



ADRET[®]
ELECTRONIQUE

MICHEL MARTIN
INGÉNIEUR TECHNICO-COMMERCIAL
RESPONSABLE DU SECTEUR INDUSTRIE

LA GENERATION DE FREQUENCE

M. MARTIN

**école
supérieure
d'électricité**

5555

1984

RESUME DE L'EXPOSE
SUR LA
GENERATION DE FREQUENCE

- 1) Notions de base.
- 2) Comparaisons des différentes techniques (des générateurs et des synthétiseurs).
 - . Description des instruments 7100 et 740.
 - . Conclusions.
- 3) Domaine d'utilisation des synthétiseurs,
 - . en basse fréquence,
 - . en radio fréquence,
 - . en métrologie.

MICHEL MARTIN

INGÉNIEUR TECHNICO-COMMERCIAL

1) GENERATION DE FREQUENCE

A) GENERALITES

- La génération de fréquence couvre un domaine très vaste de quelques MHz à quelques GHz avec les techniques conventionnelles.
- Nous ne parlerons pas des appareils générant des signaux inférieurs à 1 MHz, qui peuvent utiliser pour ce faire des oscillateurs RC ou des procédés de battements de fréquence ou des déphaseurs qui ne présentent pas grand intérêt et sont le plus souvent des appareils bas de gamme.
- Nous allons parler plus particulièrement des appareils fonctionnant de 1 MHz à 1 GHz.
- Nous ferons plusieurs catégories d'instruments suivant les technologies utilisées, qu'ils soient à tubes ou à transistors.
- Nous ne retiendrons volontairement que quelques caractéristiques intrinsèques pour cette comparaison en parlant plus précisément des critères dont personne ne parle....

Entr ' autre, du coefficient de surtension ou de qualité du circuit oscillant (de l'oscillateur ou du générateur), d'où découle la pureté spectrale près de la porteuse, du point de jonction avec le palier de bruit suivant le modèle de "Leeson".

B) Différentes catégories de générateurs

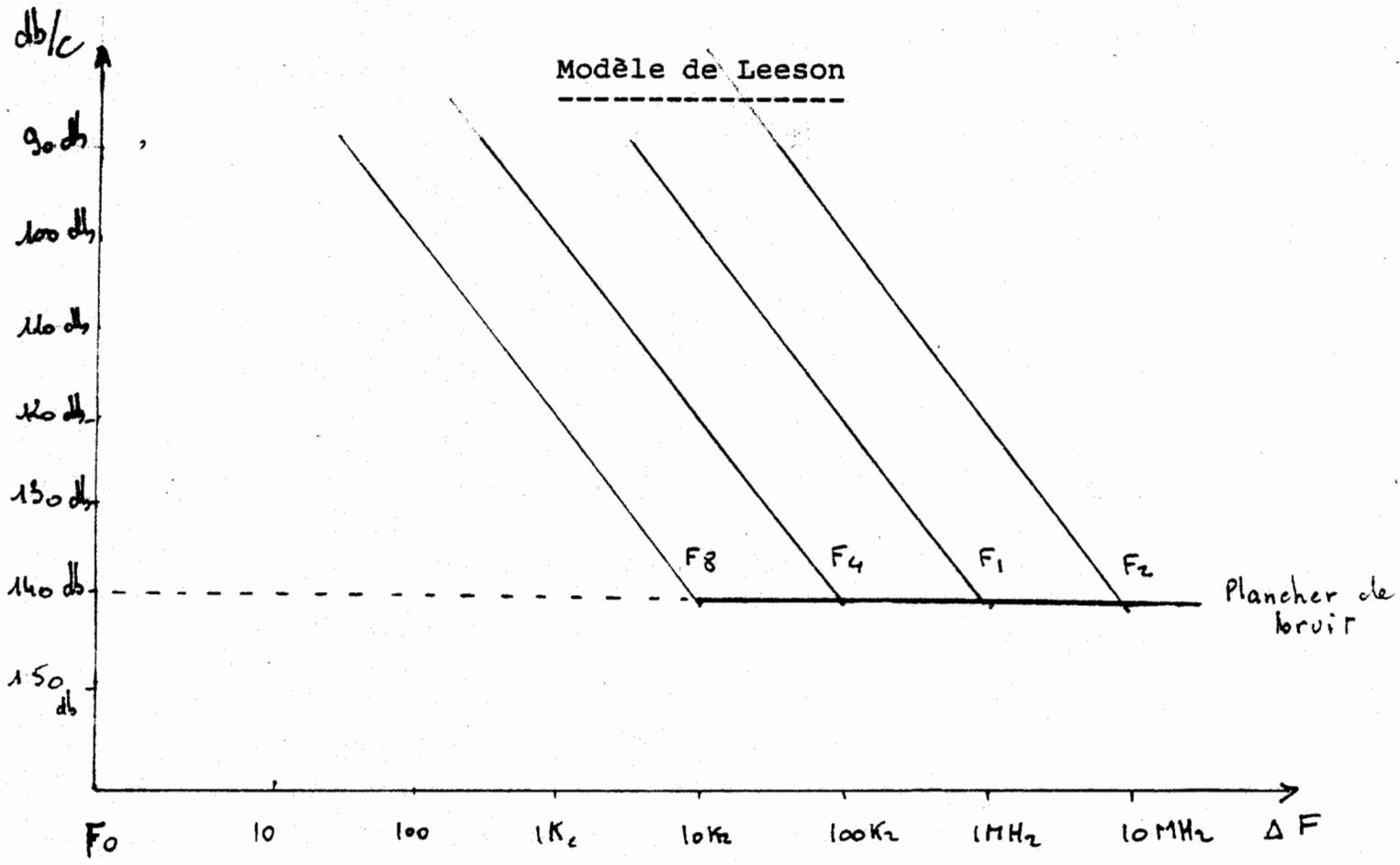
- Tous ces générateurs utilisent un oscillateur. Le coeur de ces oscillateurs est le circuit oscillant, c'est cet élément que nous prendrons pour déterminer les catégories d'instruments.

- . 1/ Oscillateur LC (C.O = self + capa air)
- . 2/ Oscillateur LC (faible Q) self + (capa + varicap)
- . 3/ Oscillateur LC synchronisé sur un quartz
(idem mais meilleure stabilité en fréquence)
- . 4/ Oscillateur LC forte surtension, à cavité.
exemple : 608 - 8640 - SMDU.
- . 5/ Oscillateur LC forte surtension, à cavité.
asservit (F) les mêmes avec meilleure stabilité.
- . 6/ Les synthétiseurs
- . 7/ Les appareils hybrides (exemple 7100 A.E.)

Dans la gamme de produit considéré, il y a toujours un oscillateur de base, c'est celui ci qui fait la différence de performance, et la grande disparité de prix.

C) Pour tous ces circuits oscillants, un dénomé Leeson a démontré un modèle,

à savoir : que la pente caractéristique de l'oscillateur rejoint le plancher de bruit de celui-ci à une distance qui est égale à $\frac{FO}{2Q}$



- F2 : oscillateur à varicap $Q \approx 30$
- F1 : oscillateur avec capacité à air $Q \approx 300$
- F4 : oscillateur à cavité $Q \approx 3.000$
- F8 : oscillateur à quartz $Q \approx 30.000$

Pour F = 600 MHz

$$F_2 = \frac{F}{2Q} = \frac{600}{2 \times 30} = 10 \text{ MHz}$$

$$F_1 = \frac{600}{2 \times 300} = 1 \text{ MHz}$$

$$F_4 = \frac{600}{2 \times 3000} = 0,1 \text{ MHz}$$

$$F_8 = \frac{600}{2 \times 30.000} = 0,01 \text{ MHz}$$

- Autrement dit, plus le coefficient de surtension du circuit oscillant est élevé, plus vite on rejoint le palier de bruit qui dépend notamment des amplis et autres éléments extérieurs au circuit oscillant.

Q = coefficient de surtension

FO = fréquence maximum de l'oscillateur.

Pour mémoire $Q = \frac{L\omega^{\bullet}}{R}$ ou $\frac{1}{RC\omega^{\bullet}}$

• Valeur de Q pour différents oscillateurs :

C° N° 2 (accord sur varicap)	Q = 30
C° N° 1 (CV à air)	Q = 300
C° N° 4 (à cavité)	Q = 3000
C° N° 8 (à quartz fréquence de 80 à 100 MHz)	Q = 30000

- On obtient donc un réseau de courbes parallèles, les unes des autres, mais dont les abscisses sont différentes.
- Plus le Q du circuit sera élevé, meilleur sera le bruit de phase à une distance donnée de porteuse jusqu'à ce que l'on atteigne le plancher de bruit.
- En règle générale la pente de l'oscillateur descend en F^{-2} ou $\frac{1}{F^2}$ la valeur est de 6 dB/octave ou 20 dB par décade.

D) Vers 1964, on a voulu améliorer la stabilité de fréquence des oscillateurs en les synchronisant sur des quartz ou des fréquences de référence données.

- . Dans un premier temps, la synchronisation était faite par des synchronisateurs extérieurs, puis il y a eu des boucles d'asservissement en fréquence incluses dans les appareils. Assez souvent, avec l'aide d'un compteur fréquencemètre, la fréquence était beaucoup plus stable mais le spectre inchangé.
- . Puis les fabricants sont passés aux boucles d'asservissement en phase. Le problème devient identique aux 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. (BP)

- Boucle de phase

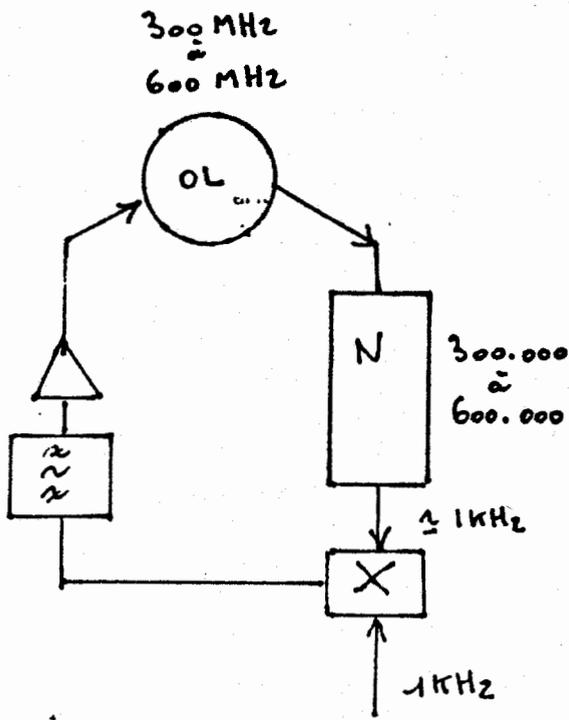
La bande passante est limitée par la fréquence max. à générer divisée par le rapport de division.

(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 BP est égale

ou inférieure à $\frac{1}{2} \frac{F}{N}$

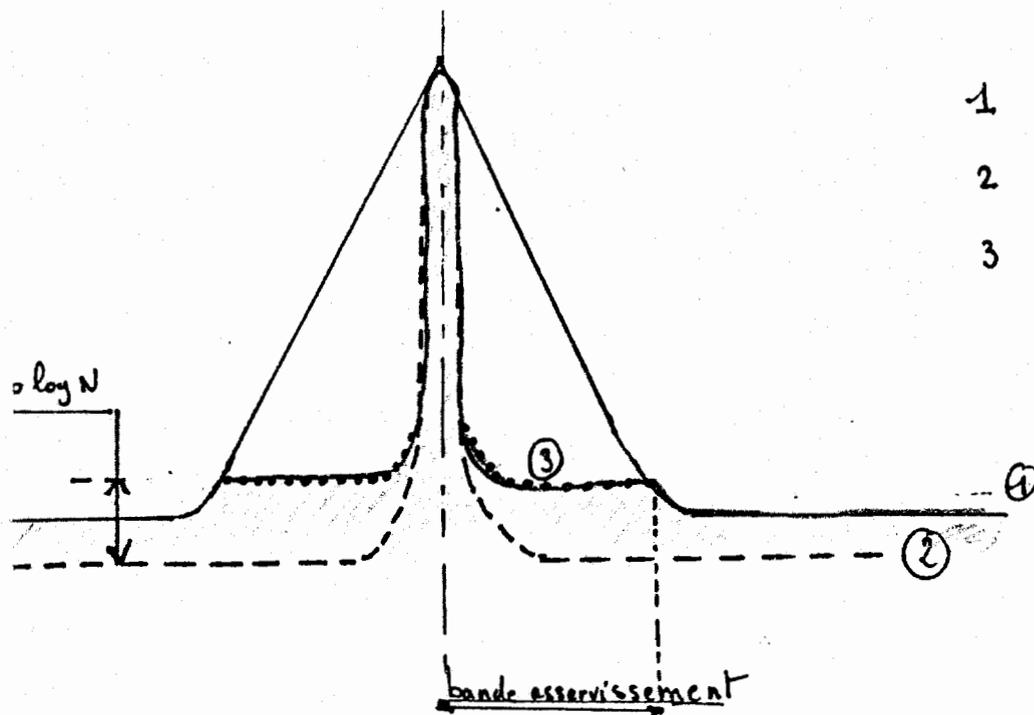
Exemple :



$$BP = \frac{1}{2} \cdot \frac{F}{N} = \frac{600}{600.000} = \frac{1}{2} 10^3 = 500 \text{ Hz}$$

L'erreur transmise à l'oscillateur est égale à l'erreur en boucle ouverte, divisée par le gain de boucle.

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 la référence, il y a donc recopie de celui-ci. On débruite donc l'oL à asservir. Mais il faut tenir compte du taux de multiplication N, car il dégrade le bruit du signal de référence dans un rapport de $20 \log$ de N.



- 1 oL à asservir
- 2 oL de référence
- 3 SPECTRE résultant

On arrive donc à la génération par synthèse de fréquence, on devine deux extrêmes.

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

OU,

- Peu de pas, faible excursion de fréquence, fréquence référence assez haute, très bonne pureté spectrale.

Entre ces deux extrêmes, beaucoup de types de synthèse.

2) DIFFERENTS TYPES DE SYNTHÈSE DE FREQUENCE

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 : (Les synthétiseurs SCHNEIDER, le 5100 de 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 $< 20 \mu s$
(Systèmes ROCKLAND, FLUKE, H.P., 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 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)
- . (Fabricants utilisant ces techniques : SCHLUMBERGER, ROHDE & SCHWARZ, ADRET-ELECTRONIQUE).

- Nous allons décrire plus particulièrement un appareil de ce type, pour vous permettre de comprendre les différentes étapes de la synthèse de fréquence.

- 1/ Explication boucle de phase (201)
- 2) Explication d'une décade (201)
- 3) Description de l'articulation d'un synthé (201)
- 4) Possibilité de mesures en fréquences active. Commentaires sur le fonctionnement, et performances de cette méthode.

6) COMMENTAIRES

- Pour éviter la remontée du bruit lié au grand taux de multiplication de boucle, chaque oscillateur travaille avec un faible taux.

Le travail est partagé entre plusieurs oscillateurs, chacun divisant la fréquence de l'oscillateur précédant donc diminuant le bruit propre de celui-ci. La sommation est effectuée en sortie sur un mélangeur, le plan de fréquence est déterminant, pour éviter les raies parasites.

rappel : synthèse a 3 boucles

Cette technique permet de travailler avec un bruit faible, mais plus il y a d'oscillateurs, plus il y a de risques de raies parasites, donc il y a un compromis entre le niveau des raies parasites que l'on peut accepter.

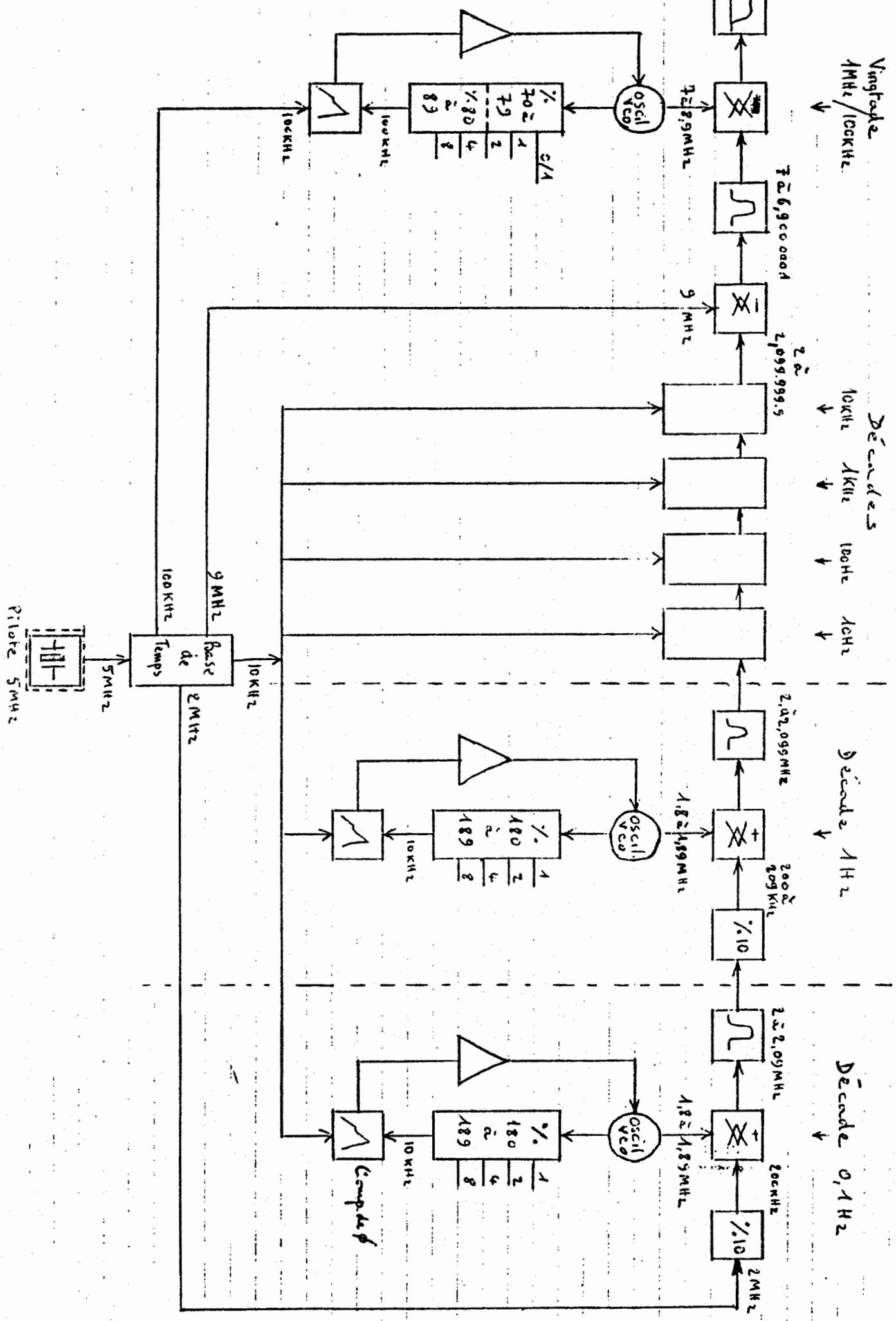
D'autre part, plus il y a d'oscillateurs, plus il y a de filtres et plus cela coûte cher.

Ces différences dans les techniques utilisées, expliquent les grandes différences de prix de ces matériels.

description : décade 201
plan 201

CS 201

I.- Plan de Fréquence

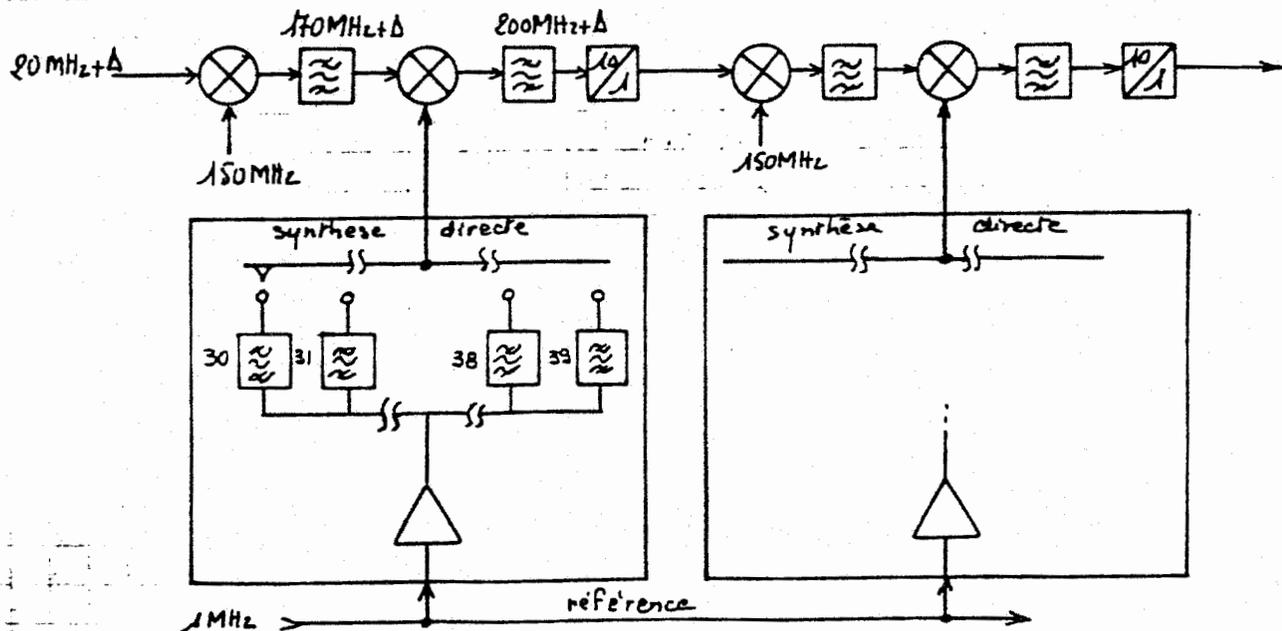


COMMENTAIRES ET EXEMPLES SUR LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE SYNTHÈSE DE FREQUENCE.

Synthèse directe.

Les premières techniques de synthèse de fréquence sont apparues vers 1950 et concernaient la synthèse directe. Un oscillateur à quartz de référence attaquait un circuit non linéaire engendrant un peigne de fréquence suivi de 10 filtres accordés sur des fréquences (par exemple 30 à 39 MHz), sortant sur un commutateur.

Cette década de fréquence était envoyée vers une chaîne de division d'incrément. Plus la década de fréquence se trouvait en début de chaîne, plus l'incrément était divisé (par exemple, pour 6 décadas, un pas de 1 MHz sur la première década donne 1 Hz à la sortie).



Chaîne itérative de division d'incrément.

2) Synthèse indirecte.

Un oscillateur est asservi au moyen d'un comparateur de phase, sur un peigne de fréquence. On vient approcher (par exemple avec des potentiomètres réglables), la fréquence d'un harmonique du 1 MHz, l'oscillateur est asservi lorsque le CPF fournit un battement zéro. (fig.1)



fig. 1

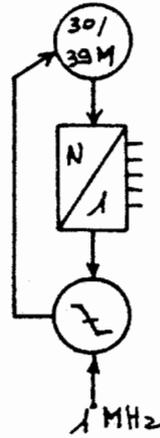


fig. 2

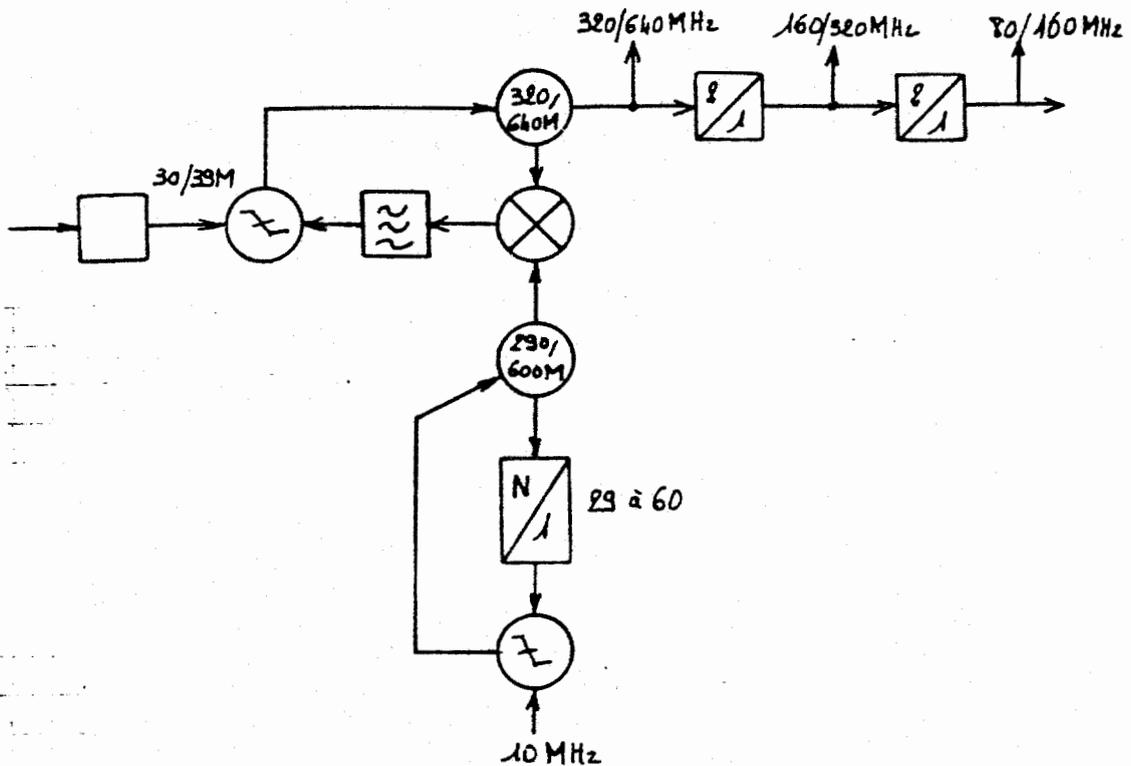
En 1966, l'idée nouvelle a été d'automatiser l'asservissement de la boucle en introduisant un diviseur programmable, ce qui a pour effet de résoudre le problème de l'approche, le comparateur de phase fonctionnant au rapport 1. Mais, dans ce système, le bruit de comparaison au niveau du CPF est remultiplié par N. (fig.2).

3) SYSTEMES DE SORTIE.

Les premiers synthétiseurs de fréquence étaient à hétérodynage, c'est-à-dire une longue chaîne itérative fournissant en sortie par exemple 30 à 39 MHz et, par l'intermédiaire d'un mélange soustractif de 30 MHz par exemple, une fréquence de 0 à 9 MHz. Mais, dans ce système, il est difficile d'éliminer les raies d'intermodulation et, le niveau de sortie étant faible, un plateau de bruit apparaissait.

Ce système devient inutilisable lorsqu'il s'agit de monter en fréquence car les oscillateurs doivent fonctionner beaucoup plus haut que la fréquence à produire. (au moins 3 fois plus haut).

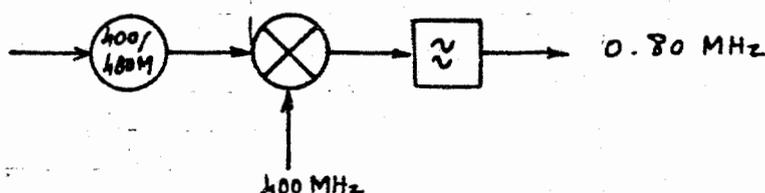
Pour obtenir une fréquence plus élevée, les incréments sont transposés sur un oscillateur de sortie couvrant une certaine gamme de fréquence.



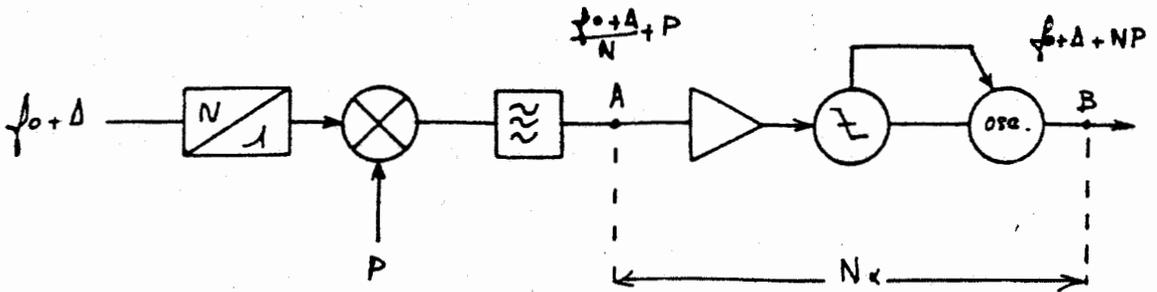
Un battement soustractif entre un oscillateur 320/640 MHz et un oscillateur 290/600 MHz asservi par l'intermédiaire d'un diviseur par 29-60 sur une fréquence de 10 MHz, est comparé dans un CPF à la fréquence d'entrée 30/39 MHz et permet d'asservir l'oscillateur 320/640 MHz.

A partir de cette fréquence 320/640 MHz, d'autres fréquences sont obtenues au moyen de diviseurs.

Inconvénients : ce système demande un module VHF très important et l'excursion étant divisée à chaque fois, serait beaucoup trop faible en fin de gamme. Pour éviter ces diviseurs, la fréquence de sortie, par exemple 400/480 MHz, est envoyée dans un mélangeur soustractif sur lequel arrive une fréquence de 400 MHz et permet d'obtenir une fréquence de 0 à 80 MHz.



PLAN DE FREQUENCE DU 6315.

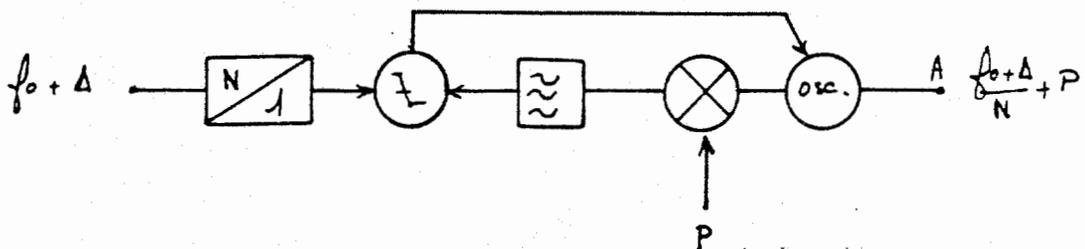


Une fréquence $f_0 + \Delta$, divisée par N , est ajoutée à une fréquence P . La fréquence obtenue $(f_0 + \Delta)/N + P$ est ensuite remultipliée par N au moyen d'un oscillateur fonctionnant N fois plus vite et asservi au rapport N par un CPF.

On obtient donc en A : $\frac{f_0 + \Delta}{N} + P$

et en B : $(\frac{f_0 + \Delta}{N} + P)N = f_0 + \Delta + NP$

Mais ce système a déjà été breveté et le niveau de bruit et de raies est inacceptable. Aussi, dans le 6315, la sommation est faite au moyen d'un oscillateur.



La fréquence $f_0 + \Delta$ est divisée par N et comparée à la fréquence d'un oscillateur, diminuée d'une fréquence P . La fréquence de sortie obtenue est donc : $\frac{f_0 + \Delta}{N} + P$.

Le niveau de bruit obtenu est de l'ordre de 110dB/Hz. Mais, quand N augmente, le taux de bruit de l'oscillateur augmente et les performances deviennent insuffisantes!

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

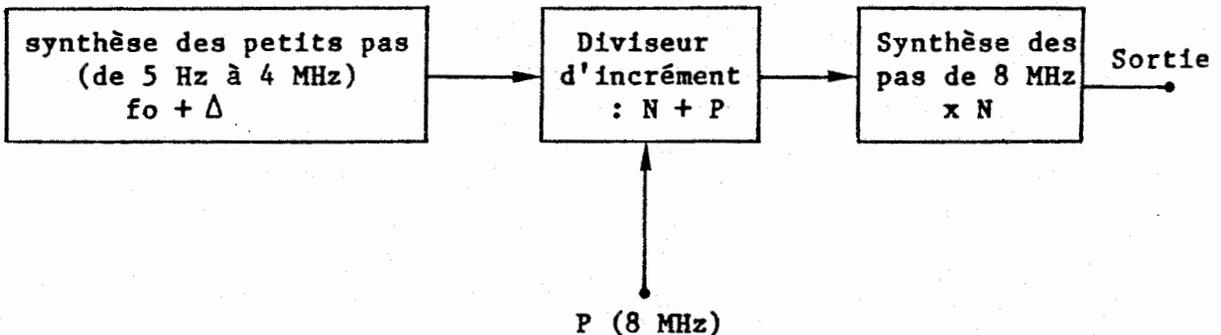
du synthétiseur 740

PRINCIPE GENERAL

Le générateur à synthèse de fréquence 740 met en oeuvre un procédé nouveau et original qui permet d'obtenir une excellente pureté spectrale tout en diminuant considérablement le nombre d'éléments nécessaires à la réalisation des parties fonctionnant en VHF.

Le procédé nouveau, breveté en France (n° 80 27 872) et à l'étranger, concerne la synthèse des plus grands pas, c'est-à-dire pour le 740, des pas de 8 MHz.

D'une manière très simplifiée, le principe du 740 peut être représenté comme ci-dessous :



Les trois blocs représentent successivement le synthétiseur des petits pas, de conception classique, générant une fréquence qui comporte une partie fixe f_0 et une partie variable constituant la somme des petits pas.

Vient ensuite un diviseur d'incrément qui réalise l'opération suivante :

$$\frac{f_0 + \Delta}{N} + P$$

La fréquence issue du diviseur d'incrément est ensuite remultipliée par N dans le synthétiseur des grands pas pour obtenir :

$$\left(\frac{f_0 + \Delta}{N} + P \right) \times N = f_0 + \Delta + NP$$

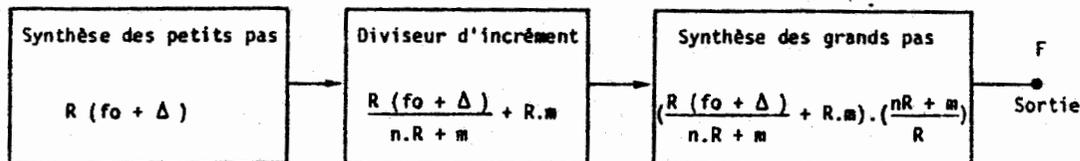
Dans le cas où f_0 est un multiple de P , il est facile de voir que la fréquence de sortie est bien la somme de la fréquence des petits pas et d'un nombre de grand pas N .

Ce procédé de synthèse a déjà été utilisé pour la réalisation du synthétiseur de fréquence 6315, avec une valeur de pas P égale à 40 MHz.

La particularité du 740, et c'est l'objet du brevet, réside dans le fait que la valeur du pas P a pu être diminuée jusqu'à 8 MHz, procurant ainsi un très grand nombre de pas et simplifiant la synthèse des petits pas, sans pour autant atteindre un taux de multiplication trop élevé, taux qui conduirait à une pureté spectrale médiocre.

L'idée consiste à faire fonctionner le synthétiseur des petits pas R fois plus haut en fréquence et à introduire un terme m aussi bien au niveau de la division de fréquence dans le diviseur d'incrément qu'au niveau de la remultiplication vers la sortie.

Ceci conduit au synoptique simplifié ci-après.



En effectuant, on obtient :

$$F \text{ sortie} = f_0 + \Delta + nP + m \frac{P}{R}$$

Il est donc clair, par rapport au principe du 6315, qu'un terme $m.P/R$ a été ajouté et qu'en choisissant judicieusement R , il est possible d'obtenir R fois plus de pas pour un même taux de multiplication n .

Dans le cas du 740, les valeurs sont :

$$f_0 = 18 \text{ MHz}$$

$$\Delta = 0 \text{ à } 8 \text{ MHz}$$

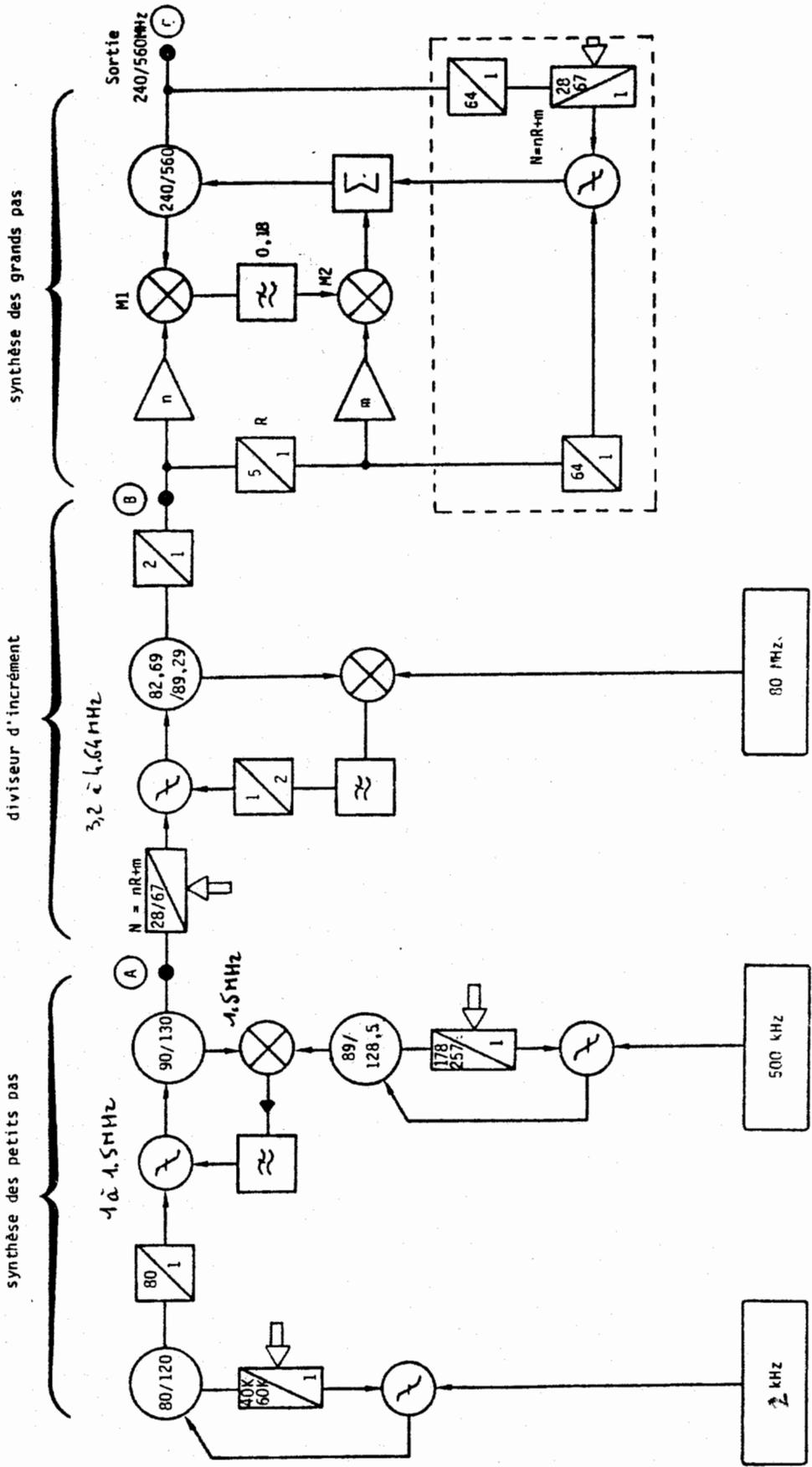
$$P = 40 \text{ MHz}$$

$$R = 5 \text{ d'où } \frac{P}{R} = 8 \text{ MHz}$$

Un schéma, page IV-4, comportant les principaux circuits va permettre de se faire une idée plus précise du fonctionnement de la synthèse 740 qui, partant d'un oscillateur à quartz de 80 MHz, permet d'obtenir une gamme de fréquence de 240 à 560 MHz en direct et 100 kHz à 560 MHz avec l'adjonction d'un diviseur et d'un mélangeur pour réaliser la gamme hétérodynée.

La synthèse des petits pas est effectuée d'une manière classique au moyen de 3 boucles d'asservissement de phase.

Synoptique de la synthèse 740.



La première boucle comporte un oscillateur de 80 à 120 MHz et un diviseur programmable 40 000 à 60 000 et réalise la synthèse de 20 000 pas de 2 kHz. Après une division fixe par 80 qui ramène la fréquence de 1 à 1,5 MHz et le pas à 25 Hz, une deuxième boucle effectue la somme de cette fréquence avec une fréquence 89 à 128,5 MHz, elle-même obtenue par la troisième boucle qui, au moyen d'un oscillateur et d'un diviseur programmable 178 à 257, génère 80 pas de 500 kHz. La fréquence somme, au point A, va donc de 90 à 130 MHz avec une résolution de 25 Hz et nous verrons plus loin que la valeur du pas est divisée par 5, de même que le bruit et les éventuelles raies parasites vers la sortie C.

La fréquence issue de la synthèse des petits pas est ensuite divisée par un taux N de la forme $nR + m$ et qui varie pratiquement de 28 à 67.

Une boucle constituée de l'oscillateur 82,69 à 89,29, d'un mélange avec du 80 MHz de référence, d'un diviseur par 2 et d'un comparateur phase fréquence, permet en fait d'ajouter 80 MHz à deux fois la fréquence issue du diviseur 28 à 67. Après division par 2, on obtient au point B une fréquence égale à la fréquence disponible en A, divisée par N, plus 40 MHz.

La boucle de synthèse des grands pas multiplie la fréquence B par N/R , soit 5,6 à 13,4, ce qui fait apparaître un taux de multiplication fractionnaire.

Cette multiplication fractionnaire est effectuée d'une manière particulière de façon à éviter la détérioration du rapport signal sur bruit.

La fréquence disponible en B est transformée en peigne de fréquence et mélangée avec la fréquence de l'oscillateur de sortie.

Une boucle d'approche comportant deux diviseurs fixes par 64 et un diviseur variable par $N = nR + m$, positionne l'oscillateur sur la bonne fréquence et il s'agit maintenant d'opérer l'asservissement fin qui permettra d'obtenir la pureté spectrale.

Le mélange M1 reçoit donc le peigne de fréquence issu de B et la fréquence de l'oscillateur. Deux cas peuvent se produire :

1) N/R est entier : une raie du spectre est égale à la fréquence de l'oscillateur. Un battement nul arrive sur le mélange M2 et après échantillonnage à $B/5$, asservit l'oscillateur.

2) N/R n'est pas entier et un battement apparaît, égal à la différence de fréquence existant entre l'oscillateur et la raie du peigne la plus proche. Ce battement est égal à $B/5$ ou $2B/5$ en positif ou en négatif, selon que la fréquence de l'oscillateur est supérieure ou inférieure à la raie du peigne.

Il est facile de voir que 5 positions d'asservissement sont possibles sur des battements égaux à $2B/5$, $B/5$, 0, $-B/5$, $-2B/5$. Il y a donc bien 5 pas effectués entre chaque pas de 40 MHz, ce qui donne une résolution de 8 MHz avec un taux de multiplication maximum de 14 par rapport à la fréquence B.

Exemple numérique :

Cet exemple donne la méthode de calcul des taux effectué par le CPU et les fréquences correspondantes aux différents points.

Le CPU détermine la valeur du taux de division du diviseur d'incrément $N = nR + m$, en prenant la partie entière du quotient de la fréquence de sortie désirée dont on a retranché f_0 , soit 18 MHz.

$$N = \text{INT} \left(\frac{F_s - 18}{8} \right)$$

Exemple : soit une fréquence de 543,21 MHz :

$$N = \text{INT} \left(\frac{543,21 - 16}{8} \right) = 65$$

Le reste de cette division est 5,21 MHz et correspond à , donc la fréquence issue de la synthèse des petits pas sera :

$$A = R (f_0 + \Delta) = 5(18 + 5,21) = 116,05 \text{ MHz}$$

Après le diviseur d'incrément :

$$B = \frac{A}{N} + 40 = \frac{116,05}{65} + 40 = 41,785384 \text{ MHz}$$

Cette fréquence, après division par 5 puis par 64, est comparée par la boucle d'approche à la fréquence de l'oscillateur divisée par 64. Ceci donne une fréquence d'asservissement de cette boucle de :

$$\frac{41,785385}{5 \times 64} = 0,130579 \text{ MHz}$$

Le compteur de la boucle d'approche divise par 65, ce qui donne donc une fréquence de l'oscillateur de :

$$0,130579 \times 65 \times 64 = 543,21 \text{ MHz}$$

Voyons maintenant le fonctionnement de la boucle d'asservissement fin. Le peigne de fréquence issu de la fréquence 41,785385 MHz comporte en particulier une raie à :

$$41,785385 \times 13 = 543,21 \text{ MHz}$$

Un battement zéro apparaît donc à la sortie du mélangeur M1 et le mélangeur M2, du type à échantillonnage, se contente de recopier la composante continue qui effectue directement l'asservissement de l'oscillateur. C'est le cas le plus simple, avec un taux de multiplication entier.

Prenons maintenant un autre exemple, propre à faire apparaître un taux de multiplication fractionnaire :

Soit 401 MHz :

$$N = \text{INT} \left(\frac{401 - 18}{8} \right) = 47, \text{ reste } 7 \text{ MHz}$$

$$A = 5(18 + 7) = 125 \text{ MHz}$$

$$B = \frac{A}{N} + 40 = \frac{125}{47} + 40 = 42,65957..$$

La boucle d'approche positionne l'oscillateur sur 401 MHz. Le spectre issu de B donne une raie à :

$$42,65957.. \times 9 = 383,9361..$$

Avec la fréquence de l'oscillateur, le mélangeur M1 donne un battement à :

$$401 - 383,9361.. = -17,0638 \text{ MHz}..$$

Ce battement est échantillonné dans M2 à B/5 :

$$\text{soit : } \frac{42,65957..}{5} = 8,5319..$$

$$\text{Or : } \frac{17,0638..}{8,5319..} = 2$$

L'asservissement s'effectue donc sur l'harmonique 2 de la fréquence $\frac{B}{5}$.

EXPLICATION DU SYNOPTIQUE

La synthèse des petits pas met en oeuvre deux cartes, la première générant 20000 pas et la seconde 80.

La "vingtmillade" comporte un oscillateur 80 à 120 MHz asservi à 2 kHz, à travers un diviseur 40000 à 60000.

Un diviseur fixe de sortie ramène la fréquence de 1 à 1,5 MHz et la valeur des pas à 25 Hz, soit 5 fois celle nécessaire en sortie.

La "quatrevingtade" comporte deux oscillateurs, le premier de 89 MHz à 128,5 MHz, réalise la synthèse de 80 pas de 500 kHz au moyen du compteur 178 à 257 et de l'asservissement à 500 kHz.

La fréquence de 1 à 1,5 MHz comportant les petits pas lui est ajoutée au moyen du deuxième oscillateur et d'une boucle d'asservissement. La fréquence de sortie 90 à 130 MHz représente la synthèse des petits pas et sera divisée par 5 vers la sortie.

La synthèse des grands pas a été longuement décrite au paragraphe précédent et comporte le diviseur d'incrément divisant les petits pas par N avec l'oscillateur 82,69 à 89,29 qui fournit deux fois la fréquence B remultipliée ensuite pour obtenir la fréquence de sortie.

Deux oscillateurs de sortie sont utilisés de manière à ce que chacun d'eux ne couvre qu'un rapport de fréquence raisonnable et de manière à réaliser la gamme hétérodynée qui permet de descendre à 100 kHz.

L'utilisation des deux oscillateurs 01 et 02, d'un certain nombre de commutateurs HF et d'un diviseur de fréquence par 2 permet d'obtenir une gamme de fréquence continue de 100 kHz à 560 MHz, comme indiqué dans le tableau.

Fréquence de sortie	Oscillateur	Gamme	Fréquence oscillateur
368 - 560 MHz 280 - 367,9 MHz	01 02	directe directe	368 - 560 MHz 280 - 367,9 MHz
184 - 279,9 MHz 122 - 183,9 MHz	01 02	: 2 : 2	368 - 559,8 MHz 244 - 367,8 MHz
0,1 - 121,9 MHz	01 02	hétérodynée	400 - 521,9 MHz 400 MHz

Pour les gammes directes et divisées, l'oscillateur utilisé est toujours asservi par le dispositif de multiplication fractionnaire qui part de la fréquence de l'oscillateur 82 à 89 MHz.

Pour la gamme hétérodynée, l'oscillateur 01 est asservi de la même manière, mais 02 est asservi à 400 MHz, directement à partir du 80 MHz du pilote et par un circuit indépendant comportant également une boucle d'approche. C'est le battement entre les fréquences des deux oscillateurs qui donne la fréquence de sortie.

Le modulateur AM est placé de telle sorte qu'il soit sur le chemin du signal dans tous les cas de figure et que, dans le cas de la gamme hétérodynée, il affecte la voie linéaire du mélangeur.

Un interrupteur HF précède le modulateur AM et permet d'obtenir la modulation d'impulsion.

La fonction modulation de fréquence est réalisée sur la carte "FM" au moyen d'un oscillateur à 80 MHz, asservi avec une bande de 5 Hz et qui reçoit, dans sa boucle, le signal de modulation FM ou sa dérivée dans le cas de la modulation de phase. En mode FM ou PM, cette oscillation est envoyée vers le diviseur d'incrément à la place du 80 MHz du pilote.

Les circuits diviseur et filtre élaborant les fréquences de modulations 400 Hz et 1 kHz se trouvent sur la même carte.

Une carte dite "analogique" assure le dosage des signaux de modulation AM, FM et PM au moyen d'un DAC* BCD, tandis qu'un deuxième DAC assure pour les modulations de fréquence et de phase, la compensation du taux de multiplication variable N qui intervient entre le diviseur d'incrément et la sortie.

La référence de niveau RF, qui permet d'effectuer les pas de 0,1 et 1 dB pour interpoler entre les pas de 5 dB de l'atténuateur, est également réalisée sur la carte analogique au moyen d'un réseau pondéré commuté par commutateur CMOS.

La carte approche comporte les boucles d'approche 01 02 avec un diviseur variable 28 à 67 et la boucle d'approche de l'oscillateur 02 à 400 MHz fixe. De plus, cette carte réunit les circuits de registres et de commande du module VHF et de l'atténuateur.

Le pilote à quartz fournit un 80 MHz très pur et comporte un diviseur par 8 qui permet d'obtenir le 10 MHz comme référence. La partie logique du 740 est constituée de deux sous-ensembles, une carte CPU et la carte face avant.

* DAC : Digital Analogical Converter = Convertisseur numérique analogique.

L'organisation de la carte CPU est un peu particulière au niveau de l'isolement des bus. En effet, il faut distinguer trois bus différents dans l'appareil :

- le bus microprocesseur qui relie le microprocesseur à ses périphériques et commande à travers des registres le bus instrument.
- le bus IEEE lié au microprocesseur à travers un circuit d'interface 68488, mais non isolé galvaniquement par rapport au bus microprocesseur.
- le bus instrument qui commande les différents modules du 740 et qui comporte un isolement galvanique par photocoupleurs.

Ainsi, l'ensemble de la partie logique est flottante et l'isolement réalisé au niveau du bus instrument. La face avant, qui comporte le clavier et les affichages, est liée au microprocesseur à travers un PIA.

3) LES GENERATEURS :

Parmi les générateurs nous allons parler plus spécialement du générateur à cavité qui est le matériel le plus performant. Contrairement au synthétiseur, le générateur offre un niveau de bruit très bas, celui ci diminuant régulièrement lorsqu'on s'éloigne de la porteuse jusqu'au moment où l'on atteint le plancher de bruit.

La différence vient du signal de sortie qui, dans la plupart des cas, provient directement de l'oscillateur.

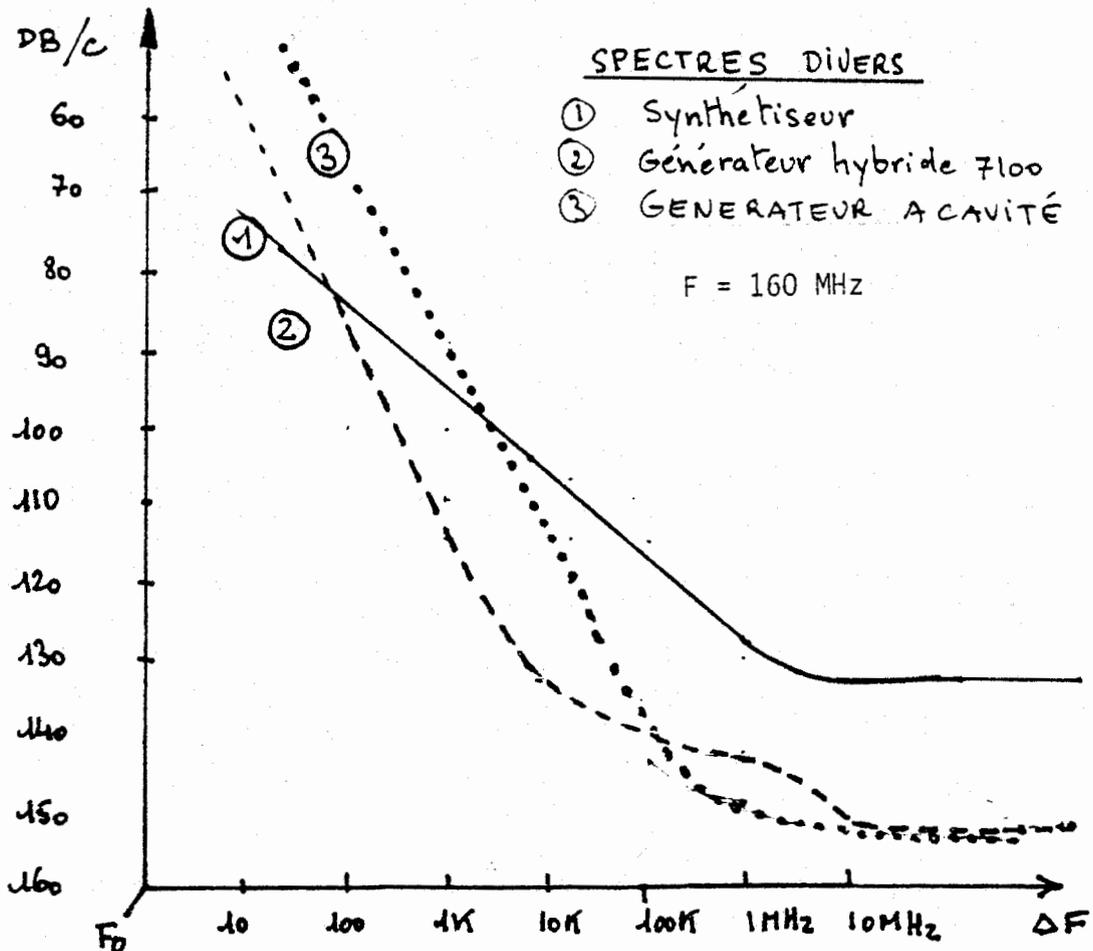
Celui-ci délivre un signal dont les bandes latérales de bruit vont continuellement descendre parce qu'il a le filtrage dû au coefficient de surtension de l'oscillateur (cavité) jusqu'à la limite $\frac{F_0}{2Q}$ (modèle de Leeson).

Il n'y a pas la limitation due à des boucles de phase, ni à une sortie sur mélangeur. Le niveau des raies parasites est souvent très faible ou inexistant.

Par contre, la stabilité de fréquence à court terme est médiocre le niveau de bruit près de la porteuse est plus important que dans un synthétiseur, les cavités sont très sensibles aux contraintes mécaniques et à la microphonie, d'autre part,

Ce matériel n'est pas programmable, la résolution n'est pas bonne.

COMPARAISON DES SPECTRES



Maintenant que nous avons fait ce tour d'horizon nous pouvons remarquer que cela se résume en fait à deux lignes de produits, avec des performances différentes mais complémentaires.

- AVANTAGES ET INCONVENIENTS

a) DU SYNTHETISEUR :

Grande stabilité de phase et de fréquence très bonne précision et résolution.

Avantage de la programmation

- Par contre, pour certaines mesures, handicap du niveau de bruit en large bande.

- Niveau des raies parasites souvent plus élevé que dans un générateur.

b) DU GENERATEUR :

Niveau des raies parasites plus faible, bruit large bande plus faible, mauvaise stabilité à court terme, pas de possibilité de programmation.

La conclusion de cette comparaison montre que ces deux lignes de produits avaient des caractéristiques intéressantes mais complémentaires.

Elles ne se trouvaient pas réunies dans un seul et même appareil avant 1978. L'avantage du prix étant en faveur du générateur, très souvent les plateformes d'études ou de fabrication étaient contraintes d'utiliser ces deux lignes de produits. Cela n'était pas économique, ne permettait pas d'avoir un parc d'appareils de mesures homogène, et conduisait souvent à des disparités importantes dans les mesures.

Cependant l'évolution des techniques utilisées ces dernières années permet maintenant d'avoir des synthétiseurs ou générateurs hybrides qui répondent aux souhaits des utilisateurs.

Les études entreprises chez les différents constructeurs ont pour but d'offrir sur le marché des instruments, conservant les performances décrites ci-dessus, mais avec des temps d'acquisition en fréquence de plus en plus rapides, environ quelques μ s, et des caractéristiques de modulations beaucoup plus performantes.

5) NOUVELLE LIGNE DE PRODUIT :

LE GENERATEUR DE FREQUENCE 7100

A) INTRODUCTION :

Fort de ces constatations les ingénieurs d'études d'ADRET-ELECTRONIQUE, ont reconsidéré le problème de la génération de fréquence dans le but de présenter sur le marché un appareil pouvant répondre aux besoins des utilisateurs.

La réponse est le 7100, générateur synthétiseur hybride, programmable qui regroupe les meilleures performances des deux lignes de produits comparés ci-dessus.

Pour des conditions de prix données, la solution n'était pas dans les procédés classiques de synthèse, puisqu'il y avait la limitation due aux nombreuses opérations arithmétiques (+, -, ., :, X,) qui font partie intégrante du principe de synthèse et font perdre environ 40 à 45 dB sur le bruit de phase de référence.

- L'utilisation d'une cavité ne pouvait pas être retenue, puisque nous désirions une bonne résolution, une très bonne stabilité et la possibilité de programmation, objectifs difficiles sinon impossibles à réaliser économiquement avec cette technique. Nous avons donc dû ^(innover) ~~(inventer)~~ et le 7100 est l'aboutissement de 4 années d'études.

Les recherches fondamentales ont été faites sur la pureté spectrale des oscillateurs libres et ont permis d'obtenir 168 db:Hz à 20 KHz de F^0 , d'autre part sur la stabilité des oscillateurs à quartz ultra stables, et nous approchons désormais de 10^{-10} de stabilité.

- entre temps, l'évolution technologique a permis à des sociétés comme ROHDE & SCHWARZ, RACAL, HEWLETT PACKARD, de développer d'autres matériels performants, mais utilisant des techniques de synthèse pures dont les prix sont beaucoup plus élevés. La solution ADRET est une des solutions les plus économiques. A l'origine notre choix a été motivé par une étude de marché.

- GENERATEUR HYBRIDE TYPE 7100

- Il offre les avantages d'un générateur à cavité, associés aux avantages des synthétiseurs, son prix est très compétitif. Il est apparu sur le marché en Septembre 1978 et cela a été une première mondiale.
- Le 7100 n'est pas un pur synthétiseur, c'est une hybridation des différentes techniques décrites précédemment.
- Pour respecter des objectifs, l'oscillateur aurait dû avoir un "Q" voisin de 5000 à 500 MHz, ce qui n'était pas possible avec une cavité et, encore moins avec des varicaps, ne serait ce qu'à cause de la limitation physique des composants.

Pour contourner cette difficulté, il était possible de réaliser cet oscillateur à une fréquence plus basse, des calculs nous donnaient d'ailleurs des conditions optimum vers 20 MHz.

- A ce moment là, il était possible d'avoir la même pureté spectrale mais avec un "Q" diminué dans le rapport des fréquences soit 25 fois plus faible et de l'ordre de 200.

Cela était possible, des études entreprises sur des oscillateurs depuis quelques années permettant d'obtenir des "Q" de 300 à ces fréquences.

(Un point intéressant à rappeler, par exemple, le coefficient de surtension d'une varicap est inversement proportionnel à la fréquence pour une tension de commande donnée)

(Explications verbales).

- D'autre part, la pureté spectrale est améliorée parce que l'on travaille 25 fois plus bas et à qualité spectrale égale, le spectre s'est rétréci dans un rapport 25.

Autrement dit, on gagne sur les performances spectrales comme le carré du rapport des fréquences.

- Oscillateur 20/25 MHz du 7100

- C'est ce qui a été réalisé. Nous avons un oscillateur travaillant de 20 à 25 MHz avec la pureté spectrale espérée ; celle que l'on aurait avec une cavité extraordinaire puisqu'un Q de 300 à 20 MHz est équivalent à un Q = 25 fois plus élevé à 500 MHz soit, 7500 , ce qui n'a jamais été réalisé jusqu'à présent.
- Nous avons bien tourné la difficulté puisque nous avons un oscillateur à forte surtension, à haute pureté spectrale qui présente un shift maximum apparent de ± 5 MHz, mais cela ne résout pas notre problème HF. (explication verbale sur le shift).

- Par contre, on peut parfaitement l'asservir, puisqu'il y a des varicaps, et effectuer une sorte de mélange entre un oscillateur à forte surtension et un synthétiseur monoboucle, faisant un grand nombre de pas, par exemple 1 kHz, les temps de commutation seront lents, mais il faudrait travailler jusqu'à 500 MHz.

Il y a bien une solution, qui serait de transposer la qualité de cet oscillateur sur toute la gamme de fréquence, sans détérioration et cela va être fait par l'oscillateur HF.

- Oscillateur HF du 7100

- Nous avons vu qu'il était difficile de faire un oscillateur 500 MHz avec une pureté spectrale et un niveau de bruit correspondant à nos souhaits.

Par contre, un oscillateur à quartz peut avoir un coefficient de surtension de 10^6 en BF et 10^{-5} vers 100 MHz.

Nous avons réalisé un tel oscillateur, travaillant à 80 MHz. Son coefficient de surtension est compris entre 100 et 150.000 et son bruit à 20 kHz de la porteuse est au maximum de - 168 dB/Hz.

Si on réalise un dispositif multiplicateur de cette fréquence de 80 MHz, associé à un système auxiliaire faisant des pas de 10 MHz uniquement, nous aurons un taux de multiplication faible et la pureté spectrale sera peu dégradée.

- Pour mémoire $OL = 640 \text{ MHz}$
- " " $N = 8$
- " " $20 \log N \simeq 18 \text{ dB}$
- Bruit plancher $168 \text{ dB} - 18 \text{ dB} \simeq 150 \text{ dB}$.

(Explications verbales)

Donc, si nous savons résoudre le problème de multiplication et de division à faible bruit, nous aurons trouvé la solution.

- Il suffira donc de faire la somme de l'oscillateur BF et de l'oscillateur HF pour élaborer d'une façon continue toute une gamme de fréquence avec le pas du kHz jusqu'à 650 MHz.
- En fait, il y a vraiment l'association de deux techniques, on retrouve un oscillateur à cavité ou son équivalent, mais on évite les difficultés rencontrées vers 500 MHz ou l'on atteint la limite physique des composants, on retrouve toutes les qualités d'un oscillateur à cavité, on peut faire de la FM car elle est effectuée avec cette pseudo qualité et la pureté spectrale est due à une surtension.
- On retrouve une technique de synthèse, mais très particulière pour faire des grands pas de 10 MHz avec un taux de multiplication très faible.
- C'est l'association de ces deux techniques qui a rendu possible la réalisation de ce générateur et le respect des objectifs que nous nous étions fixés.
- Il ne faut pas terminer cette description sans parler de la 3ème partie du 7100 sans quoi rien n'aurait été possible, la partie gestion.

- En effet, cet appareil est entièrement contrôlé par un microprocesseur qui effectue la commutation des différents oscillateurs, les changements de gamme, en fonction des ordres donnés par l'utilisateur via le panneau avant, ou par le calculateur extérieur en cas de programmation.

EXEMPLES D'UTILISATIONS

1) EN BASSE FREQUENCE :

Mesures en téléphonie, études des filtres, vibrations de structure.
Servomécanisme, asservissement, étude géophysique, etc...
Acoustique sous-marine, sonar, études médicales.

2) EN RADIO-FREQUENCE :

OL de référence, ou de transposition, mesures labos (émission réception)
générateurs de signaux tests, stimuli.

3) EN HYPER :

OL de référence pour chaîne de transposition, câbles Hertzien, radar,
stations terriennes.

4) EN METROLOGIE :

Générateur de référence délivrant toutes les fréquences avec la précision et la stabilité du quartz interne, ou de la référence extérieure (horloge atomique).

Possibilité de mesures rapides et précises en fréquences active, toutes gammes de fréquence. Adaptation de la synthèse en mesures :
mesureur d'écart de fréquence (110).