

Au cours de la dernière décennie, des progrès très importants ont été réalisés par les ingénieurs d'applications dans le domaine de la génération des fréquences. En combinant la stabilité en fréquence et les caractéristiques de balayage, on obtient des synthétiseurs qui sont des générateurs de signaux classiques. Le plus souvent, de telles combinaisons donnent de meilleures performances.

Les tout premiers synthétiseurs de fréquence, bien qu'offrant une stabilité en fréquence et une précision excellentes, (la sortie étant dérivée d'un oscillateur à quartz thermostaté) étaient cependant altérés par des niveaux de bruit importants sur les flancs du signal et par un manque de possibilité de modulation. Ces caractéristiques ont limité leur emploi dans des applications telles que : test des interférences entre voies dans un récepteur, oscillateurs locaux dans des systèmes de réception à faible bruit et tests généraux de sources de signaux. D'un autre côté, les générateurs de signaux peuvent fournir des possibilités de modulation, des niveaux de sortie calibrés et, par effet de filtrage de l'élément d'accord, un bruit faible, à des offsets importants de la porteuse (« bruit-plancher »). Cependant leur précision en fréquence, leur stabilité et leur exactitude sont à des niveaux beaucoup plus mauvais que les synthétiseurs.

# SYNTHÈSE DE FRÉQUENCE : l'évolution des techniques

## Généralités

La série 5440 des synthétiseurs (Fig. 1) qui a été conçue par la Division Instrumentation Electronique de Eaton (EID) dans son Centre de Recherche et de Développement à Sunnyvale (Californie), utilise les plus récentes innovations dans le domaine des composants HF et microondes et des techniques de conception.

La série 5440 représente l'offre la plus attrayante dans le domaine des générateurs de signaux synthétisés. En bref, cette nouvelle source de signaux programmable, qui couvre de 1 MHz à 26,6 GHz avec une résolution de 0,2 à 0,4 Hz, fournit la stabilité et la possibilité d'accord d'un synthétiseur, avec, en même temps, un plancher de bruit équivalent à un oscillateur à cavité stabilisé, et

génère une large gamme de possibilités de modulation ainsi que d'autres normalement incluses dans les générateurs de signaux de laboratoire.

## Les fonctions de base - Fréquence et puissance

Le principe de base de l'utilisation d'une source de signal synthétisé, pour une application particulière est d'être capable de fournir des signaux très stables, avec un très haut degré de résolution et sur une très large plage de référence stabilisée. Le modèle Eaton 5440 utilise un oscillateur de référence à quartz, de fréquence 10 MHz, dans une enceinte thermostatée : sa stabilité est supérieure à  $1.10^{-9}$  par 24 h. Le synthétiseur peut aussi fonctionner à partir d'un 10 MHz externe de niveau environ

Fig. 1: Synthétiseur modèle EATON 5443 (1 MHz - 26 GHz).



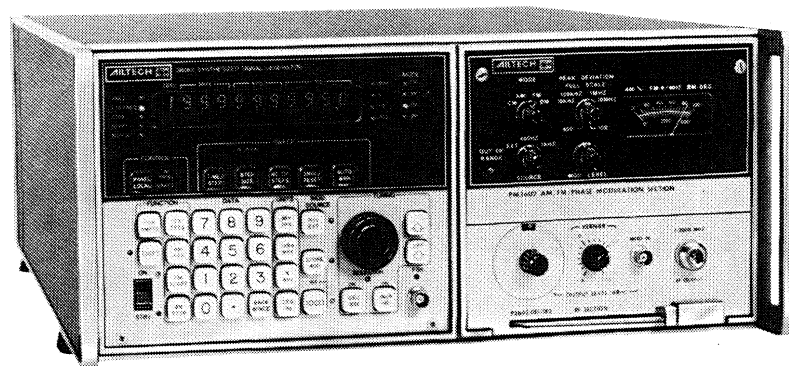


Fig. 2A : Synthétiseur modèle EATON 384 (1 MHz - 4 GHz).

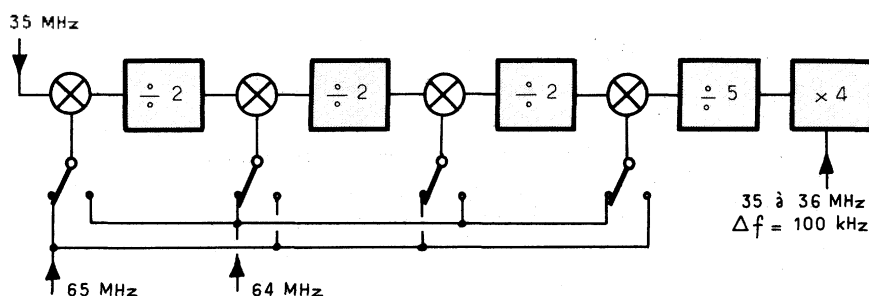


Fig. 2B : Décade simple de synthèse BDC utilisée sur le modèle à synthèse directe EATON 380 (Licence U.S. # 3636365).

ron + 8 dBm. Les caractéristiques d'un synthétiseur, spécialement sa vitesse de commutation et son bruit de phase, sont fortement affectées par la méthode utilisée pour translatier cette référence à une gamme de fréquences comprise entre une fréquence inférieure à la référence et une fréquence supérieure de trois décades à celle-ci.

Les synthétiseurs à synthèse directe ont une sortie qui est une translation directe du signal de référence, dérivée d'une manière mathématique par mélange (addition et soustraction), multiplication et division. La figure 2A montre une décade simple du synthétiseur à synthèse directe modèle Eaton 380 (fig. 2B).

La sortie d'un synthétiseur à synthèse indirecte est produite à partir d'un ou plusieurs oscillateurs à tension de commande (VCO) ver-

rouillés en phase sur la référence (ou un signal synthétisé à partir de la référence) à travers, habituellement, un diviseur programmable à rapport variable. La figure 3 montre une boucle typique utilisée en synthèse indirecte.

Des avantages et des inconvénients existent dans les deux techniques. Les synthétiseurs directs ont tendance à mieux préserver les caractéristiques de bruit du signal de référence, à une fréquence proche de celle-ci (décalage par rapport à la porteuse de 1 kHz). Généralement, on peut les commuter d'une fréquence à une autre en quelques microsecondes, ce qui permet des vitesses de balayage plus rapides pour certaines applications, les rendant ainsi aptes à des applications de « drivers » pour des sauts importants en fréquence. Cependant, par leur

nature de conception, les synthétiseurs directs sont plus bruyants que les synthétiseurs indirects à plus de quelques kilohertz de la porteuse; ils sont généralement limités à des applications dont la fréquence est inférieure à quelques gigahertz et sont généralement beaucoup plus coûteux à fabriquer.

Les synthétiseurs indirects, grâce à une conception soignée de la boucle de verrouillage en phase, peuvent également approcher des performances de bruit près de la référence.

Cependant, à des décalages de fréquence supérieurs de quelques kilohertz de la porteuse, la bande passante de la boucle de verrouillage en phase commence à prendre effet et le bruit plancher ainsi que le bruit sur les flancs du signal sont réduits à des valeurs bien inférieures à celles des synthétiseurs directs. Il existe cependant un compromis évident dans le fait que réduire la bande passante de la boucle réduira le bruit tout en augmentant le temps de commutation.

Le temps de commutation et d'établissement de la fréquence finale des synthétiseurs indirects typiques sur le marché se mesurent en dixièmes de millisecondes.

La conception du modèle Eaton 5440 utilise une combinaison unique des deux techniques. De petits incréments de fréquence sont élaborés par sept boucles de verrouillage en phase. Le signal de sortie de la partie synthèse indirecte, 250 à 500 MHz par incréments de 0,1 Hz, est mélangé à un signal de 3 à 9 GHz (incrément de 500 MHz) élaboré par une synthèse dans les parties hyperfréquences.

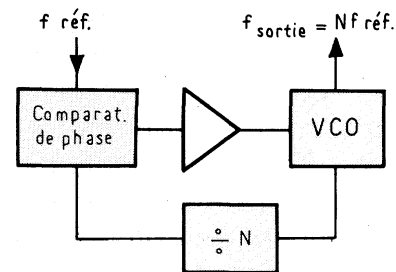


Fig. 3 : Boucle typique de verrouillage de phase.

Les interconnexions entre les différentes sections des boucles de verrouillage en phase sont également intéressantes. La division de fréquence est utilisée entre sections (Fig. 4) en même temps que des boucles en cascade pour fournir des incréments très faibles de fréquence à des fréquences basses, ceci afin d'assurer une résolution raisonnable lorsque la fréquence est translatée au niveau de l'hyperfréquence.

Le résultat final est reproduit tableau I.

TABLEAU I

GAMME DE FRÉQUENCE	RÉSOLUTION
0,001 à 3 GHz	0,2 Hz
3 à 9 GHz	0,1 Hz
9 à 18 GHz	0,2 Hz
18 à 26,5 GHz	0,4 Hz

Le procédé de division a un avantage supplémentaire: le bruit plancher sera théoriquement réduit à:

$$\Delta N_{dB} = 20 \log_{10} D$$

où D est le rapport de division.

La conception des sections de boucles de verrouillage en phase utilisent les avantages des toutes dernières découvertes en matière de composants à faible bruit utilisés dans les oscillateurs, les amplificateurs d'erreur et les diviseurs: ceci afin d'obtenir les caractéristiques de bruit les plus faibles sur le signal de sortie. La figure 5 montre une partie typique d'une boucle de verrouillage en phase.

La synthèse des signaux hyperfréquences utilise également les dernières découvertes technologiques. La référence 500 MHz est fournie par un oscillateur à onde acoustique de sur-

face (SAW) dans une boucle d'échantillonnage commandée par une multiplication de la référence 10 MHz. Le facteur de surtension Q élevé de l'oscillateur aide à la préservation des caractéristiques de faible bruit de la référence.

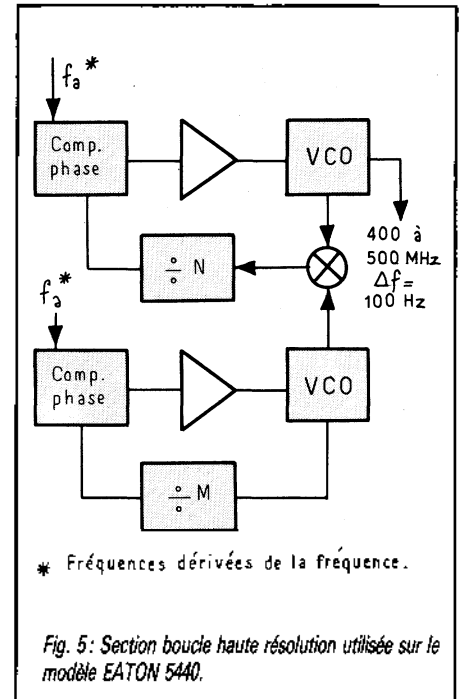
Le signal est ensuite multiplié par une diode multiplicatrice «step recovery» (SRD) pour développer une série de raies espacées de 500 MHz dans la gamme de 3 à 9 GHz. Les filtres à YIG accordables commandés par des convertisseurs numériques/analogiques à 12 bits choisissent la raie appropriée pour le mélange avec la sortie UHF de la boucle haute fréquence.

Une multiplication directe est ensuite utilisée pour développer les fréquences supérieures. La figure 6 montre un bloc diagramme simplifié de la partie hyperfréquence.

Le signal est échantillonné par un détecteur directionnel pour un nivelage interne automatique et ensuite appliqué à un atténuateur à pas programmable. La combinaison d'un nivelage à boucle fermée et d'un atténuateur de sortie permet une résolution d'amplitude de 0,1 dB avec une précision de  $\pm 1,75$  dB (à 0 dB d'atténuation) sur toute la gamme de fréquence de l'appareil. Le nivelage fonctionne pour des sorties comprises entre +13 et -90 dBm..

L'amplification faible bruit est utilisée dans la partie hyperfréquence pour fournir des puissances de sorties raisonnables utiles pour la plupart des tests de systèmes.

Le tableau II montre la puissance disponible à la sortie pour chaque



\* Fréquences dérivées de la fréquence.

Fig. 5: Section boucle haute résolution utilisée sur le modèle EATON 5440.

gamme de fréquence. Le nivelage par milliwattmètre externe ou détecteur à diode est également disponible.

TABLEAU II

GAMME DE FRÉQUENCE	PUISSANCE DE SORTIE
0,001 à 9 GHz	+ 13 dBm
9 à 18 GHz	+ 10 dBm
18 à 26,5 GHz	+ 7 dBm

## Modulation

Les fréquences des signaux internes de modulation (400 et 1000 Hz) proviennent, par synthèse directe, de la référence 10 MHz. Des entrées pour modulation externe sont également disponibles.

Le signal de modulation d'amplitude est appliqué, via les circuits ALC, à deux modulateurs linéaires: un modulateur localisé dans la signal UHF, convertisseur hyperfréquence, l'autre localisé entre le dernier doubleur/filtre hyperfréquence et les amplificateurs hyperfréquences.

La profondeur de modulation peut varier de 0 à environ 90 % pour des fréquences de porteuse allant jusqu'à 18 GHz et de 0 à environ 70 % pour des fréquences de porteuse jusqu'à 26,5 GHz. L'instrument peut accepter des signaux externes de modulation de 10 Hz à 200 kHz (à 3 dB de «roll-off»).

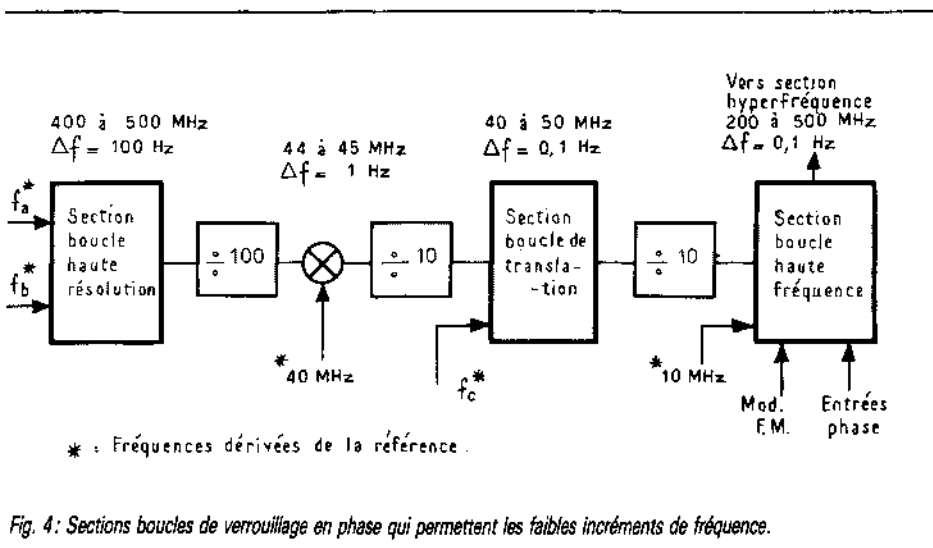


Fig. 4: Sections boucles de verrouillage en phase qui permettent les faibles incréments de fréquence.

Le modulateur d'impulsion est localisé physiquement juste après le second filtre YIG dans la section hyperfréquence. Il est commandé par un générateur de déclenchement interne avec une commodité de choix, de manière à recevoir des impulsions externes à polarités positive et négative.

La conception du modulateur est telle qu'un rapport « on/off » d'environ 80 dB peut être obtenu avec des temps de montée et de descente inférieurs à 10 nanosecondes pour des fréquences de répétition allant jusqu'à 5 MHz.

La modulation de fréquence est obtenue par modulation directe du VCO qui fournit le signal 40 MHz pour le mélangeur entre les sections de boucle de haute résolution et de translation (voir figure 4).

Des excursions crête jusqu'à 200 kHz à des taux de répétition allant jusqu'à 330 kHz sont disponibles.

Une option sera disponible mi-1986 : elle fournira des excursions crêtes jusqu'à 10 MHz à des taux supérieurs à 330 kHz. La modulation de phase est effectuée en appliquant le signal de modulation au comparateur de phase de la boucle finale haute fréquence de verrouillage en phase.

Les excursions maxima disponibles à des taux compris entre le continu et 100 kHz sont définies dans le tableau III.

TABLEAU III

FRÉQUENCE DE	EXCURSION DE
0,001 à 3 GHz	± 200°
3 à 9 GHz	± 100°
9 à 18 GHz	± 200°
18 à 26,5 GHz	± 400°

## Programmabilité

En version standard, le modèle Eaton 5440 est entièrement programmable et conforme au standard IEEE-STD-488-1978. Un interface RS-232 sera disponible en option au cours de l'année 1986.

Toutes les fonctions du panneau avant du modèle Eaton 5440 sont programmables. En plus du choix typique de la fréquence de sortie et de son niveau, la programmation est étendue à :

- Largeur de balayage de vitesse ;

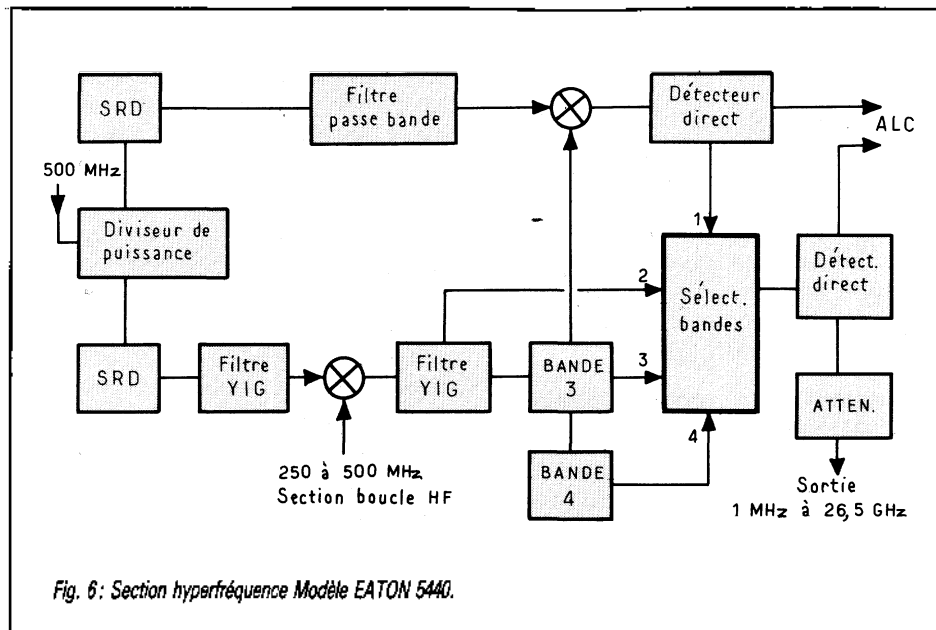


Fig. 6: Section hyperfréquence Modèle EATON 5440.

- HF - mise en route - arrêt ;
- Choix de la source de nivelage ;
- Choix de la source de modulation ;
- Sensibilité de la modulation.

La programmation comprend aussi toute une gamme de fonctions de tests internes.

## Pureté spectrale

La pureté spectrale de la sortie d'une source est habituellement décrite suivant deux caractéristiques :

- Le niveau et la fréquence relatifs au signal choisi de signaux discrets présents en sortie (signaux erratiques) ;
- L'amplitude et la largeur (en fréquence) du bruit de phase sur le signal de sortie.

L'existence, à forts niveaux, de l'une ou l'autre des caractéristiques ci-dessus peut sévèrement limiter l'utilisation d'une source de signaux.

Des signaux erratiques discrets sont triés par catégories suivant leur relation avec la fréquence de sortie, ce qui est généralement une indication de leur provenance.

Ces signaux erratiques sont habituellement caractérisés par :

- les harmoniques de la sortie ;
- les sous-harmoniques de la sortie ;
- des signaux non corrélés harmoniquement avec la sortie.

Les harmoniques sont le résultat habituel de non-linéarités des circuits

de sortie ou près de la sortie. Les sous-harmoniques résultent de fuites ou de passages de signaux de commande. Les signaux erratiques non corrélés harmoniquement sont générés dans les divers procédés de mélange. Ces derniers sont les plus difficiles à supprimer du fait que leurs relations avec la fréquence de sortie désirée n'est pas, en général, une constante.

Les performances excellentes du modèle Eaton 5440, en réduisant les niveaux de tous les types de signaux erratiques, sont obtenues en portant le plus grand soin à tous les facteurs qui en sont la cause.

Les fréquences d'entrées des mélanges sont choisies pour permettre le filtrage de produits de mélanges erratiques non désirés. Autant que possible, les niveaux d'attaque des mélanges sont fixés de manière à minimiser la génération de ces produits. Des modules, et quelquefois des composants blindés sont utilisés pour réduire les parasites et les câbles sont soigneusement vérifiés pour résuier les fuites. Le tableau IV montre les niveaux parasites non-harmoniques à la sortie de l'appareil.

TABLEAU IV

FRÉQUENCE DE SORTIE	NIVEAU
0,001 à 3 GHz	- 64 dBc*
3 à 9 GHz	- 70 dBc
9 à 18 GHz	- 64 dBc
18 à 26,5 GHz	- 58 dBc

Le bruit de phase sur le signal est probablement l'aspect le plus impor-

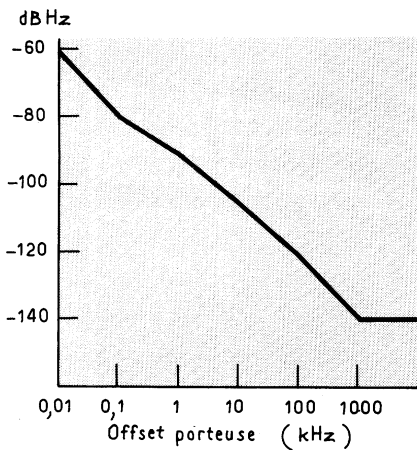


Fig. 7: Performances typiques de bruit de phase du modèle EATON 5440.

tant de la pureté spectrale d'une source.

Des signaux parasites, quoique gênants, sont identifiables. Cependant, un niveau de bruit élevé sur le flanc d'un signal, ou un bruit plancher élevé, peut limiter l'utilisation d'une source ou même la rendre inutilisable pour certaines applications. Les tests des récepteurs : sensibilité, sélectivité et interférence entre canaux, peuvent être sévèrement limités, voire même impossible à cause des niveaux élevés de bruit sur le flanc du signal (à quelques kilohertz).

Un bruit plancher élevé, c'est-à-dire un bruit à 1 MHz ou plus de la porteuse, pourra limiter l'utilisation de la source dans des applications où elle est utilisée comme oscillateur local : le bruit converti dans le récepteur représente le même offset mais par rapport à la fréquence intermédiaire.

Un signal de sortie à faible bruit suppose le choix d'un oscillateur de référence de haute qualité et à faible bruit : de plus il faut y ajouter les principes de base utilisés dans les oscillateurs à faible bruit (choix des éléments actifs à faible bruit, polarisation, etc.).

En outre, les mêmes techniques de blindage sont utilisées pour réduire le bruit en même temps que les signaux parasites. La figure 7 montre les performances typiques de bruit de phase du modèle Eaton 5440 à deux fréquences de sortie différentes. Ces courbes sont lissées (tracé

asymptotique des performances réelles) et sont typiques des synthétiseurs indirects, excepté qu'elles sont de 5 à 10 dB plus basses que les autres synthétiseurs disponibles dans le commerce il y a quelques années.

### Rapidité de commutation

La vitesse de commutation n'est pas généralement une considération importante dans les synthétiseurs indirects, premièrement parce qu'il est communément admis que ces types de synthétiseurs sont lents. Cependant, des améliorations sur la vitesse de commutation peuvent réduire les coûts d'une manière significative, dans de nombreuses applications.

En chaîne de production ou en cas de volume de tests très importants, une vitesse de commutation plus rapide veut dire gain de temps.

Gain de temps veut dire plus grande production et réduction des coûts de test.

Quelques applications, en large gamme de fréquences, font utiliser la technique « ping-pong » : le signal, par sauts de fréquence, provient de plusieurs synthétiseurs que l'on commute : ceci tout simplement parce que le temps de commutation de ces synthétiseurs est trop important pour ces applications.

Une amélioration de la vitesse de commutation peut réduire le nombre de sources de signal et réduire ainsi l'investissement pour un système particulier.

La vitesse de commutation des synthétiseurs est habituellement spécifiée comme étant le temps nécessaire, pour la fréquence de sortie, à s'établir le plus près possible de la fréquence finale désirée (offset de fréquence).

Il n'existe pas d'offset standard car il varie suivant les synthétiseurs des différents fabricants et même, suivant le même appareil, selon le pas du saut de fréquence.

Les synthétiseurs classiques ont une vitesse de commutation de 10 ms, voire 50 ms pour s'établir à 1 kHz de la fréquence finale pour des pas de fréquences supérieurs à 1 MHz.

La combinaison de la synthèse directe et de la synthèse indirecte, ainsi que l'optimisation de la concep-

tion des boucles de verrouillage en phase, donnent au modèle Eaton 5440, les spécifications suivantes :

- Vitesse de commutation inférieure à 1 ms (500  $\mu$ s typiques) pour être à 10 Hz de la fréquence finale et pour des pas de fréquence allant jusqu'à 100 MHz.

Le synthétiseur Eaton 5440 est disponible en deux versions :

- Modèle 5442 : Gamme de fréquences : 1 MHz à 18 GHz
- Modèle 5443 : Gamme de fréquences : 1 MHz à 26,5 GHz.

L'extension de la fréquence 18 à 26,5 GHz peut être ajoutée ultérieurement sur le modèle 5442 pour le transformer en modèle 5443.

Cet appareil offre des performances de bruit phase excellentes ainsi qu'une très bonne vitesse de commutation.

Il peut être utilisé en laboratoire à cause de toutes ses possibilités de modulation. Il est de dimensions réduites :

hauteur : 13,3 cm ;  
largeur : 42,54 cm ;  
profondeur : 55,9 cm.

Sa consommation est faible pour un appareil qui offre autant de possibilités.

A. MARION

Eaton

Division Instrumentation  
Electronique Ailtech

Toute  
l'électronique

une

véritable

bibliothèque

technique