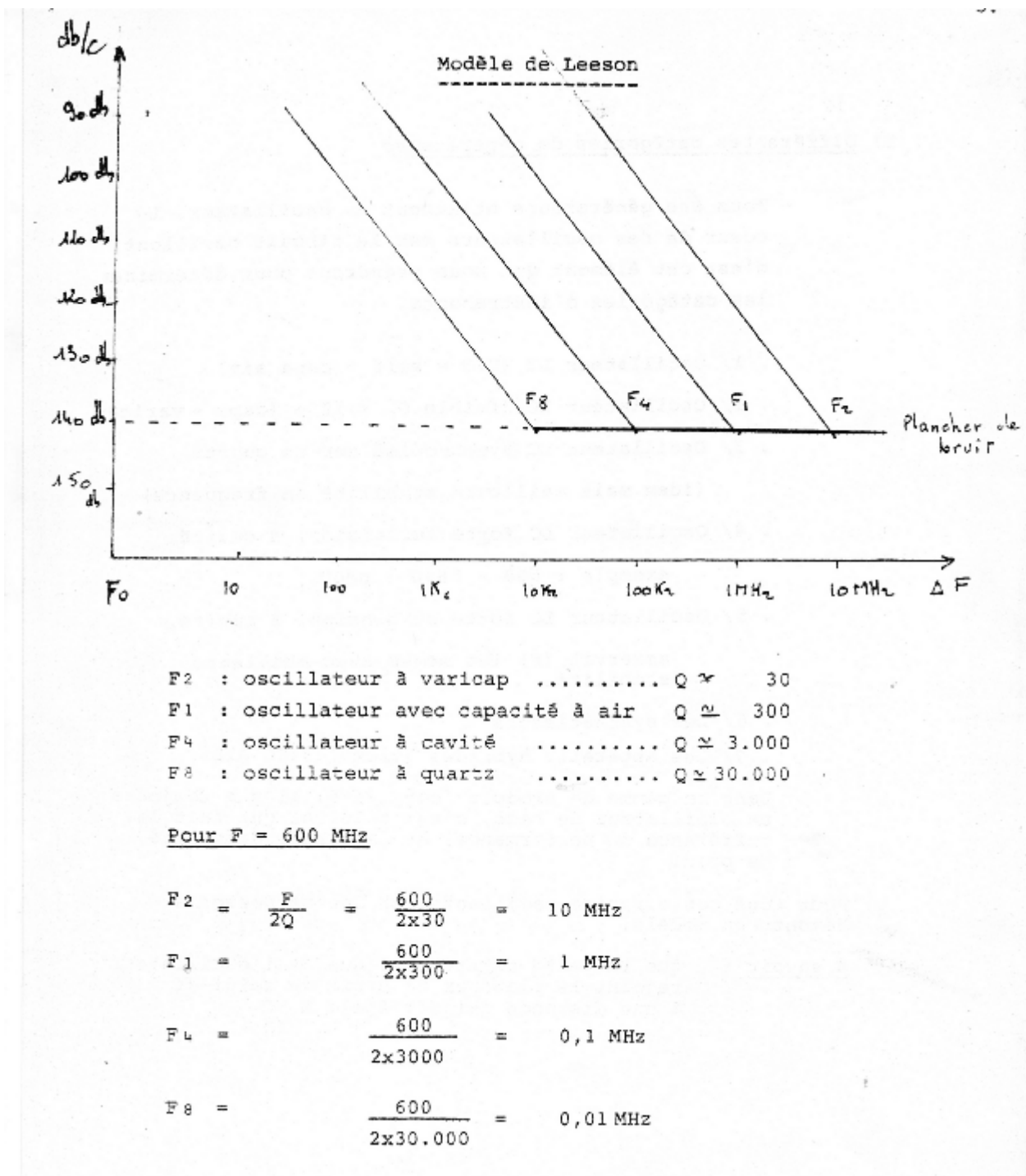


FIG 23

Commentaires :

C'est le type d'oscillateur utilisé dans le générateur qui détermine la qualité spectrale de celui-ci. Sur l'exemple schématisé ci-dessus, la fréquence est de 600MHz . On constate que les différentes pentes des signaux de sortie de F8 à F2 représentent la diminution des bandes latérales de bruit près de la porteuse (FO)

Les signaux observés sur les différents générateurs s'écartent de F0 en fonction du coefficient de surtension ou de qualité de l'OL.

La fin de la pente rejoint le plancher de bruit du générateur à un point qui est égal à F0 divisé par 2Q conformément au modèle de Leeson.

(FO pour la fréquence générée, Q pour le coefficient de qualité de l'oscillateur (OL).

Plus le « Q » du circuit sera élevé, meilleur sera le bruit de phase à une distance donnée de la porteuse jusqu'à ce que l'on atteigne le plancher de bruit du générateur lié à l'ensemble des circuits de celui-ci.

En règle générale la pente de l'oscillateur descend en F-2 ou 1 /F2. La valeur courante est de 6dB par octave ou de 20db par décade pour les systèmes numériques

Evolutions des générateurs (des générateurs aux synthétiseurs)

Vers les années 1964, on a voulu améliorer la stabilité de fréquence des générateurs en les synchronisant sur des Quartz ou des fréquences de références données.

Dans un premier temps, la synchronisation était faite par des appareils extérieurs, puis il y a eu des boucles d'asservissement en fréquence dans les appareils ou réalisées à l'aide d'un compteur fréquence-mètre extérieur associé. La fréquence était beaucoup plus stable mais le spectre de fréquence inchangé.

Puis les fabricants sont passés aux boucles d'asservissement en phase.

Le problème devient identique à celui des synthétiseurs.

Deux éléments importants sont à prendre en compte :

1/ le taux de division ou de multiplication de la boucle .

2/ la bande passante d'asservissement

Boucle de phase

La bande passante est limitée par la fréquence max à générer divisée par le rapport de division.

L'élément commun aux deux étant la fréquence de référence .

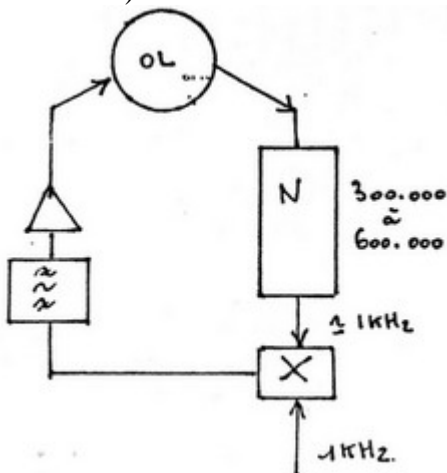
D'après le théorème de l'échantillonnage, une boucle d'asservissement n'est stable que si la bande passante d'asservissement est égal ou inférieure à 1/2 de F/N.

OL de 300 à 600 MHz

bande passante = 1/2 F/N

$$\frac{600.000}{600.000} = \frac{1}{2} 10.3 \text{ soit } \mathbf{500 \text{ Hz}}$$

(F= 600MHz , N= 600.000)



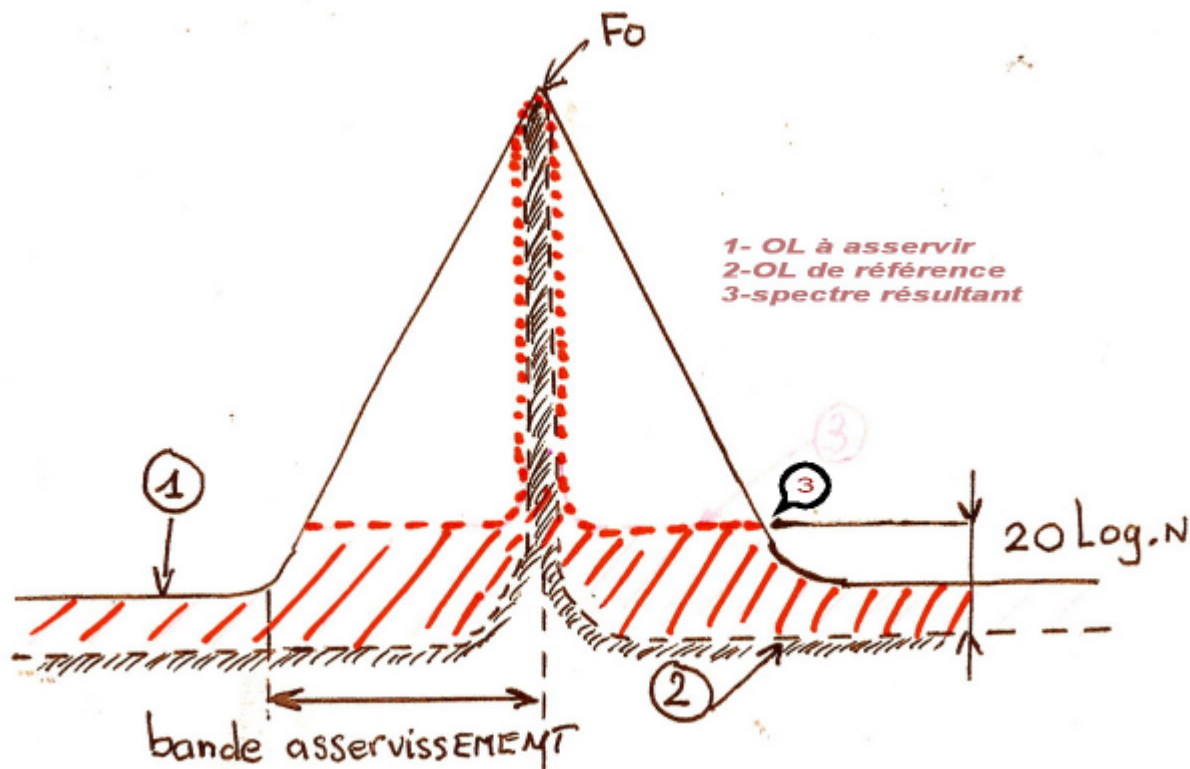


FIG 25

L'erreur transmise à l'oscillateur est égale à l'erreur en boucle ouverte, divisée par le gain de boucle (G). Donc si G est très grand, l'erreur est très faible. Cela veut dire que le spectre dans la bande considérée sera égal au spectre de référence. Il y a donc copie de celui-ci.

On débruite donc le signal de l'OL à asservir, mais il faut tenir compte du taux de multiplication « N » car il dégrade le bruit du signal de référence (comme expliquer plus haut) dans un rapport de $20 \log$ de N .

On arrive donc à la génération par synthèse de fréquence ou on peut deviner 2 extrêmes :

A / un seul oscillateur faisant un grand nombre de pas, donc N important, forte remontée du bruit, grande excursion de fréquence, coût relativement faible.

B / peu de pas, faible excursion de fréquence, référence de fréquence plus haute, très bonne pureté spectrale

Entre ces deux extrêmes, beaucoup de types de synthèses !

Commentaire :

Avant de résumer rapidement avec vous les différents types de synthèse de fréquence, je voudrais vous faire part de mes premières réactions quand j'ai découvert ces nouvelles techniques et principes d'élaboration des fréquences.

Je ne doute pas que vous ne partagiez les mêmes remarques que moi et que vous ne soyez pas tentés d'arrêter là votre lecture ! En effet je connaissais les principaux types oscillateurs comme nous l'avons rappelés dans les paragraphes précédents, de même que les principales techniques « disons analogiques » pour créer des générateurs.

Quand j'ai découvert les premières explications concernant la synthèse de fréquence, j'ai pensé que les ingénieurs chargés de ces études étaient soit des gens compliqués et torturés ou des techniciens géniaux

« Pourquoi faire compliqué alors qu'il était relativement simple de générer des signaux ».

Alors ! Continuez la lecture, la bonne réponse est la deuxième et je vais vous le démontrer en utilisant des termes les plus simples et les moins rébarbatifs possibles.

Il y a différentes techniques pour créer la fréquence dans les synthétiseurs. Comme je vous ai promis des explications simples, je vais vous prendre par la main (si vous me permettez cette expression) pour vous faire découvrir l'intérieur d'un instrument et ses différents circuits. Je prendrai comme support la synthèse itérative avec un ancien appareil de chez Adret Electronique célèbre référencé CS 201 (générant de 0.1Hz à 2.MHz.) Sa structure est très facile à expliquer et elle est transposable jusqu'à plusieurs gigas avec des principes quelques peu identiques. Je vous commenterai bien entendu les autres types de synthèses existantes une fois que vous aurez compris et j'espère être enthousiasmé par ces techniques.

La synthèse itérative : Cette synthèse de fréquence correspond à une suite d'opérations purement arithmétiques de divisions et de mélanges successifs. Chaque fréquence fournit possédant la précision et la stabilité du quartz, elle est dite itérative, puisque chaque chiffre est élaboré séparément à l'aide d'un oscillateur indépendant. C'est le type de synthèse le plus souple, qui permet d'utiliser un synthétiseur comme un générateur polyvalent. Elle vous rappellera un peu les postes de radio avec les mélanges et les fréquences intermédiaires.

Le premier point ; nous avons dit dès le départ que fréquences émises avaient toutes les performances (précision et stabilité du quartz de référence de l'appareil.) Nous partons donc d'un pilote 10MHz ou 5MHz, thermostaté, qui a une stabilité de 10^{-8} par 24h (ou quelques 10^{-9} /24H sur option.) Cette référence va être divisée par des circuits spécifiques pour délivrer : du 2MHz, du 100KHz, du 10KHz, ou multiplier pour obtenir du 9MHz toutes ces fréquences étant nécessaires pour asservir les différents oscillateurs.

Décade de fréquence : Dans ce type de synthèse chaque chiffre de la fréquence de sortie est élaboré séparément par un circuit appelé : *décade de fréquence (du fait qu'il y a 10 pas significatifs)* . il y a **autant de décade que de chiffre à générer.**

Dans notre exemple 0,1Hz/1Hz/10Hz/100Hz/1KHz/10KHz/

Description et explication de fonctionnement d'une décade (Par exemple celle des pas de 0,1Hz)

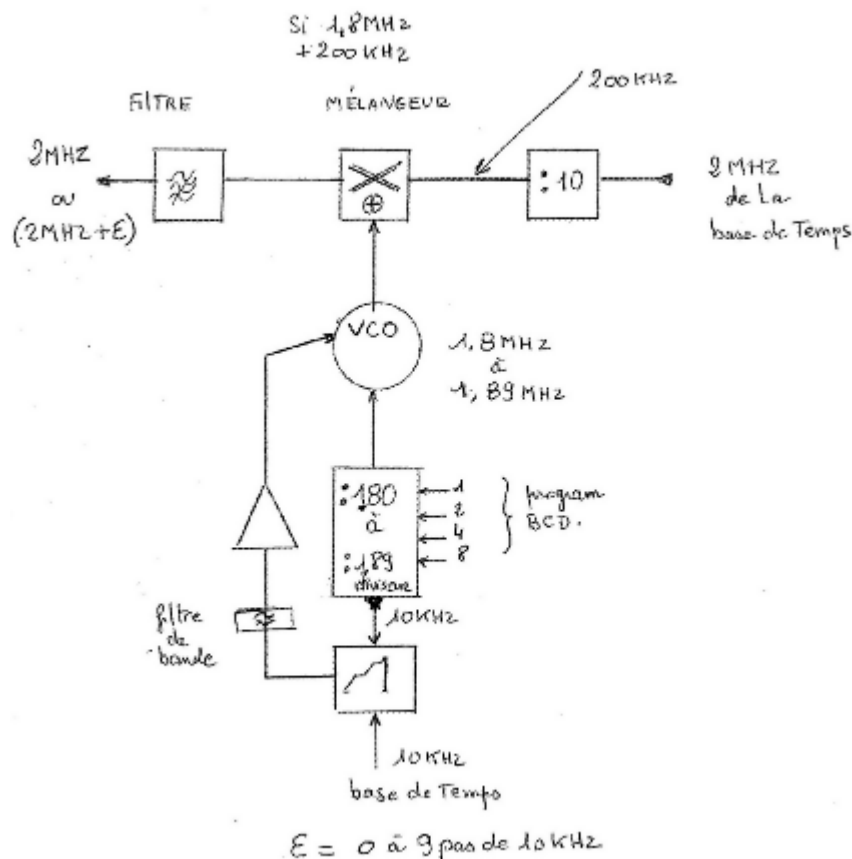


FIG 26

De droite à gauche sur le dessin : La fréquence de référence de 2 MHz en provenance de la base de temps est mise en forme et divisée par 10 dans le diviseur. Elle est envoyée dans le mélangeur aditif qui fait la somme avec la fréquence reçue du VCO soit de 1,8 MHz si le chiffre zéro est sélectionné ou programmé sur cette décade ou 1,89MHz si le chiffre neuf est validé. Nous aurons donc une fréquence de sortie qui variera de (1,8MHz+200KHz) soit 2MHz au minimum à (1,89MHz +200KHz) soit 2,09MHz au maximum.. Nous retrouvons bien 9 pas de fréquence de 10KHz correspondant à la valeur sélectionnée par l'utilisateur que nous appellerons incrément ou Epsilon sur le schéma.

Principe de la boucle de phase ou PLL.

L'oscillateur VCO est commandé par la tension issue de l'amplificateur de commande. Supposons la fréquence de 1,8MHz, celle-ci est divisée par un taux de 180 car le chiffre zéro a été sélectionné par l'utilisateur. Une fréquence de 10KHz est donc présentée sur le circuit comparateur de phase qui reçoit aussi une fréquence de référence de 10 KHz de la base de temps. Le moindre écart donne un signal d'erreur, amplifié pour rétablir l'équilibre $F=180 \times 10$ KHz ou $F/n=10$ KHz (n étant le taux de division sélectionné).

Notez qu'il s'agit d'une boucle d'asservissement intégrale car on compare en phase et on asservit en fréquence.

Explication globale du fonctionnement

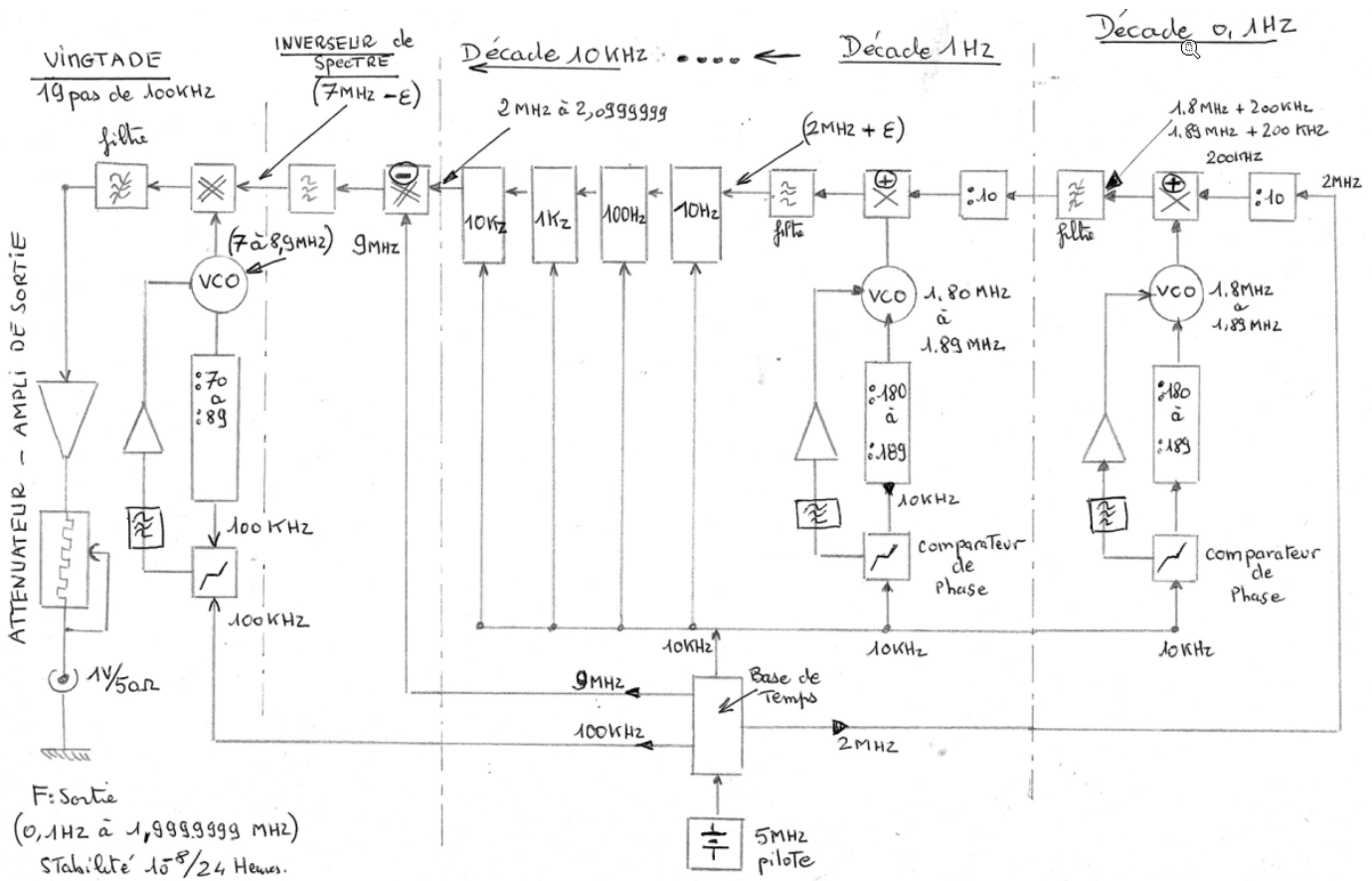


FIG 27

La première décade décrite est celle de droite du schéma global correspondant au pas ou à la résolution de 0,1Hz et vous allez comprendre pourquoi.

Supposons que le chiffre validé soit 9. la fréquence de sortie de la décade 0,1Hz est de 2,09MHz elle va attaquer le diviseur de la décade suivante (des pas de 1Hz) et la fréquence présentée au mélangeur sera maintenant 209 KHz. Si le chiffre 3 est validé sur cette décade, le VCO va délivrer 1,83MHz .la sortie du mélangeur va donner : 1,83 MHz+209KHz soit 2,039MHz .regardez bien ! Cette décade rajoute bien ces 3 x 10KHz, mais ajoute les 9x 10 KHz de la précédente divisés par 10. L'incrément a reculé d'un cran.

Cela va se passer pour chaque chiffre sélectionné et à chaque décade en allant de droite à gauche. L'incrément de cette première décade va être divisé par 10 lors de chacun de ses déplacements de droite à gauche, d'une décade à l'autre jusqu'à la dernière (celle des 10KHz) ou il sera devenu un incrément de 0,1Hz !

Si on appelle « A » la décade de droite (les 0,1Hz) puis en allant vers la gauche comme sur le dessin, « B » celle des Hz, puis « C » celle des 10Hz, puis « D » celle des 100Hz, puis « E » celle des KHz, puis « F » celle des 10KHZ . La fréquence à la sortie de la décade des 10KHZ deviendra, si on appelle « Epsilon les chiffres validés sur chaque décade (ϵ) :

Fréquence de sortie = (2MHz + ϵ) + ($\epsilon/10$) + ($\epsilon/100$) + ($\epsilon/1000$) + ($\epsilon/10000$) + ($\epsilon/100000$)

si vous préférez en utilisant les lettres données à chaque décade:

Fréquence de sortie = F + (E/10) + (D/100) + (C/1000) + (B/10000) + (A/100000)

Si tous les incréments validés avaient été 9 nous aurions en sortie

F = 2,0999999 MHz soit nos 2 MHz de porteuse avec la totalité des incréments soit : +999999 Hz..

Si tous les incréments validés avaient été 0 nous aurions en sortie

F = 2,0000000 MHz sans aucun incréments !

Cette première partie de génération va être envoyée sur le circuit suivant qui s'appelle inverseur de spectre !

Ce circuit va recevoir une fréquence de référence de 9MHz et va faire un battement soustractif avec la première partie des fréquences générées qui vient d'être décrite.

Nous aurons donc en sortie de l'inverseur de spectre (*suivre sur le schéma*) soit :

9MHz - 2,0999999 MHz soit 6,9000001 MHz ou

9MHz - 2MHz = 7MHz.

Nous aurons donc une sous porteuse variant de 6,9....MHz à 7 MHz, contenant tous les petits incréments (ϵ) de fréquence de : 0,1Hz au pas de 10 KHz .

Après passage dans un filtre de bande, cette fréquence sera prête à attaquer le mélangeur soustractif final de la « vingtade » (*parce que 20 pas ou incréments significatifs de fréquence de 100KHz chacun*).

Nous n'allons pas recommencer les explications car le principe est le même que pour la décade sauf que le comparateur reçoit deux fréquences de 100KHz pour verrouiller la PLL.

Un taux de division de 70 à 79 par pas ou une commande globale de 10 pas de 100KHz (taux de division de 80 à 89) Le taux global variera donc de 70 à 89 commandé en BCD manuellement ou par programmation extérieur.

Le VCO de cette « vingtade » pourra délivrer une fréquence de 7 MH à 8,9 MHz ce qui constituera la Dernière sous porteuse permettant de fournir la fréquence finale. (*voir sur la partie gauche du schéma*).

L'étage final : (*suivre sur le schéma*)

La Fréquence sous porteuse recevant tous les petits pas va attaquer le mélangeur soustractif effectuant la dernière opération sur les fréquence.

Cas extrêmes

Soit la vingtade fournit 7 MHz et la sous porteuse 7 MHz le battement étant soustractif : **il y a 0Hz en sortie.**

Soit la vingtade fournit 7 MHz et la sous porteuse 6,9000001 MHz le battement étant soustractif, la sortie va délivrer : 0,999999 MHz soit **99,9999 KHz** avec 0,1Hz de résolution...

Soit la vingtade fournit 8,9 MHz et la sous porteuse 6,9000001 MHz le battement étant soustractif il y a en sortie une fréquence de **1,9999999 MHz** soit 2MHz moins 0,1Hz.

Après filtrage et amplification une fréquence de 0,1Hz à 2MHz (*à 0,1Hz prêt*) est disponible en sortie.

La résolution est de 0,1Hz et toutes les fréquences générées ont la précision et la stabilité celle du quartz de référence.

Un atténuateur en sortie permet de faire varier le signal de 1V efficace sur 50 Ohms (+13dBm) à -100dB max.

Cet appareil peut fournir des modulations : AM, de 0 à 100%

: FM avec des excursions de +/- 0,1Hz à +/-100 KHz

: et des wobulations soit +/-100KHZ ou + hors synthèse.

Questions que vous ne manquerez pas de vous poser ?

Pourquoi se compliquer la vie ! En utilisant des sous-porteuses et des fréquences aussi hautes pour générer du 2 MHz ?

Il y a une règle d'or pour éviter les raies parasites liées à la synthèse de fréquences et aussi les raies harmoniques en relations avec celles-ci .Il faut que les sous porteuses utilisées dans le plan de fréquence de l'instrument soient au minimum dans un rapport 3 avec la fréquence de sortie. Ce sont les mêmes précautions afin d'obtenir la meilleure pureté spectrale qui préconisent d'utiliser les techniques d'inverseur de spectre et de mélanges successifs des sous porteuses .

Après avoir utilisé ce type de synthèse très caractéristique et facile à expliquer , nous allons vous parler des autres types de synthèses.

Différents types de synthèse de fréquence

1) Synthèse « monoboucle »

Lorsque la bande à couvrir n'est pas trop importante et lorsque la valeur du pas est d'au moins quelques kHz, il est possible de réaliser un synthétiseur indirect ne comportant qu'une seule boucle de phase. Cette technique autorise la réalisation de synthétiseurs très simples, programmables mais de performances d'autant moins bonnes que le nombre de pas augmente.

2) Synthèse digitale

Cela consiste à réaliser une période de sinusoïde sous forme d'échantillons numériques, qui une fois convertis fournissent le signal analogique désiré.

Cette technique ne fait appel ni aux filtres, ni aux boucles de phase. On part toujours du quartz mais celui-ci délivre des signaux d'horloge pour une unité de calcul arithmétique qui produit des valeurs séquentielles des différents points d'échantillonnage de la fréquence. (En général, 4 échantillons par cycle de sortie au minimum).

Ces échantillons digitaux sont alors convertis en signaux analogiques, par un convertisseur D/A et filtrés par un passe-bas. Cette technique est économique, les temps d'acquisition sont courts.

Exemple :

(fabricant utilisant ou ayant utilisé cette technique : SCHNEIDER, ROCKLAND)

3) Synthèse directe

La fréquence F égale au pas est obtenue à partir de la fréquence de référence par multiplication ou Division.

Un peigne de fréquences issues de F , contient toutes les fréquences harmoniques et une batterie de Filtres commutables sélectionne l'harmonique de rang N désiré soit la fréquence NF .

Chaque filtre doit couper les harmoniques adjacents et la commutation de filtres peut être mécanique ou électronique. Les temps d'acquisition sont très courts $< 20 \mu s$

(fabricant utilisant ou ayant utilisé cette technique ROCKLAND, FLUCKE, HP, AIL).

4) Synthèse N fractionnée

Elle fait appel à une boucle de verrouillage générant des fréquences qui ne sont pas des multiples entiers du signal de référence. Il est possible d'obtenir toute fréquence comprise entre celle de la référence et celle de l'oscillateur accordé par tension.

((fabricant utilisant ou ayant utilisé cette technique HEWLETT-PACKARD°

5) Synthèse itérative

C'est le type de synthèse retenue par ADRET, la synthèse de fréquence correspond à une suite d'opérations purement arithmétiques de divisions et de mélanges successifs. Chaque fréquence fournit possédant la précision et la stabilité du quartz, elle est dite itérative, puisque chaque chiffre est élaboré séparément à l'aide d'un oscillateur indépendant. C'est le type de synthèse le plus souple, qui permet d'utiliser un synthétiseur comme un générateur polyvalent.

· Schéma d'une décade et d'un appareil commenté.

(fabricant utilisant ou ayant utilisé cette technique · SCHLUMBERGERT, ROHDE & SCHWARZ, ADRET-ELECTRONIQUE. MARCONI.

Pour conclure

C'est grâce à l'évolution des oscillateurs, vers les générateurs puis leurs transformations en synthétiseurs que des progrès aussi rapides qu'exceptionnels ont pu être réalisés dans une multitude de domaines.

Vous n'auriez pas connu le développement et les performances des téléphones portables et de tout ce qui a suivi s'il n'y avait pas eu cette grande pureté spectrale des signaux émis ainsi que leur stabilité. C'est celles ci qui ont permis un très grand nombre de canaux sans que les conversations se mélangent.

(liées au bruit dans les canaux adjacents, pour ceux qui connaissent)

Vous n'auriez pas connu une telle évolution dans le domaine spatial si il n'y avait pas eu des signaux ultra purs et très stables. Par exemple pour avoir la précision et la stabilité dans la position d'un satellite, comme pour les rendez vous avec une station spatiale, c'est la stabilité de phase qui est liée à la pureté spectrale qui permettent ces performances.

Vous voyez le chemin parcouru depuis l'élaboration des premiers circuits électroniques associé au génie de tous les passionnés de radio qui ont permis de faire avancer toutes ces techniques. Il n'y aurait pas eu toutes ces découvertes modernes sans leurs contributions.

C'est sans aucune prétention que j'ai pris le chemin des premiers oscillateurs pour arriver aux sources de fréquence modernes comme les synthétiseurs. Sachez que celle-ci ont elles même été à la base de toutes les sources RF et hyperfréquences pour les liaisons radio, télémétrie, radar et de tous les équipements sophistiqués qui existent dans le domaine avionique et militaire que je n'aborderais pas puisque cela déborde le hors sujet.

Dernière partie : Si cet article devait être édité :

Il faut savoir que l'ensemble des figures séparées pour mise en page ou image à rajoutée en fonction des contraintes rédactionnelles sont disponible en fin de l'article référence. Ces figures sont présentées sous différentes formes ou format pour offrir le plus d'adaptabilité possible pour une mise en page. exemple : la photo ci dessous pourrait être incorporé dans le préambule.

Générateur des années 1918 pour tests des matériels (liaisons phoniques) dans les tranchées ou essais de premiers appareils de liaisons avec les avions (liaisons radiotélégraphiques guidage de l'artillerie avec avions ou ballons captifs)



Bibliographie

notes personnelles et " press book " de M.Martin.

ESE.n.5555 / 1984. la génération de fréquence par M.Martin.

théorie et pratique des circuits électronique par J Quinet ,
et A Petitclerc édition Dunod 1968.

La synthèse de fréquence " Adret électronique " 1979

par JC Reghinot et JC Pianezzi aux Editions radio.

Internet photos HP site : http://www.kennethkuhn.com/hpmuseum/hp_tour.htm