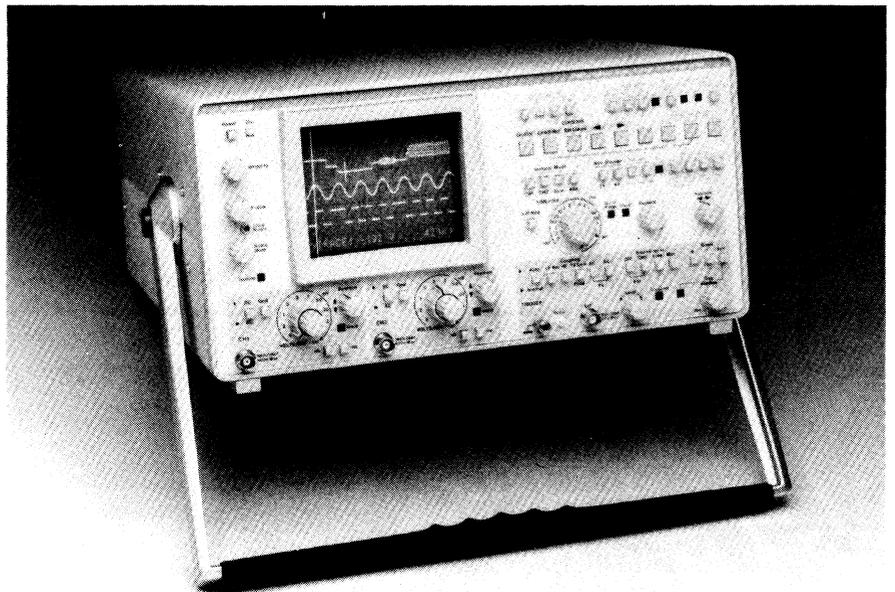


## CONCEPTION ET À MÉMOIRE

*Avec le 4050, Gould complète sa gamme d'oscilloscopes à mémoire numérique, par un appareil à hautes performances. Il est conçu suivant la même philosophie que les Gould 1425 et Gould 4035 : chacune des deux voies possède son convertisseur parallèle, 100 MHz 8 bits, et sa mémoire de 1 Kmots visualisée en temps réel. Pour la conception du 4050, Gould utilise les progrès techniques les plus récents, comme les convertisseurs rapides parallèles 100 MHz 8 bits ou la logique de contrôle intégrée dans un circuit prédiffusé ; ce qui permet d'obtenir un appareil très performant pour un prix très abordable.*



# UTILISATION D'UN OSCILLOSCOPE NUMÉRIQUE

## Organisation du système de capture du signal

L'appareil possède deux voies identiques comprenant chacune une chaîne complète de capture (fig. 1).

La bande passante du préamplificateur-atténuateur est limitée à 50 MHz pour éviter les effets de repliement.

En effet, si l'on considère un signal sinusoïdal de fréquence  $F_s$  échantillonné à une fréquence  $F_e$ , la suite des impulsions d'échantillonnage, dont l'amplitude est égale à la valeur instantanée du signal à cet instant, peut être décomposée en une somme de composantes sinusoïdales, en calculant les différents termes d'une série de Fourier.

Ce spectre comprend une infinité de fréquences, qui sont représentées sur la figure 1 et données par l'expression suivante :

$$n F_e \pm F_s.$$

Dans un oscilloscope à mémoire numérique, on reconstitue sur l'écran le signal d'entrée  $F_s$  et non l'ensemble du spectre issu de l'échantillonnage.

Comme la fréquence  $F_s$  est la première du spectre, la jonction des points successifs, par un segment de droite, réalise un filtre passe-bas qui laisse passer  $F_s$  et qui bloque les fréquences  $F_e - F_s$  et au dessus.

Mais, si en gardant  $F_e$  fixe, on fait croître  $F_s$ , la raie  $F_s$  se déplace vers la droite et la raie  $F_e - F_s$

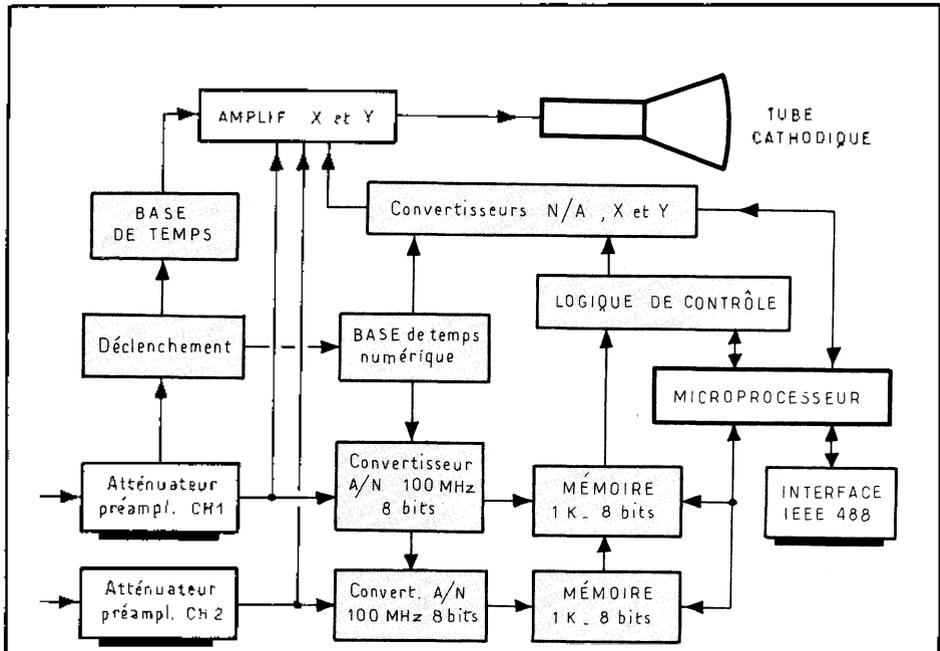


Fig. 1 : Schéma général du 4050.

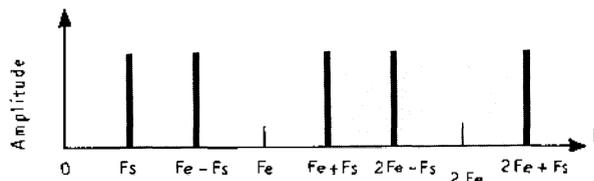
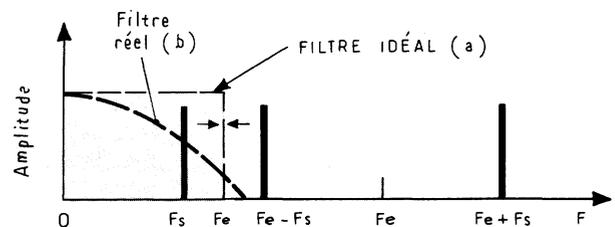


Fig. 2 : Spectre des échantillons d'un signal sinusoïdal

Fig. 3 : Déplacement du spectre en fonction de la fréquence du signal.



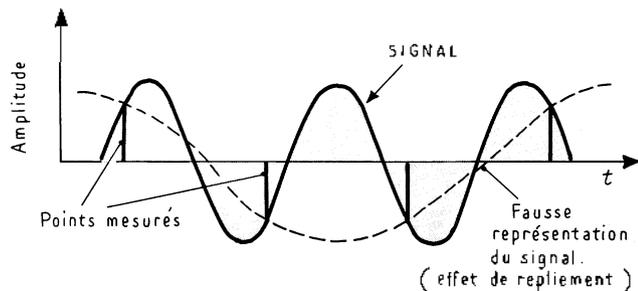


Fig. 4 : Un signal dont la fréquence est supérieure à la moitié de la fréquence d'échantillonnage donne lieu à une fausse représentation.

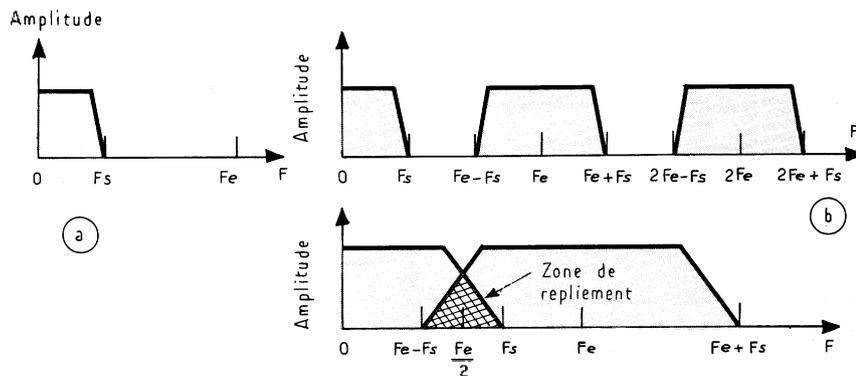


Fig. 5 : Echantillonnage d'un signal contenant un spectre de fréquences.

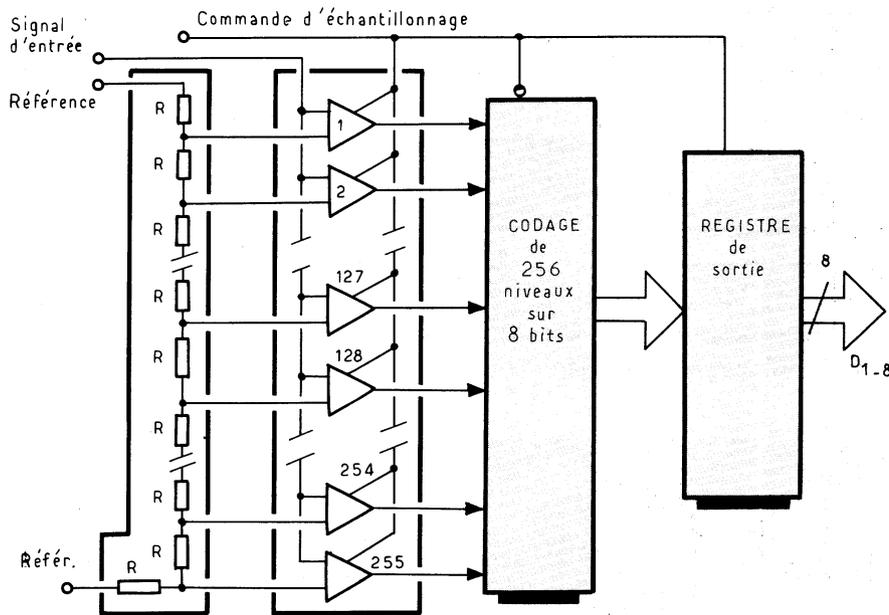


Fig. 6 : Le convertisseur parallèle (Flash ADC).

se déplace vers la gauche (fig. 3). Il arrive un moment où les deux composantes ont la même valeur :

$$F_s = F_e - F_s.$$

Si  $F_e - F_s$  devient inférieur à  $F_s$  (fig. 4), il n'est plus possible de séparer la fréquence fondamentale  $F_s$  de la fréquence image  $F_e - F_s$ . C'est cette limite  $F_s = F_s/2$

qui constitue le théorème de Shannon :

*On ne peut pas reproduire le signal avant échantillonnage si sa fréquence est supérieure à la moitié de la fréquence d'échantillonnage.*

En réalité, le signal observé comporte généralement tout un spectre de fréquences de largeur

$F_s$  (Fig. 5) ; après échantillonnage, on aura une série infinie de spectres images centrés sur  $F_e$ ,  $2F_e$  etc. et couvrant la bande  $F_e - F_s$  à  $F_e + F_s$ ,  $2F_e - F_s$  à  $2F_e + F_s$  etc (fig. 5 b).

Si le signal contient des fréquences supérieures à  $F_e/2$ , le spectre principal et le spectre image se chevauchent ; une fois que des fréquences dues au repliement ont été introduites, il n'est plus possible de les séparer du signal original (fig. 5 c). La seule solution consiste à limiter la bande passante à  $F_e/2$  à l'entrée du système de numérisation.

Dans la pratique, on ne sait pas réaliser des filtres à pente infinie (cf. fig. 5 (a)) ; le filtre réel sera progressif (cf. fig. 5 b), la fréquence d'échantillonnage devra donc être notablement supérieure au double de la fréquence d'entrée.

En pratique, on utilisera des fréquences au moins cinq à dix fois supérieures à la plus haute fréquence comprise dans le signal d'entrée ; ce qui, dans le cas d'un échantillonnage à 100 MHz comme le 4050, autorise une bande passante de 10 MHz (avec dix points par cycle) ou de 20 MHz (avec cinq points), ce qui donne une lisibilité encore très acceptable.

La sortie de chaque préamplificateur attaque sous très faible impédance un convertisseur analogique-numérique en circuit intégré.

Ce convertisseur est du type parallèle (Flash ADC), fonctionnant à 100 MHz et codant l'information sur 8 bits. Ce circuit (fig. 6) comporte 255 comparateurs. Le signal analogique à coder est appliqué simultanément sur l'une des entrées de chacun des 255 comparateurs, l'autre entrée des comparateurs est reliée à une chaîne de résistances qui en fixe la polarisation ; une tension de seuil est appliquée à chaque comparateur suivant une loi progressive.

Lorsqu'une tension  $V$  est appliquée à l'entrée du système, à chaque impulsion de l'horloge d'échantillonnage, tous les comparateurs dont le seuil est inférieur à  $V$  basculent, alors que les autres restent à zéro.

Le circuit de codage identifie le comparateur de plus haut niveau

qui a basculé et code sous forme binaire son numéro d'ordre. Un registre de sortie mémorise le résultat.

La sortie du convertisseur est envoyée à l'entrée de la mémoire de 1 K mots de 8 bits où, suivant la vitesse de balayage choisie, les données sont enregistrées.

Chaque voie possédant une chaîne complète, la capture de l'information est parfaitement simultanée sur les deux voies et se fait toujours à la vitesse maximale des convertisseurs, dans les mêmes conditions, quelle que soit sa vitesse de balayage choisie.

## Performances d'un oscilloscope à mémoire numérique

Les performances d'un oscilloscope conventionnel sont principa-

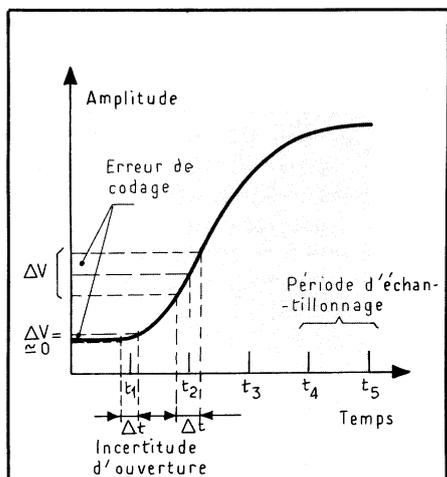


Fig. 7 : La quantification du signal.

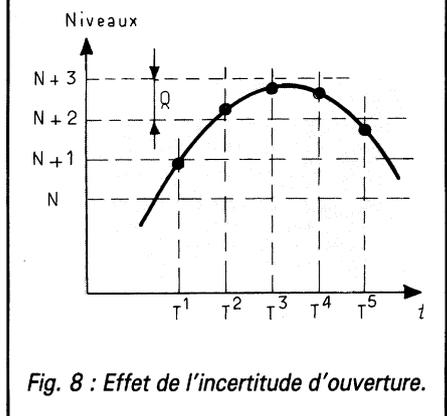


Fig. 8 : Effet de l'incertitude d'ouverture.

lement caractérisées par la valeur de la bande passante ; celle-ci est définie comme la fréquence où la valeur du gain a chuté de 3 dB.

La forme de la courbe d'atténuation en fonction de la fréquence est bien connue (6 dB par octave).

Cette variation du gain des amplificateurs en fonction de la fréquence existe également sur un oscilloscope à mémoire numérique, mais d'autres éléments propres à la numérisation interviennent pour caractériser les performances.

### La quantification

Alors que la valeur du signal analogique présent à l'entrée du convertisseur varie d'une manière continue, le système de numérisation prélève le signal à des instants précis et en fournit un équivalent numérique sous forme de nombre binaire.

Du fait que la représentation numérique est limitée à un certain nombre de bits, tout point du signal mesuré à l'intérieur de l'intervalle de quantification  $Q$  sera codé par le même nombre  $N$ .

Il s'ensuit que l'information mémorisée  $N$  définit que la valeur initiale du signal était comprise entre les limites  $N$  et  $N + 1$  (fig. 7).

Dans la pratique, on s'arrange pour que la valeur codée  $N$  occupe le centre de l'intervalle de quantification  $Q$ . La largeur de l'intervalle de quantification est égale à une unité du nombre représentant le codage pleine amplitude (LSB).

Ainsi la valeur théorique de l'amplitude du signal en ce point sera :

$$N \pm 1/2 \text{ LSB.}$$

Le 4050 a une résolution nominale verticale de 8 bits, ce qui signifie une gamme dynamique de 49,9 dB. Dans ces conditions, l'erreur maximale de quantification sera de  $1/256$  soit :  $\pm 0,195 \%$ .

### Les facteurs qui limitent la résolution

Différents facteurs influencent la résolution réelle utilisable sur un

oscilloscope à mémoire numérique ; les plus importants sont le bruit de fond du système et l'incertitude sur le temps d'ouverture du système d'échantillonnage.

Le bruit global du système peut réduire considérablement la résolution effective d'un système de conversion analogique-numérique et l'on rencontre des convertisseurs 10 bits qui n'offrent que 7 ou 8 bits de résolution effective à cause du bruit qui s'étend sur quatre ou cinq niveaux.

Pour pouvoir bénéficier de la totalité de la résolution du convertisseur, le bruit doit être inférieur à l'erreur de quantification.

Ceci se met facilement en évidence en connectant l'entrée de l'appareil à la masse et en contrôlant, avec l'expansion maximale, sur combien de niveaux la trace se trouve répartie ; normalement tous les points doivent se trouver sur un ou deux niveaux suivant que le réglage du cadrage positionne la trace sur un niveau de quantification ou entre deux niveaux voisins.

Ce bruit global provient de plusieurs sources. Tout d'abord le bruit de l'amplificateur d'entrée et de tous les dispositifs dans lesquels transite le signal (CCD par exemple).

Mais également le bruit présent sur les alimentations, soit le bruit propre de celle-ci, (on évitera les alimentations à découpage) soit le bruit induit par la partie numérique de l'appareil.

Grâce à une étude poussée sur les différents étages d'amplification, au codage par conversion directe (flash ADC), à l'utilisation d'une alimentation à régulation série et à un excellent découplage entre la partie analogique et la partie numérique, sur le 4050, l'ensemble de ces bruits est inférieur au  $1/2$  LSB.

L'incertitude sur le temps d'ouverture est souvent un problème plus important que le bruit du système dans un oscilloscope à mémoire numérique, particulièrement lorsque la variation  $dV/dT$  du signal devient relativement élevée.

L'incertitude d'ouverture définit avec quelle précision en temps l'information est prélevée lors d'une conversion analogique-  
nu-

Tableau I

Fréquence du signal	620 kHz	1,2 MHz	2,5 MHz	5 MHz	10 MHz	20 MHz
Nombre de bits effectifs	7	6	5	4	3	2

Tableau II

Fréquence du signal	Nombre de bits effectifs	Erreur maximale	Gamme dynamique
1 MHz	7,3	+/- 0,31 %	43,9 dB
2 MHz	7,2	+/- 0,34 %	43,3 dB
5 MHz	6,9	+/- 0,41 %	41,5 dB
10 MHz	6,7	+/- 0,48 %	30,3 dB
20 MHz	6,3	+/- 0,63 %	37,9 dB
30 MHz	6,0	+/- 0,78 %	36,1 dB

Nota : pour une amplitude de 90 % du plein écran

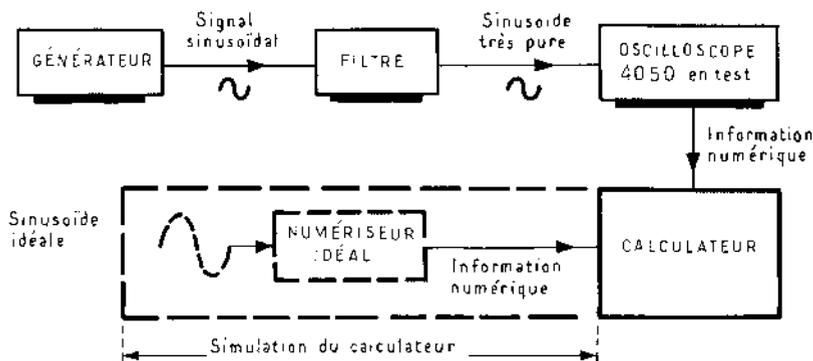


Fig. 9 : Principe de la méthode de mesure de la résolution effective.

mérique. Cette imprécision en temps se traduit par une imprécision dans la conversion du signal provoquant une diminution de la résolution (fig. 8).

Celle-ci ne doit pas être confondue avec l'atténuation du signal provoquée par la diminution du gain de l'amplificateur aux fréquences élevées.

L'incertitude sur le temps d'échantillonnage d'un convertisseur analogique-numérique, peut être provoquée par une grande variété de facteurs suivant le principe du système utilisé et par le bruit dans le système de commande de l'échantillonnage.

Si l'on considère un signal sinusoïdal de la forme :

$$V = A \sin 2 \Pi ft,$$

l'erreur maximale pour cette sinusoïde est donnée par :

$$dV = 2 \Pi dt.$$

Si l'incertitude d'ouverture n'est pas minimisée correctement lors de l'étude du convertisseur analo-

gique-numérique, il en résultera pour l'appareil une chute de la résolution effective, notable, pour les fréquences d'échantillonnage élevées.

Par exemple un convertisseur 8 bits dont l'incertitude d'échantillonnage serait de seulement une nanoseconde donnerait les résolutions effectives indiquées dans le tableau I.

On voit que pour un signal de 20 MHz, avec une incertitude de +/- 1 ns, la résolution serait pratiquement inexistante.

Ces deux facteurs font que l'indication du nombre de bits théorique n'est pas suffisante pour donner une information précise sur la qualité de la mesure effectuée sur cet appareil.

Il faut tenir compte du bruit du système qui peut dégrader la résolution aux basses fréquences et de l'incertitude sur le temps d'ouverture qui limite cette résolution aux fréquences élevées.

Gould est un des rares constructeurs à garantir les caractéristiques de résolution effective (probablement le seul constructeur pour un appareil d'un prix aussi intéressant).

Mais l'incertitude d'ouverture du convertisseur analogique-numérique du 4050 est trop faible pour pouvoir être mesurée directement.

Pour pouvoir caractériser la résolution du 4050, Gould, utilise une méthode de mesure globale de la résolution effective qui prend en compte toutes les causes d'erreurs (fig. 9).

Un signal sinusoïdal de très grande pureté est appliqué à l'entrée de l'oscilloscope. Les informations capturées sont comparées par la méthode des moindres carrés avec celles obtenues par simulation d'un système idéal dans un calculateur.

Le programme calcule une sinusoïde idéale,  $A \sin (\omega t + f) + C$ , puis la traite dans un numériseur idéal (logiciel) pour en donner une représentation quantifiée.

La comparaison entre la sinusoïde idéale et la sortie du numériseur idéal donne l'erreur théorique de quantification (+/- 0,195 % pour 8 bits).

Les informations réelles sortant de l'oscilloscope sont alors comparées à la courbe idéale pour obtenir la fonction d'erreur du système réel. Le nombre de bits perdus est égal à :

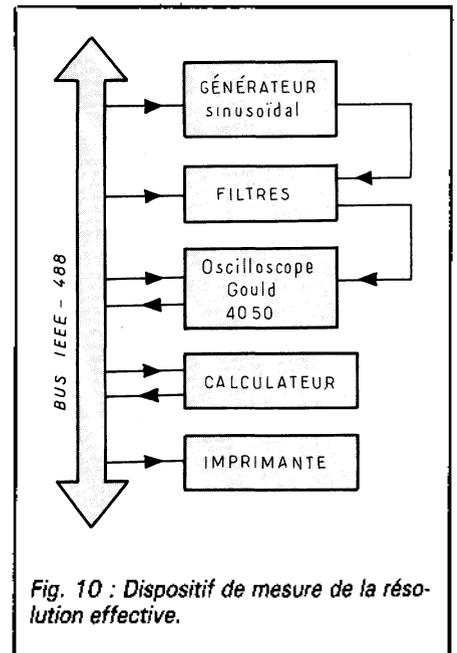


Fig. 10 : Dispositif de mesure de la résolution effective.

bits perdus =

$$\log_2 \frac{\text{erreur de numérisation}}{\text{erreur idéale de numérisation}}$$

Le nombre de bits effectifs est égal au nombre de bits d'un convertisseur idéal, qui introduirait une erreur d'écart quadratique moyen égale à celle du convertisseur testé et la valeur de la résolution en bits effectifs est égale à :

bits effectifs =

$$\text{nombre de bits normal} - \text{nombre de bits perdus.}$$

Cette mesure (fig. 10) effectuée sur des signaux sinusoïdaux de différentes fréquences donne, pour le 4050, les résultats indiqués dans le tableau II.

On remarquera que la précision analogique et la précision numérique sont de nature différentes. La précision des gammes du circuit d'entrée est principalement due aux erreurs de réglage des atténuateurs et des gains ; un étalonnage lors de la mesure permet d'améliorer notablement cette précision.

Par contre, la précision numérique est liée à l'erreur de quantification et ne peut être corrigée mais reste toujours nettement meilleure que la précision analogique.

## Visualisation et organisation des mémoires

Sur le 4050 les données capturées sont visualisées sans aucune altération ; les points sont seulement réunis par un segment de droite pour faciliter l'association des points correspondant à un même signal. L'utilisateur peut ainsi les analyser comme il le souhaite.

Aux vitesses moyennes et lentes la visualisation se fait en temps réel, c'est à dire que chaque nouveau point capturé est immédiatement visualisé sur l'écran ; l'opérateur peut ainsi suivre l'évolution du phénomène observé aussi bien en mode déclenché qu'en mode défilement.

Aux vitesses rapides, l'œil ne peut suivre l'évolution du signal. Pour faciliter la lisibilité, le signal est tout d'abord capturé dans une

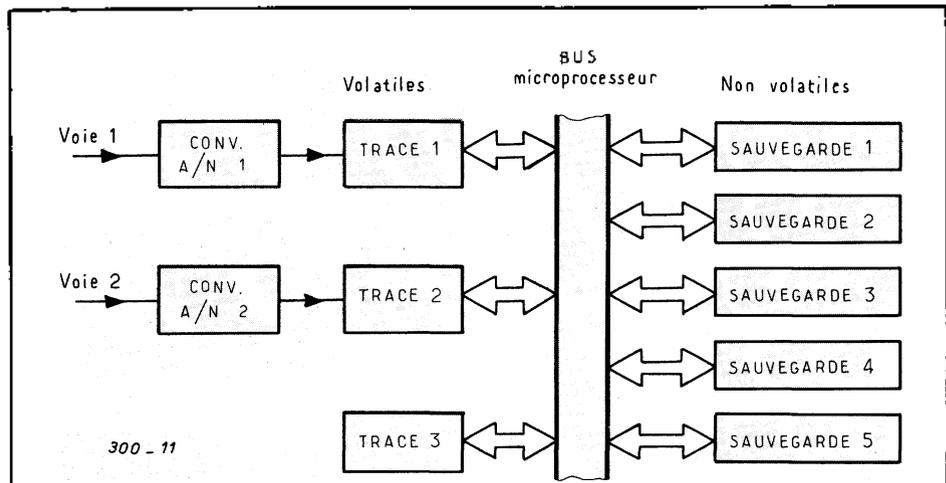


Fig. 11 : L'organisation des mémoires.

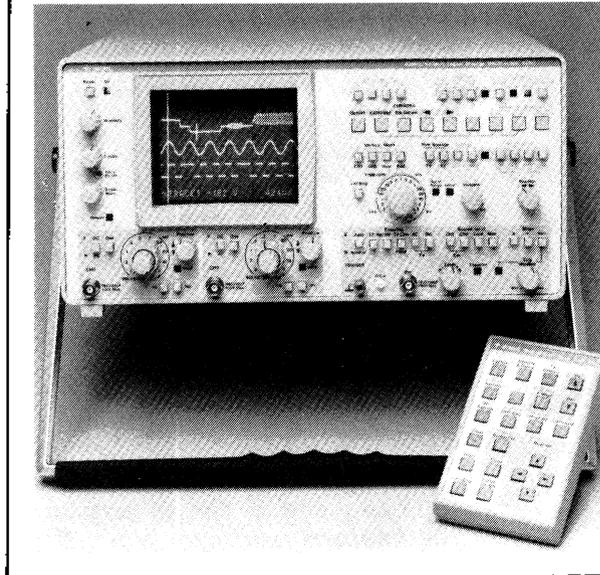


Fig. 12 : Le Gould 4050 muni de son clavier processeur.

mémoire rapide puis, lorsque la mémoire est complète, il est copié dans la mémoire de visualisation ; ce retard à la visualisation est imperceptible à l'observateur.

Le 4050 possède 8 mémoires de stockage des signaux (fig. 11). Trois d'entre elles sont visualisables sur l'écran, ce sont les deux mémoires des voies d'entrée et une troisième mémoire, également de 1 Kmots, qui permet de visualiser une trace de référence.

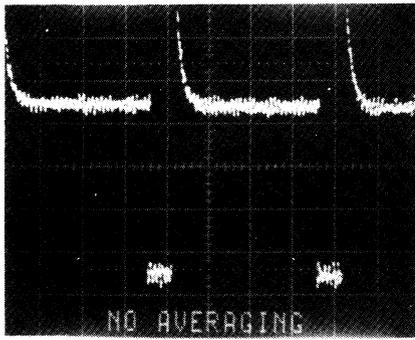
Le choix de consacrer 1 Kmots à chaque voie comme à la mémoire de référence permet de disposer de la même bande utile sur chaque signal que l'on visualise une, deux ou trois traces (la bande passante utile est fixée par la vitesse de balayage choisie et par le nombre de points sur la trace). Les cinq autres mémoires, non volatiles sont des mémoires de sauvegarde. Des touches sur la

face avant de l'appareil permettent de déplacer les informations entre les mémoires de sauvegarde et les mémoires visualisables.

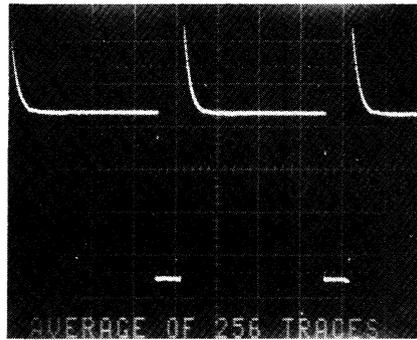
## Mesures et traitement du signal

Dans de nombreux cas, le traitement consiste à comparer le signal actuel avec un signal de référence. Le système de mémoire du 4050 se prête parfaitement à ce genre d'opération.

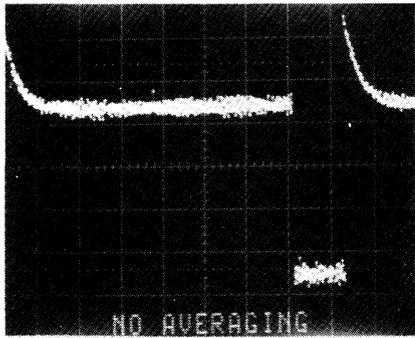
Les cinq mémoires non volatiles permettent le transport des courbes de référence ou des courbes réelles relevées lors d'une intervention sur le site d'exploitation d'un équipement.



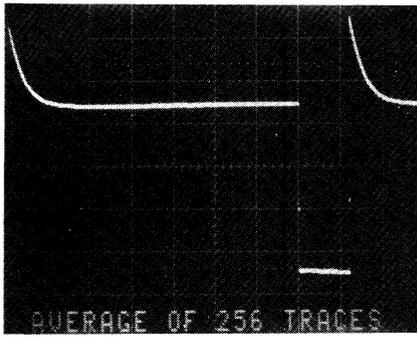
1



2



1



2

Fig. 13 : Signal sorti du bruit par le moyennage : (1) sur un balayage, (2) 256 balayages.

### Les curseurs de mesure

Le 4050 est doté de deux curseurs de mesure qui permettent d'afficher directement sur l'écran, simultanément, les différences de temps et de tension entre deux points du signal, en tenant compte des réglages de sensibilité et de vitesse de balayage.

La position du curseur de référence comme celle du curseur de mesure peuvent être fixées en n'importe quel point du signal sur les trois traces visualisables ; la position est fixée en numérique par rapport aux points mesurés, il n'y aura donc pas d'erreur de pointé due aux erreurs de paralaxe ou à l'épaisseur de la trace ; en utilisant l'expansion, la position de chaque curseur peut être réglée au point près.

### Le clavier processeur

Le 4050 peut être muni en option d'un clavier de traitement (fig. 12) qui permet d'exécuter des fonctions lors de la capture du signal ou sur les traces mémorisées.

Lors de la capture, il est possible de faire le moyennage sur un maximum de 256 captures, ce

qui permet par exemple de sortir un signal cohérent d'un bruit aléatoire (fig. 13).

Tant par sa bande passante en numérique que par sa possibilité de capturer une ligne particulière, le 4050 est bien adapté au domaine de la télévision.

Son circuit de déclenchement est équipé d'un séparateur actif de synchro TV qui permet de déclencher une capture soit sur une image, soit sur une ligne du signal TV.

Grâce au clavier processeur on peut fixer le numéro de la ligne choisie qui sera capturée et visualisée (fig. 14 et 15). Une touche permet d'enchaîner une fonction de capture et une fonction de traitement après capture.

Après la mémorisation d'un signal, il est possible de manipuler les traces : par exemple, les déplacer verticalement et horizontalement pour les superposer ou au contraire les séparer, les inverser par rapport à la ligne centrale de l'écran, les amplifier ou de les atténuer verticalement (de  $\times 3,98$  à  $\times 0,06$ , avec le gain affiché sur l'écran) pour examiner un détail, ou affecter des facteurs d'échelle

avant d'utiliser les opérations arithmétiques.

Ce clavier permet de réaliser des opérations arithmétiques sur les deux traces et sur la trace de référence, comme l'addition de deux signaux CH1 + CH2, la soustraction de deux traces, qui permet de faire apparaître les différences entre deux signaux, ou la multiplication de CH1 par CH2 (qui donnera par exemple la puissance instantanée si CH1 est le courant et CH2 la tension).

Le clavier processeur permet le filtrage numérique du signal enregistré. La principale utilisation est de supprimer les fréquences élevées contenues dans un signal. On dispose de 6 filtres par vitesse de balayage dont la fréquence de coupure est donnée par :

$$\frac{8,14}{T \times 2^{n-1}} \text{ Hz}$$

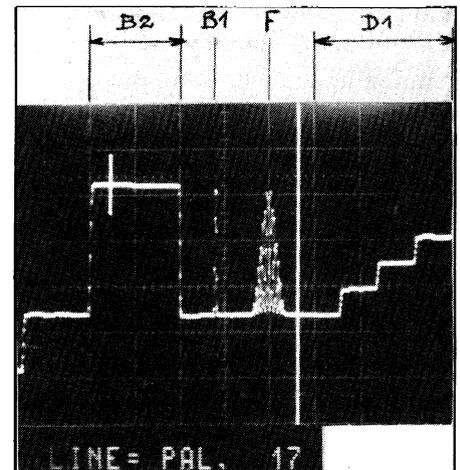


Fig. 14 : Capture d'une ligne TV : (ligne 17) elle permet de mesurer les temps de montée et de descente (B2) à réponse (B1) impulsionnelle, la luminance et la chrominance ainsi que la linéarité à basse fréquence. (D1) (F ou 20T modulé).

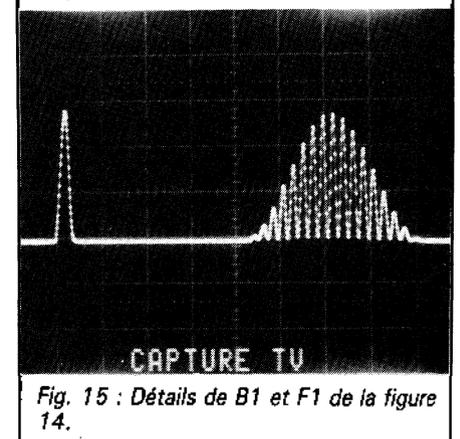


Fig. 15 : Détails de B1 et F1 de la figure 14.

où  $T$  = la vitesse de balayage en s/cm et  $n$  = l'étage de filtre compris entre 1 et 6.

A l'aide de ce clavier, l'utilisateur peut analyser le phénomène étudié sans avoir recours à un calculateur. Par exemple dans la recherche de défauts dans les systèmes numériques, il sera facile de mettre en évidence une différence entre le signal de référence et le signal observé par simple soustraction.

La comparaison du signal à un calibre est parfaite en ce qui concerne l'amplitude, mais sur l'échelle des temps les variations de durée sont cumulatives, ce qui élimine l'utilisation automatique d'un calibre en temps.

Par exemple, une charge différente sur un bus de micro augmentera certains temps de réponse ; ce phénomène, normal empêche la comparaison globale à la référence.

Cependant, sur le 4050, le déplacement horizontal des traces, les unes par rapport aux autres, permet de remettre en phase les signaux sur le front choisi avant d'effectuer la soustraction.

De même en combinant les filtres et les opérations mathématiques, on pourra extraire d'un signal ses composantes basses, moyennes ou hautes fréquences.

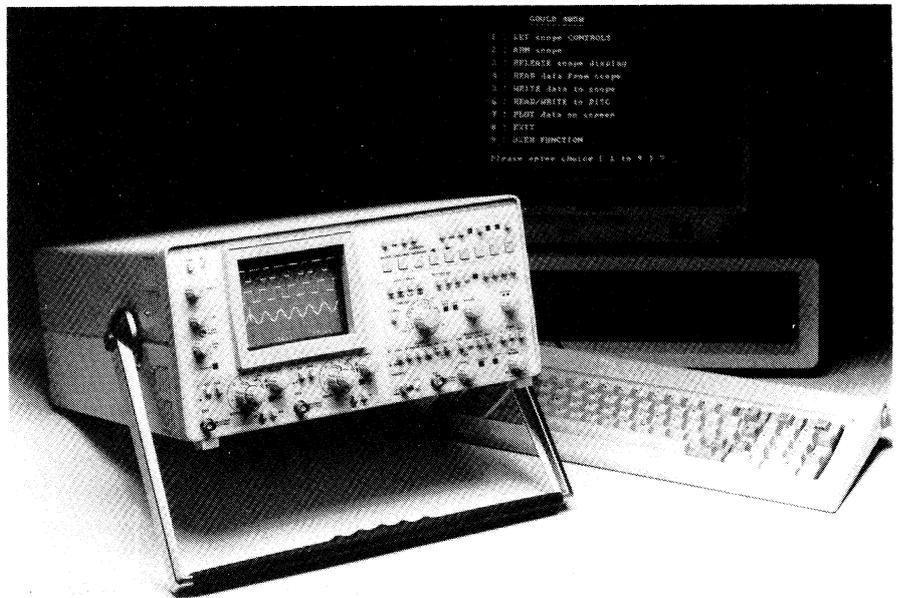


Fig. 17 : Le 4050 connecté à un IBM-PC par l'intermédiaire du bus IEEE-488.

Les possibilités de sortie sur tables traçantes analogique ou numérique (utilisant le langage graphique HPGL utilisé par de nombreux constructeurs de tables, dont Gould) permettent d'archiver les résultats des mesures et des traitements d'une manière simple et économique (fig. 16). Mais si l'on désire des traitements particuliers, son interface IEEE 488 en standard permet de

le connecter à un ordinateur. Un progiciel (SK5523) est disponible sur IBM-PC ou compatibles pour l'utilisation du Gould 4050 (fig. 17).

La qualité de sa numérisation et ses possibilités de traitement font du Gould 4050 un outil de prédilection dans les domaines de l'électronique ou de l'électricité aussi bien que dans l'analyse des phénomènes physiques, de la mécanique ou de la chimie.

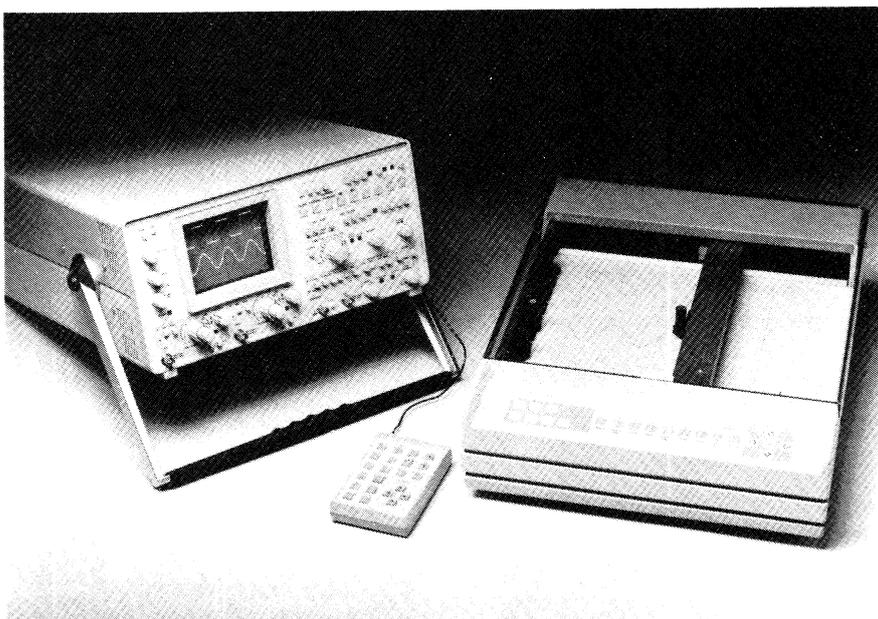


Fig. 16 : Ressortie des informations sur table traçante numérique. Sans nécessiter de calculateur, le GOULD 4050 reproduit les traces en couleur en graduant les axes suivant les réglages de l'appareil.

**N. LOTODÉ**  
Gould Electronique

#### Bibliographie :

*Oscilloscopie numérique : le 4035 de Gould.* TOUTE L'ÉLECTRONIQUE n° 501 de février 1985.

*L'oscilloscopie numérique aujourd'hui et demain.* ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE n° 92 de septembre 1985.