

LES GENERATEURS- SYNTHETISEURS DE FREQUENCE

1ère partie : généralités

par J.-C. REGHINOT

L'Electronique appliquée à la génération de fréquences stables et précises emploie le générateur synthétiseur avec un sensible avantage sur le générateur analogique, apportant certains raffinements techniques, tels la programmation en « DCB 1-2-4-8 », l'asservissement de plusieurs synthétiseurs à une source unique de fréquence, l'affichage décimal avec une résolution de l'ordre du millièème de hertz. Ce premier article consacré aux synthétiseurs rappellera le fonctionnement de ces appareils ; ensuite seront abordées les applications au laboratoire, dans les télécommunications, dans l'instrumentation, pour terminer par la description d'un nouveau produit de structure modulaire.

PRINCIPES DE BASE

Le cœur d'un générateur de fréquence étant l'oscillateur, on lui doit un soin tout particulier ; mais il faut également disposer d'un système d'affichage offrant toute garantie de précision et de répétabilité. Les oscillateurs généralement utilisés dans les générateurs, sont vite limités en stabilité et en précision, et l'on ne peut guère espérer obtenir plus de 10^{-5} /24 H. ; quant au repérage, par bouton gradué ou échelle défilante, on se heurte rapidement à des problèmes mécaniques et d'étalonnage.

Dans les générateurs-synthétiseurs le problème se pose de façon particulière du fait qu'il est possible de générer des fréquences quelconques à partir d'un oscillateur à fréquence fixe. Ce que l'on demande tout d'abord à l'oscillateur est donc d'être précis et stable, à fréquence fixe et non plus dans une gamme de fréquence déterminée.

De ce point de vue, parmi les différents types d'oscillateurs, celui qui offre le plus de garantie, tant pour la précision que pour la stabilité est sans aucun doute l'oscillateur à quartz en enceinte thermostatée, puisqu'il permet d'obtenir sans difficulté des stabilités d'environ 2.10^{-9} par 24 heures.

A propos de la stabilité élevée des pilotes équipant les synthétiseurs, il est à remarquer que leur étalonnage nécessite un matériel des plus performant tant pour le contrôle de leur stabilité que pour le réglage de leur point de fonctionnement.

De ce fait, le constructeur est amené à réaliser une chaîne d'étalonnage qui délivre un enregistrement graphique de la stabilité en fonction du temps et de la température. En effet, pour une taille donnée, un quartz voit son coefficient thermique s'annuler à une température bien déterminée. C'est à cette température que doit être le dispositif de régulation thermique du pilote pour obtenir

le meilleur résultat (défini par une résistance calibrée). De plus, la fréquence d'oscillation doit être exactement ajustée par comparaison avec un oscillateur de référence primaire tel par exemple que la fréquence porteuse de certains émetteurs de radiodiffusion reconnus comme « étalons métrologiques » pour être eux-mêmes pilotés par des standards de haute précision au rubidium ou au caesium (de classe 10^{-10} à 10^{-12}).

La figure 1 représente un équipement automatique permettant d'effectuer ces deux opérations de contrôle et de réglage.

Pour le réglage de la fréquence, l'idéal est de pouvoir l'afficher directement en décimal, chiffre par chiffre, avec une résolution de l'ordre de 0,1 Hz à 0,001 Hz, selon l'application.

Mais comme un générateur doit pouvoir couvrir une certaine gamme de fréquence et que le quartz, du fait même de sa stabilité, ne peut résonner que sur une seule fréquence, un générateur piloté par ce genre d'oscillateur doit procéder par synthèse, d'où le terme de synthétiseurs de fréquence.

Comme pour les générateurs de fréquence analogiques classiques, les applications du synthétiseur se divisent en deux grandes catégories, les applications industrielles — et les applications de laboratoire.

Dans les applications industrielles, la vertu de programmation du synthétiseur permet de constituer des chaînes de mesures automatiques ou semi-automatiques.

Dans ce domaine, nous pouvons citer : la référence de fréquence, de phase ou de temps, le contrôle de l'étalonnage, ainsi que les techniques dites « sélectives » englobant les télécommunications (pilotages d'émetteurs de Radiodiffusion et de Radiocommunication). Dans ce dernier cas, le synthétiseur est souvent utilisé en tant que quartz à fréquence variable ou pilote à gamme continue, car à lui seul, il peut remplacer toute une batterie de quartz.

Dans les applications de laboratoire, l'affichage décimal de la fréquence avec une résolution pouvant atteindre 10^{-3} Hz () est particulièrement apprécié. De plus, le synthétiseur garde la souplesse d'emploi du générateur classique, puisque la synthèse de fréquence permet toutes les fonctions de modulation AM/FM et de phase, ainsi que la génération de signaux multiplés avec une grande stabilité du niveau de sortie. Les qualités et les performances d'un générateur sont fonction de l'utilisation qui en est faite. En effet, si le domaine industriel exige précision de la fréquence et stabilité du niveau de sortie tout en se contentant d'un honnête taux de distorsion, le laboratoire, lui, exigera une excellente pureté spectrale ainsi qu'une grande dynamique du niveau de sortie. Quant aux domaines des télécommunications, le synthétiseur utilisé devra posséder l'ensemble des caractéristiques qui sont exigées dans le domaine industriel et dans celui du laboratoire.

SYNTHESE DE FREQUENCE

De tous les procédés de synthèse imaginés jusqu'à ce jour, nous retiendrons celui utilisé par *Adret-Electronique* qui est la synthèse par boucle de phase numérique, plus communément appelée « phase lock », système utilisé sur le modèle CS 201 qui couvre la gamme de

* Cette valeur n'est pas limitative. Il n'y a pas, en fait, de limite théorique à la résolution d'un synthétiseur. Elle n'est fixée, en pratique, que par les besoins des utilisateurs.

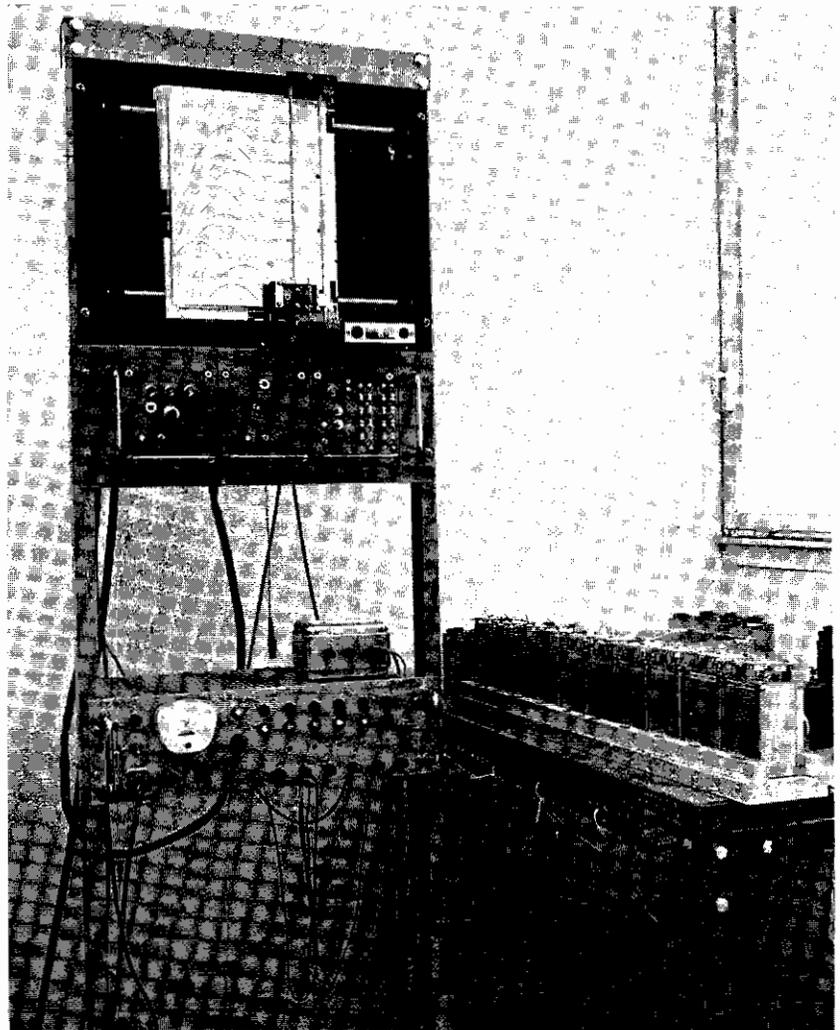


Fig. 1. Equipement de contrôle et réglage des oscillateurs.

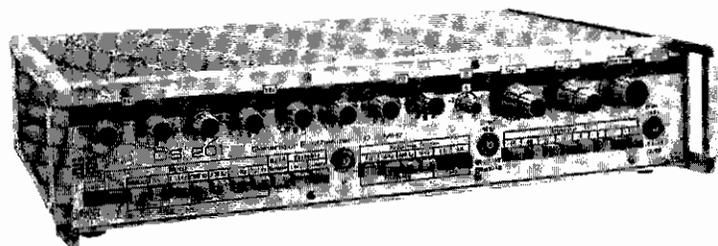


Fig. 2. Le générateur-synthétiseur « CS 201 » de ADRET Electronique.

0,1 Hz à 2 MHz, avec une résolution de 0,1 Hz. (fig. 2) Ce générateur, comme nous le verrons, possède les mêmes fonctions que les générateurs analogiques classiques puisqu'il est plus particulièrement destiné aux laboratoires.

La synthèse de fréquence s'effectue par l'intermédiaire d'un maître oscillateur à quartz, fonctionnant sur 5 MHz, et de certains de ses harmoniques, que nous appelons fréquences de références et qui proviennent d'une base de temps pilotée

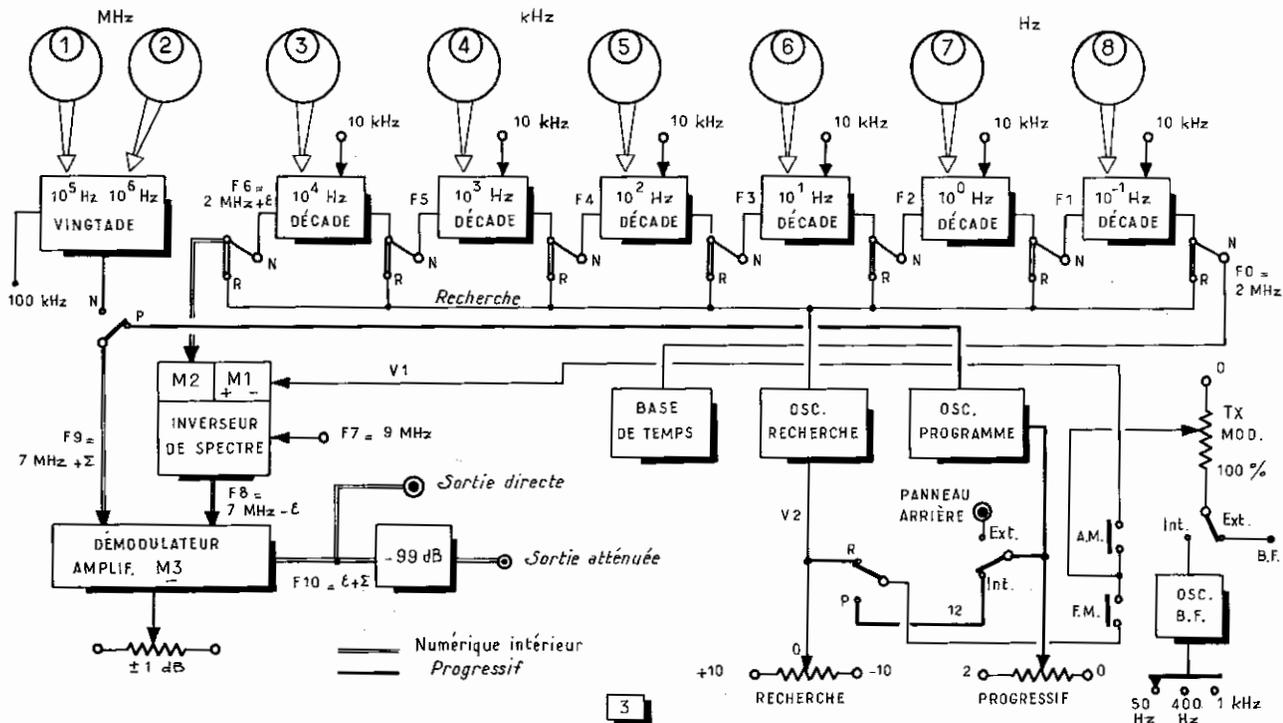


Fig. 3. Schéma synoptique de fonctionnement du « CS 201 ».

par l'oscillateur à quartz en question.

La synthèse est itérative, chaque chiffre étant élaboré séparément et d'une façon identique par l'intermédiaire de 6 unités d'insertion décimale (ou décade) pour les chiffres de 10^{-1} Hz à 10^4 Hz, et d'une « vingtade » pour les chiffres 10^5 et 10^6 Hz.

Principe :

Le principe de fonctionnement du CS 201, est schématisé par la figure 3.

Supposons que nous ayons affiché la fréquence 1 234 567,8 Hz ; nous allons suivre pas à pas la façon dont est élaborée cette fréquence dans l'appareil ; nous dirons que cette fréquence est synthétisée.

La base de temps produit une sous-porteuse $F_0 = 2$ MHz, transmise à la première décade. Celle-ci délivre une fréquence égale à F_0 majorée de « d » fois le pas incrémental de 10 kHz issu également de la base de temps. Si par exemple, le chiffre « d » (dixième de Hz) est égal à 8, la seconde décade reçoit une fréquence de 2 080 000 Hz. Le rôle de celle-ci consiste alors à diviser par 10 l'incrément de fréquence reçu et

à y ajouter son propre incrément (Hz). Si ce chiffre U des unités est égal à 7, la fréquence transmise à la troisième décade est de 2 078 000 Hz. Cette même opération est répétée six fois, et la fréquence transmise au circuit « inverseur de spectre » est dans notre exemple de 2 034 567,8 Hz.

Ce circuit effectue un décalage de fréquence par battement soustractif avec une fréquence fixe de 9 MHz issue également de la base de temps ; il fournit donc la porteuse F_8 égale à 7 MHz, minorée de la somme des 6 incréments précédents, soit : 6 965 432,1 Hz dans notre exemple. Cette fréquence peut éventuellement être modulée en amplitude par une tension analogique V1 (soit interne : oscillateur BF, soit externe : prise BF). Nous reparlerons de cette modulation ultérieurement.

Par ailleurs, l'unité d'insertion de gauche, appelée « vingtade », fournit la porteuse F_9 égale à 7 MHz majorée d'un nombre de pas incrémentaux de 100 kHz chacun et correspondant aux deux chiffres de poids 10^5 et 10^6 Hz, soit de 00 à 19 fois 100 kHz. Dans notre exemple précédent, la fréquence F_9 est donc égale à 8 200 000 Hz.

L'ensemble démodulateur-amplificateur effectue le battement $F_9 - F_8$ et délivre la fréquence synthétisée, soit dans notre exemple :

$$8\,200\,000 - 6\,965\,432,1 = 1\,234\,567,8 \text{ Hz}$$

et qui correspond bien à la fréquence affichée initialement sur les 8 commutateurs (ou « roues codées »)

Fonction recherche :

Cette fonction permet d'effectuer une variation continue de fréquence autour d'une valeur affichée grâce à un oscillateur d'interpolation « OSC. RECH. » Cette fonction conduit donc à la modulation de fréquence et à la vobulation, dont nous reparlerons par la suite.

Le synoptique de la figure 3 indique la façon dont sont interconnectées les décades, et l'on voit que l'entrée, de chacune d'elles peut recevoir par commutation, soit la sortie de la précédente, soit la sortie de l'oscillateur « OSC. RECH. » qui couvre la gamme de 1,9 à 2,1 MHz ($2 \text{ MHz} \pm 100 \text{ kHz}$), en fonction d'une tension analogique de commande V2. Il est donc aisé de comprendre que les variations de la fréquence synthétisée, sont fonction de l'unité d'insertion qui reçoit la fréquence

de l'oscillateur d'interpolation ce qui conduit à des excursions de $\pm 0,1$ Hz, ± 1 Hz, ± 10 Hz, ± 100 Hz, ± 1 kHz, ± 10 kHz, ± 100 kHz et ceci, par l'intermédiaire des inverseurs N (numérique) R (recherche).

Progressif de fréquence :

Un deuxième oscillateur d'interpolation « OSC. PROG. » couvrant la gamme de 7 à 9 MHz peut également se substituer à la sortie de la « vingtade » au niveau du démodulateur de sortie, ce qui entraîne une déviation de fréquence de ± 1 MHz.

Cette dernière possibilité du CS 201 permet donc d'effectuer une vobulation sur la totalité de la gamme de fréquence du synthétiseur, soit de 0 à 2 MHz par l'intermédiaire d'une tension analogique extérieure d'amplitude de 0 à + 6 V et de fréquence variable entre 0 et 10 kHz.

Modulation d'amplitude :

La modulation en amplitude d'un synthétiseur est des plus classique ; elle s'effectue en faisant varier le niveau de la fréquence synthétisée au rythme du signal modulant. Dans le CS 201 cette modulation s'effectue au niveau de l'inverseur de spectre par l'intermédiaire du modulateur M1 qui reçoit une tension de modulation dosée par le bouton Tx MOD, puisque la touche AM est alors enfoncée. Cette tension de modulation peut être soit interne (oscillateur BF de 50 Hz, 400 Hz ou 1 000 Hz), soit extérieure (prise BF).

A ce propos, il est à remarquer que les circuits de modulation étant linéaires de 0 à 10 kHz, il est possible d'effectuer une modulation par signaux carrés.

COMMANDE DE FREQUENCE

Nous venons de voir que la fréquence synthétisée était d'abord fonction de l'affichage décimal, mais qu'elle ne pouvait être modifiée analogiquement en « recherche » et en « progressif ». L'examen, à titre d'exemple, des différentes commandes manuelles auxquelles l'utilisateur a accès sur le générateur CS 201 de *Adret Electronique* met en évidence cinq modes possibles pour commander la fréquence de sortie.

Mode « numérique intérieur »

La touche « numérique intérieur » autorise l'affichage de la fréquence par l'intermédiaire des 8 roues codées de 0,1 Hz à 1 999 999,9 MHz par pas de 0,1 Hz.

Mode « recherche »

Lorsque l'une des 7 touches « recherche » est enfoncée, la fréquence synthétisée varie de façon continue autour de la fréquence affichée et dans la limite de la valeur correspondant à la touche enfoncée ($\pm 0,1$ Hz... ± 100 kHz.) Cette variation s'effectue par action sur la fréquence de l'oscillateur d'interpolation. La fréquence de cet oscillateur est disponible par prise, et sa mesure, à l'aide d'un fréquencemètre permet d'une part, d'augmenter la résolution de l'appareil à 0,001 Hz, et d'autre part, de transformer le synthétiseur en un véritable fréquencemètre actif.

Mode « numérique extérieur »

La touche « num. ext. » permet la validation d'un programme extérieur qui se substitue à l'affichage par les roues codées. Ce programme, comprend quatre informations codées en DCB 1-2-4-8 pour chacun des 7 chiffres, et une seule information pour les mégahertz (1 ou 0). Dans ces conditions, les changements de fréquence s'effectuent en présentant tous les codes en parallèle, et le temps d'acquisition est d'environ 5 ms, mais il peut être réduit à 300 μ s en utilisant une voie de synchronisation à 10 kHz.

Mode « progressif intérieur »

La touche « progressif int. » permet de faire varier la fréquence de sortie de 0 à 2 MHz d'une façon continue. Ce mode de fonctionnement s'apparente beaucoup au générateur classique puisqu'il autorise un réglage progressif de la fréquence, à la seule différence que l'on peut couvrir la totalité de la gamme sans commutation. Cette possibilité est particulièrement intéressante pour la détermination rapide d'une fréquence inconnue, par exemple dans le cas de recherche de la bande passante d'un filtre ; une fois cette approche faite, la bande passante peut être déterminée avec précision en « numérique intérieur ».

Mode « progressif extérieur »

Quand la touche « progressif ext. » est enfoncée, la fréquence de sortie est fonction d'une tension analogique comprise entre 0 et + 6 V connectée à la douille J2 située sur le panneau arrière.

Dans le cas d'une linéarité excellente, le synthétiseur devient un véritable convertisseur tension/fréquence.

CRITERES DE PERFORMANCES

Si, dans un générateur, la précision et la stabilité de fréquence sont primordiales, la régulation du niveau de sortie et la pureté spectrale ont également leur importance. En ce qui concerne le niveau de sortie, les difficultés rencontrées sont les mêmes qu'avec les générateurs analogiques ; de ce fait, les solutions et les résultats sont identiques. C'est-à-dire que, en prenant certaines précautions au niveau des circuits de sortie (démodulateur/amplificateur), on obtient maintenant, une régulation de l'ordre de $\pm 0,3$ dB sur toute la gamme de fréquence. La pureté spectrale pose davantage de problèmes dans un synthétiseur du fait même du procédé qui nécessite l'élaboration de différentes fréquences de référence qui peuvent être véhiculées jusqu'à la sortie, provoquant ainsi l'apparition de raies latérales fixes ou non ; de plus, les différents modulateurs n'offrent pas toujours toutes garanties de linéarité, ce qui donne naissance à des raies harmoniques. Enfin, le bruit propre aux divers composants donne une certaine coloration de bruit au signal de sortie.

Pour ce qui est des raies parasites, seule une étude très poussée du plan de fréquence permet de les atténuer jusqu'à un niveau de l'ordre de 40 dB pour les raies harmoniques et de 70 dB pour les raies latérales, tandis que la limite du bruit peut s'abaisser jusque vers 70 dB.

Pour situer le synthétiseur par rapport au générateur analogique, la figure 4 schématise deux spectres, l'un relevé à partir d'un CS 201, et l'autre à partir d'un générateur analogique de classe professionnelle.

La fréquence centrale est, dans les deux cas, égale à 1 MHz et la dispersion choisie de 100 Hz par division, montre en détail ce qui se passe autour de cette fréquence centrale F_0 de 1 MHz.

Pour les deux relevés, la largeur du spectre à mi-hauteur n'est pas mesurable car elle est trop petite devant la bande passante du filtre d'analyse qui est de 5 Hz.

En ce qui concerne la trace du générateur analogique (courbe 1), on voit que le bruit commence à apparaître à 50 Hz de la porteuse avec un niveau ramené dans une bande de 1 Hz (échelle verticale de droite) de -70 dB. A 100 Hz de la porteuse, ce bruit se situe à -80 dB (hormis l'imposante raie cohérente à 100 Hz due au redressement secteur). Enfin, à 1 Hz de la porteuse, le bruit atteint -110 dB.

La courbe 2 qui correspond au générateur synthétiseur type CS 201, indique clairement des caractéristiques en faveur du synthétiseur. En effet, à 100 Hz de la porteuse, le bruit se situe en-dessous de 110 dB/Hz, et au-delà, le spectre est pratiquement plat.

La figure 5 montre le matériel qui permet le tracé d'un spectre de fréquence; il s'agit d'un analyseur de spectre synthétisé permettant l'enregistrement de spectrogrammes avec

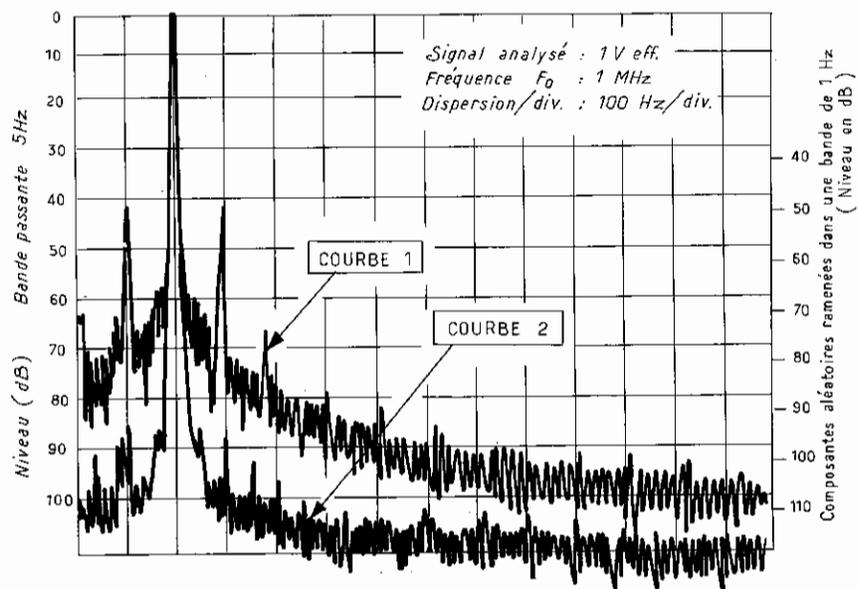


Fig. 4. Spectres comparés d'un générateur et d'un synthétiseur.

une dynamique de 110 dB et une bande passante de 5 MHz. A ce propos, il est à noter que le niveau du bruit enregistré peut être ramené dans une bande de 1 Hz en retranchant 7 dB au niveau enregistré. En effet, le bruit étant, entre autre, fonction de la racine carrée de la bande passante du filtre d'analyse qui est ici de 5 Hz, on a : $20 \log de \sqrt{5} \approx 7$ dB. Du reste, l'échelle de gauche de l'enregistrement précé-

droite

dent donne directement le niveau du bruit ramené dans une bande de 1 Hz.

PROGRAMMATION

Le développement de l'automatisation des procédés de mesures et de contrôles exige la mise en œuvre de moyens rapides et garantissant une bonne répétabilité des mesures. Or, en matière de génération de fréquence, seule la programmation de ce paramètre permet d'obtenir de tels résultats. Le gain de temps des manipulations et l'élimination de tous risques d'erreurs, peuvent ainsi conduire à des économies pouvant atteindre 90% du coût des opérations de contrôle, de mesure et de test. C'est à cet effet que sont conçus divers modèles de programmeurs tel, celui qui est propre au CS 201 et que représente la figure 6.

La programmation de la fréquence d'un synthétiseur s'effectue directement en DCB 1-2-4-8 et agit directement sur les circuits de synthèse (décades et « vingtade »), c'est-à-dire qu'elle ne nécessite que 4 informations par chiffre à coder.

Nous verrons ultérieurement les applications de cette programmation mais, d'ores et déjà, il paraît intéressant de passer en revue quelques considérations générales sur cette

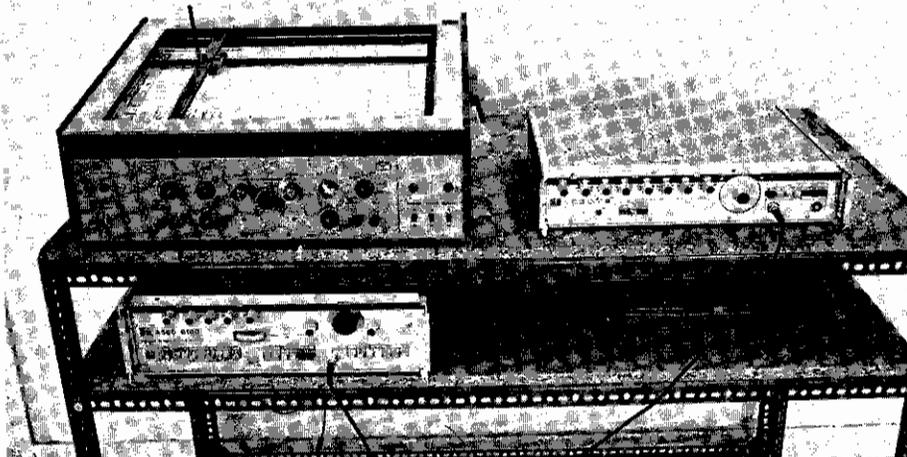


Fig. 5. Matériel de tracé des spectres de fréquence.

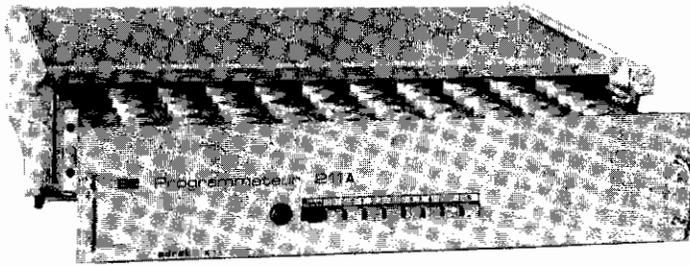


Fig. 6. Aspect du programmeur du « CS 201 ».

propriété intrinsèque des synthétiseurs qu'est la programmation. Le programmeur est une mémoire réglable qui permet l'élaboration de 8 fréquences pré-réglées, qui sont ensuite mises en service soit à l'aide de boutons-poussoirs (semi-automatique), soit par l'intermédiaire d'un cadenceur (402 par exemple). Il est d'ailleurs possible d'utiliser plusieurs programmeurs, ce qui étend le nombre de fréquences pré-réglées à 16 - 24 ..., ($k \times 8$).

Il est certain que la simplicité de programmation permet au synthétiseur d'être inclus dans un ensemble complexe de calcul d'optimisation, d'automatisme ou de télécommande, ainsi que dans une chaîne instrumentale faisant intervenir un ordi-

nateur. On peut alors envisager le bouclage de la chaîne et ainsi réaliser une rétroaction de la mesure sur la simulation (synthétiseur), en vue d'obtenir un résultat optimal au niveau du système ou du dispositif soumis aux essais. Le synoptique d'une telle chaîne est donné par la figure 7.

CIRCUITS ADDITIONNELS

Il est parfois utile d'asservir le maître oscillateur interne du synthé-

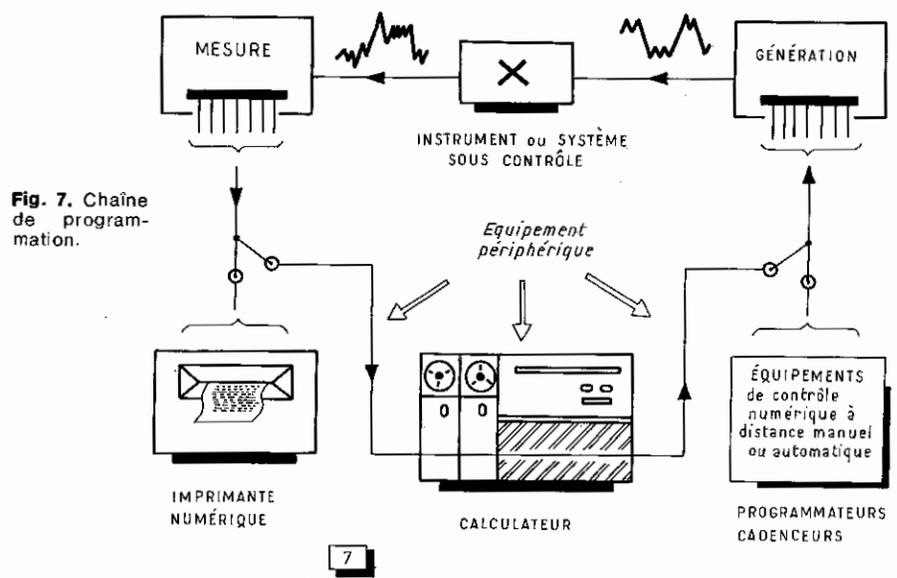


Fig. 7. Chaîne de programmation.

tiseur à un pilote extérieur. Cet asservissement s'effectue alors grâce à un comparateur de phase incorporé et dont le battement est disponible sur prise extérieure. Dans ce cas, l'asservissement est réalisé quand, par la rotation d'un potentiomètre dix tours, le battement devient nul.

Cette possibilité est surtout intéressante quand on désire asservir le synthétiseur à un étalon de haute stabilité au cæsium ou au rubidium, car alors chaque fréquence synthétisée acquiert la stabilité de ce pilote extérieur.

TECHNOLOGIE

La photographie de la figure 8 donne un exemple d'implantation des circuits d'un synthétiseur. Chaque sous-ensemble est câblé sur carte imprimée enfichable. Tous les réglages sont regroupés sur le même circuit.

J.-C. R.

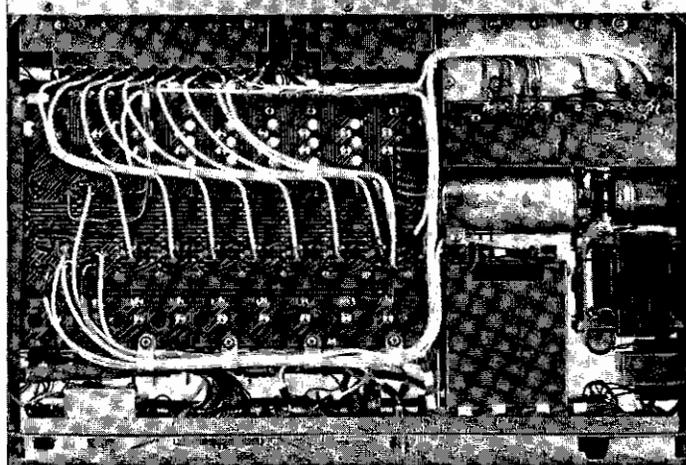


Fig. 8. Intérieur du générateur « CS 201 ».