

Un oscilloscope « *vintage* », un appareil de légende.

Mais pour quoi faire ?

Oscilloscope : voici le nom d'un appareil de mesure dont chaque radioamateur en a entendu parler au moins un jour dans sa vie. Pourquoi un tel appareil est-il tant prisé dans le domaine technique qui est une des multiples facettes parmi les activités des radioamateurs ?

Ah, voici une bonne question qui en soutend deux autres immédiatement après. Qu'est-ce qu'un oscilloscope ? Que peut-on faire d'utile avec un oscilloscope ?

Cet article n'a pas la prétention d'être un cours pour radioamateurs sur l'oscilloscope. En revanche, nous vous proposons un article à vocation ludique pour découvrir comment profiter à petit prix d'un ancien appareil dont les performances sont toujours d'actualité. Voici un exemple d'oscilloscope à mémoire phosphorescente : le HP 141A ferait rougir encore aujourd'hui certains oscilloscopes numériques du dernier cri.

Alors nous invitons, à qui le souhaite, d'aller à la chasse aux appareils de seconde main – peut-être moins *vintage* que le HP 141A – et de ne pas avoir peur de retrousser ses manches pour donner une seconde vie à des appareils de légende. Le bénéfice que vous pourrez en retirer est une merveilleuse aventure technique au cours de laquelle vous pourrez apprendre par partage d'expérience avec d'autres radioamateurs.



Fig. 1 : Oscilloscope HP 141A à mémoire phosphorescente et à persistance variable configuré ici avec un tiroir HP 1402A amplificateur vertical double trace et un tiroir HP 1421A double base de temps.



Fig. 2 : HP 141A, vue arrière ; le connecteur châssis pour le raccordement secteur a été remplacé par un modèle actuel pour accueillir les cordons secteurs standards aux normes internationales (IEC).

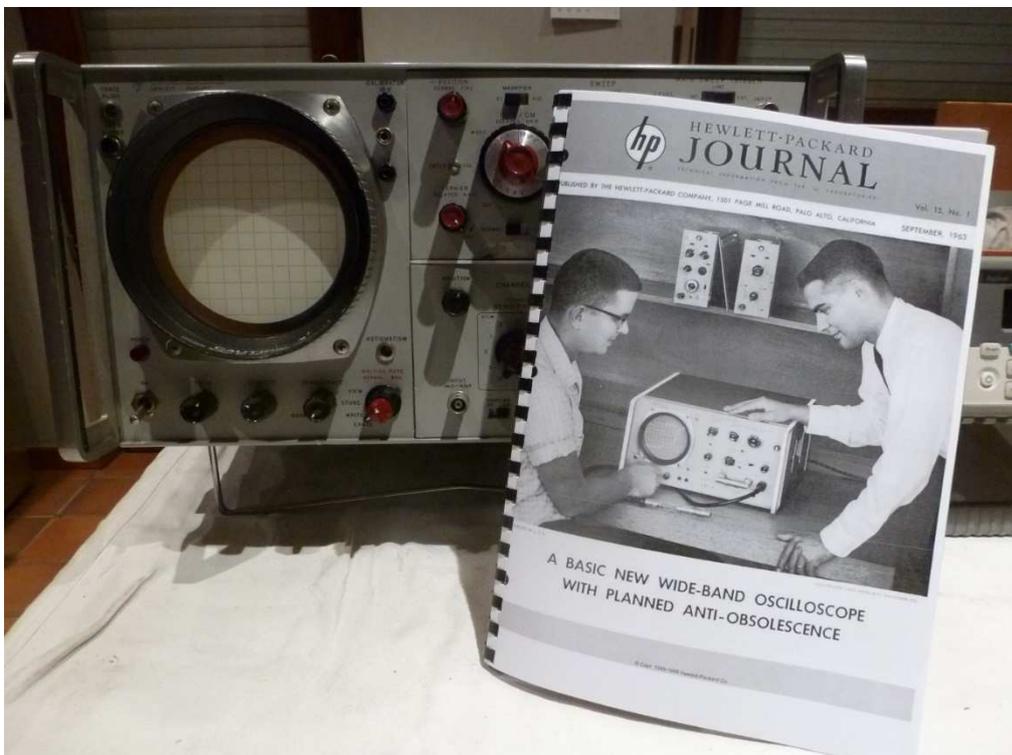


Fig. 3 : Hewlett Packard introduit le modèle HP 141A en 1963. Le slogan écrit en bas de page de couverture du magazine mensuel « HP Journal » est édifiant : ANTI-OBSOLESCENCE ! C'est aux antipodes de l'obsolescence programmée (« oups » ...) de certains appareils modernes !

Qui voudrait donc s'acharner sur du matériel aussi ancien ? Voici une question qui peut trouver plusieurs réponses. En voici quelques unes ci-dessous.

Ce type d'appareil est d'un prix dérisoire sur le marché de seconde main. La documentation technique complète est disponible gratuitement dans le domaine public, par exemple sur Internet. Les appareils mis sur le marché à l'époque étaient fournis avec les schémas électroniques complets, avec les listes de composants de remplacement, et enfin avec un manuel de maintenance accompagné d'une littérature abondante sur les procédures de dépannage et de calibrage de l'appareil. Ces appareils appartiennent aussi à une époque où les constructeurs n'hésitaient pas à concevoir la fabrication de matériel robuste, fiable, increvable et facile à dépanner. Beaucoup de pièces critiques et d'origine sont encore disponibles aujourd'hui et sont accessibles grâce à nos moyens modernes de télécommunication. Faut-il vous faire un dessin sur ce qui est possible de trouver sur e-bay, par exemple ? Vous pourrez parfois trouver des composants neufs en provenance d'anciens stocks (NOS : *New Old Stock*) ou bien trouver des sous-ensembles complets vendus pour pièces de remplacement. Enfin ci-après, voici deux dernières réponses plus subjectives. Plonger les mains dans les entrailles d'un tel appareil est une aventure passionnante où l'on peut beaucoup apprendre par une observation de tous les détails de construction et ainsi nous donner des idées pour nos futurs montages électroniques « faits maison » par un OM Radioamateur. Restaurer et utiliser un appareil de légende peut parfois satisfaire une certaine nostalgie des appareils analogiques avec beaucoup de boutons sur la face avant. Sans toutefois sombrer dans le passéisme, maîtriser l'utilisation de ce type d'appareil relativement complexe nous oblige à bien comprendre le fonctionnement complet de celui-ci. Un tel apprentissage peut parfois être bien plus profitable quand il est comparé à l'utilisation d'un appareil moderne totalement automatique où tout est prémâché pour l'utilisateur.



Fig. 4 : Les manuels de service ont été utiles pour le dépannage et la restauration de cet appareil de légende, bien connu de plusieurs générations et ayant équipé de nombreux laboratoires et écoles techniques. On remarquera un smartphone sur la table : un demi-siècle de distance de technologies !

Une anti-obsolésence planifiée à l'époque par le constructeur ??? Non, mais tu blagues ! Personne ne te croirait aujourd'hui. Et pourtant ...

OUI ! Et ceci n'est pas surfait. En effet, dès le début des années '60, de nombreux constructeurs d'appareils de mesure ont innové dans la morphologie de leur gamme de matériel en proposant des systèmes modulaires. Pour le même rack électronique de base, il a été possible pendant plusieurs décennies d'assister à la mise sur le marché de nouveaux modules de plus en plus performants pouvant être accueillis dans le même rack de base. Cela a en outre permis de choisir des modules spécifiques en fonction des besoins de l'utilisateur tout en maîtrisant les dépenses. Tout cela peut faire sourire de nos jours car le monde a bien changé (je ne vous apprends rien) et la logique actuelle des constructeurs est relativement différente par rapport à celle qui existait il y a un demi siècle.



Fig. 5 : Mainframe (rack électronique de base) et *plug-in* (modules enfichables). Association de multiples technologies avec tubes radio 5642 6DJ8 8233 6AU6 6BL8 5651 ZZ1000, nuvistors 6CW4 (triode miniature à fort μ , forte pente), transistors au germanium et au silicium.

« OUFTE ! » Comme on dirait au pays de Liège.

Quels sont donc les modules que l'on peut enficher dans le rack électronique d'un tel oscilloscope et quelles ont été les évolutions de cet appareil ? Voici un peu d'histoire.

Au début, il n'y avait que quatre modules d'amplificateur vertical, deux modules de base de temps et un module spécial réflectomètre dans le domaine du temps (TDR : *Time Domain Reflectometer*) pour la mesure sur des lignes de transmission avec possibilité de recherche et de localisation de défaut dans ces lignes.



Fig. 6 : Modules amplificateur vertical HP 1400A et HP 1401A. Source : HP.

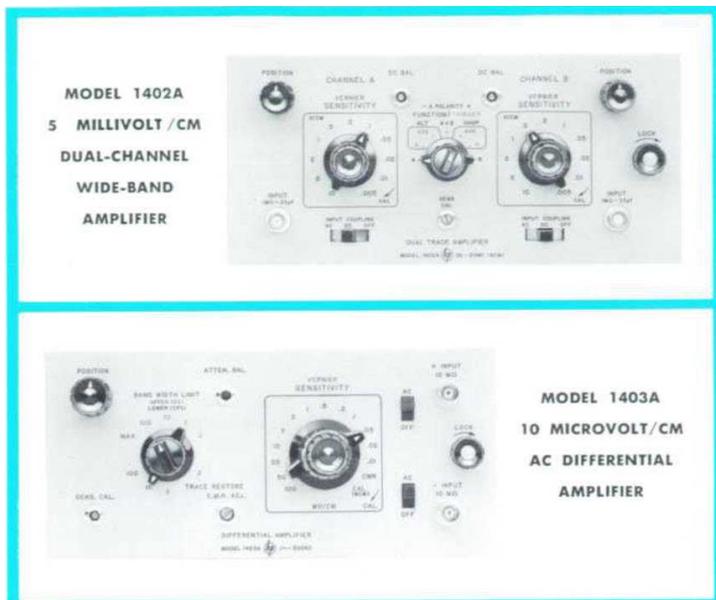


Fig. 7 : Modules amplificateur vertical HP 1402A et HP 1403A. On remarquera l'extrême sensibilité du dernier module : 10 μ V par division. Pouvez-vous me trouver un oscilloscope numérique moderne aussi sensible ? Si oui, alors vous êtes invités à nous le communiquer. Source : HP.



Fig. 8 : Modules de base de temps HP 1420A (simple base de temps) et HP 1421A (double base de temps). Source : HP.

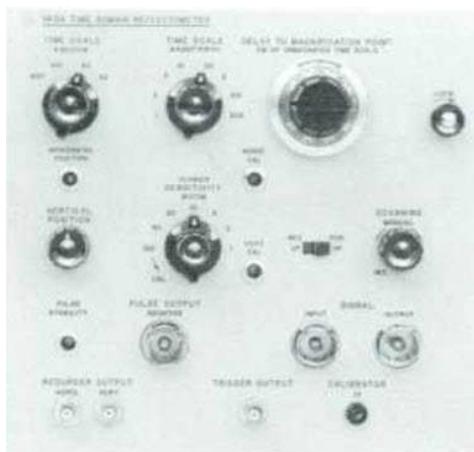


Fig. 9 : Module spécial réflectomètre dans le domaine du temps (TDR). Source HP.



Fig. 10 : Illustration de l'enfichage des modules sous forme de simple ou double taille de tiroir. Source : HP.

Et quelques années plus tard ...

 <p>1400B</p> <ul style="list-style-type: none"> • 100 μV/div • dc to 500 kHz • Differential on all ranges • 100 dB CMRR <p>Price: \$275. Page 12</p>	 <p>1402A</p> <ul style="list-style-type: none"> • 5 mV/div • dc to 20 MHz-dual trace • Signal delay for fast rise viewing <p>Price: \$575. Page 8</p>	 <p>1404A</p> <ul style="list-style-type: none"> • 10 mV/div to 15 MHz • 1 mV/div to 10 MHz • Signal delay for fast rise viewing • Selectable triggering <p>Price: \$975. Page 10</p>	 <p>1406A</p> <ul style="list-style-type: none"> • 50 μV/div-dc to 400 kHz • No drift • Calibrated offset for accurate ac and dc measurements <p>Price: \$950. Page 11</p>
 <p>1401A</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 mV/div-dual trace • dc to 450 kHz • Convenient dual trace triggering <p>Price: \$450. Page 12</p>	 <p>1403A</p> <ul style="list-style-type: none"> • 10 μV/div • 0.1 Hz to 400 kHz • 106 dB CMRR <p>Price: \$575. Page 14</p>	 <p>1405A</p> <ul style="list-style-type: none"> • 5 mV/div-dual trace • dc to 5 MHz • Algebraic addition <p>Price: \$350. Page 9</p>	 <p>1408A</p> <ul style="list-style-type: none"> • 100 μV/div-dual channel • dc to 500 kHz • 100 dB CMRR • Alternate or chopped sweeps <p>Price: \$575. Page 13</p>

Fig. 11 : Gamme des modules amplificateur vertical avec module quatre traces (HP 1404A). Un module spécial (non répertorié ci-dessus) sera dédié à une utilisation en vertical/horizontal : X-Y-Z (*monitor*).

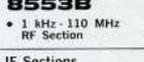
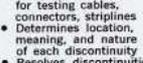
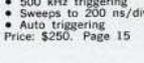
 <p>1410A</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 mV/div at 1 GHz: dual trace • Internal triggering • High impedance probes and 50Ω inputs <p>Price: \$1700. Page 19</p>	 <p>1420A</p> <ul style="list-style-type: none"> • 10 MHz triggering • Sweeps to 50 ns/div • Auto triggering <p>Price: \$375. Page 15</p>	 <p>1424A</p> <ul style="list-style-type: none"> • Triggering to 5 GHz • Sweeps to 10 ps/div • Direct readout on all sweeps <p>Price: \$1400. Page 24</p>	<p>Spectrum Analyzer Plug-Ins</p> <p>Tuning Sections</p>  <p>8555A</p> <ul style="list-style-type: none"> • 10 MHz - 40 GHz RF Section  <p>8554L</p> <ul style="list-style-type: none"> • 500 kHz - 1.25 GHz RF Section  <p>8553B</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 kHz - 110 MHz RF Section <p>IF Sections</p>  <p>8552A</p> <ul style="list-style-type: none"> • Standard IF Section  <p>8552B</p> <ul style="list-style-type: none"> • High Resolution IF Section <p>• Complete Spectrum Analyzer System presents amplitude versus frequency over a 7 dB display range.</p> <p>• Absolute signal amplitude measurement in dBm or Voltage</p> <p>Price: 8552A, \$2150 8552B, \$2850 8553B, \$2200 8554L, \$3500 8555A, \$5975</p> <p>Page 32</p>
 <p>1411A</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 mV/div-dual trace • Bandwidths to 12.4 GHz • Remote samplers <p>Price: \$700. Page 21</p>	 <p>1421A</p> <ul style="list-style-type: none"> • 20 MHz triggering • Delayed sweep • Sweeps to 20 ns/div <p>Price: \$675. Page 16</p>	 <p>1425A</p> <ul style="list-style-type: none"> • Delayed sweep • Sweeps to 10 ps/div • Triggering to 1 GHz <p>Price: \$1900. Page 25</p>	
 <p>1430A</p> <ul style="list-style-type: none"> • 28 ps risetime <p>Price: \$3000. Page 22</p>	 <p>1422A</p> <ul style="list-style-type: none"> • 500 kHz triggering • Sweeps to 200 ns/div • Auto triggering <p>Price: \$250. Page 15</p>	 <p>1415A</p> <ul style="list-style-type: none"> • Complete TDR system for testing cables, connectors, striplines • Determines location, meaning, and nature of each discontinuity • Resolves discontinuities —an inch apart • Easy to operate <p>Price: \$1200. Page 28</p>	
 <p>1430B</p> <ul style="list-style-type: none"> • 20 ps risetime <p>Price: \$3500. Page 23</p>	 <p>1431A</p> <ul style="list-style-type: none"> • 12.4 GHz bandwidth <p>Price: \$3000. Page 22</p>	 <p>1416A</p> <ul style="list-style-type: none"> • Speeds and simplifies swept frequency measurements • High resolution direct readout in dB • Low drift • X-Y recorder outputs <p>Price: \$500. Page 27</p>	
 <p>1432A</p> <ul style="list-style-type: none"> • 90 ps risetime <p>Price: \$1000. Page 21</p>	 <p>1423A</p> <ul style="list-style-type: none"> • 20 MHz triggering • Sweeps to 20 ns/div • Trigger hold-off <p>Price: \$490. Page 15</p>		

Fig 12 : Gamme des modules de base de temps jusqu'à une vitesse de balayage de 200 ps par division, modules amplificateur vertical à large bande passante jusqu'à 12,4 GHz et même 18 GHz avec un temps de montée de 20 picosecondes en technique « *analog sampling* », module spécial de balayage dans le domaine de la fréquence (*sweeper*) et modules analyseur de spectre. Une véritable évolution dans les performances pour l'époque qui rivalisent encore avec celles que nous connaissons aujourd'hui. Source : HP.

Le rack électronique de base a évolué sous deux formes : la première avec un tube cathodique de forme rectangulaire (HP 141B Fig. 13, rack du dessus) et non plus circulaire (HP 141A Fig. 13, rack du dessous), la deuxième avec un tube cathodique géant (HP 143A Fig. 14) avec un réticule de 8 x 10 pouces, c'est-dire de 20 cm x 25 cm.



Fig 13 : Les deux versions du rack électronique de base pouvant accueillir la même gamme de modules.

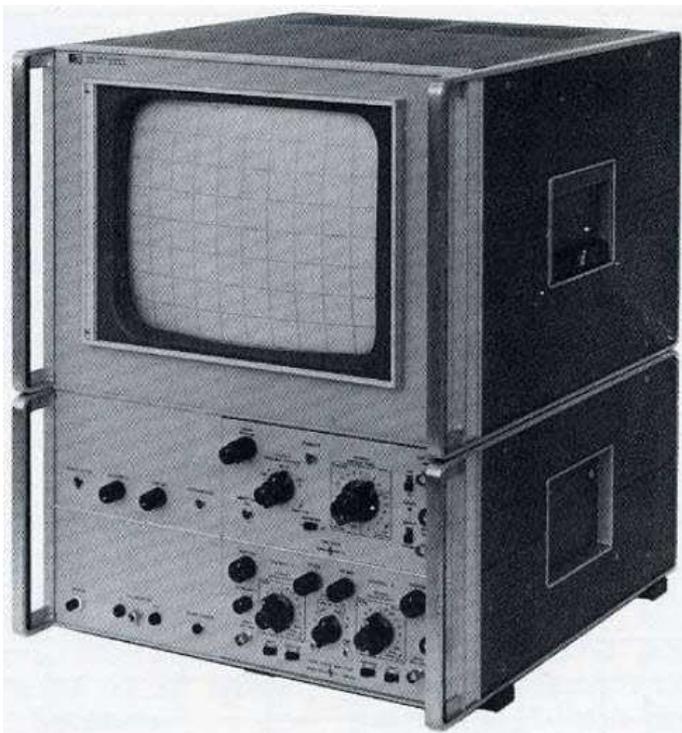


Fig. 14 : Version du rack électronique à écran géant pouvant accueillir la même gamme de modules.

L'aventure commence et il faut oser se lancer dans le démontage, le nettoyage, la restauration, le remontage, le dépannage et le calibrage d'un tel appareil. Interdiction de trouver une pièce en trop une fois le remontage terminé (hi 3x).

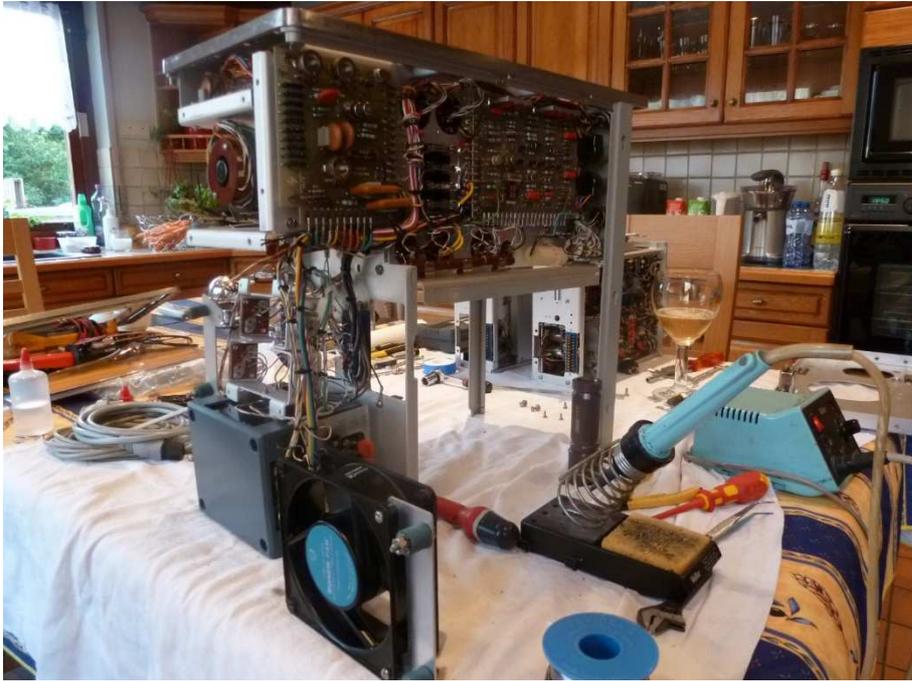


Fig. 15 : Le chantier de l'appareil en cours de restauration (rack vu du dessous).

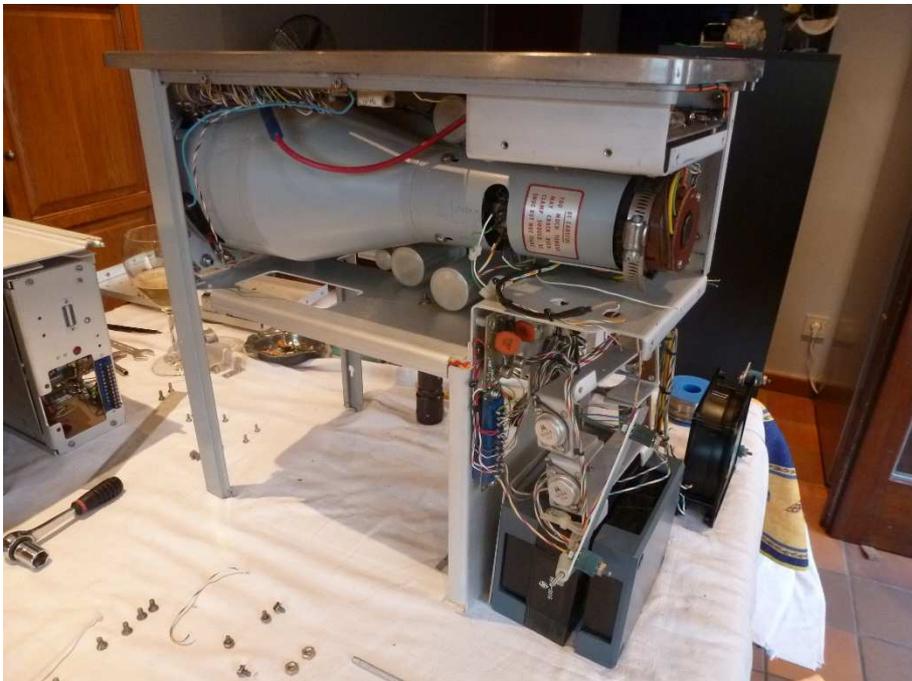


Fig. 16 : Le chantier de l'appareil en cours de restauration (rack vu du dessus).



Fig. 17 : Vue de l'appareil avec dépose du tube cathodique (opération délicate) pour un nettoyage complet.



Fig. 18 : Détail du col du tube cathodique où l'on peut observer le montage des électrodes constituant le canon à électrons.

Restauration de l'appareil : quelques boutons cassés ont été remplacés par des neufs d'ancien stock (oui, il est possible d'en trouver encore de nos jours). Un connecteur BNC complètement écrasé à l'arrière de l'appareil a été remplacé (opération facile). Le connecteur du raccordement secteur dont le modèle d'origine est complètement obsolète a été remplacé par un connecteur secteur moderne aux normes internationales (IEC) ; cela a nécessité d'aménager légèrement la découpe dans la tôle arrière de l'appareil pour accueillir le nouveau modèle de connecteur. Les capots extérieurs étaient un peu cabossés ; quelques coups de marteau sur une enclume et les capots sont redressés. Les contacts des commutateurs ont été nettoyés, désoxydés et dégraissés. Tout l'appareil a été dépoussiéré de fond en comble (pinceau et aspirateur), les éléments souillés ont été nettoyés et dégraissés, les traces de nombreuses anciennes étiquettes autocollantes ont été enlevées au moyen d'un solvant (alcool isopropylique, isopropanol) et des larges traces de peinture au pochoir sur le capot supérieur ont été éliminées avec un nettoyant approprié, avec huile de coude et arme de patience. Les paliers du rotor du ventilateur ont été lubrifiés (oui, il y a tout un paragraphe dans le manuel de service qui décrit la procédure pour la maintenance du ventilateur). Bref, le tout a été bichonné.

Dépannage de l'appareil :

Avant tout, déconnecter les gros condensateurs électrolytiques, pratiquer une inspection visuelle et les tester un à un sous leur tension de service avec une alimentation de laboratoire équipée d'un limiteur de courant. Par chance, nous n'avons pas eu de mauvaise surprise de ce côté-là. Test complémentaires des condensateurs avec un ESR-mètre (*Equivalent Series Resistor*).

Nous avons débusqué trois pannes.

- Un tube radio était visiblement défectueux (intérieur complètement blanchâtre), ce qui est le symptôme d'une fêlure dans l'enveloppe en verre sous vide (sur le dessous du tube entre les broches). Ce tube radio a été remplacé d'emblée.
- Une résistance d'un étage différentiel dans le circuit de déclenchement de la base de temps (*trigger*) avait changé de valeur par vieillissement. L'étage différentiel étant complètement déséquilibré, il ne pouvait plus agir sur les circuits situés en aval de cet étage. La résistance défectueuse et celle située dans la deuxième branche de l'étage différentiel ont été toutes deux remplacées en même temps.
- Un mauvais contact du curseur d'une résistance ajustable empêchait le bon fonctionnement du réglage de persistance au niveau du pilotage de la mémoire phosphorescente du tube cathodique (réglage du « *flood gun* » que nous expliquerons plus loin en annexe de cet article).

Calibrage de l'appareil :

Le manuel de service décrit la procédure complète étape par étape pour calibrer l'appareil. Cette procédure est si bien décrite qu'il est impossible de se tromper. Les seuls instruments de mesure nécessaires ont été un multimètre électronique et un générateur de fonction. Un autre oscilloscope avait été utile pour le dépannage.

Voici les résultats après remise en service de l'oscilloscope HP 141A.

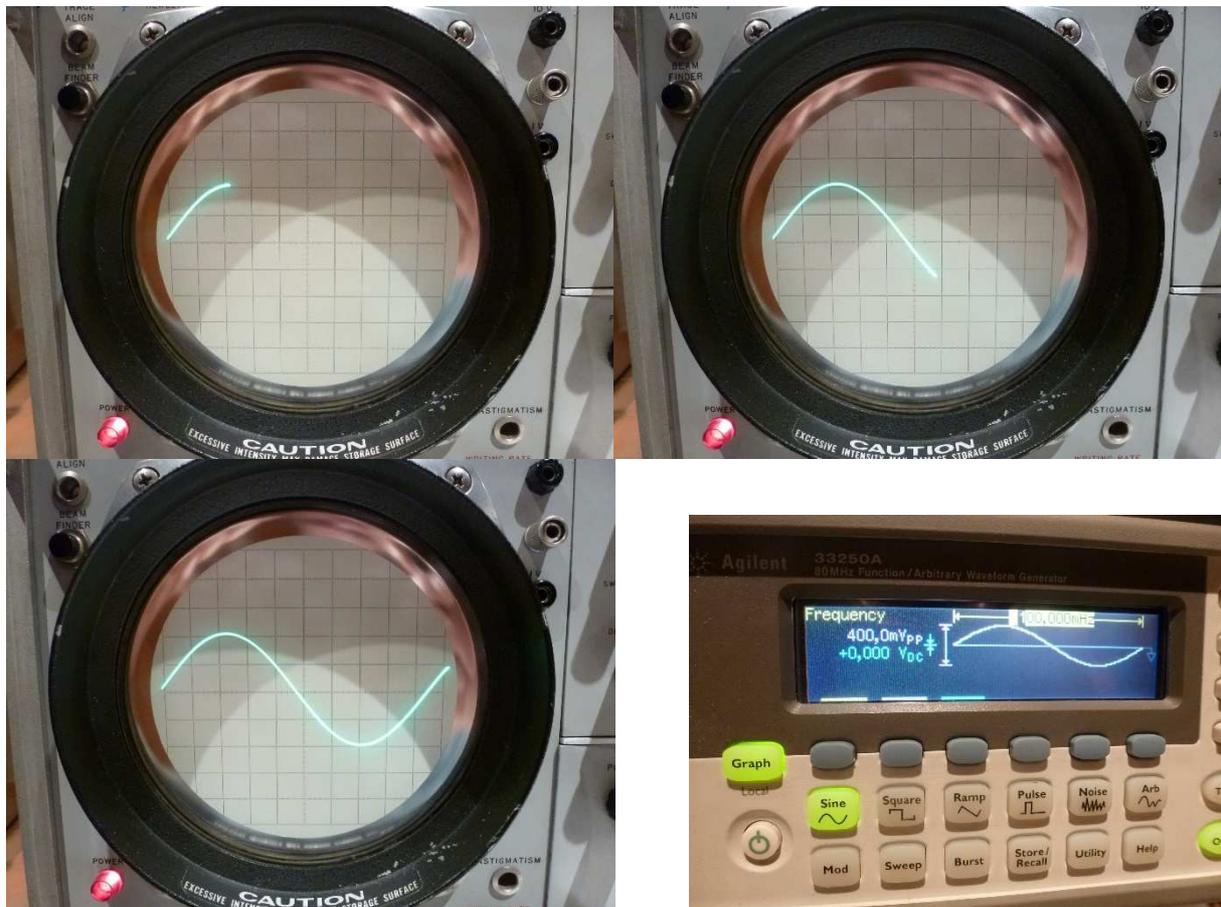


Fig. 19 : Activation de la persistance variable de la mémoire phosphorescente pour visualiser un signal sinusoïdal d'une fréquence de 100 mHz (un dixième de Hertz). Trace en *single shot* (balayage unique). Base de temps réglée sur le calibre de 1 seconde par division. Temps de balayage complet : 10 secondes.

On observe sur la figure ci-dessus la constitution de la trace au fur et à mesure du balayage de l'écran sans extinction de la phosphorescence. Le balayage unique étant terminé, la trace ne s'évanouit pas et reste parfaitement visible pendant plus d'une heure grâce au dispositif de mémoire phosphorescente : une prouesse technologique pour l'époque où les circuits numériques et mémoires électroniques n'existaient pas encore. D'autres modèles d'appareils, dont la conception a été ultérieure au dispositif de mémoire phosphorescente, ont adopté des mémoires à tores ferrites pour la mémorisation des signaux numérisés, mais cela est une autre histoire. En bas à droite de la figure, on peut observer l'afficheur en mode graphique du générateur de fonction pour un signal sinusoïdal : l'inverse de la période indique une fréquence de 100 mHz, ce qui correspond à une période de 10 secondes.

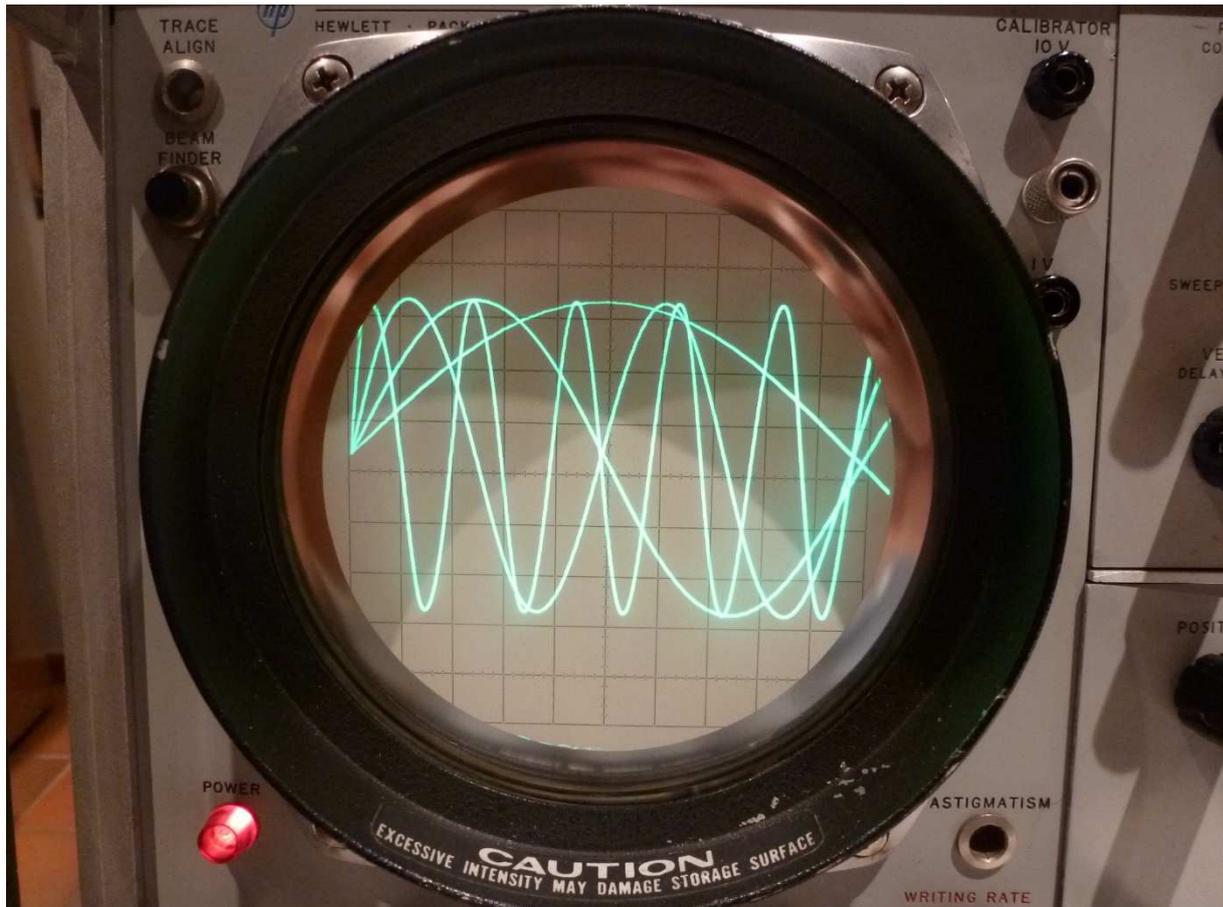


Fig. 20 : Quatre mémorisations successives du même signal avec des calibres de base de temps différents. Traces en *single shot* (balayage unique).

La persistance des traces, selon le réglage de celle-ci, peut durer de plusieurs minutes à plus d'une heure ! Le but de cette expérience est de bien montrer que chaque trace est mémorisée de la première à la dernière sans perdre « l'enregistrement » des traces précédentes mémorisées au fur et à mesure.



Fig. 21 : Enclenchement du dispositif de mémoire phosphorescente. Persistance réglée au minimum. L'écran est illuminé uniformément (arrosage d'électrons sur l'écran par la *flood gun*, voir commentaire ci-dessous). On devine le tracé d'une sinusoïde à l'écran (le réglage d'intensité de la trace a été réduit pour prendre ce cliché).

Le tube cathodique est équipé d'un double canon à électrons : le canon principal (canon d'écriture) qui permet d'obtenir la trace sur l'écran du tube, et le canon de réglage de persistance de la mémoire phosphorescente (*flood gun*). Ce dernier crée une charge d'espace qui est canalisée par un collimateur de façon à obtenir un faisceau d'électrons en forme de colonne qui entoure le faisceau focalisé émis par le canon principal. La trace laissée par le canon d'écriture est ici une sinusoïde que l'on devine légèrement sur la figure ci-dessus.

En très résumé : le faisceau du *flood gun*, canalisé par le collimateur vient « arroser » d'électrons l'écran phosphorescent au travers d'un maillage (trame) et d'un film électrostatique (surface de trame) tous deux situés juste derrière l'écran phosphorescent (trame de stockage et surface de stockage). L'arrosage d'électrons émis par le *Flood Gun* permet d'entretenir la phosphorescence de l'écran à l'endroit exact de la trace. Le canon d'écriture polarise le film électrostatique de charges positives uniquement à l'endroit de la trace grâce au phénomène d'émission secondaire d'électrons. En effet, une partie des électrons lancés à toute vitesse par le canon d'écriture rebondissent sur l'écran phosphorescent laissant derrière eux un déficit d'électrons. Les électrons du *Flood Gun* sont attirés par ces charges positives apparues sur le film électrostatique, traversent les mailles de celui-ci et viennent ainsi entretenir la phosphorescence de l'écran à l'endroit de la trace.

Voir explications complémentaires en annexe 1 de cet article.

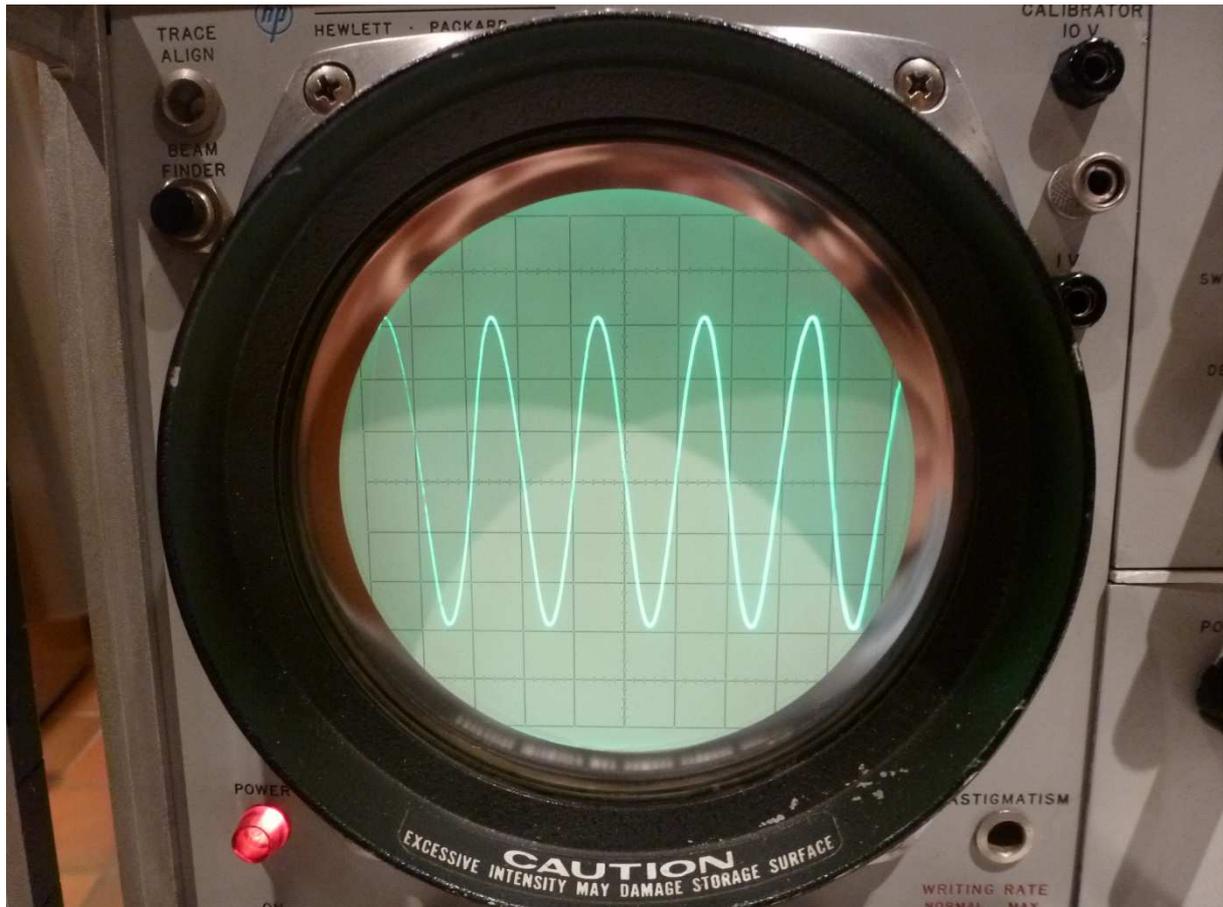


Fig. 22 : Augmentation de la persistance par rapport à celle qui a été illustrée à la figure précédente.

L'illumination uniforme de l'écran diminue au profit de l'augmentation de la persistance de la trace. Le spot lumineux laisse une trace perceptible pendant la totalité du temps de balayage avant que la trace ne s'évanouisse complètement. Pour un réglage déterminé de la persistance lors du cliché réalisé ici, on voit que le début de la trace (sur la gauche de l'écran) commence à peine à s'évanouir sur la durée d'un balayage complet réglé ici à 1 seconde (calibre de 0,1 seconde par division à la base de temps).



Fig. 23 : Activation de la double trace ; un signal sinusoïdal est appliqué aux deux entrées verticales de l'oscilloscope. Le cliché de la figure illustre les conditions d'augmentation de la persistance par rapport à celle montrée sur la figure précédente. Le calibre de la base de temps a été diminué par rapport au réglage effectué lors du cliché de la figure précédente.

On comprend mieux par le cliché de cette figure l'avantage d'un oscilloscope à persistance variable pour la visualisation de signaux très lents (VLF : *Very Low Frequency*). Ici, la base de temps est réglée à son minimum, c'est-à-dire à 1 seconde par division. Le temps du balayage complet est donc de 10 secondes. On observe l'évanouissement progressif de la trace car la persistance est loin d'être réglée ici au maximum de ses possibilités. La photo a été prise juste au moment où le balayage redémarre : la surbrillance à gauche de l'écran indique le début d'une nouvelle trace à l'écran.

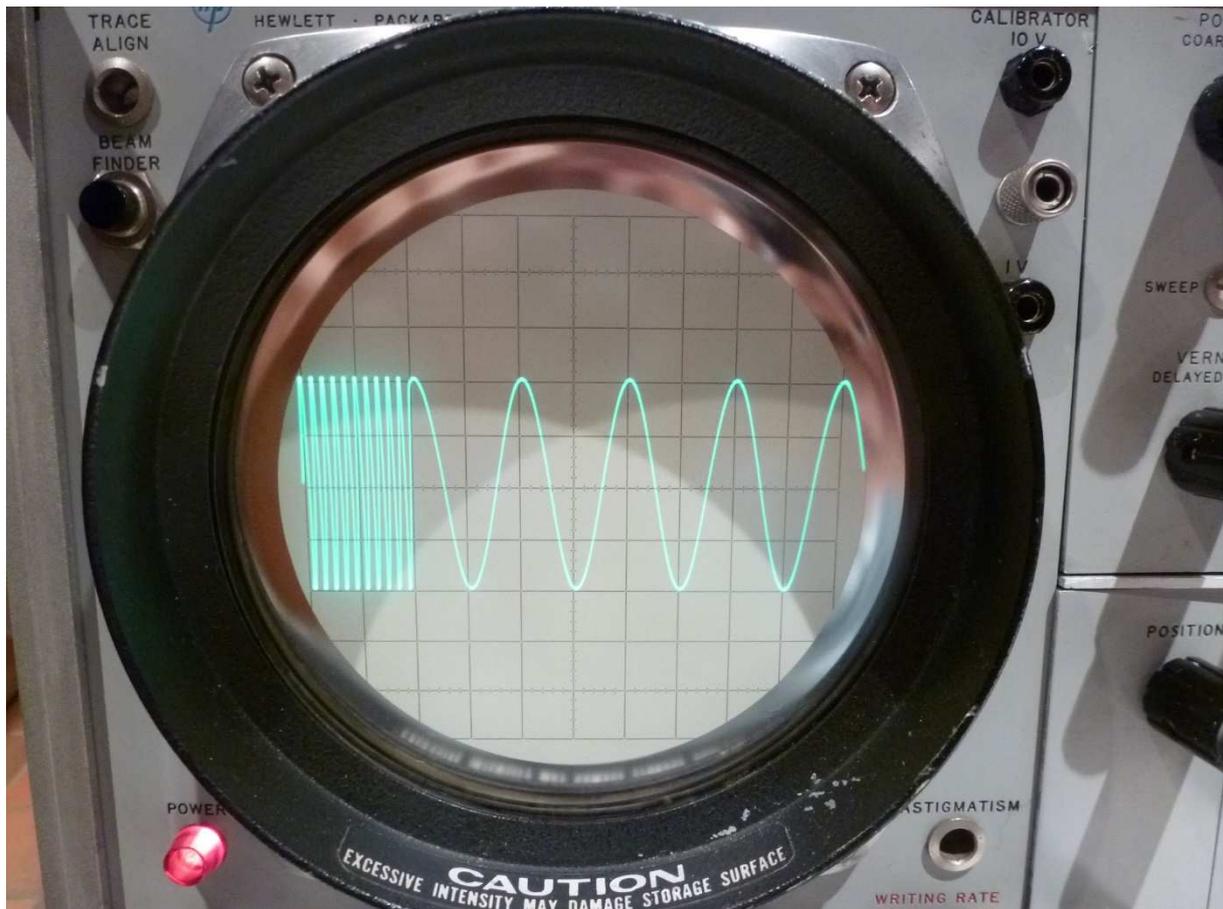


Fig. 24 : Activation de la double base de temps avec visualisation d'un signal dilaté par la deuxième base de temps, ceci après un délai de deux centimètres à partir du début du balayage principal.

Pour l'analyse de signaux complexes, comme par exemple celle d'un signal vidéo composite, le balayage de la base de temps doit être ni trop lent (perte de détails du signal) ni trop rapide (perte de la fin de la période du signal). La double base de temps permet de démarrer lentement le balayage et ensuite de le poursuivre de manière rapide à partir d'un délai réglable par rapport au début de la trace (*trigger delay*). Le calibre de la première base de temps est réglé de façon à visualiser une période entière du signal complexe. Le calibre de la deuxième base de temps est réglé en fonction du degré de détail que l'on veut obtenir sur une partie de la période du signal.

Le réglage du délai entre le déclenchement du balayage lent (1^{ère} base de temps) et celui du balayage rapide (2^{ème} base de temps) permet d'aller visualiser une tranche de la période du signal à l'endroit désiré de celle-ci. Tout se passe comme si on promenait une loupe de gauche à droite sur le tracé d'une période du signal. L'avantage est de pouvoir visualiser une tranche du signal sur la totalité d'une période : non seulement sur le début, mais aussi vers la fin de la période. Visualiser un détail sur la fin d'une période n'est pas possible avec une simple base de temps.

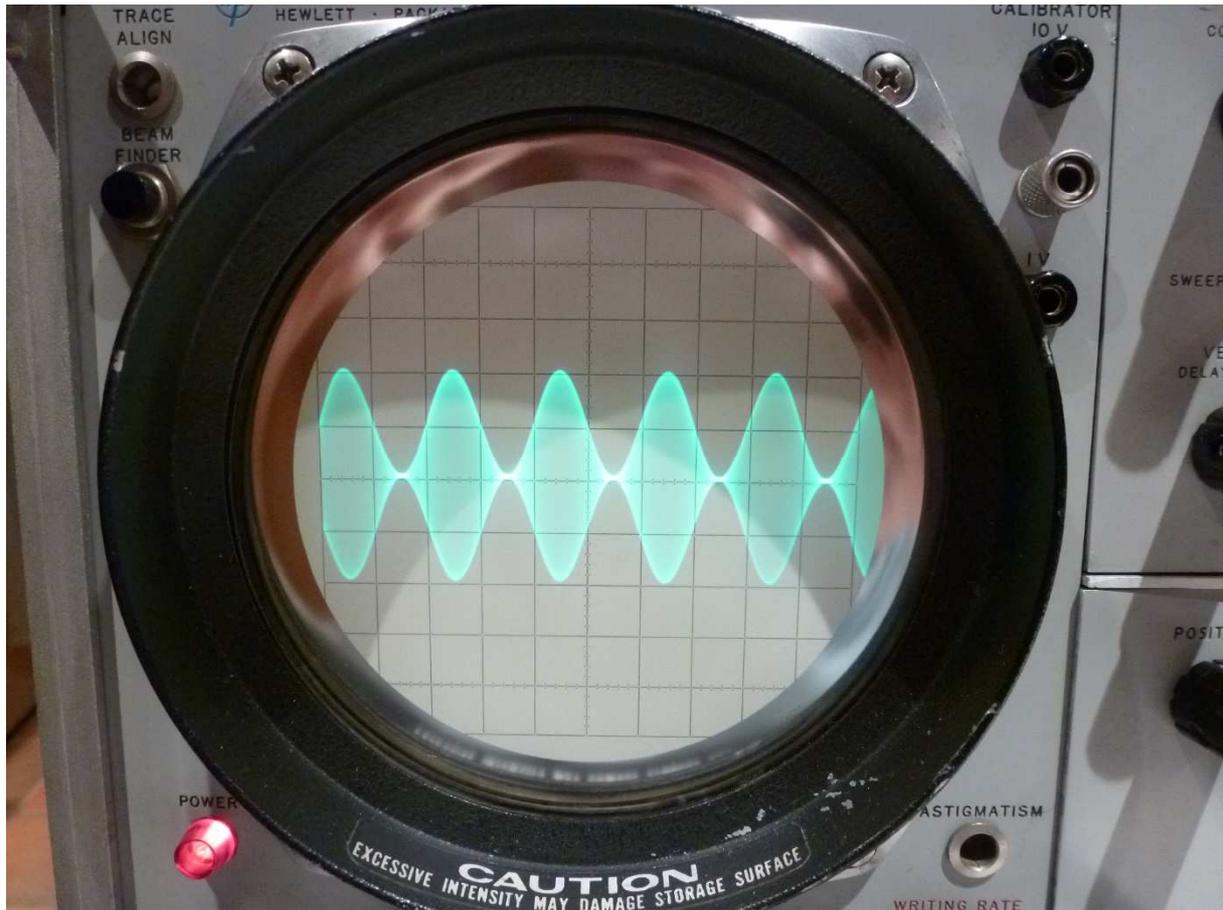


Fig. 25 : Visualisation classique d'un signal modulé en amplitude avec une profondeur de modulation de 100 %.

La persistance de l'écran au phosphore permet de visualiser la trace en détectant parfaitement l'enveloppe d'un signal HF modulé en amplitude par un signal BF. On peut même observer un dégradé de luminosité entre le milieu et les bords de l'enveloppe. Seuls les oscilloscopes numériques récents et hauts de gamme peuvent afficher un dégradé de couleur en activant une fonction spéciale pour visualiser ce type de signal modulé en amplitude ou bien pour l'affichage par exemple du diagramme de l'œil dans les relevés de mesures sur des transmissions numériques.

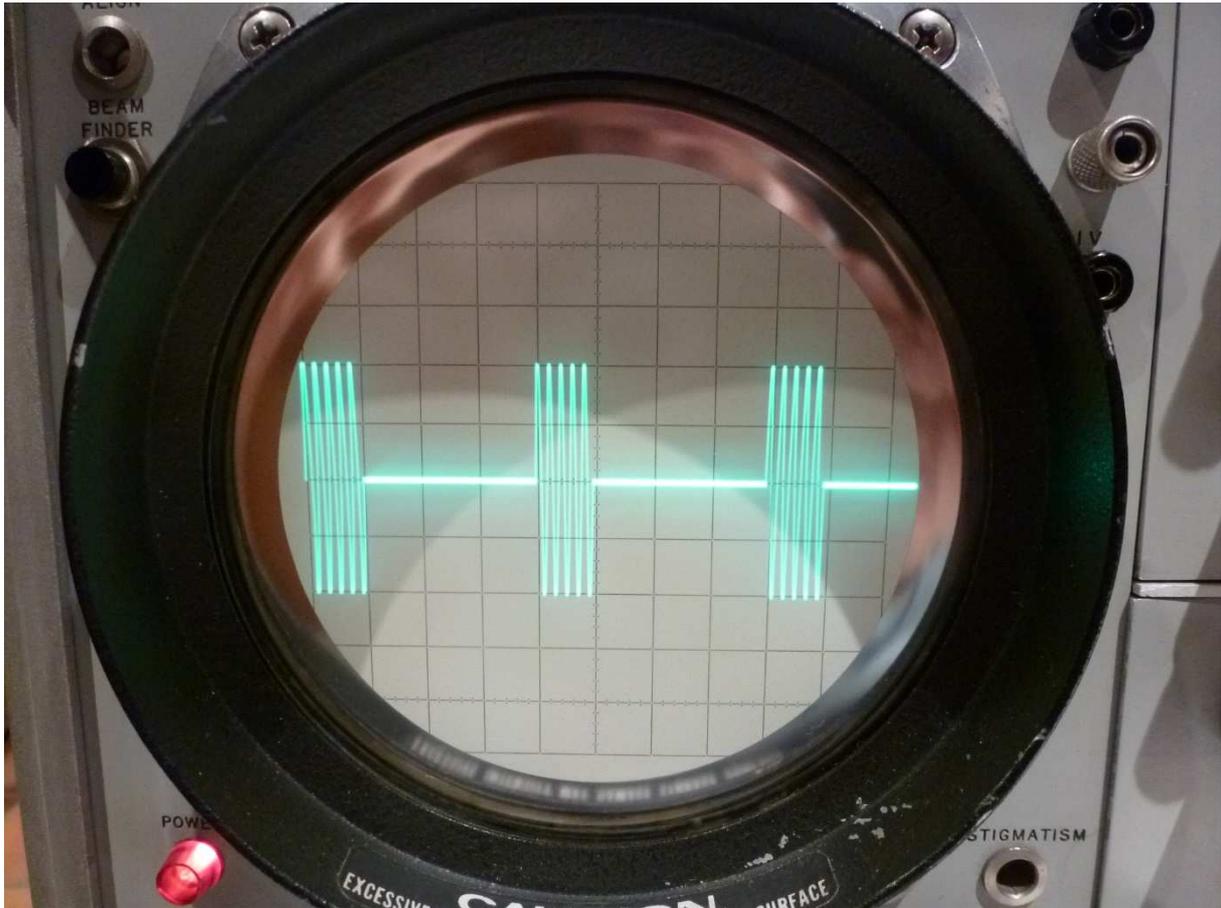


Fig. 26 : Visualisation d'un signal sinusoïdal pulsé (*burst* : train d'impulsions) avec répétition de 5 cycles de la sinusoïde. Fréquence de la sinusoïde : 1 kHz ; 20 ms d'écart entre le début de chaque train d'impulsions ; amplitude : 200 mV_{pp}.

On observera la finesse du spot qui réalise le tracé à l'écran. Les tubes cathodiques construits à cette époque étaient d'une qualité remarquable. On ne peut pas en dire autant de certains oscilloscopes numériques modernes qui affichent une trace bien plus grossière sur des signaux de relativement faible amplitude.

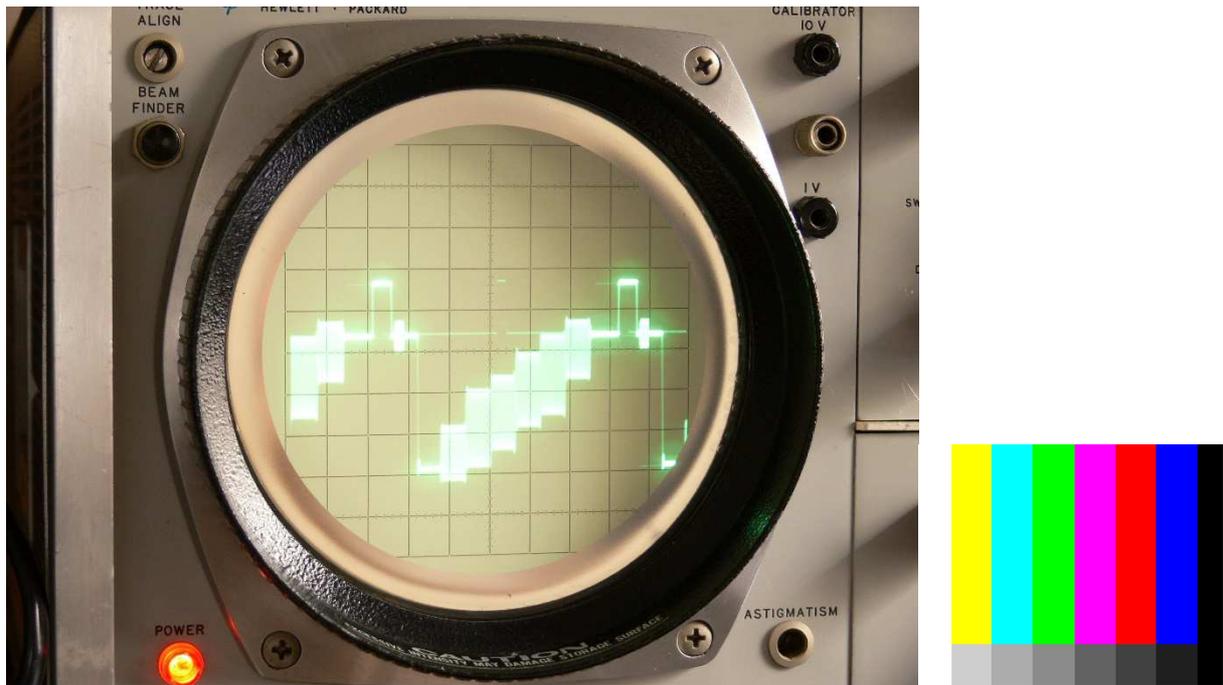


Fig. 27 : Visualisation d'un signal vidéo composite (inversé) où l'on peut observer une ligne de balayage de l'image vidéo qui commence par l'impulsion de synchronisation ligne suivie du *burst* de chrominance, ensuite le signal de luminance de la ligne est composé à partir d'une mire en forme de bandes verticales de différentes couleurs (marches d'escalier). Source Internet Forum Joachim Gittel, Allemagne.

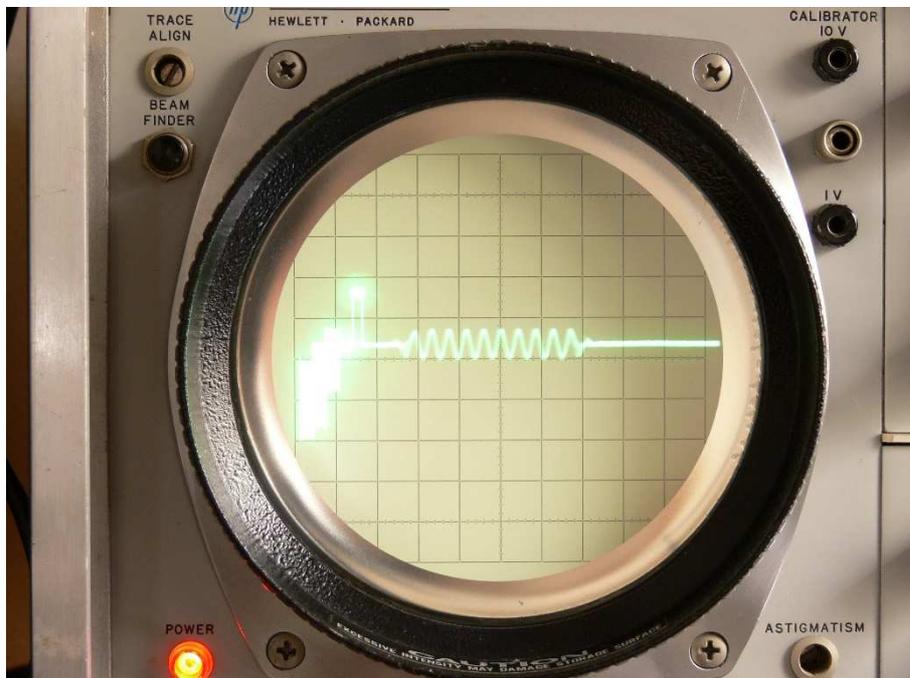


Fig. 28 : Visualisation du même signal vidéo composite que celui de la figure précédente avec détail du *burst* de chrominance qui suit l'impulsion de synchronisation ligne. Source Internet Forum Joachim Gittel, Allemagne.

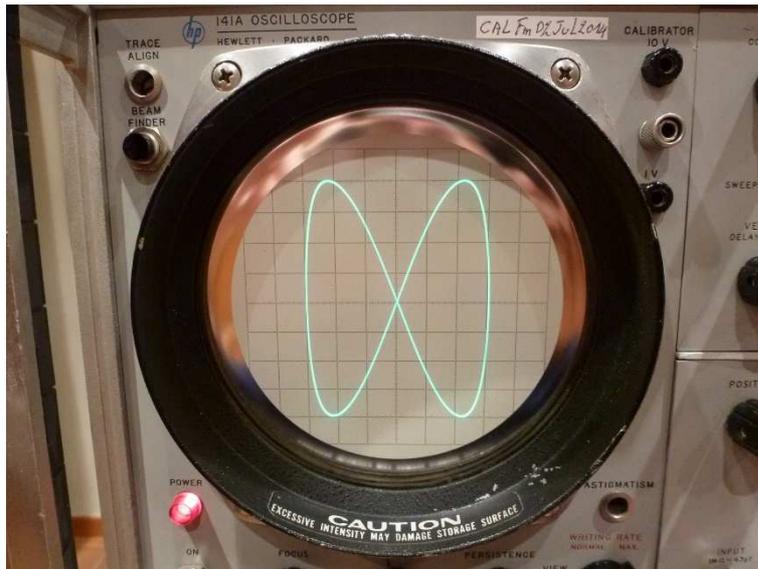


Fig. 29 : Mode X-Y de l'oscilloscope et visualisation d'une courbe de Lissajous formée par une sinusoïde de 100 Hz en horizontal et de 200 Hz en vertical.

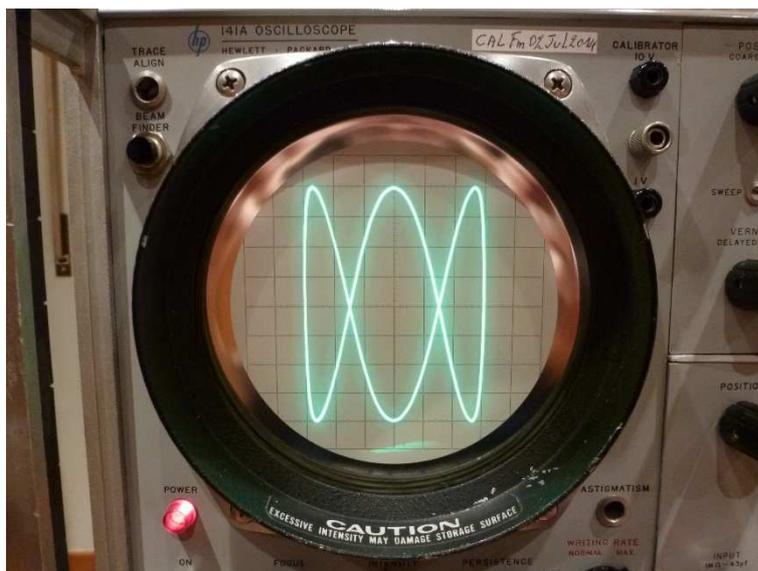


Fig. 30 : Mode X-Y de l'oscilloscope et visualisation d'une courbe de Lissajous formée par une sinusoïde de 1 Hz en horizontal et de 3 Hz en vertical ; la persistance variable a été activée pour la visualisation complète de la trace.

Voici probablement ce qui est le plus facile à visualiser sur un oscilloscope analogique et le plus difficile à afficher sur un oscilloscope numérique en mode X-Y. La résolution d'une trace analogique est infinie et, contrairement aux oscilloscopes numériques, il n'y a pas de limitation de longueur (profondeur) de mémoire pour afficher la courbe à l'écran, ni de limitation de vitesse de rafraîchissement de trame d'image, ni de limitation de durée d'enregistrement sur l'échelle horizontale. Ceci est particulièrement contraignant sur les oscilloscopes numériques pour des courbes de Lissajous relevées sur des signaux à très basse fréquence (de l'ordre de 10 Hz à 100 Hz).

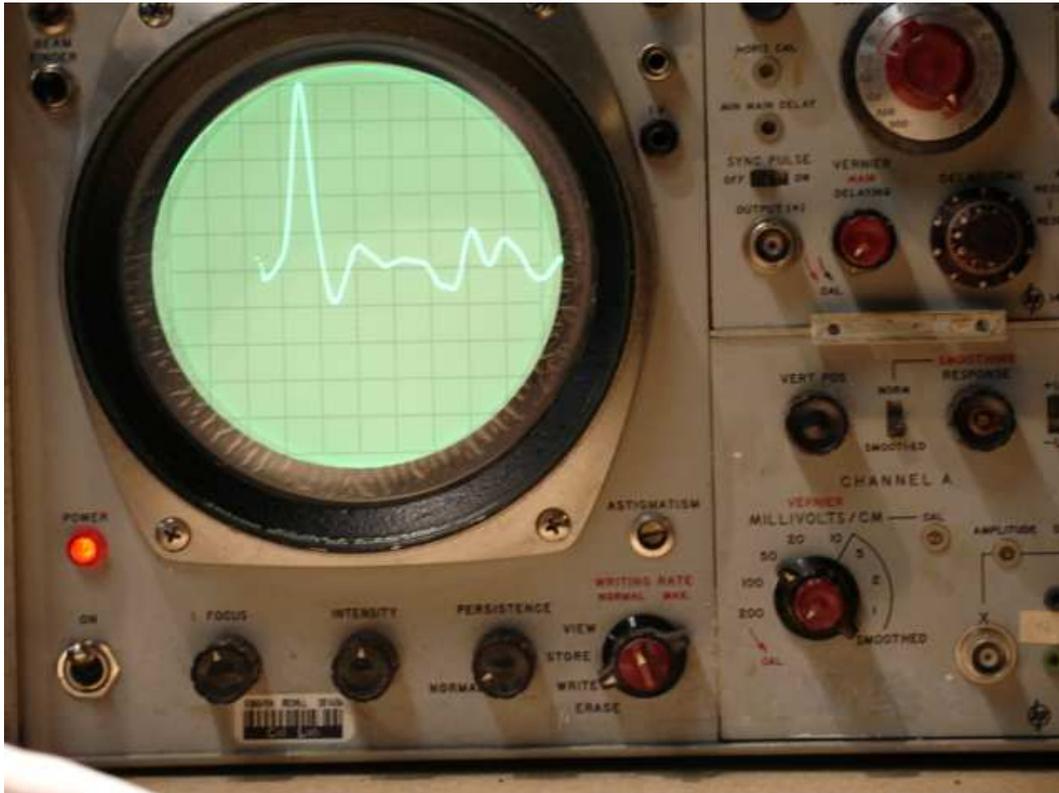


Fig. 31 : Oscilloscope HP 141A avec un module HP 1411A amplificateur vertical *analog sampling*, un module base de temps *analog sampling* HP 1424A et un module externe *sampler* HP 1430C de 18 picosecondes de temps de montée et d'une bande passante de 18 GHz. Le calibre sur la déflexion horizontale est de 200 picosecondes par division. Source : site Internet de Kenneth A. Kuhn (*Ken's*).

Sur la figure ci-dessus, l'oscillogramme montre un relevé de mesure d'une impulsion d'une largeur de 200 picosecondes à la base de celle-ci (signal répétitif). Le *sampler* externe HP 1430C est raccordé sur un « *comb* générateur » HP 8406A. Visualiser un signal aussi rapide n'est pas à la portée de tous les oscilloscopes. On peut ainsi apprécier les performances d'un tel équipement qui pourtant date du milieu des années '60 et qui n'est pas du tout obsolète dans ses capacités de mesure.

Voir en annexe 2 une brève explication sur les évolutions des performances de bande passante des tubes cathodiques et sur la technique d'*analog sampling*.

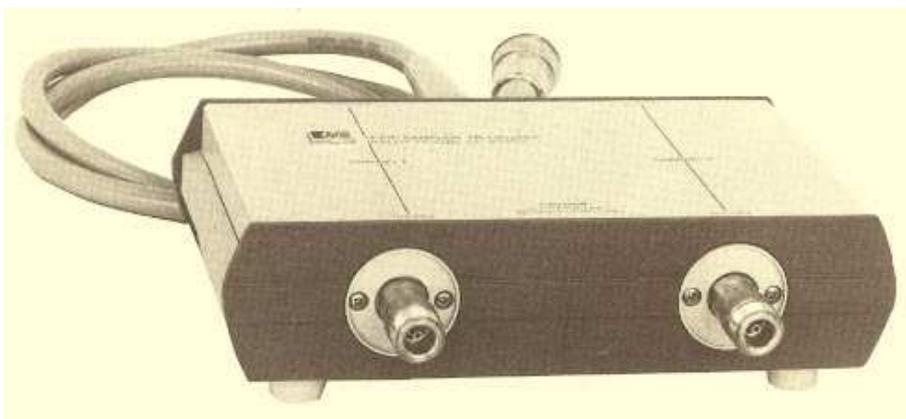


Fig. 32 : Module externe *sampler* double trace HP 1430C ; bande passante 18 GHz ; 18 picosecondes de temps de montée. Source HP.

Annexe 1 :

Description et fonctionnement du tube cathodique à mémoire phosphorescente

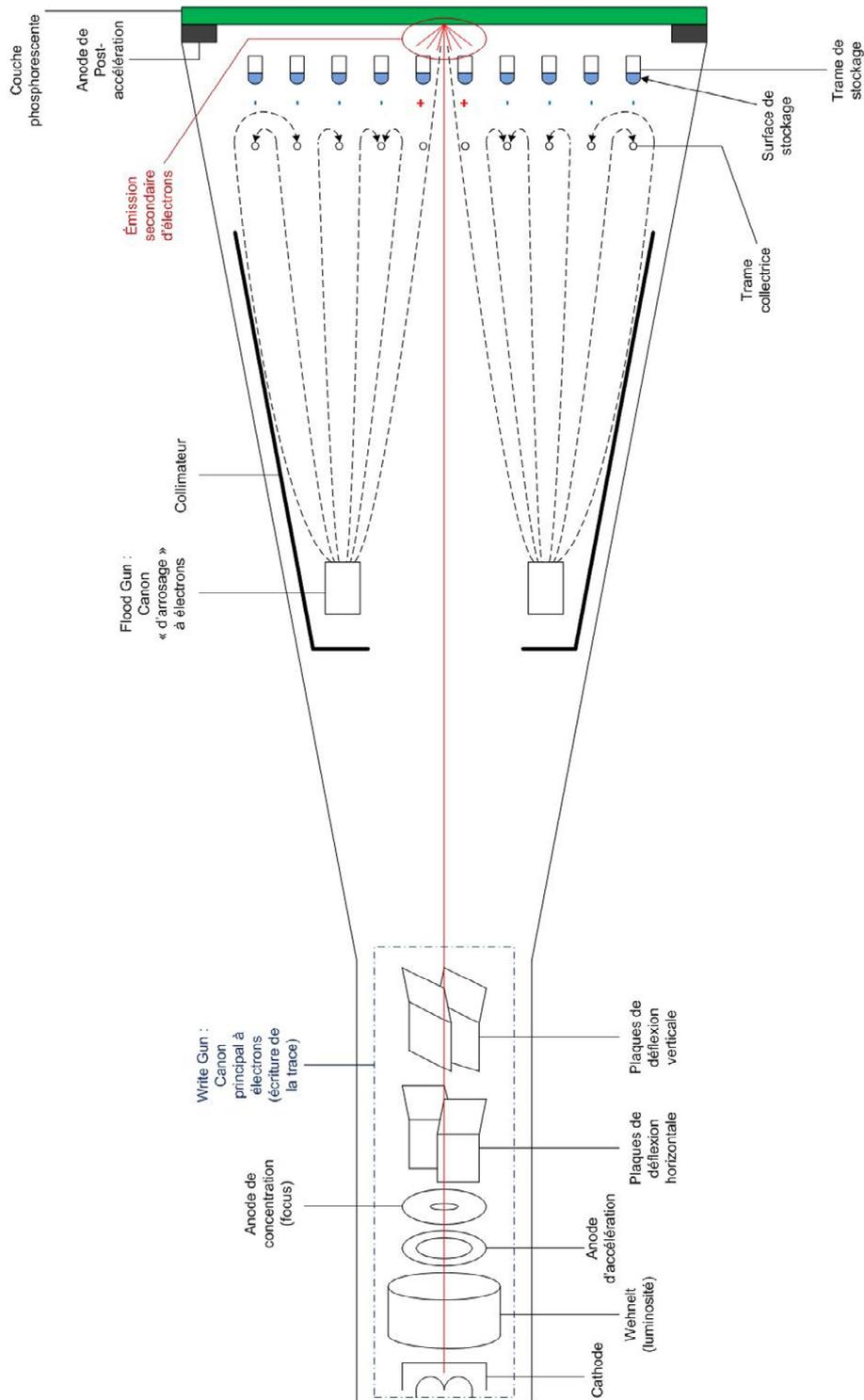


Fig. 33 : Vue en coupe d'un tube cathodique à mémoire phosphorescente.

Un tube cathodique à mémoire phosphorescente est composé au départ comme tout tube cathodique normal : dans une enveloppe de verre en forme d'entonnoir allongé, on y a effectué un vide très poussé et on y a logé un canon à électrons (canon principal ou canon d'écriture). Voir la figure 33 ci-dessus. Le canon principal est constitué d'un filament de chauffage et d'une cathode (chauffage indirect). L'agitation thermoïonique des électrons crée une charge d'espace (nuage d'électrons) qui sont « aspirés » par une anode d'accélération (en forme d'anneau) raccordée à un potentiel positif haute tension par rapport à la cathode. La vitesse atteinte par les électrons devient extrêmement élevée au point que ceux-ci passent au travers de l'ouverture de l'anode d'accélération en formant un faisceau d'électrons.

Le débit d'électrons du faisceau est réglé par une électrode appelée Wehnelt qui est raccordée à un potentiel légèrement négatif par rapport à la cathode. Le Wehnelt agit comme une grille dans un tube à vide. En réglant le potentiel du Wehnelt, on ajuste l'intensité lumineuse de la trace sur l'écran phosphorescent du tube.

Pour que le faisceau d'électrons ne soit pas divergeant, ceux-ci sont canalisés par une anode de concentration dont la forme ressemble à celle d'une plaque circulaire percée d'un trou en son centre. Après l'anode de concentration, le faisceau prend une forme de flamme effilée (comme à la sortie d'un chalumeau). En réglant le potentiel de l'anode de concentration (réglage de focus), on ajuste la longueur de la forme de flamme de façon à obtenir un point d'impact (spot) à la pointe de la forme de flamme juste au niveau de la surface de l'écran phosphorescent.

Certains tubes disposent d'électrodes supplémentaires pour le réglage d'astigmatisme (circularité du spot) et pour le réglage de géométrie (linéarité de la trace).

À la sortie du canon principal à électrons, deux paires de plaques de déflexion permettent de dévier le faisceau d'électrons selon un axe horizontal et selon un axe vertical. En raccordant une base de temps (signal triangulaire en forme de rampe, c'est-à-dire en dents de scie) aux plaques de déflexion horizontale, on obtient le balayage horizontal du spot, et en raccordant les plaques de déflexion verticale à l'amplificateur d'amplitude du signal (amplificateur vertical), on obtient par combinaison des deux paires de plaques une trace sur l'écran phosphorescent. Pour que l'écran s'illumine correctement, les électrons doivent véritablement bombarder l'écran à toute vitesse. C'est la raison pour laquelle un dernier « aspirateur » à électron se situe proche de l'écran. Cet « aspirateur » ultime prend le nom d'électrode de post-accélération qui est raccordée à un potentiel très haute tension (THT) par rapport à la cathode.

L'impact des électrons est tellement violent sur la couche phosphorescente de l'écran qu'un certain nombre de ceux-ci rebondissent. Ce phénomène est appelé émission secondaire d'électrons. Comme les électrons rebondissent au point d'impact sur la couche phosphorescente de l'écran, il y a localement à ce point d'impact un déficit d'électrons par rapport au nombre d'électrons présents sur le reste de la surface de la couche phosphorescente. Un déficit d'électron crée une charge positive ; retenons bien cela.

Dans un oscilloscope conventionnel, la persistance de la couche de phosphore est en fonction de la nature de celui-ci. La persistance est de quelques dizaines de μs (oscilloscopes rapides, trace de teinte bleue claire) à quelques secondes (pour les oscilloscopes à haute persistance, trace de teinte verte). Si le signal est répétitif sur une période courte et que la base de temps est suffisamment rapide, la persistance est supérieure au temps qui sépare les traces entre deux balayages successifs. Ainsi, on peut visualiser la trace entière en permanence. En revanche pour des signaux rapides analysés par un balayage unique (*single shot*) la persistance ne permet pas de visualiser la trace de façon permanente : elle s'évanouit après un temps équivalent à la persistance. Il en est de même pour les signaux très lents : le temps du balayage doit être très long et la trace s'évanouit au fur et à mesure qu'elle est dessinée sur l'écran. On voit donc l'avantage d'un oscilloscope à mémoire phosphorescente dont on peut régler la persistance de quelques secondes à plus d'une heure.

Dans un tube cathodique à mémoire phosphorescente, il y a un deuxième canon à électron appelé *Flood Gun*. Il s'agit d'un véritable arrosoir à électrons qui inondent l'écran. Les électrons émis par le *Flood Gun* arrivent à une vitesse modérée sur l'écran. Le *Flood Gun* est un groupe de canons à électrons qui est située en avant du canon principal et qui entoure celui-ci. Afin d'obtenir un large faisceau d'électrons en forme de colonne, les trajectoires des électrons doivent être parallèles entre elles et être perpendiculaires au plan de l'écran. Pour y arriver, un groupe d'électrodes constituent un collimateur qui entoure l'enveloppe de verre du tube sur sa partie évasée en arrière de l'écran. Le collimateur agit donc comme un jeu de lentilles électrostatiques.

Juste contre la couche phosphorescente de l'écran se trouve une trame de stockage. Une trame ressemble au maillage du tissu d'une moustiquaire. La trame de stockage est constituée d'une trame, comme son nom l'indique, sur laquelle est déposée une couche (film électrostatique) d'un matériau diélectrique (surface de stockage). Le canon principal, que l'on peut aussi appeler le canon d'écriture, dirige un faisceau d'électrons qui viennent frapper la couche phosphorescente à grande vitesse. Un certain nombre d'électrons rebondissent en émission secondaire et laissent derrière eux un déficit d'électrons (charges positives) là-où le canon d'écriture a dessiné la trace. On a donc une trace (une traînée) de charges positives sur l'écran. Cette trace de charges positives vient polariser localement (sous la même forme de trace) le diélectrique à la surface de la trame de stockage. La surface de stockage (diélectrique) emprisonne ainsi la traînée des charges positives. Le reste de la surface de la trame de stockage emprisonne des charges négatives (présentes lors du dernier cycle d'effacement, voir plus loin).

Lorsque le *Flood Gun* vient arroser d'électrons la trame de stockage, ceux-ci sont attirés par la traînée de charges positives emprisonnées par le diélectrique à la surface de la trame de stockage. Les électrons attirés par les charges positives passent à travers les mailles de cette trame pour enfin bombarder la couche phosphorescente de l'écran et entretenir ainsi la luminosité de la trace. En revanche les autres électrons sont repoussés quant à eux par les charges négatives emprisonnées sur le reste de la surface de la trame de stockage. Voir Figure 33 ci-dessus. Comme les électrons qui sont repoussés doivent bien aller quelque part afin de ne pas créer une charge d'espace parasite, ceux-ci sont écoulés par la trame collectrice placée juste avant la trame de stockage sur le trajet des électrons envoyés à vitesse modérée par le *Flood Gun*.

Pour effacer la trace qui a été mémorisée (stockée) sur la surface de la trame de stockage, il suffit de porter cette trame à un potentiel négatif par une commande d'effacement de trace (*erase*), ce qui va résorber les charges positives laissées sur le diélectrique à la surface de la trame de stockage. Ensuite la trame est replacée au potentiel approprié pour un nouvel enregistrement d'écriture de la trace.

Annexe 2 :

Avancées technologiques des tubes cathodiques et principes de l'*analog sampling* pour mesurer au-delà du Giga Hertz

Attention : *analog sampling* ≠ *digital sampling* !

En effet, dans un oscilloscope purement analogique, il n'y a aucun circuit numérique ni composant mémoire à circuits intégrés ou à tores ferrite.

La limite supérieure en fréquence des oscilloscopes analogiques conventionnels est de l'ordre de 1 GHz. Cette borne supérieure de bande passante est due non pas à celle de l'amplificateur d'entrée verticale, mais bien à celle du tube cathodique lui-même. Pourtant, il existe des oscilloscopes purement analogiques capables d'effectuer des mesures sur des signaux dont la fréquence est supérieure à 1 GHz et cela grâce aux techniques d'*analog sampling*.

Voici les limites et les derniers retranchements d'améliorations apportées au cours de l'évolution des tubes cathodiques. Au-delà de 1 GHz, la capacité entre les plaques de déflexion devient un véritable shunt sur le trajet du signal et limite ainsi la bande passante du tube. La longueur nécessaire des plaques de déflexion pour la déviation du faisceau d'électrons devient trop proche de la longueur d'onde des signaux aux fréquences élevées (radiofréquence). Le long des plaques de déflexion, l'apparition d'ondes stationnaires viennent perturber la déflexion du faisceau d'électrons. Pour que l'onde reste progressive le long des plaques de déflexion, celles-ci prennent la forme de lignes de transmission qui sont chargées à leur extrémité. Comme l'onde se propage le long de ces lignes (plaques) de déflexion bien plus vite que celle à laquelle se déplacent les électrons du faisceau, les lignes de déflexion doivent être formées de lignes à retard. Pour y arriver, la ligne de déflexion prend la forme d'un hélicoïde longitudinal (spirale) de façon à ce que la vitesse de propagation des ondes le long de l'hélicoïde soit équivalente à la vitesse de déplacement des électrons dans le tube.

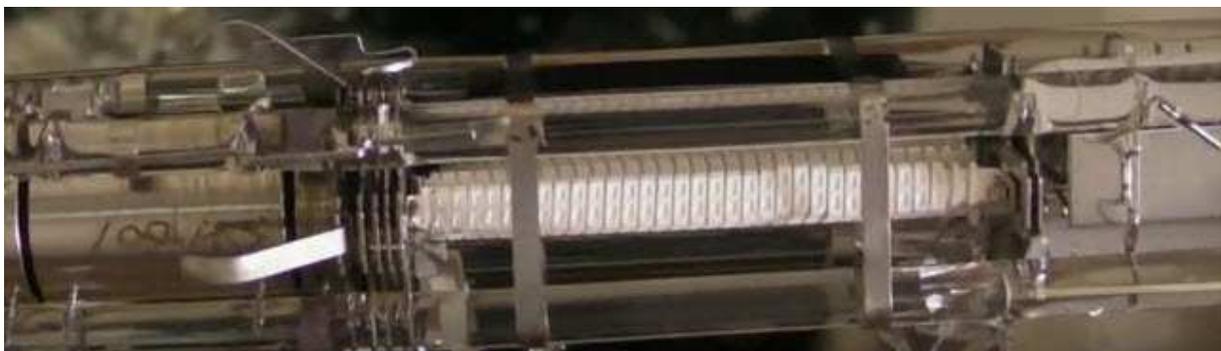


Fig. 34 : Canon à électrons (à gauche) suivi de lignes de déflexions en hélicoïde sur support en barreau de stéatite (à droite). Tube cathodique Tektronix MCP (*Micro-Channel Plate*). Source Internet Youtube : « Jipihorn », France.

Pour que les lignes de déflection puissent aisément dévier le faisceau, la vitesse de déplacement des électrons ne doit pas être excessive pour une question de bonne sensibilité de déviation du faisceau. Après la déflection du faisceau, les électrons doivent donc être à nouveau accélérés sans distorsion de linéarité de déflection. C'est ainsi qu'après les lignes de déflections, un groupe d'électrodes aux géométries étudiées (en formes de flancs de boîtes sans fond) viennent accélérer le faisceau d'électrons déviés. Les formes particulières de ces électrodes créent une succession de champs électrostatiques dont la géométrie particulière en trois dimensions permet non seulement d'accélérer les électrons mais aussi d'exercer une expansion de la déviation du faisceau.



Fig. 35 : Vue de détail sur le groupe d'électrodes d'accélération des électrons et expansion du faisceau dévié à la sortie des lignes de déflection. Tube cathodique Tektronix MCP (*Micro-Channel Plate*). Source Internet Youtube : « Jipihorn », France.

Malgré toutes les précautions décrites ci-dessus, il y a un nombre insuffisant d'électrons qui sont projetés sur la surface phosphorescente de l'écran. En effet, le spot devant se déplacer très rapidement d'un bout à l'autre le long de la surface de l'écran, il y a une faible quantité d'électrons qui peuvent bombarder « à la volée » la couche de phosphore. Pour remédier à cette contrainte, le constructeur Tektronix a réellement fait preuve d'innovation dans les années '70 en plaçant une plaque optoélectronique amplificatrice d'électrons presque contre l'écran de phosphore. Le principe est similaire à celui des tubes amplificateurs de lumière. Il s'agit d'une plaque constituée d'un faisceau de segments de fibres creuses microscopiques (25 μm de diamètre), plaque appelée *Micro-Channel Plate* (MCP). Les micro-canaux formés de segments de fibres creuses sont légèrement inclinées par rapport à l'axe longitudinal du trajet des électrons vers l'écran. L'intérieur de chaque fibre est enrobé d'un revêtement favorisant l'émission secondaire d'électrons. L'ensemble de la plaque est polarisée à un potentiel approprié de l'ordre de 700 V à 1050 V.

Les quelques électrons qui rentrent dans les micro-canaux inclinés rebondissent contre leurs parois et à chaque rebond d'électrons il y a une émission secondaire d'électrons plus nombreux. Les électrons qui se sont multipliés à la sortie des micro-canaux sont accélérés une dernière fois dans le court espace qui sépare la plaque MCP de la couche de phosphore. Cette accélération est réalisée par une électrode portée à un potentiel THT de 25 kV et qui est sous la forme d'une aluminure (fin dépôt d'aluminium) contre la couche de phosphore. Cette aluminure à la surface du phosphore agit comme une vitre sans tain [*le mot « tain » est une altération du mot « étain »*. L'amalgame d'étain et de mercure déposé en fin film sur une feuille de verre forme une couche semi-transparente, d'où le nom de vitre sans tain].

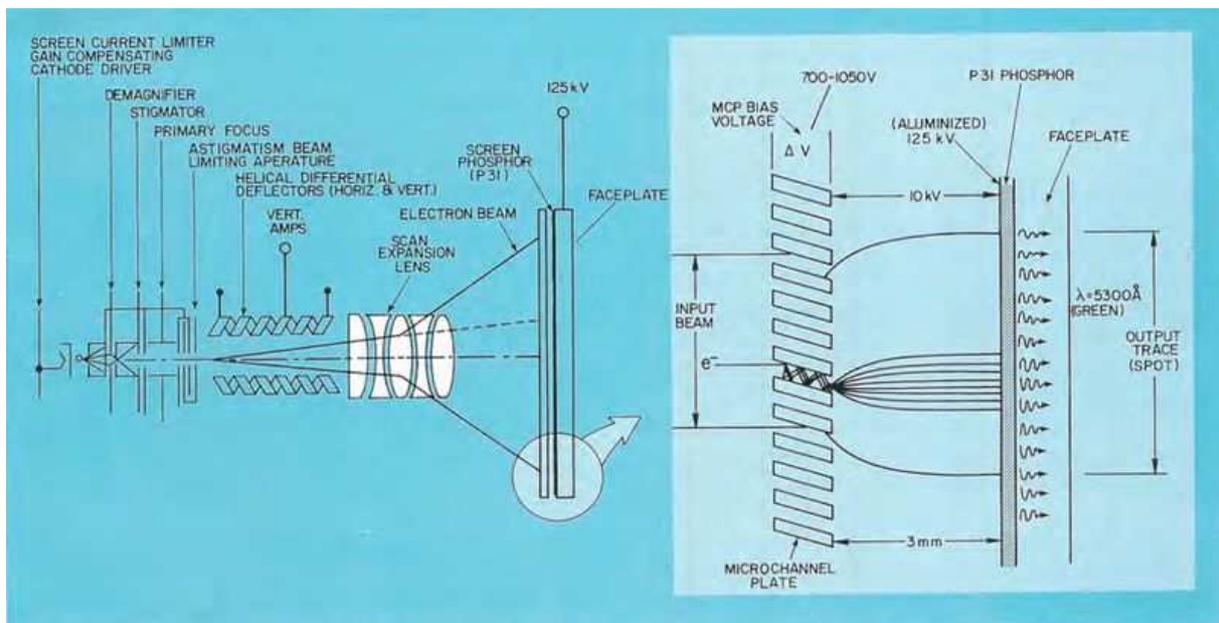


Fig. 36 : Schéma de la constitution d'un tube cathodique Tektronix T7100 ayant équipé dès 1978 les oscilloscopes analogiques TEK 7104 et R7103 dont la bande passante est de 1 GHz (l'oscilloscope analogique le plus rapide créé dans le monde). L'amplification apportée par la plaque MCP est suffisante pour visualiser à l'œil nu une trace en *single shot* (non répétitif) avec une base de temps de 200 picosecondes par division. Source Internet TekWiki-W140.

Maintenant que nous connaissons les dernières avancées technologiques pour porter la borne supérieure de la bande passante d'un tube cathodique d'un oscilloscope analogique à une fréquence de 1 GHz, voyons comment procéder pour effectuer des mesures sur des signaux dont la fréquence est au-delà du Giga Hertz, toujours au moyen d'un oscilloscope purement analogique.

Le principe de l'*analog sampling* des oscilloscopes analogiques applique en quelque sorte une forme d'évolution de l'utilisation d'une double base de temps comme illustré à la figure 24, mais on y ajoute un système de déclenchement (*trigger*) particulier. Pour que l'oscilloscope puisse afficher une trace, le signal doit être répétitif. Le principe du *sampling* est de constituer la trace à partir de petites portions sur chaque cycle du signal à mesurer. Chaque portion du signal est prise avec un léger retard de cycle en cycle. Il suffit de mettre bout à bout les portions du signal avec une base de temps « lente » pour afficher la trace d'un cycle sur l'oscilloscope comme illustré ci-dessous.

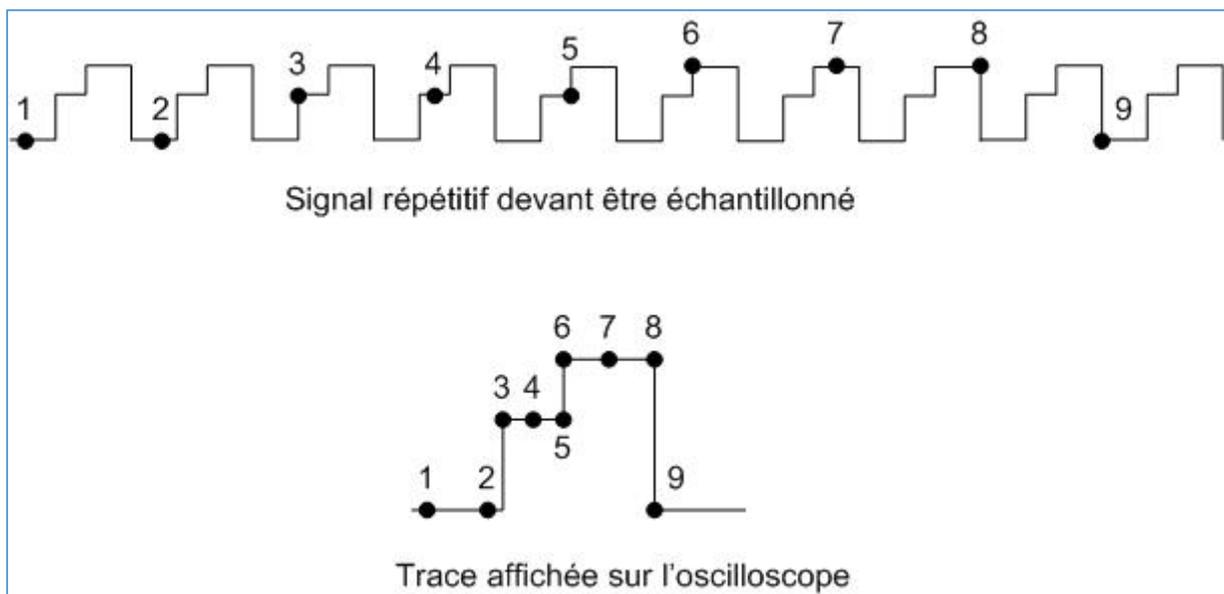


Fig. 37 : Illustration du principe du *sampling*.

En pratique, le signal répétitif à échantillonner déclenche une base de temps rapide à chaque passage par zéro de son amplitude (à chaque cycle). Une autre base de temps lente recouvre plusieurs cycles du signal à échantillonner. Le nombre de cycles est choisi de façon à ce que la fréquence de la base de temps lente soit compatible avec la bande passante du tube cathodique.

L'amplitude des rampes de la base de temps rapide est comparée avec celle de la base de temps lente. Le résultat de la comparaison active un déclencheur (*trigger*) qui s'active après un délai croissant à partir de chaque passage par zéro du signal de cycle en cycle durant la période de la base de temps lente et selon l'évolution de l'amplitude de la rampe de celle-ci. Le déclencheur activé avec un délai croissant permet de transformer la rampe linéaire de la base de temps lente en une rampe étagée en marches d'escalier. Lors de chaque montée en plateau de cette rampe en marche d'escalier, la valeur de l'amplitude instantanée du signal à échantillonner est maintenue dans un étage échantillonneur bloqueur (*sample and hold*) à composants discrets (transistors). La valeur de l'amplitude instantanée est « mémorisée » par le potentiel de charge d'un condensateur de faible valeur (quelques picofarads). Cette valeur de potentiel est entrée en X de l'oscilloscope et la base de temps lente en marches d'escalier est entrée en Y. Cette description du principe *d'analog sampling* est relativement résumée. En pratique, il y a bien plus de subtilités dans les modules électroniques de base de temps *sampling*, amplificateurs *sampling* et module externe *sampler*, mais ceci est une autre histoire.

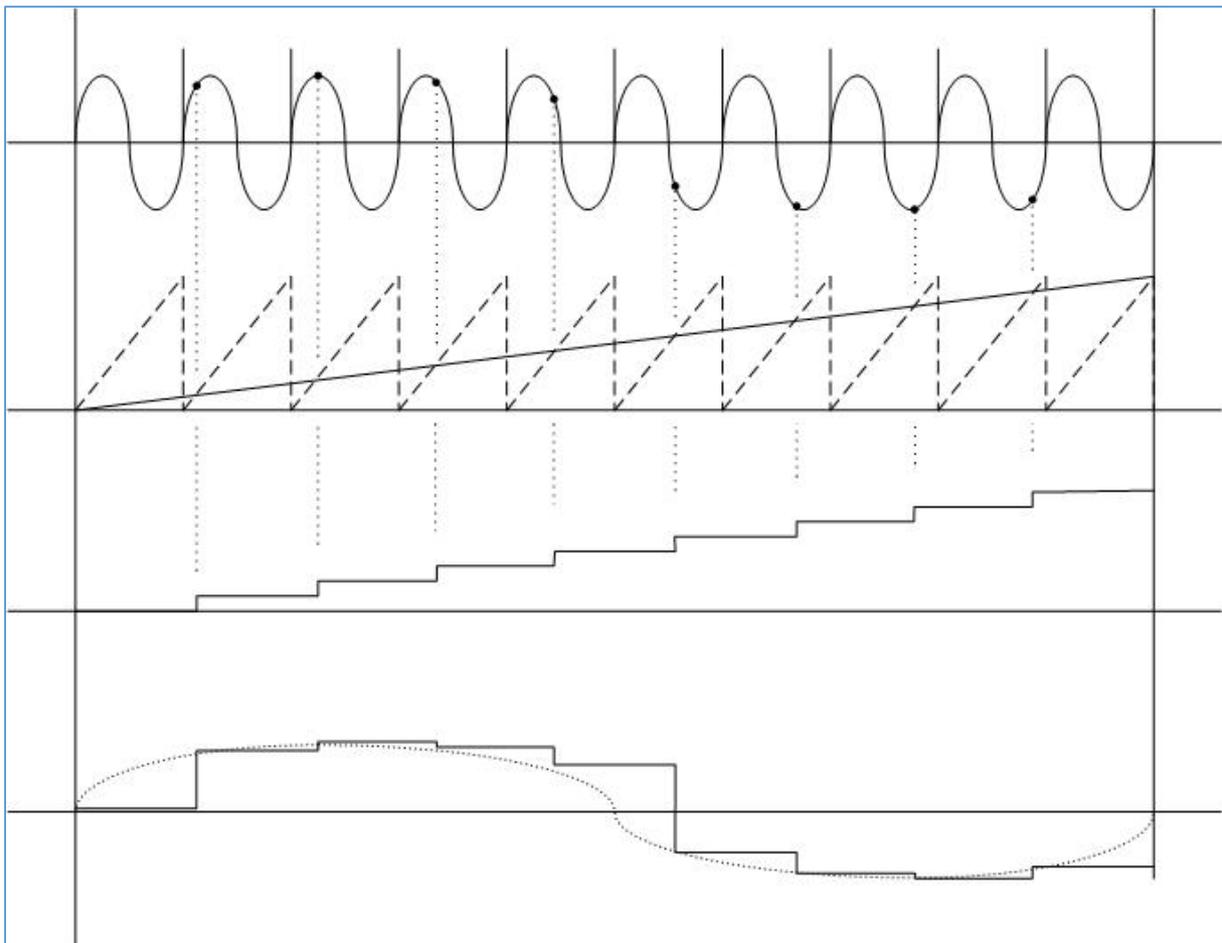


Fig. 38 : Échantillonnage d'un signal répétitif, base de temps rapide, base de temps lente, comparaison des rampes pour obtenir un délai croissant, rampe en marche d'escalier et signal affiché par l'oscilloscope.

En prenant une rampe de la base de temps lente qui couvre de nombreux cycles du signal répétitif, on obtient une résolution suffisante pour l'affichage de la trace sur l'oscilloscope.