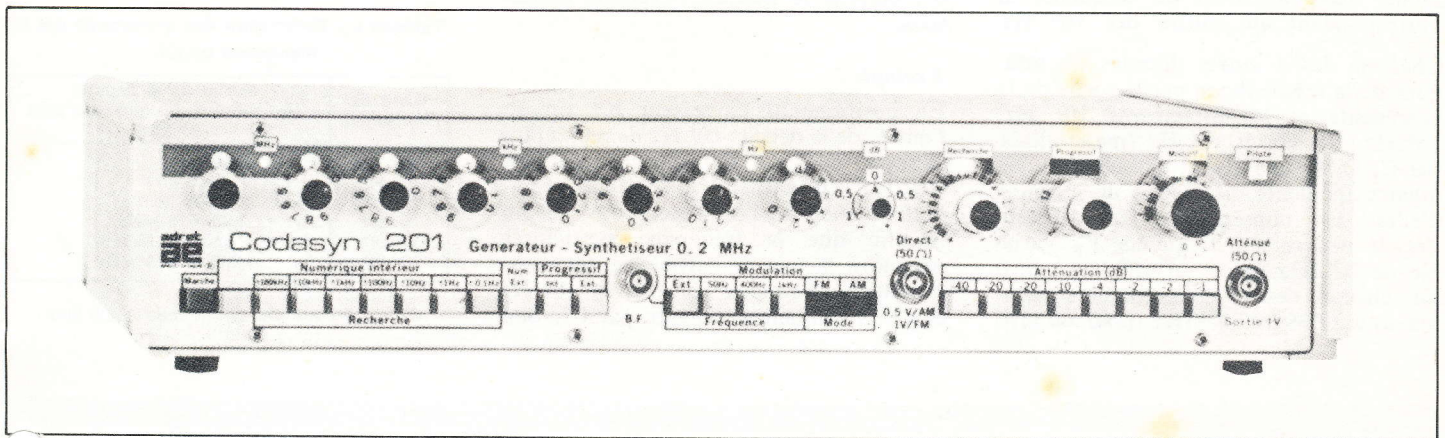


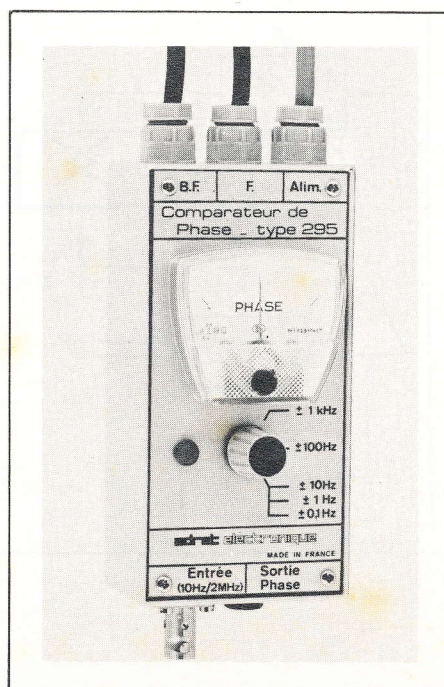
les générateurs synthétiseurs de fréquence

LEURS POSSIBILITÉS

par Jean-Claude REGHINOT (*)



Le générateur-synthétiseur
0 à 2 MHz Adret-Electronique



Aspect du comparateur de phase
« 295 » de la même firme.

(*) Ingénieur à la société Adret-Elec-
tronique.

EMI 154/1-4-1972

Dans un précédent article (*Electronique Industrielle* - juin 1970), nous avons traité du principe de la synthèse de fréquence utilisé par la société Adret-Electronique dans ses générateurs-synthétiseurs de fréquence.

Ce principe étant connu, nous nous proposons ici de démontrer que les générateurs-synthétiseurs possèdent la souplesse des générateurs classiques, puisqu'ils permettent les fonctions de modulation de fréquence, modulation d'amplitude et de modulation, à large bande ou à bande étroite.

Modulation de fréquence

Il a été vu précédemment que l'une des qualités intrinsèques des générateurs-synthétiseurs de fréquence était leur stabilité en fréquence, puisque chacune des fréquences discrètes délivrées par l'appareil

reil possédait la précision et la stabilité du maître oscillateur à quartz incorporé ($2 \cdot 10^{-9}$ / 24 h). En conséquence, la modulation en fréquence du synthétiseur, du fait même de cette stabilité, ne paraît pas évidente à réaliser. C'est pourquoi il nous paraît utile d'effectuer un retour sur le principe de la synthèse de fréquence schématisé figure 1.

Le générateur-synthétiseur précédemment décrit possède une gamme de fréquences s'étendant de 0,1 Hz à 99 999,9 Hz ; cette fréquence est, en quelque sorte, véhiculée tout au long de la chaîne itérative par l'intermédiaire d'une sous-porteuse à 2 MHz attaquant la première unité d'insertion décimale appelée *décade*.

Cette décade divise par 10 la fréquence incidente (ici 2 MHz) et ajoute son propre incrément de fréquence (multiple du 10 kHz de référence), qui correspond au chiffre des 10^{-1} Hz affiché sur l'appareil. La sortie de cette première unité d'insertion $F_3 = 2 \text{ MHz} + (A \text{ fois } 10 \text{ kHz})$, attaque l'entrée de la seconde, qui effectue également une division par 10 de la fréquence incidente (ici F_3) et ajoute son incrément de fréquence B correspondant au chiffre des 10^0 Hz.

Chacune des 4 autres décades est attaquée de la même façon par la sortie de la précédente et les incréments 10^1 Hz, 10^2 Hz, 10^3 Hz et 10^4 Hz (matérialisés par C, D, E, et F) sont ajoutés à la fréquence incidente au niveau de chacune d'elles. En conséquence, la dernière décade délivre une fréquence F_9 , variable de 2 MHz (pour un affichage de 0 sur chacun des 6 commutateurs décimaux) à 2,099 999,9 MHz (pour un affi-

chage de 9 sur ces mêmes commutateurs décimaux).

La sous-porteuse est ensuite éliminée par battement dans le démodulateur de sortie, si bien qu'il ne subsiste plus, après filtrage, que la fréquence synthétisée.

Pour effectuer une variation de la fréquence de sortie, il faut donc faire varier la fréquence d'entrée de l'une des unités d'insertion décimale ; on voit tout de suite que l'excursion maximale sera fonction du rang de la décade où aura lieu cette variation de fréquence. Dans ce cas, les 6 décades sont aménagées comme le montre la figure 2.

L'entrée de chacune des 6 unités d'insertion reçoit par commutation, soit la fréquence issue de la décade précédente (position N des 7 inverseurs dits de « recherche »), soit le signal délivré par un oscillateur d'interpolation 07 (position R de ces mêmes inverseurs), dont la fréquence peut varier de 1,9 MHz à 2,1 MHz en fonction d'une tension analogique de commande V_1 . De cette façon, la fréquence synthétisée varie en fonction de l'unité attaquée par l'oscillateur 07, comme le montre l'exemple ci-dessous.

Exemple :

En positionnant l'inverseur K4 sur R, l'entrée de la décade 10^2 Hz ne reçoit plus la sortie de l'unité d'insertion précédente (10^1 Hz, c'est-à-dire F_6), mais elle reçoit la fréquence de l'oscillateur 07 ; ce qui signifie que la fréquence synthétisée dépend à la fois de l'affichage des commutateurs décimaux 10^4 , 10^3 et 10^2 Hz et de la fréquence délivrée par 07. Soit

par exemple la fréquence initialement affichée :

Décade

10^4 Hz 10^3 Hz 10^2 Hz 10^1 Hz 10^0 Hz 10^{-1} Hz

Affichage

3 4 5 6 7 8 Hz

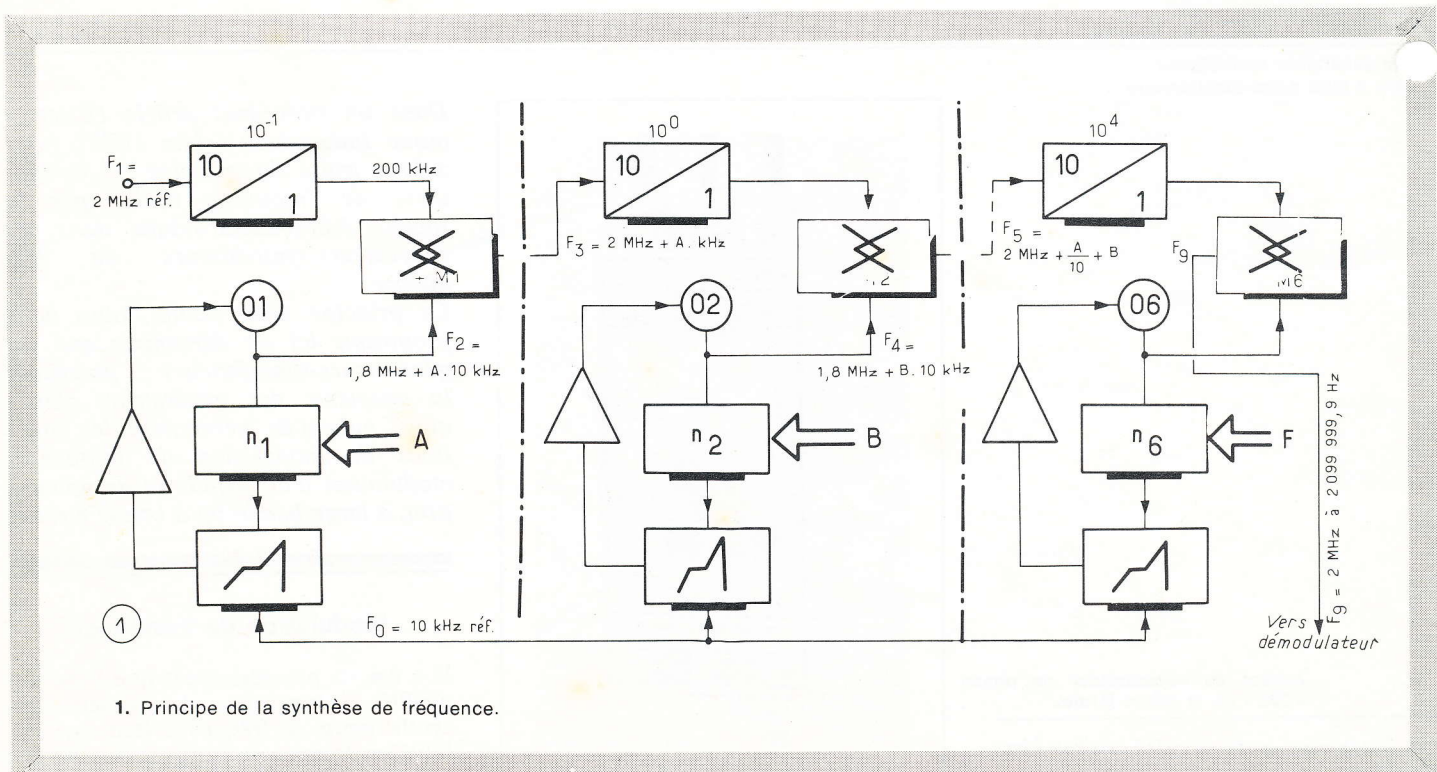
Si la fréquence délivrée par 07 est exactement de 2 MHz, la fréquence synthétisée est 34,5 kHz, puisque la manœuvre de K4 sur R revient (dans un fonctionnement avec K4 sur N donc sans modulation FM), à avoir affiché 0 sur les commutateurs décimaux correspondant aux poids 10^{-1} , 10^0 et 10^1 Hz, puisque dans ces conditions, la fréquence F_6 serait exactement de 2 MHz.

Par conséquent, dans notre exemple, la manœuvre de K4 sur R élimine les incréments correspondants aux chiffres des 10^{-1} , 10^0 et 10^1 Hz, ce qui est illustré par le tableau I où l'on voit que les chiffres dépendant des décades mi-hors circuit par K4 ne sont plus pris en considération dans l'élaboration de la fréquence synthétisée.

Tableau I. - Elimination des incréments par la manœuvre de K4

Rang de l'incrément	Sortie de la décade (les incréments éliminés sont en gras)
10^{-1} Hz	$F_3 = 2, \mathbf{08}$ MHz
10^0 Hz	$F_5 = 2, \mathbf{078}$ MHz
10^1 Hz	$F_6 = 2, \mathbf{0678}$ MHz
10^2 Hz	$F_7 = 2, \mathbf{05,678}$ MHz
10^3 Hz	$F_8 = 2, \mathbf{045,678}$ MHz
10^4 Hz	$F_9 = \mathbf{2,0345,678}$ MHz

d'où la fréquence synthétisée : 34,5 kHz



1. Principe de la synthèse de fréquence.

Remarque :

Dans le cas de la première décade 10^{-1} Hz, l'attaque est constituée soit par le 2 MHz de référence, soit par la fréquence issue de l'oscillateur 07. De plus, la fréquence de « recherche » est disponible à l'arrière de l'appareil ; nous verrons plus loin l'intérêt que présente la mesure de cette fréquence.

Si la fréquence d'interpolation est différente de 2 MHz, par exemple 2,05 MHz, cela revient à augmenter de 50 Hz la fréquence de sortie de l'appareil, qui devient alors 34,55 kHz ; ceci s'explique en se rappelant que chaque décade divise par 10 la fréquence incidente, tout en ajoutant son propre incrément de fréquence et qu'au niveau de l'une des décades, une fréquence incidente de 2 MHz correspond à un affichage de 0 sur les décades précédentes.

En conséquence, les 50 kHz supplémentaires (par rapport au 2 MHz de 07) subissent, dans notre exemple, une division par 1 000 avant d'être ajoutés à la fréquence affichée, ($34,5 \text{ kHz} + 50 \text{ kHz}/1 000 = 34,55 \text{ kHz}$).

La commande en fréquence de l'oscillateur d'interpolation 07 peut s'effectuer par l'intermédiaire d'un potentiomètre dit de « recherche » gradué de - 10 à + 10, et la variation de cette fréquence, en fonction du potentiomètre, est celle indiquée par la figure 3.

Si le potentiomètre est sur une graduation négative, par exemple - 3, la fréquence de l'oscillateur d'interpolation devient 1,97 MHz et la différence $2 \text{ MHz} - 1,97 \text{ MHz} = 30 \text{ kHz}$ concourt à dimi-

nuer la fréquence en sortie de l'appareil après avoir également subi la division par 10^3 . En conséquence, la fréquence synthétisée devient dans ce cas-là :

$$34,5 \text{ kHz} - 30 \text{ kHz}/10^3 = 34,47 \text{ kHz}$$

En conclusion, le rang de l'unité d'insertion attaquée par l'oscillateur d'interpolation détermine une certaine excursion de fréquence possible autour de la fréquence affichée. Cette excursion dépend ensuite de la fréquence de l'oscillateur d'interpolation qui, comme nous l'avons vu plus haut, est commandée par un potentiomètre gradué mais peut également être fonction d'une tension analogique interne (oscillateur BF) ou par tous signaux extérieurs, comme le montre la figure 4.

Cette illustration montre que la tension BF interne (oscillateur 08) ou externe est tout d'abord dosée par un potentiomètre gradué de 0 à 100 % (*Tx modulation*), qui définit ainsi la déviation maximum de fréquence, autorisée à l'intérieur de chacune des bandes de fréquence dépendant de chaque décade et sélectionnée par les inverseurs K1 à K7.

En reprenant notre exemple précédent :

- Fréquence affichée : 34,5678 kHz
- Inverseur K4 sur R
- Potentiomètre « Recherche » sur 5 (ce qui détermine une fréquence centrale de 34,55 kHz).

Si le bouton *Tx modulation* est sur 40 % la variation de fréquence sera de $\pm 40 \text{ Hz}$, c'est-à-dire $\pm 40 \%$ de l'excursion affichée, qui est ici de 100 Hz ; cette variation s'effectuera, soit à la vitesse de l'une des fréquences de l'oscillateur BF interne, soit par l'intermédiaire d'un signal extérieur (rampe par exemple).

Il est possible de reconstituer exactement la fréquence centrale de 34,5678 kHz en positionnant le bouton « Recherche » entre 6 et 7 jusqu'à obtenir sur la prise « fréquence recherchée » 2,0678 MHz.

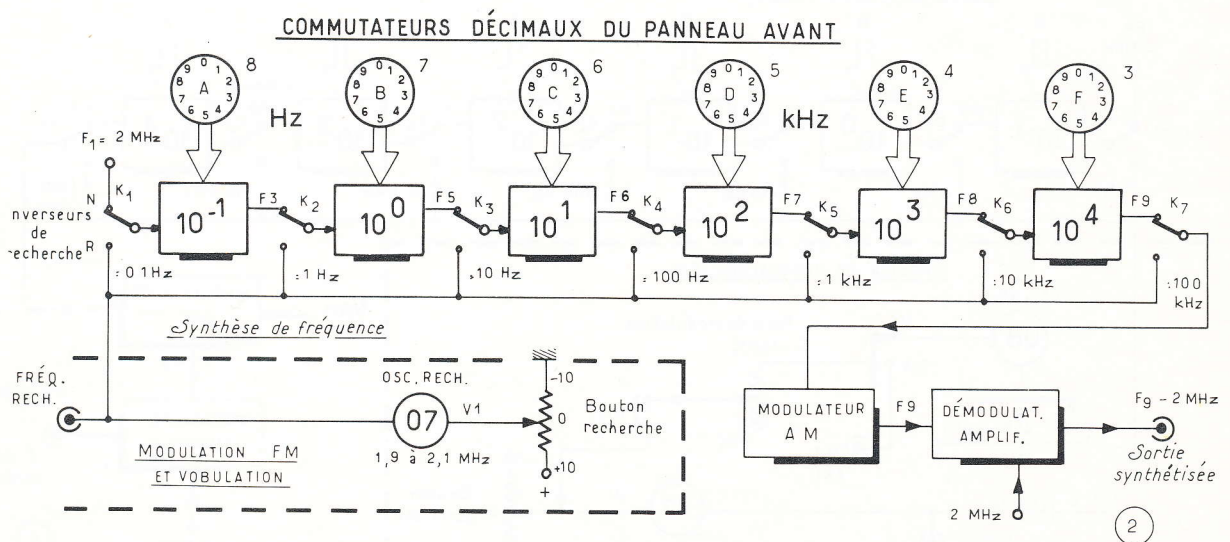
Schéma électrique

La commutation en mode FM de chacune des 6 décades ne pose aucun problème. Afin de compléter les informations données précédemment, nous indiquons (fig. 5) la modification intervenant au niveau des décades représentées par le circuit que nous vous avons déjà donné dans le précédent article, mais que nous redonnons ici (fig. 6).

La fréquence de « recherche » arrive en 3 du connecteur, puis par Q1 elle attaque le diviseur d'entrée SN4 de la même façon qu'en fonctionnement sans modulation de fréquence, où le signal de la décade précédente arrive en 4 du connecteur.

Oscillateurs « Recherche » et « BF »

Les schémas des oscillateurs de « Recherche » et « BF » sont indiqués figure 7. L'oscillateur de recherche est un multivibrateur classique à couplage d'émetteurs, composé des transistors Q09 et Q10, dont la fréquence est fonction de la tension arrivant en 17 du connecteur. Cette tension, comme nous l'avons vu précédemment, provient soit du potentiomètre « Recherche », soit d'une tension extérieure, soit enfin de l'oscillateur BF. Mais il est à remarquer que la fréquence de recherche peut dépendre à la fois du potentiomètre Recherche et de



2. Aménagement des six décades pour effectuer une variation de la fréquence de sortie.

l'un des signaux, interne (oscillateur BF) ou externe.

La fréquence « Recherche » (variable de 1,9 MHz à 2,1 MHz) est disponible en 6 du connecteur, puis après commutation elle attaque l'entrée de l'une des 6 décades du générateur, comme nous l'avons vu précédemment. Cette fréquence est également disponible en 8 du connecteur pour l'alimentation de la prise FREQ RECH dont nous avons déjà vu l'intérêt. L'oscillateur BF est un classique oscillateur à pont de Wien dont la fréquence est fonction des capacités C24, C25 et C26 mises en service. Les fréquences de 50 Hz, 400 Hz et 1 kHz ainsi déterminées sont disponibles en 18 du connecteur ; puis par la commutation et après dosage par le bouton *TX modulation*, elles commandent l'oscillateur de recherche

par le point 17 du connecteur, en fonction « Modulation interne ».

Exemples d'application

Nous reproduisons figures 8, 9 et 10 les oscillogrammes correspondant à différents cas de modulation d'un synthétiseur :

- Une modulation de fréquence de ± 100 kHz par oscillateur BF de 400 Hz (fig. 8) ;
- Une modulation d'un filtre passe bande (fig. 9) ;
- La modulation d'un quartz par générateur extérieur (fig. 10).

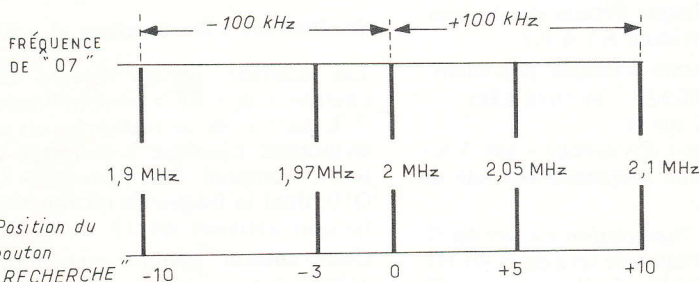
Modulation par salves (« tone burst »)

Les circuits de modulation des générateurs-synthétiseurs *Adret* passant la composante continue, il est possible d'ef-

fectuer une modulation par signaux rectangulaires, comme le montre la figure 11. De même, une tension variable de -5 V à $+5$ V permet de faire varier la fréquence de sortie d'une façon continue et éventuellement de l'asservir sur une fréquence extérieure en utilisant un comparateur de phase. Cette dernière propriété du synthétiseur conduit à une conséquence fort intéressante de cet appareil, puisqu'elle permet d'obtenir une multiplication d'erreur par 10, 100 ou 1000, en mesurant la fréquence de l'oscillateur d'interpolation disponible sur le panneau arrière du synthétiseur.

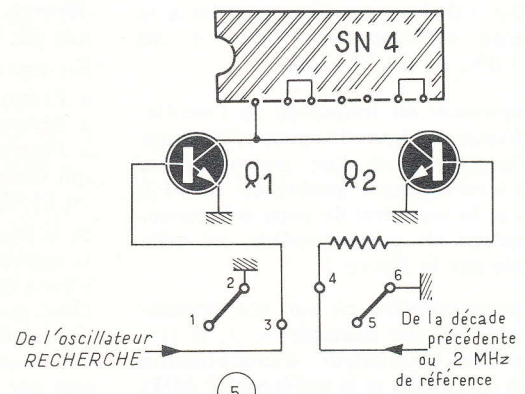
Multiplicateur d'erreur

La figure 12 représente l'interconnexion à réaliser entre le générateur, le comparateur de phase (295) et un fréquence-



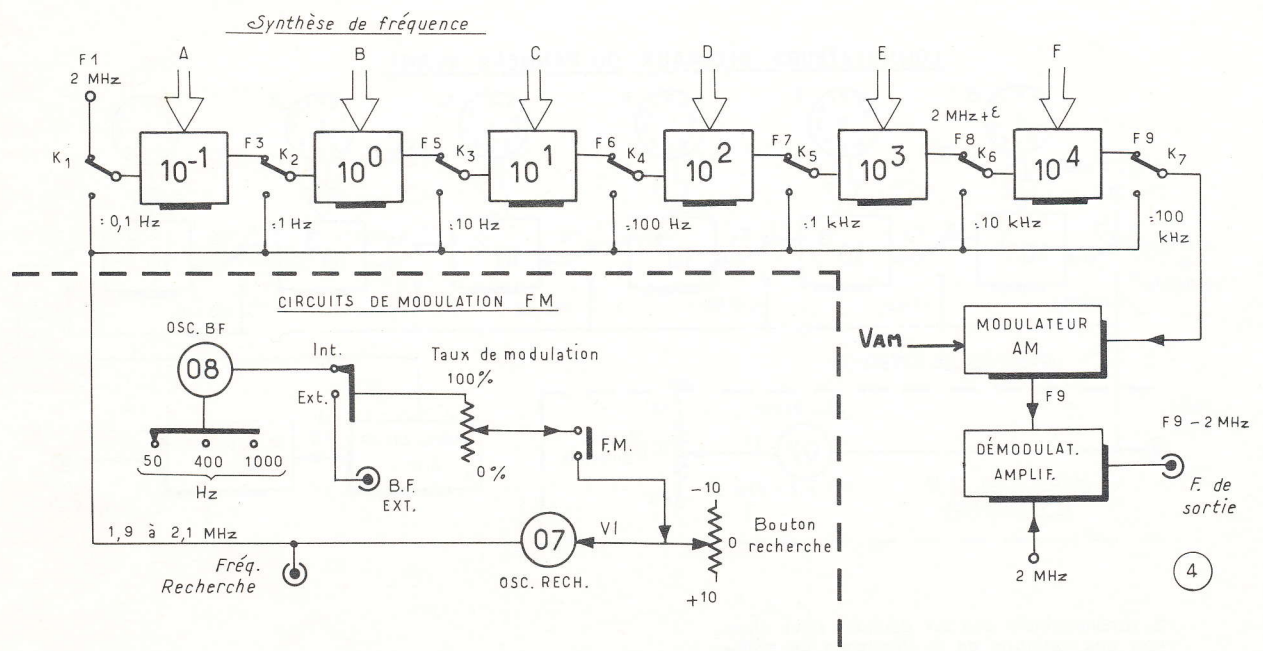
3

3. Variation, en fonction du potentiomètre, de la fréquence qui commande l'oscillateur d'interpolation.
4. Circuits de modulateur FM : commande de l'oscillateur d'interpolation.



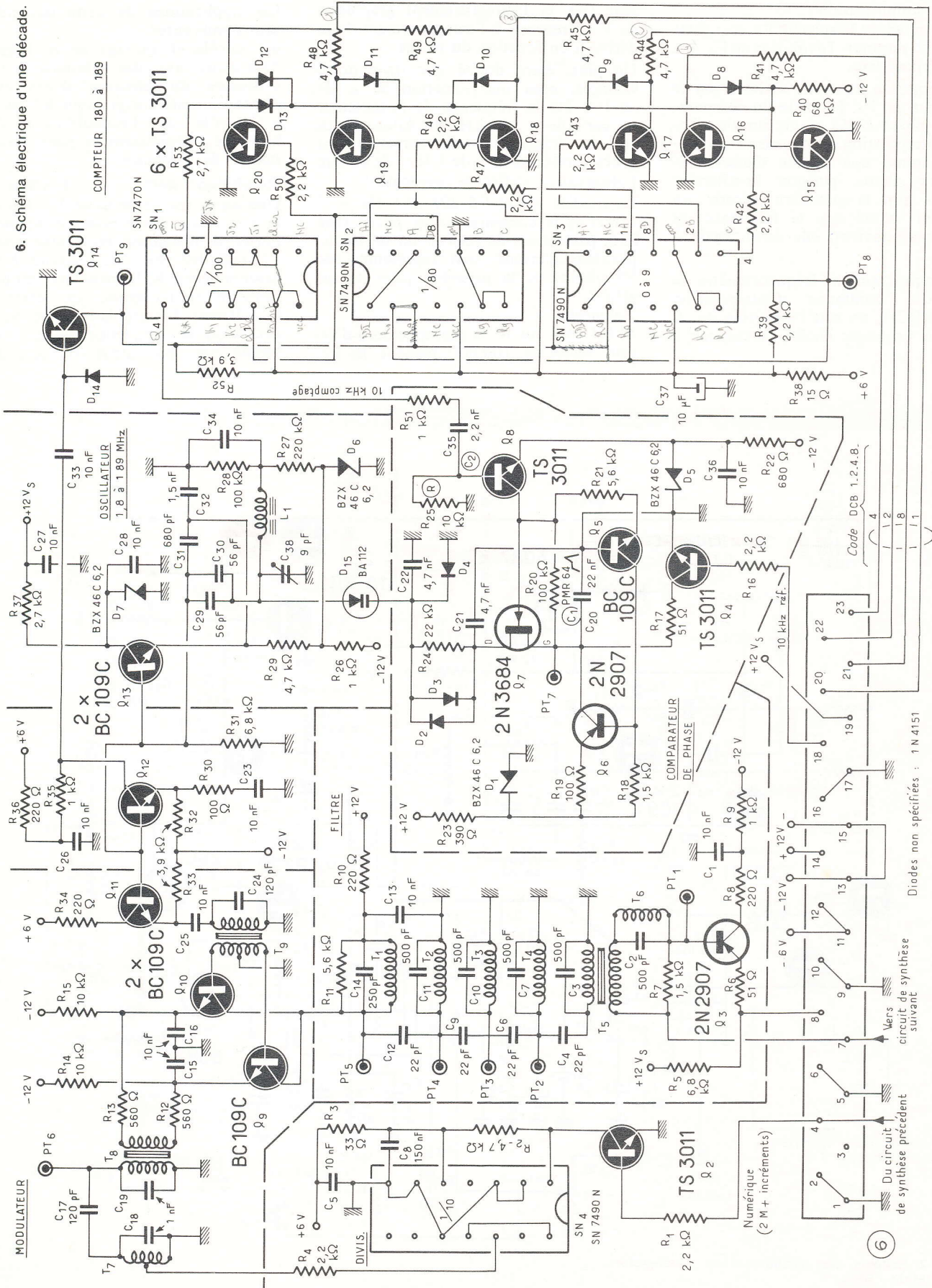
5

5. Modification intervenant au niveau des décades.



4

6. Schéma électrique d'une décade.



Diodes non spécifiées : 1N4151

Mers
circuit de synthèse
suivant

Du circuit
de synthèse précédent

6

mètre extérieur. Sur cette illustration, le nombre d'unités d'insertion a été limité à 3, par simplification.

Soit un signal de fréquence $F_x + \epsilon$ dont on désire mesurer l'évolution de $F_x + \epsilon$, étant supposé fixe.

Si la fréquence nominale délivrée par le générateur est F_x , la sortie du comparateur de phase (295) réagit sur l'oscillateur d'interpolation et le système se comporte comme une boucle d'asservissement en phase, puisque l'oscillateur introduit sur la première décade un incrément Δ tel que la fréquence du synthétiseur devient, elle aussi, égale à $F_x + \epsilon$.

En mesurant sur le fréquencemètre la sortie de l'oscillateur d'interpolation FREQ RECH, on suit l'évolution de Δ qui, dans l'exemple choisi, correspond à $1\ 000 \epsilon$.

La fréquence Δ est une fonction linéaire de la tension de commande de l'oscillateur (V), et l'enregistrement graphique de V correspond à l'enregistrement de la dérive ϵ en fonction du temps.

De plus, étant donné que dans notre exemple, pour une variation de ϵ , de ± 100 Hz la fréquence de l'oscillateur 07 varie de ± 100 kHz, les kilohertz lus sur le fréquencemètre correspondent à des variations de ϵ de 1 Hz ; de ce fait, l'observation s'effectue rapidement.

Le modèle *Adret CS 201* (0,1 Hz - 2 MHz) et le comparateur de phase type 295, permettant de réaliser un tel multiplicateur d'erreur, sont représentés sur les photos de la première page de cet article.

Remarque :

Si K1 était sur R, la multiplication d'erreur serait de 100 000 puisque la fré-

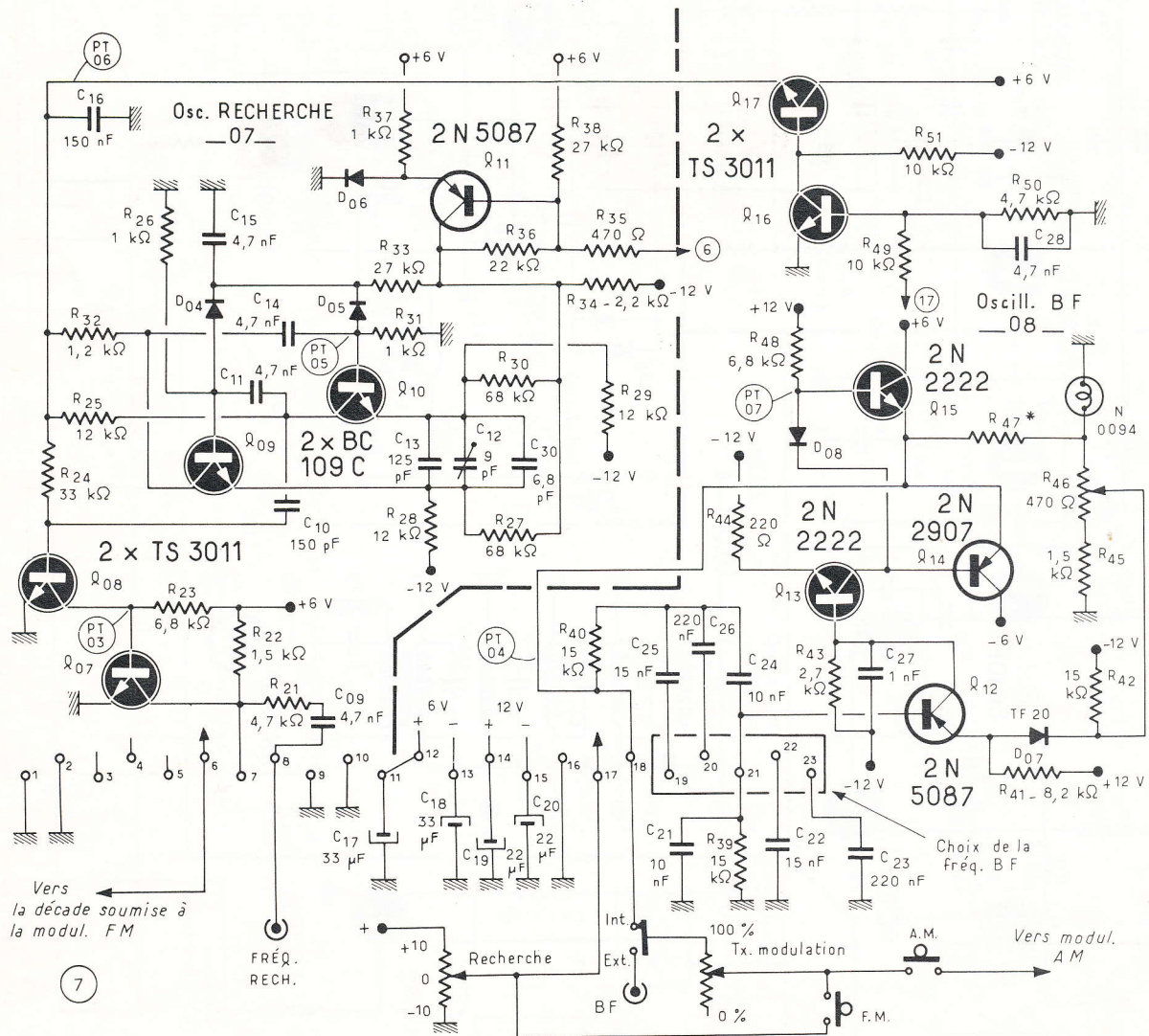
quence de l'oscillateur d'interpolation serait divisée par 10^5 .

Les applications de cette particularité sont nombreuses :

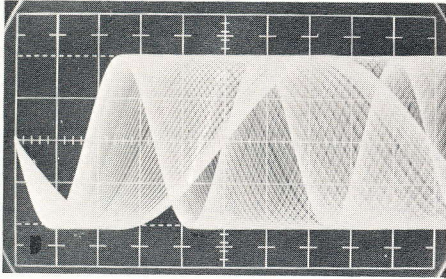
- Contrôle et ajustage de la fréquence d'un quartz avec une précision de 10^{-10} .
- Mesure du pleurage d'une chaîne d'enregistrement magnétique à 2 ou 3 %.
- Contrôle de l'échauffement d'une huile de refroidissement pour transformateur de puissance, etc...

Résolution portée au 1/1 000 Hz.

Une autre particularité de la mesure de la fréquence d'interpolation permet de porter la résolution du synthétiseur au 1/1 000 Hz. En effet, quand K1 est positionné sur R, la manœuvre du potentiomètre de recherche (qui commande l'oscillateur d'interpolation), permet une excursion de fréquence de $\pm 0,1$ Hz tandis que l'oscillateur 07 varie de \pm



7. Schéma des oscillateurs de « recherche » et de « BF ».



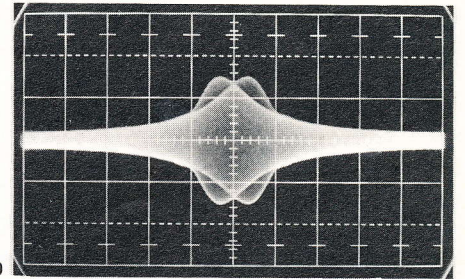
8

8. Une modulation de fréquence de ± 100 kHz par oscillateur BF de 400 Hz.

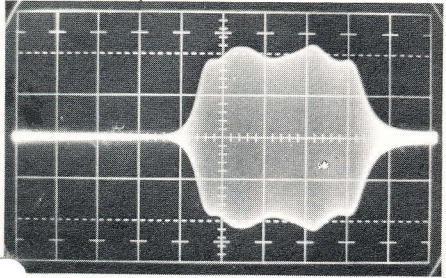
9. Une vobulation d'un filtre passe bande.

10. La vobulation d'un quartz par générateur extérieur.

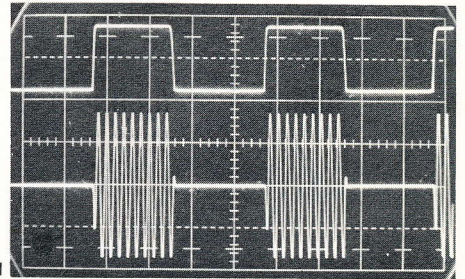
11. Une modulation par signaux rectangulaires.



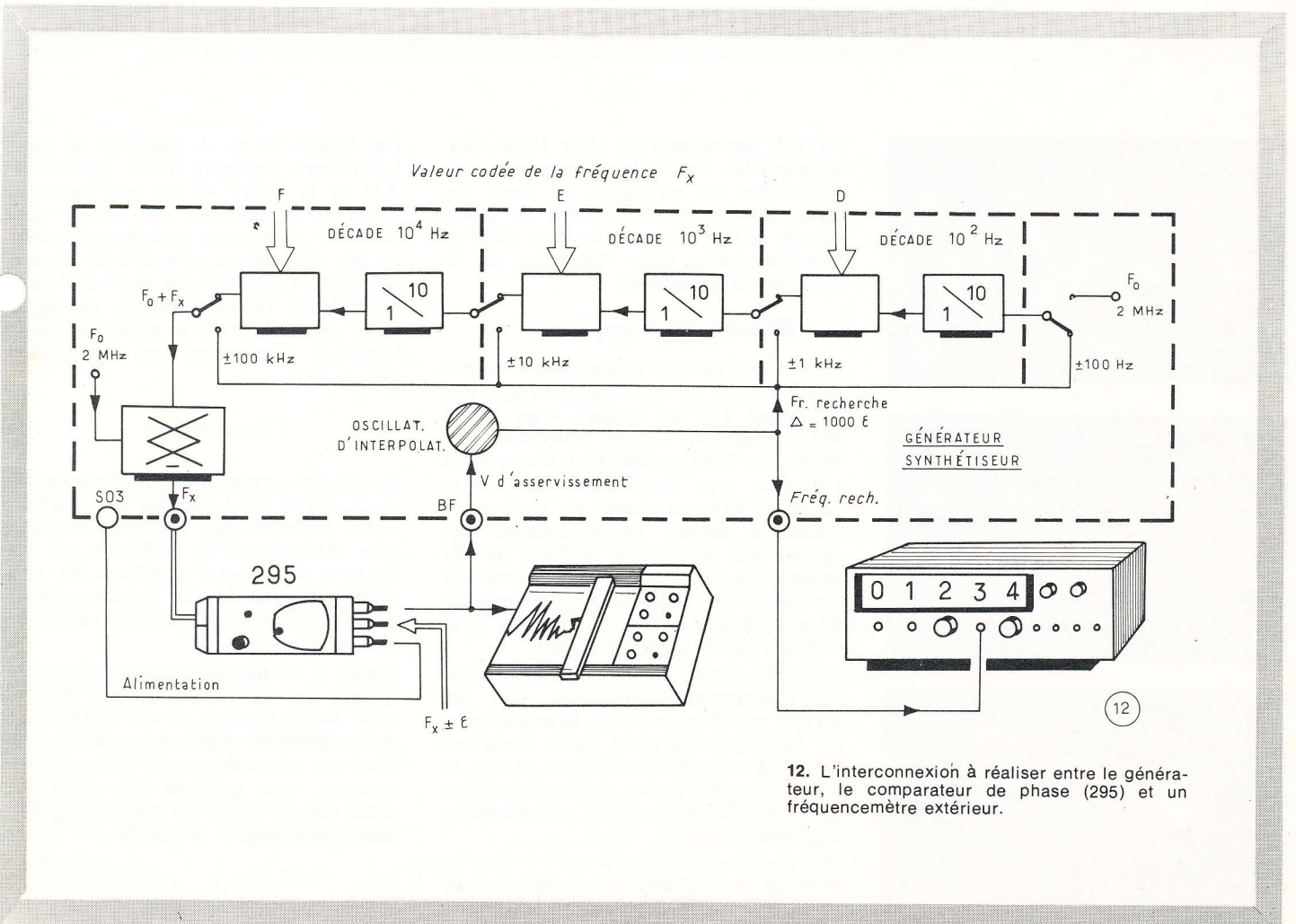
10



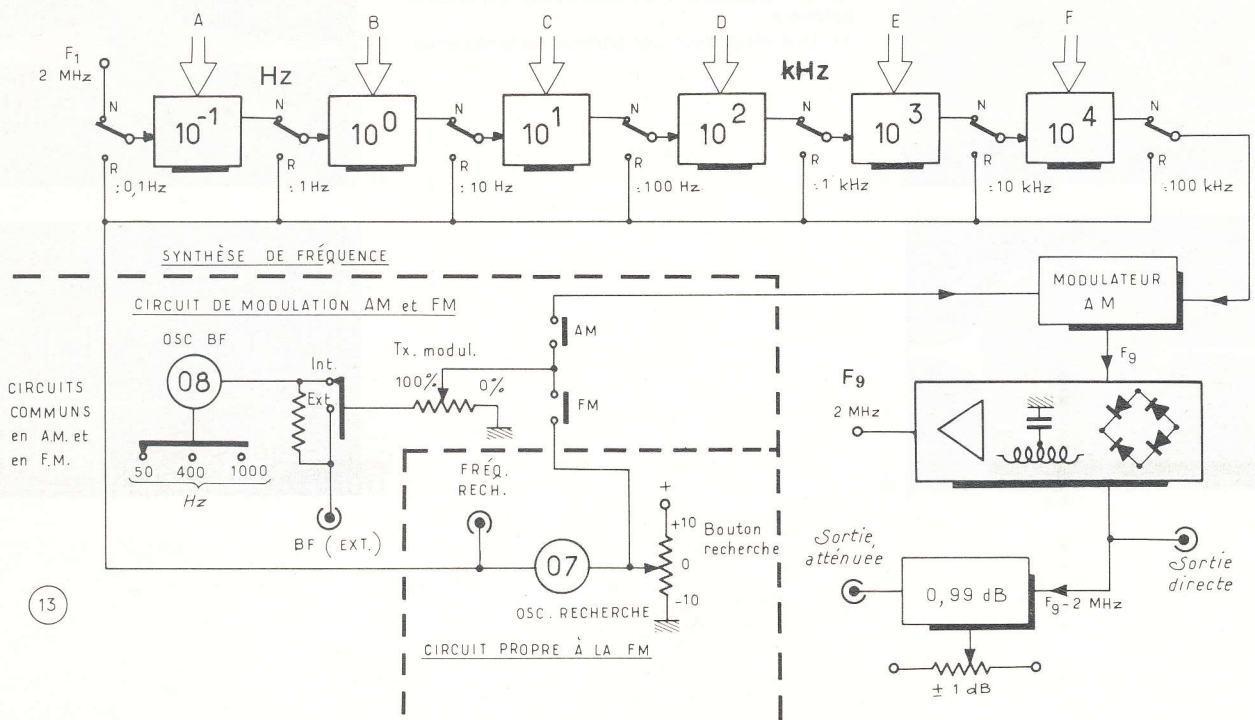
9



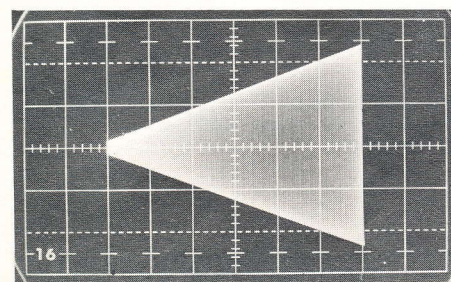
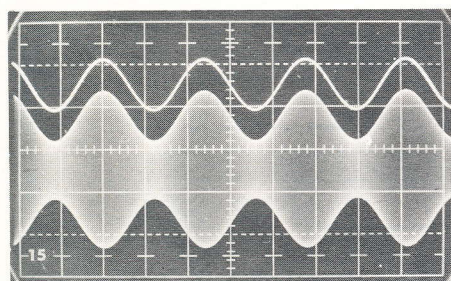
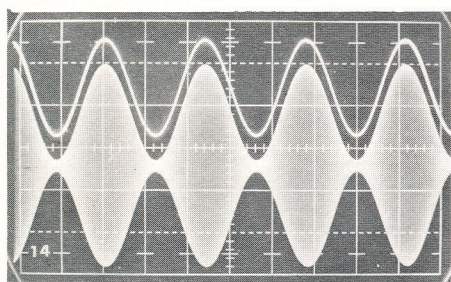
11



12. L'interconnexion à réaliser entre le générateur, le comparateur de phase (295) et un fréquencemètre extérieur.



13. Synoptique général du générateur synthétiseur.



100 kHz par rapport à 2 MHz. Donc, aux kilohertz lus sur le fréquencesmètre correspondent les millièmes de hertz en sortie du synthétiseur. Tout se passe comme si l'on disposait de deux chiffres supplémentaires pour l'affichage de la fréquence à synthétiser.

Modulation d'amplitude

Pour effectuer une modulation d'amplitude, il suffit de faire varier l'amplitude du signal HF au rythme d'un signal basse fréquence. Sur un générateur synthétiseur, cette modulation d'amplitude s'effectue très simplement en faisant passer la fréquence issue de la dernière décade à travers un modulateur qui reçoit, par ailleurs, la tension BF de modulation. Le principe de cette fonction est illustré par la figure 13 qui reproduit le synoptique général du générateur synthétiseur décrit dans cet article.

Sur cette figure, on voit que les circuits de modulation d'amplitude sont les mêmes que dans le cas de la modulation de fréquence puisqu'il suffit d'enclencher la touche AM et que de ce fait, la tension de modulation appliquée au modulateur AM est issue du potentiomètre « Tx modulation ».

14 et 15. Deux exemples de modulation AM.
16. Méthode du trapèze pour la mesure du taux de modulation AM.

Les figures 14 et 15 montrent les oscillogrammes résultant d'une modulation AM et la figure 16 un oscillogramme illustrant la méthode du trapèze pour la mesure du taux de modulation en AM, ce qui s'effectue aisément avec un synthétiseur *Adret*, puisque la fréquence de modulation interne choisie, est également disponible sur la prise BF quand l'appareil fonctionne en modulation intérieure.

Conclusion

Le présent exposé met en évidence une particularité fondamentale des synthétiseurs modernes qui associent aux qualités intrinsèques de *précision*, de *stabilité* et de *fiabilité* qu'offrent les techniques numériques, les fonctions diverses et la souplesse d'utilisation des générateurs classiques.

Quant à la pureté spectrale de la fréquence de sortie, qui, jusqu'à présent, avait freiné l'expansion des synthétiseurs dans certaines applications des oscillateurs ou même du quartz (télécommunications), nous pouvons dire qu'aujourd'hui elle est digne des meilleurs générateurs analogiques classiques.

J.-C. REGHINOT