

Photorecepteurs

Biblio: Sextant p. 57 et suivantes
Duffaut optique p. 192 et suivantes
BUP 676 p. 1317 (expériences de J.M.)

I Linéarité et caractéristique de la P.D.

II Sensibilité

III Répoux spectral

IV ——— Temporelle

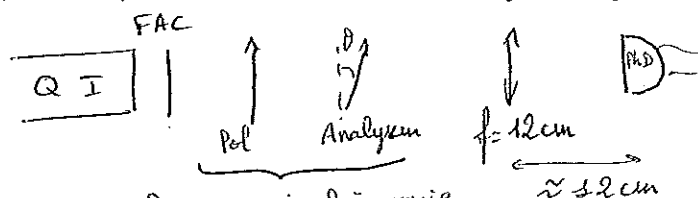
La lumière est un puissant outil d'investigation en physique. Pour pouvoir l'utiliser comme tel, on a besoin de photorecepteurs dont le rôle est justement de convertir un signal lumineux en un signal électrique. Un photorecepteur est caractérisé par la linéarité de sa réponse avec l'éclairement, sa sensibilité, sa réponse spectrale et son temps de réponse.

I Caractéristique et linéarité de la photodiode (PhD)

On connaît la relation courant-tension d'une PhD lorsqu'elle est dans un circuit : $I = I_{\text{inv}} (e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1)$. Pourquoi peut-on dire que c'est un photorecepteur ? La PhD est une jonction PN. Lorsqu'un photon arrive sur la zone P, s'il se fait absorber suffisamment près de la zone de déplétion, l' e^- va être accéléré et va passer de la zone P à la zone N, d'où l'apparition d'un courant.

J'ai donc tracé la caractéristique I-V d'une photodiode pour 7 éclairements.

Montage optique :



Pour pouvoir faire varier l'éclairement selon la loi de Malus

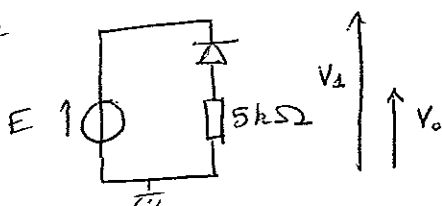
$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

Pour faire converger un maximum de rayons vers la PhD

on se place en montage "longue dérivation" car en inverse la photodiode a une impédance d'entrée de l'ordre de celle de l'appareil de mesure.

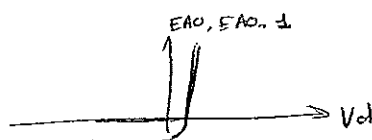
Montage électrique

générateur de tension continue dont on fait varier à la main la tension.



On acquiert V_1 et V_0 sur Synchrone, 2000 pts en 8 s (pour avoir le temps de tourner le bouton) avec le calibre +5/-5V pour V_0 .

⚠ Petite subtilité de synchrone : - 1ère acquisition, tout va bien - 2ème acquisition, la 1ère acquisition est déformée !!

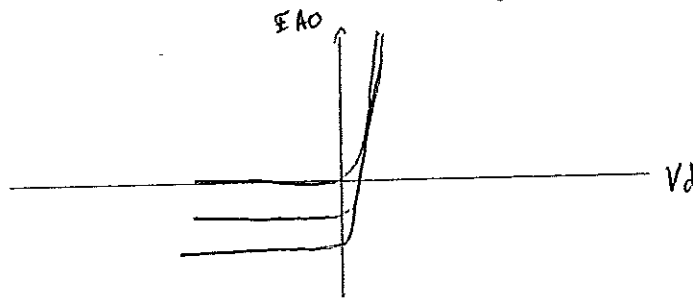


avec $V_d = E A_1 - E A_0$

Ceci vient du fait que les valeurs des abscisses ne sont pas les mêmes à chaque acquisition et par conséquent $EAO-1$ est en fonction de Vd
 (on fait tourner le bouton à la main) (qui correspond à la 1^{ère} acquisition) $= EAO-1$
 $\uparrow$
 $= EAO-1$
 $\uparrow$
 1^{ère} acquisition!

D'où dans la feuille de calcul, il faut appeler une nouvelle variable $Vd-1$ et écrire $Vd-1 = EAO-1 - EAO-1$ et dans "Paramètres" mettre qu'en trace $EAO = f(Vd)$ et $EAO-1 = f(Vd-1)$ et là c'est bon, la courbe n'est plus déformée.

→ On reprend une courbe devant le jury à un nouvel angle.



(faire la même manip avec $Vd-2 = EAO-2 - EAO-2$)

On voit que lorsque la diode est polarisée en inverse, elle impose un courant dans le circuit qui dépend de l'éclairement.

→ On trace $RI_{\text{mes}} = f(\cos^2 \theta)$

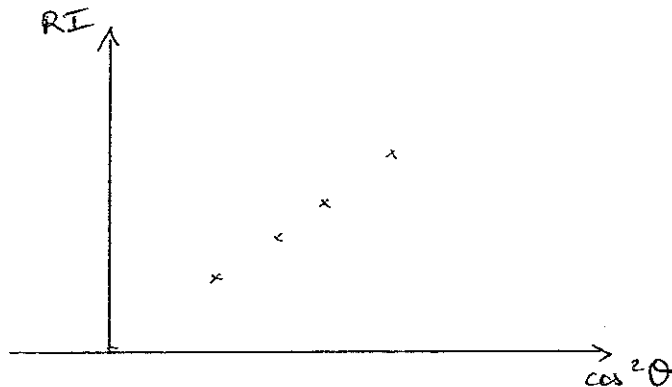
(Prendre un point)

↑
 pris au voltmètre
 aux bornes de la résistance.
 Pas la peine de tracer la courbe à chaque fois.

à $\theta = 40^\circ$ $RI = 1,32V$

$\theta = -40^\circ$ $RI = 1,28V$

→ on reporte $RI = 1,30V$ à $\cos^2 40 = 0,59$



→ la réponse est linéaire!

(Par le cas de tous les photorecept
 la photorésistance n'est pas linéaire)

$$RI = a_0 + a_1 \cos^2 \theta$$

$$a_0 =$$

$\neq 0$ à cause de - l'obscurité pas si obscure
 - m à 90° polariseur / analyseur n'arrête pas H

$$a_1 =$$

Interch'itudes • sur RI : sur le 3^{ème} digit après la virgule $\frac{0,001}{1,3} = 0,00077$

→ on connaît RI à ~~0,001~~ 0,1 %

• sur le φ résiduel entre les 2 0° des polariseurs et analyseurs:

$$\text{on a : } \cos^2(\theta + \varphi) + \cos^2(\theta - \varphi) = \cos^2 \theta + \varphi^2 \sin^2 \theta$$

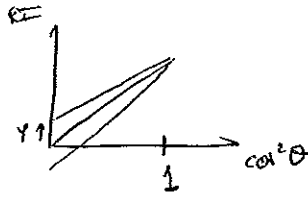
DL à l'ordre 1

• sur la lecture de θ : $\pm 2^\circ$

$$\cos^2(\theta + \varphi) = \cos^2\theta - 2\sin\theta\cos\theta \text{ à l'ordre 1}$$

erreur la + grande en $\theta = \frac{\pi}{4}$: φ

on peut encadrer la pente
pour avoir l'incertitude
majorée dessus.



II Sensibilité S

$$S = \frac{I}{\Phi} \text{ en } A \cdot W^{-1}$$

$$= \frac{\text{pente}}{R \Phi_0 (\times 5)}$$

↑ mesuré au fluxmètre.

⚠ le fluxmètre ne donne non pas en flux (en W) mais un éclairement (en $W \cdot m^{-2}$)
(unbelievable)

⇒ il ne faut pas oublier de multiplier par la surface de la photodiode que
j'estime à $3 \times 3 = 9 \text{ mm}^2$

⚠ Le fluxmètre a son maximum de sensibilité à 555 nm ⇒ la "pente" que
j'ai eue + haut est non pas celle obtenue en 1ère partie mais celle avec un
filtre interférentiel centré sur 549 nm.

⚠ le fluxmètre (décidément, il les accumule) donne un résultat
en lux $\rightarrow 1 \text{ lux} = \frac{1 \text{ lumen}}{m^2} = \frac{1,466 \cdot 10^{-3} W}{m^2} \text{ à } 555 \text{ nm}$

avec le filtre interférentiel vert : pente = 19,13 mV

$$R = 5 \text{ k}\Omega$$

$$\Phi_0 = 520 \text{ lux}$$

$$S = 9 \cdot 10^{-6} m^2$$

⚠ ~~à bien cadrer le polar~~
à bien remettre polar / analyseur
à 0° !

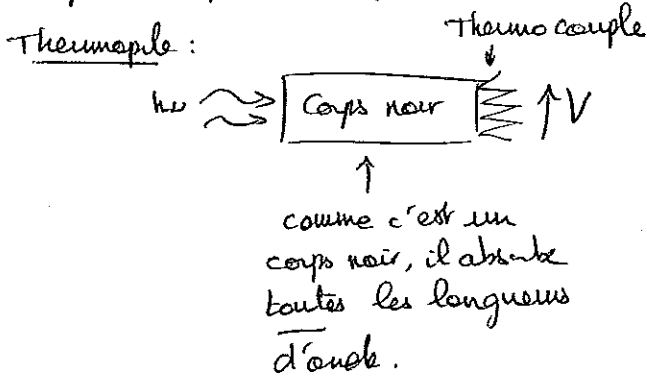
$$\rightarrow S = 0,4 A \cdot W^{-1}$$

donnée constructeur $0,4 A \cdot W^{-1}$

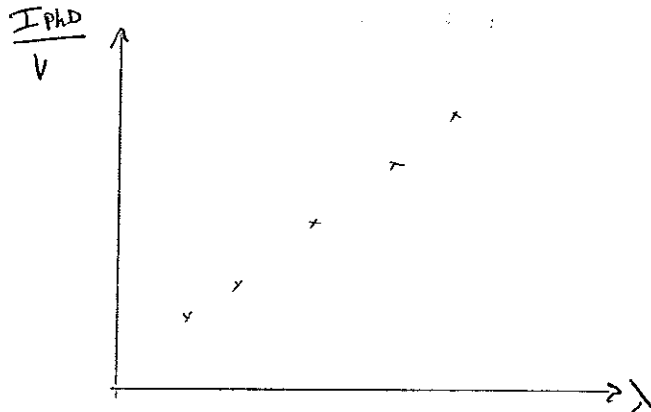
III Réponse spectrale

Est ce que pour un même flux avec un laser vert ou rouge, la PhD me renvoie la même intensité? Non car elle a une réponse spectrale non plate.*

On l'étudie à l'aide d'une thermopile qui, par principe, a une réponse spectrale plate.

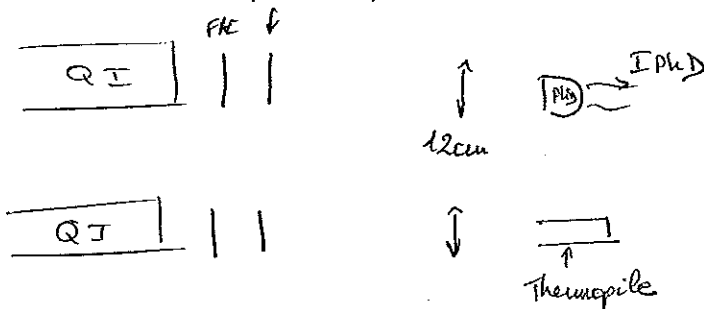


car elle repose sur le type des semi-conducteurs, or le coefficient d'absorption est d'autant + qd que l'NRJ du photon est qd → les paires e⁻-trou des bandes λ ~~trouvent~~ de se créer trop tôt de la zone P, et donc trop loin de la ZCE pour se faire accélérer.



pts pr $\lambda =$
 408
 436
 549
 581
 634 nm

Courbe obtenue avec filtre interférentiel



Rem: Faire d'abord toutes les mesures avec la PhD puis TOUT EN GARDANT LE PIED AU MÊME ENDROIT faire les mesures avec la thermopile.

Rem: Ne pas oublier d'enlever le polar / analyseur, ils ne servent à rien ici.

→ On prend 1 pt.

On voit que la PhD absorbe le + ds le rouge, ce qui concorde avec notice du constructeur + avec explication avec le coeff d'absorption.

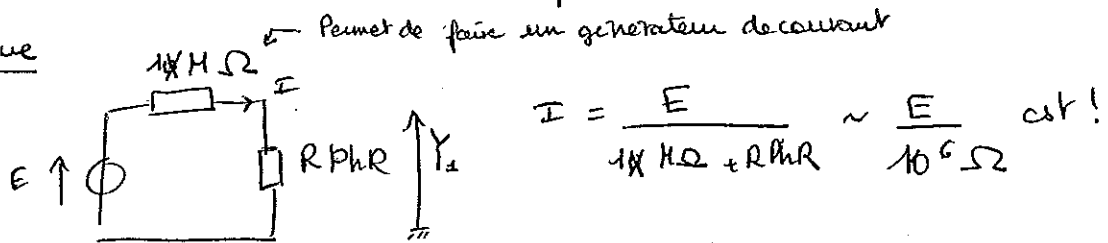
⚠ Certaines PhD absorbent + dans le vert car zone P a une épaisseur adéquate pour.

IV Réponse temporelle

Photorecepteur choisi: la Photorésistance = s.c. intrinsèque

L'arrivée d'1 hv provoque la création d'une paire e⁻-trou, ce qui a pour effet de diminuer la résistance de la PhR lorsqu'elle est soumise à une ddp.

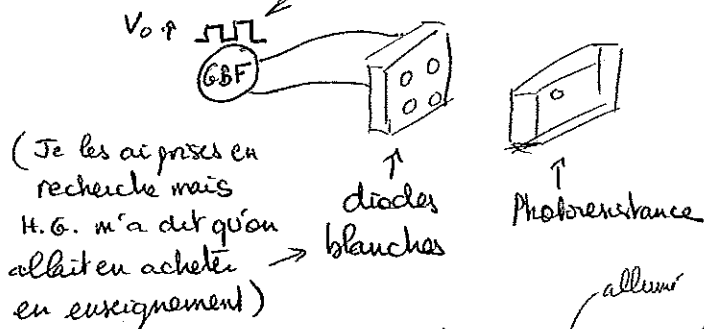
Montage électrique



Sur ~~l'oscilloscope~~, on acquiert Y_1 . Comme I est est, on a accès à R .

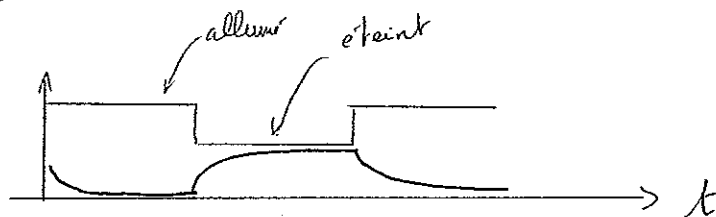
Montage optique

on voit 2 de l'oscillo, on acquiert ce créneau.



Rem: en dessous de $V_0 = 4V$, les diodes blanches ne s'allument pas.

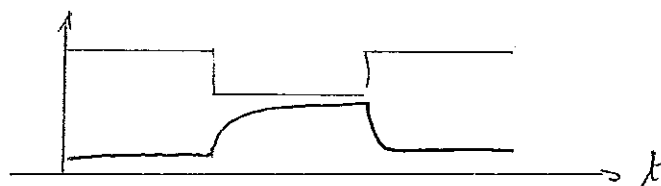
x V_0 faible



Rem:
Avec un laser, on n'observe que ce régime.

temps de réponse le m à la descente qu'à la montée

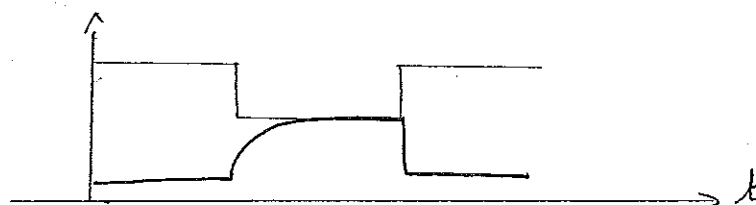
x V_0 moyen (ou $\nearrow \phi$)



allumé $\rightarrow$ éteint: toujours le m tps (corrèsp-d aux recombinaisons)

éteint $\rightarrow$ allumé: tps + faible

x V_0 grand



allumé $\rightarrow$ éteint: tps le m tps

éteint $\rightarrow$ allumé: tps encore + faible.

→ Phénomène non linéaire qui fait que le temps de réponse n'est pas le même à la montée et à la descente.

On prend le + gd des 2 : $t_R =$

(cette manip est recyclable d'après H.G. dans HP 31 Instabilités et phénomènes non linéaires)

Rem : le montage p. 72 du Sextant ne marche pas. L'A0 sature en courant. On a l'impression de voir un t_R + faible mais en fait c'est l'A0 qui sature.

CCl : En conclusion, on a vu ~~des~~ ≠ caractéristiques des photorécepteurs. Selon ce qu'on veut en faire, on choisira un photorécepteur plutôt qu'un autre. Par exemple la photoresistance a un mvs tps de réponse. Néanmoins, elle trouve Ht de m des applications : - le détecteur de flamme
- le lampadaire.

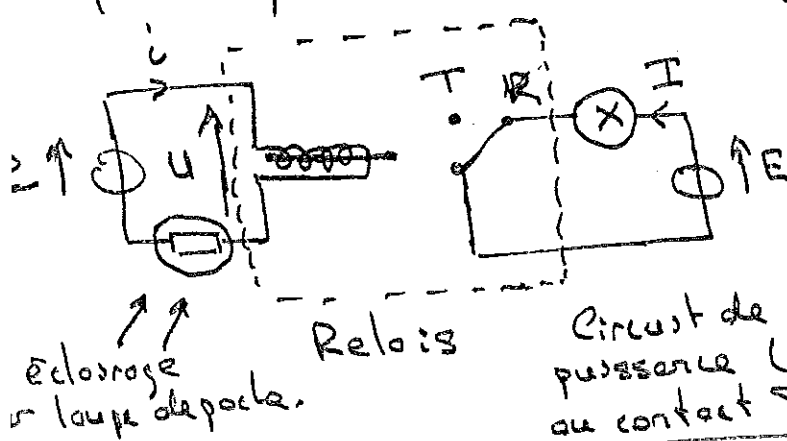
Montages de conclusion.

Il s'agit en fait du même montage, utilisé avec deux positions différentes du relais ; qui est un exemple d'utilisation de la photorésistance (ou LDR [Light Dependent Resistor]).

Montage "allumeur crépusculaire"

Correspond à une utilisation pour l'éclairage public :

- le circuit de puissance est ouvert (pas de courant) lorsque la photorésistance est éclairée (par le jour)
- le circuit de puissance est fermé (lampe sous tension) lorsque la photorésistance n'est pas éclairée (nuit).



T: contact travail ($U = 12V$, $i \geq 20mA$)
R: contact repos ($U \leq 12V$)

Essai préliminaire: Éclairée par la lampe de poche, la photorésistance a une résistance de 400Ω , pour que le relais passe en position T on a

$$\frac{E - U}{R} \geq 20mA \Rightarrow E \geq 20V$$

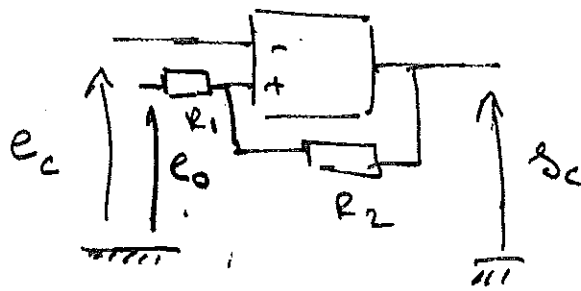
non éclairée, la lampe de poche a une résistance de plus $10k\Omega$ (dépend du type d'obscurité), pour que le relais soit en position R on a

$$i \leq 20mA \Rightarrow E \leq 200V$$

La tension E gère le niveau de déclenchement du relais lors de l'obscurité à laquelle l'éclairage va se déclencher.

Afin que, à l'aube ou au crépuscule, le passage d'un nuage ne suffise pas à refaire obscurcir le relais

on peut rajouter dans le circuit de commande un comparateur à hystérésis (Bouclage "+" $\Rightarrow$ régime saturé)



Situation de départ:

$$s_c = U_{sat}$$

$$e_c + \frac{R_1}{R_1 + R_2} (U_{sat} - e_c) > e_c$$

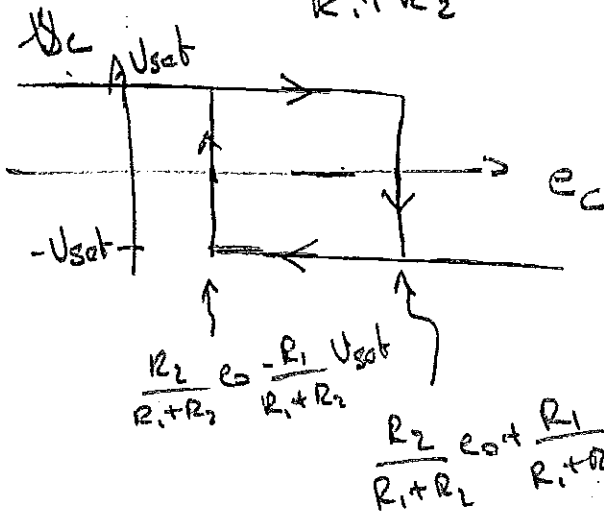
$$e_c < \frac{R_2}{R_1 + R_2} e_c + \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{sat}$$

Il y a basculement de $s_c = U_{sat}$ à $s_c = -U_{sat}$ lorsque

$$e_c = \frac{R_2}{R_1 + R_2} e_c + \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{sat} \quad (\text{sens } e_c \text{ croissant})$$

Déterminons la condition pour le basculement de $s_c = -U_{sat}$ à $s_c = U_{sat}$ (sens e_c décroissant) est

$$e_c = e_c + \frac{R_1}{R_1 + R_2} (-U_{sat} + e_c) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} e_c - \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{sat}$$



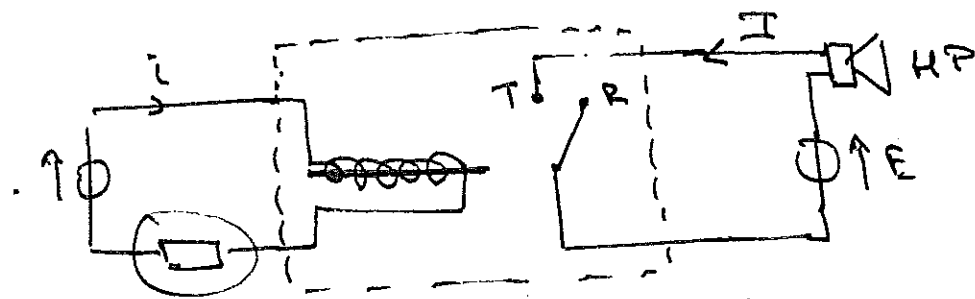
Ainsi, après un basculement dans un sens donné de variation de e_c , il faut forcer vers e_c dans le sens opposé d'une quantité plus importante pour revenir à l'état initial.

Il y a une plage de valeurs de e_c pour laquelle le système reste dans son état, quel qu'il soit.

Montage "détecteur de flamme"

Correspond à une utilisation pour la détection d'incendie

- le circuit de puissance est ouvert lorsque la photorésistance est dans l'obscurité (pas de flamme)
- le circuit de puissance est fermé (haut-parleurs de l'alarme à incendie sous tension) lorsque la photorésistance est éclairee (présence de flamme).

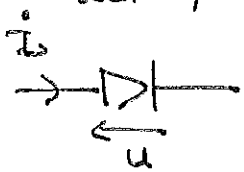


Circuit de puissance
(connecté au contact T)

Questions des correcteurs

Quelle est la différence entre une photodiode et une cellule photovoltaïque ?

Il s'agit en fait des mêmes composants physiques (création 2 paires électron-trou dans un semi-conducteur par énergie lumineuse : une paire est créée par un photon d'énergie supérieure à E_{gall})



Convention récepteur (u et i sont dans des sens opposés) : $P = ui > 0$ dans le cas où le dipôle reçoit une énergie positive



Convention générateur (u et i sont dans le même sens) : $P = ui > 0$ dans le cas où le dipôle fournit une énergie positive.

Convention récepteur :

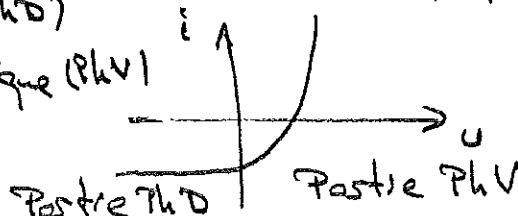
Fonctionnement générateur

Fonctionnement récepteur

Fonctionnement récepteur

Fonctionnement générateur

Photodiode (PhD)
Cellule photovoltaïque (PhV)

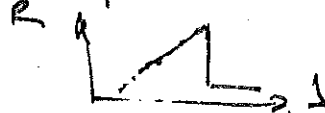


Quels sont d'autres récepteurs possibles ainsi que leur temps de réponse ?

- Photodiode (1ns)
- Oeil (10ms)
- Photoresistance (20ms)
- Photomultiplicateur
- Capteurs CCD
- Détecteurs thermique ($Z = \frac{C}{G} = \frac{\text{conductivité thermique}}{\text{conductance}}$)
 R_q : la sensibilité augmente lorsque la conductance diminue.
- * Thermopile (1s)
- * Détecteurs pyroélectrique. ($dQ = \pi dT \times I = S \frac{dQ}{dT}$)
 $\uparrow$ charge surfacique $\uparrow$ température $\uparrow$ coefficient pyroélectrique

Quelles sont les deux grandes familles de récepteurs ?

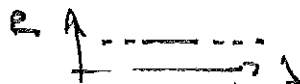
Détecteurs photonique:



← réponse spectrale $R(\lambda)$

L'absorption d'un photon dans un matériau fait passer un électron du matériau dans un état excité (effet photoélectrique)

Détecteurs thermique:



L'absorption du rayonnement se traduit par une élévation de température du matériau, laquelle est ensuite convertie en signal électrique.

Comment justifier l'ordonnée à l'origine de la courbe $I_s(\Phi)$ (= intensité de polarisation inverse de la photodiode exposée à un flux Φ) ?

L'obscurité n'est pas parfaite dans l'optique ; rayonnement du corps noir ...

Le courant d'obscurité (nA) ne peut être suffisant (il doit être énoncé !) pour justifier le chiffre obtenu.

Couvent expliquer simplement les deux temps de réponse
(à la montée et à la descente) de la photo-résistance?

En mode "faible flux", lorsqu'il y a peu d'éclairement, peu
de porteurs sont formés et la recombinaison se fait normalement.

En revanche en "fort flux", le phénomène de saturation
augmente le temps de rise (c'est-à-dire ralentit la recombinaison).

Ce phénomène fait qu'à l'allumage (seul temps de réponse
influencé par le flux envoyé) le temps de réponse est
autant plus petit que le flux est grand.

A l'extinction, un seul temps de réponse est observé: ne
dépend que très faiblement du flux.

3: Pour observer que le temps de réponse n'est pas dû
à un effet électronique, on fera varier la valeur d'une
résistance et observera que rien ne change (du temps de réponse!).

Parfois faut-il faire attention à la tension de polarisation
appliquée!

Afin d'éviter le claquage de la jonction PN par phénomène
d'avalanche (en pratique $V_f < 5-10V$)

Ideée :

Les manipulations associées à ce montage sont classiques,
est bon de présenter un "petit plus" si possible quantitatif
(du type modulation avec un photo-récepteur).

Sinon on peut problématiser en cherchant à étudier un
montage donné ou début.