

Autopsie d'une image

par André DEIBER

Lycée Fustel de Coulanges - Strasbourg

et Olivier KEMPF

I.U.F.M. d'Alsace - Site de Strasbourg

G.R.E.S.E.P. Groupe de Recherche de l'I.U.F.M. d'Alsace

et de l'Université Louis Pasteur

Un écran de télévision est le lieu de phénomènes complexes. Il est possible de déterminer le mode de construction d'une image sans intervenir à l'intérieur du téléviseur. Un capteur optique rapide permet de suivre ligne par ligne le balayage de l'écran. L'association du signal vidéo, disponible sur la prise péritel, et de ce signal optique permet une démarche déductive dans l'analyse de la structure fine de l'image. Mais pour cela, le critère de rapidité du système optique est primordial.

1. LE MONTAGE EXPÉRIMENTAL

1.1. Le capteur

1.1.1. La photodiode BPW34

Lors d'une variation brutale de l'éclairement de la photodiode, un courant photoélectrique apparaît (ou disparaît) très rapidement ; le retard étant de l'ordre de 10^{-10} s. Mais ce temps de production ou de recombinaison des porteurs de charge, n'est pas à confondre avec le temps de réponse de la photodiode et encore moins avec celui de l'ensemble du dispositif comme nous le verrons ci-après. Le schéma équivalent d'une photodiode en mode photoconducteur, donc en polarisation inverse est le suivant.

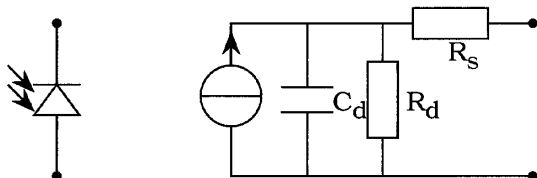
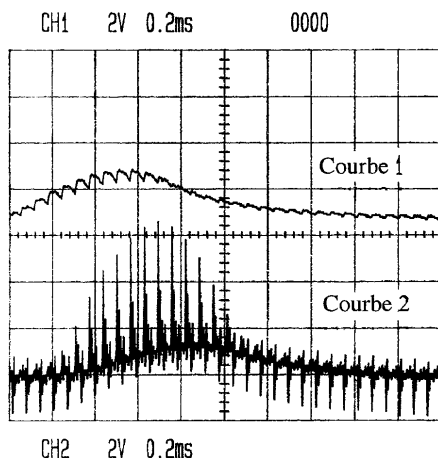


Figure 1 : Photodiode BPW34 et équivalent.

En pratique R_s est de l'ordre de quelques dizaines d'Ohms, tandis que $R_d \approx 10^{11} \Omega$. La capacité parallèle de l'ordre de 200 pF d'après le constructeur.

1.1.2. Branchement électronique de la photodiode

a - Montage de base (Graphe 1 - courbe 1)



Graphe 1

Sous une intensité lumineuse donnée, une photodiode, notée Ph, polarisée en inverse, joue le rôle de source de courant. L'intensité du courant inverse est proportionnelle à l'intensité lumineuse, en négligeant le courant d'obscurité. Le montage de base (figure 2) en mode photoconducteur est très lent, comme le montre le schéma équivalent.

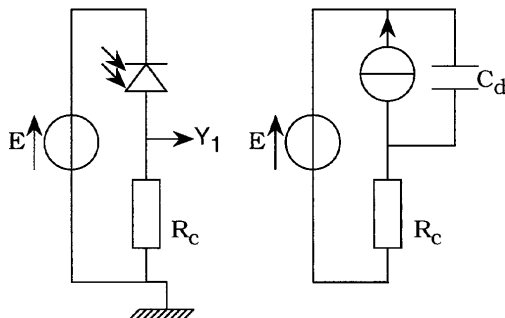


Figure 2 : Montage de base et équivalent.

En pratique, on peut négliger R_d et R_s . La constante de temps $\tau = C_d R_c$ limite la fréquence de travail à quelques kilohertz : si l'on désire obtenir un signal d'amplitude correcte c'est tout à fait insuffisant pour analyser l'image d'une télévision de manière détaillée.

b - Montage avec amplificateur opérationnel (Graphe 1 - courbe 2)

Ainsi, associée à un convertisseur courant-tension à amplificateur opérationnel, on obtient une «image» de cette intensité lumineuse en visualisant la tension de sortie de l'amplificateur opérationnel (U_s) sur l'écran d'un oscillographe (Y_2). Le montage associant un AOP à la photodiode fait travailler cette dernière sur une résistance de charge égale à la résistance de la boucle de réaction divisée par le gain en boucle ouverte à la fréquence de travail. En pratique, c'est le slewrate qui va limiter la rapidité du dispositif.

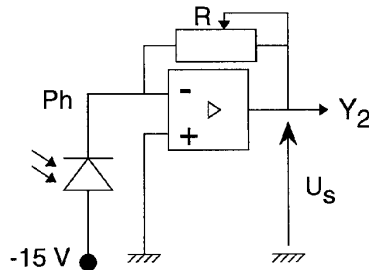


Figure 3 : Montage avec AOP.

Dans le graphe 1, la courbe de comparaison des deux montages est éloquent.

1.1.3. Contrainte technique - Choix des composants

Le capteur photoélectrique

La durée typique des phénomènes lumineux est de l'ordre de quelques μs . Il faut donc éliminer par exemple les phototransistors trop lents pour cette application et retenir les photodiodes telles que le modèle BPW34.

L'amplificateur opérationnel

Il doit être choisi de qualité satisfaisante, au moins du type TL081, de produit gain-bande passante égal à 3 MHz, de slewrate égale à 20 V/ μ s.

Le potentiomètre

A puissance lumineuse donnée, une augmentation de R entraîne celle de U_s , la valeur de R doit être choisie afin de ne pas saturer l'amplificateur opérationnel (cela va dépendre de l'intensité lumineuse mesurée).

Normalement une valeur de 1 M Ω devrait convenir.

La photodiode et son boîtier

Les photodiodes sont d'un maniement aisé lorsqu'elles sont montées sur une prise jack mâle mono 3,5 mm. Après avoir scié l'extrémité du capot de protection (côté raccord cordon), la photodiode se trouve au fond du cylindre opaque. On a donc minimisé les lumières parasites.

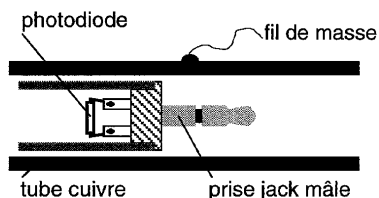


Figure 4 : Coupe longitudinale du capteur.

On emboîte l'ensemble du capteur dans un tube de cuivre, de type distribution d'eau, relié à la masse de l'oscilloscope. On a ainsi minimisé les parasites inductifs dus aux forts champs électromagnétiques présents dans l'environnement proche d'un téléviseur. Cette précaution est absolument nécessaire.

Le branchement

Le capteur sera ainsi relié à l'amplificateur opérationnel via une prise jack femelle mono 3,5 mm associée à un câble blindé (deux conducteurs, une masse).

La tension de sortie de l'amplificateur opérationnel est montée sur fiche banane pour être visualisée par l'oscilloscope.

1.2. L'image

1.2.1. Obtention d'une image

Le plus simple serait d'utiliser l'image d'un programme sur une chaîne de télévision. Mais on préférera une image fixe issue d'un arrêt sur image d'une cassette de magnétoscope, permettant d'obtenir facilement un déclenchement lors de la visualisation à l'oscilloscope. L'idéal est une image d'intensité paramétrable par enregistrement vidéo d'une mire en niveau de gris. Un caméscope n'est donc pas nécessaire. Un magnétoscope suffit amplement.

1.2.2. Récupération du signal vidéo de l'image

Pour recueillir le signal vidéo d'une image télé, il suffit sur l'une des prises péritel du cordon de raccordement télé-magnétoscope de récupérer la sortie vidéo (vidéo output) et la masse de la prise péritel côté magnétoscope (bornes 19 et 17). Ou de récupérer l'entrée vidéo (vidéo input) et la masse de la prise péritel côté télévision (bornes 20 et 17 cf. figure 5). On préférera pour des raisons de proximité le brochage côté télévision.

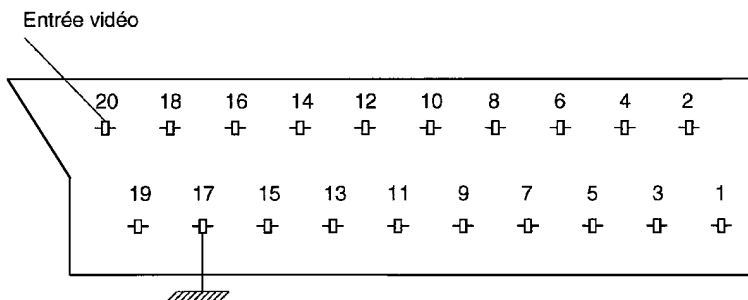


Figure 5 : Câblage prise péritel côté télévision.

1.3. La mesure

Si on désire étudier une région localisée de l'écran, il faut associer le système (capteur-amplificateur opérationnel) et brancher la tension de sortie sur une des voies de l'oscilloscope. Si on désire comparer le signal optique et le signal vidéo il suffit de visualiser le signal vidéo sur la voie 2 de l'oscilloscope.

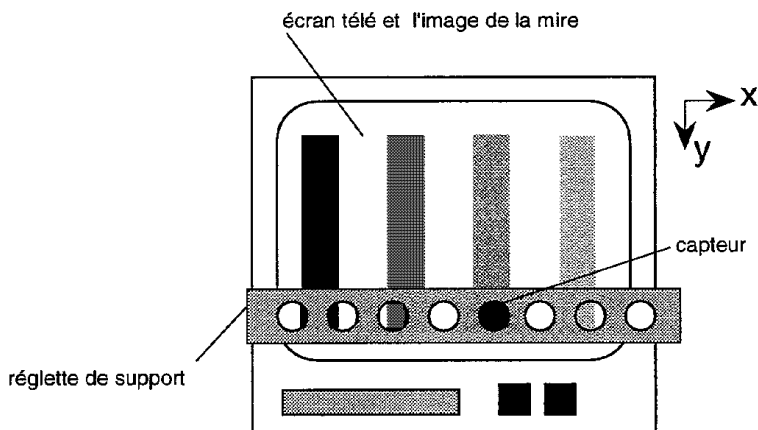


Figure 6 : Dispositif expérimental relatif à l'écran de télévision.

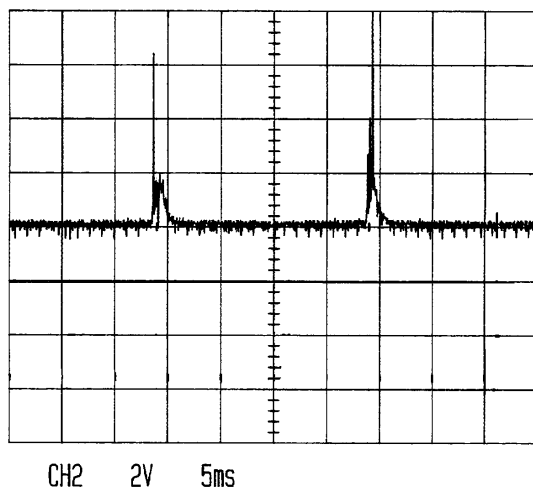
2. ÉTUDE AVEC LE CAPTEUR

2.1. Étude des pics principaux - Étude de l'écran - Application à la détermination de la fréquence de balayage verticale de l'écran

En visualisant le signal optique d'une image fixe quelconque, on observe grâce au capteur un signal périodique à l'oscillographe. La période du signal est de 20 ms. Le signal périodique est caractérisé par un pic de durée brève. La largeur de ce pic correspond à la durée pendant laquelle le capteur est éclairé. Cela montre que la partie de l'écran scrutée par le capteur est obscure la majeure partie du temps soit environ 90 %. On imagine donc très bien que le rapport temps d'éclairement sur temps d'extinction d'un point donné de l'écran est très largement inférieur à 10 %.

Mais nous ne percevons pas cette alternance. Cela implique donc une persistance rétinienne suffisante. D'environ 100 ms, elle est satisfaisante, compte tenu de la périodicité de la luminosité de l'écran égale à 20 ms pour un point donné de l'écran.

Le signal de fond observé hors pics s'interprète par des parasites électromagnétiques résiduels sur le circuit du capteur lui-même.



Graphe 2.1

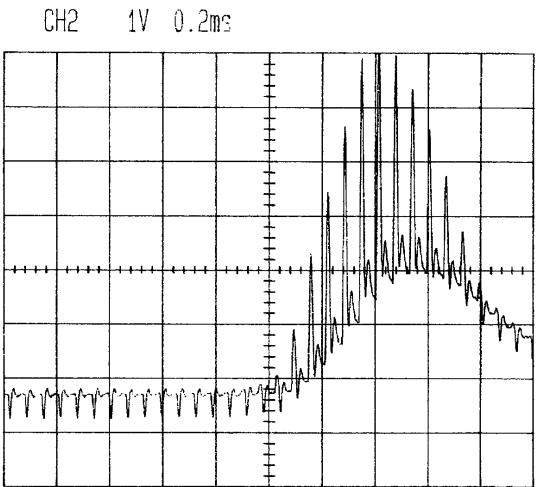
2.2. Étude de la structure d'un pic principal - Étude d'une partie circulaire de l'écran - Mise en évidence de la persistance de l'écran

En changeant la base de temps de l'oscilloscope, on constate qu'un pic principal se subdivise en plusieurs pics secondaires. Chacun d'entre eux correspond au passage du spot sur une des lignes de la zone de l'écran placée en face de la photodiode.

La hauteur d'un pic secondaire est liée à la luminosité de l'image qui apparaît dans cette zone de l'écran (cf. les variations brutales), mais aussi à sa position dans la fenêtre oculaire visible par la photodiode soit la longueur du segment de ligne visible (cf. l'allure de l'enveloppe supérieure du pic principal).

L'enveloppe inférieure (luminosité de fond) du pic principal correspond à la persistance résiduelle des lignes de l'écran qui ne sont plus actives : c'est «la rémanence» de l'écran.

Sur la fin du signal, à partir de l'instant où on ne visualise plus de pics secondaires mais simplement l'enveloppe inférieure on peut estimer, en extrapolant, le temps de relaxation de la luminosité de fond de la dernière ligne «lue» par le capteur soit environ 0,4 ms.



Graphe 2.2

La figure 7 simule le signal si il n’y avait pas rémanence.

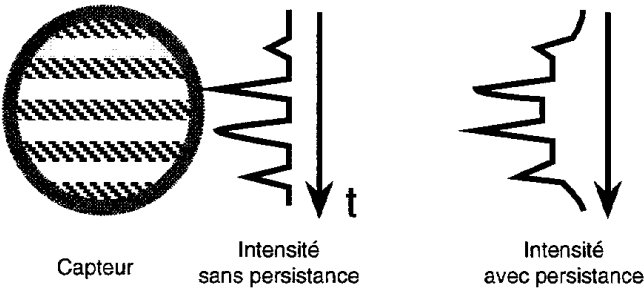
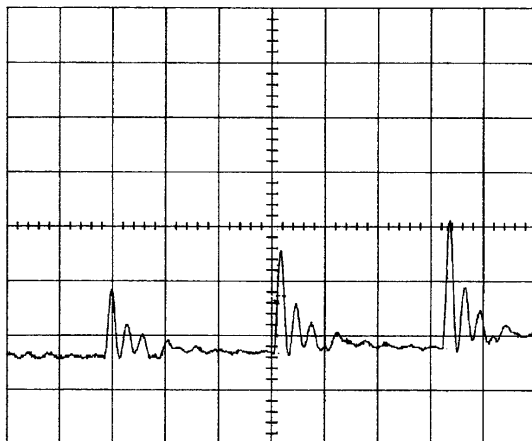


Figure 7 : Ce que voit le capteur.

2.3. Étude des pics secondaires - Étude des lignes - Application à la détermination du nombre de lignes

2.3.1. Approche expérimentale

CH2 0.2V 20 μ s



Graph 2.3

En diminuant encore la base de temps, les pics secondaires apparaissent plus visibles, on peut aisément mesurer la durée entre deux pics secondaires soit 64 μ s. Cette durée est le temps mis par le spot pour aller d'une ligne à la suivante pour deux points situés sur la même verticale (cf. 2.4.).

La période de balayage de l'écran étant égale à 20 ms (cf. 2.1.), on trouve 312,5 lignes pour l'ensemble de l'écran. On met ainsi en évidence le balayage alterné ligne paire puis ligne de numéro impair. A chaque «paquet de passages» devant le capteur, il n'y a en fait lecture que de la moitié des lignes.

L'image formée par le balayage des lignes paires (ou impaires) s'appelle dans le langage technique une trame. Une trame alterne toutes les 20 ms, donc l'image entière se forme toutes les 40 ms ce qui correspond bien à 25 images par seconde.

Compte tenu que le téléviseur doit «afficher» 25 images par seconde et qu'une image est constituée par 625 lignes, le téléviseur doit transmettre 15 625 lignes par seconde soit une ligne en 64 ms. Cela

concorde. Mais on peut se demander si cette structure se retrouve au niveau de l'écran. Pour cela, il suffit de se livrer à une observation directe à la loupe de la structure d'une colonne de l'écran (type In Line). En associant une règle finement graduée on décompte environ 360 points (selon les téléviseurs) soit a priori 300 lignes. Mais cela contredit le nombre de lignes annoncé par les constructeurs soit 625 lignes.

Remarquons que le décompte est très délicat sur le tube type Trinitron où il est impossible de décompter les points sur l'écran.

D'une manière plus précise, l'écran du téléviseur étant éteint, on observe sur tout l'ensemble de l'écran des colonnes verticales : chacune de ces colonnes contient trois colonnes de couleurs ternes. Éclairé, il apparaît un damier constitué de blocs de trois couleurs vives (rouge, vert, bleu) qu'on appellera point. On déduit, de la répartition de ces points qu'il apparaît des lignes paires et impaires (voir figure 8). Mais comme le nombre de points sur une colonne n'est pas lié de manière simple au nombre de lignes, on en déduit qu'il n'y a pas, a priori, de relation entre la structure de l'écran et le mode de lecture en lignes de l'image.

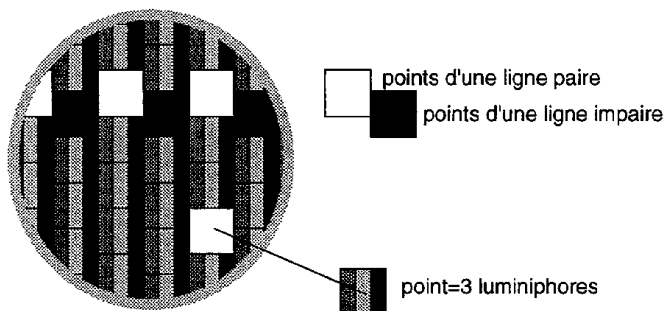


Figure 8 : Lignes paires et impaires dans l'objectif du capteur.

2.3.2. Ce que nous apprend le technicien

Cf. figures 9A et 9B publiés dans un prospectus pour l'achat de téléviseurs.

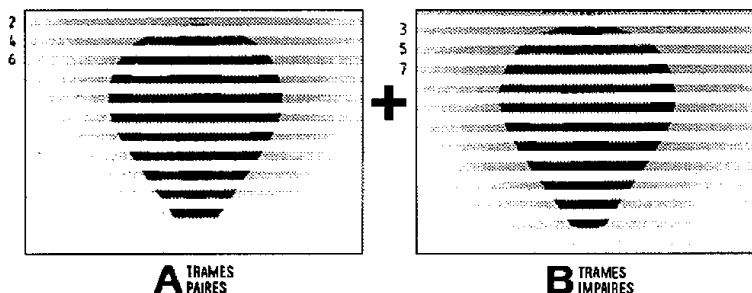


Figure 9A et 9B : Trame paire et impaire.

Les observations sont en accord avec les fiches de description fournies aux clients. En effet dans le tube Black Line S, Philips utilise du P.V.P. (Poly Vinyl Perolidium). Cette technique dispose avec une extrême précision de fins sillons de graphite dans lesquels reposent des bandes de couleurs (les phosphores) ; celles-ci sont éclairées séparément sans interférence entre elles. Ce procédé permet de maîtriser la largeur des bandes bleues, rouges et vertes composant l'image, de la réduire et ainsi d'en mettre davantage sur chaque ligne horizontale.

Le masque en invar graphité est une grille qui guide les faisceaux d'électrons des trois canons vers les points de l'écran du téléviseur. Les électrons qui n'y parviennent pas sont entièrement absorbés par le masque ou les contours de la grille, supprimant ainsi toute lumière incidente et donc un meilleur contraste apparaît.

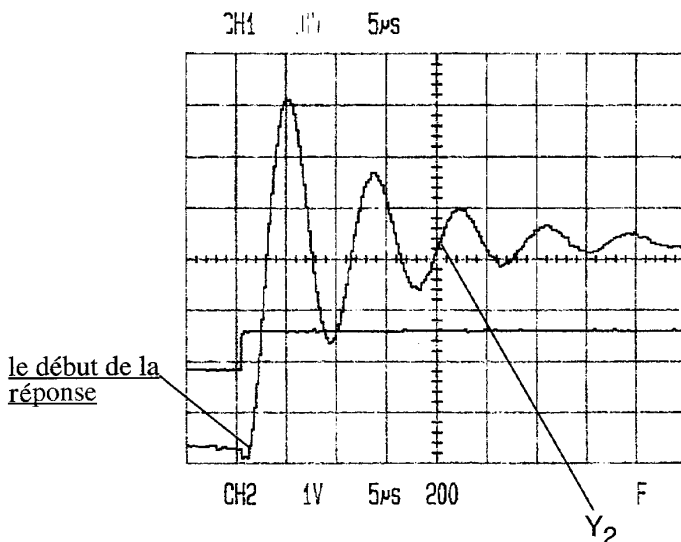
Les phosphores sont des corps naturels ou synthétiques, qui possèdent la propriété d'émettre de la lumière à température ambiante. Ce sont des corps luminescents de durée moyenne supérieure à un millième de seconde (contrairement au corps fluorescent). Ce sont par exemple des cristaux de sulfure de zinc (le diluant) dans lesquels ont été introduites des traces d'un autre métal (des activateurs).

La persistance d'un phosphore est le temps au bout duquel, l'excitation ayant cessé, sa luminosité, qui décroît de façon exponentielle, est réduite au un centième de sa valeur initiale, et donc a pratiquement disparu.

2.4. Origine des oscillations après le passage du spot

Au début de notre expérimentation nous avons attribué les oscillations suivant le pic de ligne à chacun des trois luminiphores. En faisant varier la couleur, les oscillations n'ont pas changé d'allure. Afin d'en dégager l'origine, nous avons utilisé une source lumineuse rapide autre qu'une télévision.

Le générateur émet un signal carré de fréquence relativement élevée (≈ 10 kHz). La comparaison des deux enregistrements montre bien que les oscillations sont propres au dispositif optoélectronique et ne font pas intervenir l'écran du téléviseur. Il faut remarquer que **le début de la réponse** du capteur coïncide avec la variation brutale de luminosité.



Graph 2.4

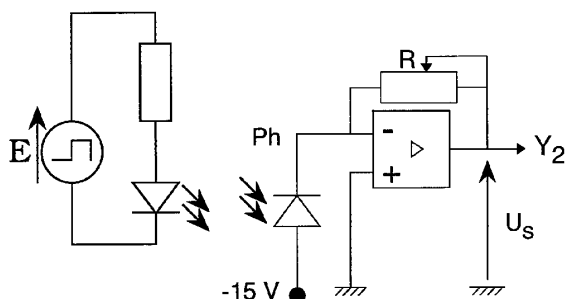


Figure 10 : Montage de visualisation de la réponse du signal.

3. COMPARAISON DU SIGNAL OPTIQUE ET DU SIGNAL VIDÉO

En comparant le signal optique et le signal vidéo, nous allons augmenter progressivement la vitesse de balayage en montrant que le capteur optique placé sur l'écran permet de localiser un «événement» sur le signal vidéo de la prise péritel. C'est cette association qui permet de développer une démarche déductive, afin de valider les hypothèses sur la structure du signal vidéo.

3.1. Lecture globale d'une image

3.1.1. Analyse qualitative

On observe que la périodicité des deux signaux est la même. Mais un déplacement vertical descendant de la photodiode entraîne une translation du signal optique par rapport au signal vidéo. On peut donc très aisément identifier le début et la fin de la lecture de l'image et mettre en évidence le temps d'attente du spot (**attente trame**) avant la lecture suivante (cf. 3.1.1).

3.1.2. Analyse quantitative

Le décalage temporel entre le début du signal périodique de trame (**départ du signal trame**) et le signal optique est directement lié à la distance qui sépare le haut de l'écran et la position verticale du détecteur optique. Il permet ainsi de mesurer la «vitesse» de balayage vertical d'une des trames (paire ou impaire). A cette fin en s'aidant de la petite réglette en bois, on peut tracer $\Delta t = f(y)$ et vérifier que la fonction f est affine. On trouve un coefficient directeur, inverse de la

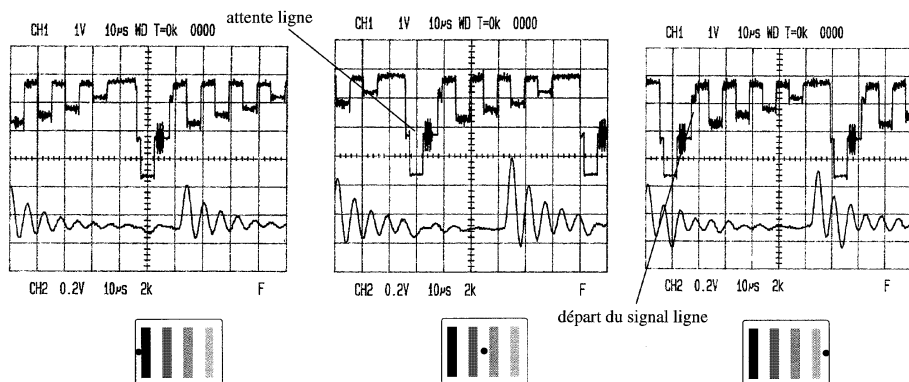
de balayage vertical. Mais une analyse du signal vidéo (passez à une base de temps plus faible cf. graphe 3.1.2) montre que la durée de ce «blanking» n'excède pas 2,75 ms. Il manque donc environ 1,25 ms qui transporte de l'information vidéo mais qui n'apparaît pas sur la partie visible de l'écran. Il manque donc environ vingt lignes, ce qui compte tenu de la vitesse de balayage vertical représente une distance de 2 cm, réparties en haut et en bas de l'écran. Une analyse encore plus poussée du signal de blanking montre que les tops lignes continuent d'être émis (sans transporter d'information vidéo) de manière à construire le top trame. D'autres tops de lignes permettent le transport d'informations diverses (signaux d'identification trame SECAM) tandis que d'autres lignes sont utilisées pour le télétexte. Mais cela nous mènerait trop loin dans l'autopsie de l'image.

3.2. Lecture d'une ligne

3.2.1. Analyse qualitative

En augmentant la fréquence de balayage de l'oscilloscope, on visualise la structure de la ligne. Là encore, un déplacement horizontal entraîne une translation du signal optique par rapport au signal vidéo que l'on visualise à l'oscilloscope afin de dégager la structure d'une ligne (cf. graphe 3.2.1).

On peut donc très aisément identifier le début et la fin de la lecture de la ligne et mettre en évidence le temps d'attente du spot (**attente ligne**) avant la lecture de la ligne suivante. En particulier, il est possible d'identifier les paliers correspondants à chaque zone de la mire par simple déplacement du capteur.

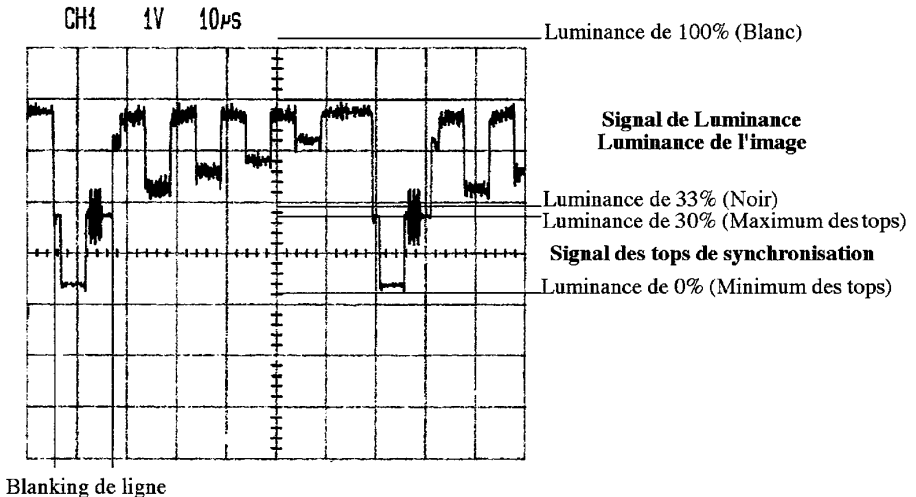


Graphe 3.2.1

On constate que la photodiode réagit de manière très rapide et permet une corrélation aisée entre le signal de ligne et la position horizontale du capteur. Mais il faut faire abstraction des oscillations parasites de la réponse du capteur ; on prend en compte la date de début de montée du signal optique (cf. 2.4).

3.2.2. Analyse quantitative

Le décalage temporel entre le début du signal périodique de ligne (**départ du signal ligne**) et le signal optique est directement lié à la distance qui sépare la gauche de l'écran et la position horizontale du détecteur optique. Il permet ainsi de mesurer la «vitesse» de balayage horizontal d'une des trames (paires ou impaires). A cette fin en s'aidant de la petite réglette en bois, on peut tracer $\Delta t = f(x)$ et vérifier que la fonction f est affine. Le coefficient directeur est l'inverse de la vitesse de balayage horizontal $\left((133 \pm 5) 10^{-6} \text{ s.m}^{-1} \right)$ soit une vitesse de balayage horizontal de $(7500 \pm 60) \text{ m.s}^{-1}$. L'ordonnée à l'origine fait apparaître un temps mort $(25 \pm 1 \mu\text{s})$.



Graph 3.2.2 : Détail du signal ligne.

Ce temps mort correspond a priori à la durée du blanking de ligne, synchronisation ligne ou plus concrètement durée du retour de balayage ligne. Mais une analyse du signal d'une ligne (passez à une base de

temps plus faible cf. graphe 3.2.1) montre que la durée du blanking ligne n'excède pas $19\text{ }\mu\text{s}$. Il manque donc environ $6\text{ }\mu\text{s}$ qui transporte de l'information vidéo mais qui n'apparaît pas sur la partie visible de l'écran. Il y a donc là encore, compte tenu de la vitesse de balayage horizontal, une distance d'environ 2 cm à répartir à gauche et à droite de l'écran.

Une analyse encore plus poussée du signal de synchronisation de ligne laisse apparaître des paliers (post-pré-top) avec en plus un signal de salve (burst) qui contient les informations couleurs.

On constate bien que la durée de lecture d'une ligne est inférieure à $64\text{ }\mu\text{s}$. Le spot met donc un certain temps pour revenir et attend un signal de synchronisation avant de lire la ligne. Cette fenêtre temporelle permet de crypter l'information en modifiant de manière codée le retard par rapport à ce signal pour chaque ligne. Celles-ci semblent translatées les unes par rapport aux autres de manière aléatoire (cf. Canal + en codé).

4. CONCLUSION

L'analyse expérimentale de l'écran de télévision recèle toutes les difficultés d'une expérimentation sur un phénomène complexe. Il faut d'abord isoler le signal optique des forts parasites en blindant le dispositif. Afin d'éviter des erreurs d'interprétation, il était nécessaire d'isoler le caractère pertinent dans la réponse du capteur, en concevant une expérience complémentaire pour analyser l'origine des oscillations.

Dans certains cas, des hypothèses de travail peuvent être infirmées : les lignes ne peuvent être déduites de la structure visible de l'écran.

Ce n'est que l'observation simultanée de plusieurs paramètres expérimentaux qui permet souvent d'échafauder une explication scientifique cohérente d'un phénomène.

REMERCIEMENTS

Par ailleurs, nous tenons à remercier M. François PENNER, technicien au lycée Fustel de Coulanges, pour sa collaboration efficace.