

# MP12 - Photorécepteurs

Clément (de la Salle et Colléaux)

3 avril 2020

Niveau : L3

## Bibliographie

✍ Jolidon

Il carryyyyyyyyyyy

## Prérequis

➤

## Expériences

- ☞ Linéarité d'une photodiode
- ☞ Temps de réponse d'une photorésistance
- ☞ Taille d'un capteur CCD

## Table des matières

Table des matières	1
<b>1 Étude d'une photodiode</b>	<b>2</b>
1.1 Tracer des caractéristiques (qualitatif) . . . . .	2
1.2 Conditionnement de la diode (préparation) . . . . .	4
1.3 Linéarité de la photodiode . . . . .	4
<b>2 Temps de réponse d'une photorésistance</b>	<b>5</b>
<b>3 Taille d'un capteur CCD</b>	<b>7</b>

# Introduction

## But

Étudier trois caractéristiques de trois photorécepteurs différents

## NB

- Si on veut étudier la photorésistance, c'est mieux de faire son temps de réponse parce qu'elle n'est absolument pas linéaire et que son étude spectrale est ultra bordélique
- D'ailleurs, on n'a pas mis d'étude spectrale parce que fuck la thermopile...

## 1 Étude d'une photodiode

### But

Montrer que le courant délivré par la photodiode est bien proportionnel (ou du moins affine) au flux lumineux.

### 1.1 Tracer des caractéristiques (qualitatif)

#### Principe

Une photodiode est une jonction PN de semi-conducteurs dopés. Lorsqu'un photon arrive dans la zone de déplétion, une paire d'électron-trou est créée. Ces deux particules sont séparées sous l'effet du champ électrique présent dans la zone de déplétion et donc on observe l'apparition d'un **photocourant**. La caractéristique courant-tension de la diode est alors shiftée vers le bas, la diode présente donc un courant négatif même en régime bloqué ( $U < 0$ )

Commencer par monter la photodiode dans un circuit à résistance de charge (on peut conjuguer un trou devant la QI avec la photodiode à l'aide d'une lentille aussi) :

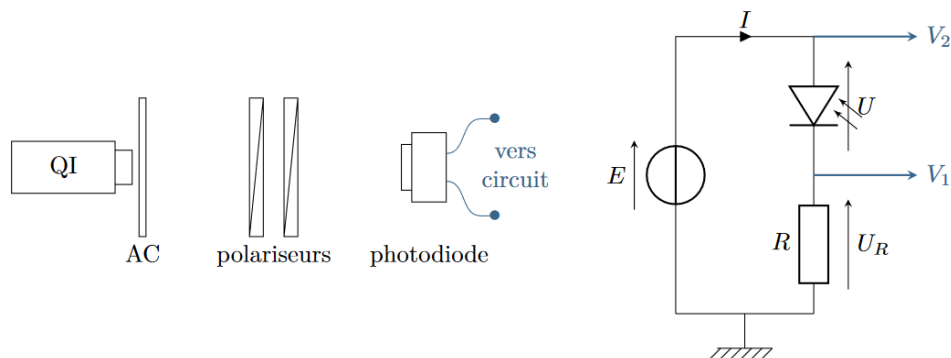


FIGURE 1.1 – Montage pour l'étude de la photodiode

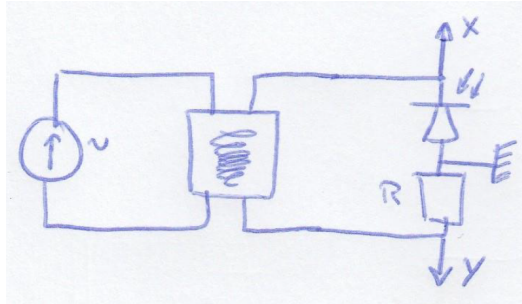


FIGURE 1.2 – Utilisation d'un transformateur d'isolement

Le montage ci-dessus propose de lire les valeurs  $V_1$  et  $V_2$  au Voltmètre pour connaître la polarisation de la diode... C'est évidemment ce genre d'appareil qu'on va utiliser pour la suite car pour un capteur c'est juste la lecture d'un chiffre qui nous donne le renseignement voulu.

Mais dans un premier temps, on peut (si y a le temps) présenter au jury le réseaux de caractéristiques à l'oscillo. Cela nécessite de déplacer la masse entre la diode et la résistance. On peut utiliser :

- Un transformateur d'isolement (cf. schéma)
- Un GBF à masse flottante
- Une sonde pour l'oscillo

Le point de fonctionnement est alors déterminé par l'intersection de la caractéristique de la diode et de la droite la résistance :

$$I = I_{diode}(U; \phi) = \frac{E - U}{R}$$

**Manip' : Tracer du réseau de caractéristique**

Donc en faisant varier sinusoïdalement  $E$ , on peut tracer à l'oscillo (mode XY) la caractéristique  $I_{diode}(U; \phi)$ . Limite on peut changer l'intensité vite fait pour bien vérifier que tout est shifté vers le bas quand  $\phi$  augmente.

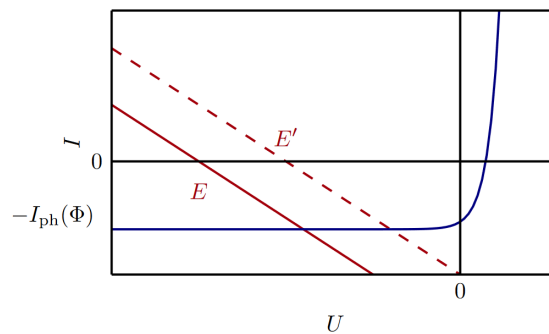


FIGURE 1.3 – Détermination du point de fonctionnement

On comprend ainsi que le point de fonctionnement doit se situer dans la zone  $I < 0, U < 0$  afin comme le courant corresponde au photocourant uniquement.

Après cette visualisation, on peut débrancher l'oscillo et placer un voltmètre pour mesurer  $U_R$ .

## 1.2 Conditionnement de la diode (préparation)

Comme on le voit sur la FIGURE 1.3, on doit choisir  $R$  comme meilleur compromis :

- D'un côté, il faut que  $R$  soit le plus grand possible, pour que la valeur de  $U_R = RI$  mesurée soit la plus significative.
- D'autre part, si  $R$  est trop grand, on voit que le point de fonctionnement sort de la zone  $U < 0$

Pour ça fixer  $E = 10$  V par exemple... Une fois que le conditionnement a été fait, ne plus jamais toucher aux valeurs !

## 1.3 Linéarité de la photodiode

C'est ça la vraie expérience ! Le but est de vérifier qu'on a bien

$$I = \Gamma\phi + I_0$$

Or on n'a pas accès directement à  $\phi$  le flux lumineux... On le connaît indirectement avec la loi de MALUS

$$\phi \propto \cos^2 \theta$$

Où  $\theta$  est l'angle entre les deux polariseurs. On peut donc écrire que :

$$I = \Gamma' \cos^2 \theta + I_0$$

### Expérience : Linéarité de la photodiode

➤ Jolidon p.145

⊖ 10 min

Mesurer  $R$  à l'ohmmètre afin de convertir  $U_R$  mesuré en un courant  $I$ . Pour chaque angle, relever en  $\pm\theta$  et choisir :

$$\bar{U}_R = \frac{U_R(\theta) + U_R(-\theta)}{2}$$

Cela permet d'éviter une erreur systématique sur la détermination de l'origine des angles...

Faire la régression et retrouver  $\Gamma'$  et  $I_0$ ... Attention, bien faire  $I = I(\cos^2 \theta)$  et pas  $U_R = U_R(\cos^2 \theta)$  !

### Discussion

- Pourquoi faire un fit affine et pas linéaire gnagnagna ? Pour deux raisons :
  - Il fait jamais vraiment noir
  - Même s'il faisait noir, il existe un courant de fuite de la photodiode (mais bon normalement c'est bien négligeable...)
- On définit la sensibilité comme

$$s = \frac{dI}{d\phi}$$

Donc ici, il s'agit du coefficient  $\Gamma$  et non  $\Gamma'$ ... On ne peut à priori pas y remonter !

- On utilise plutôt un montage à résistance de charge plutôt qu'un montage à amplificateur opérationnel (cf. schéma) car il est plus simple d'exploiter le réseau de caractéristique avec le premier... Cependant l'avantage du deuxième repose dans le fait que comme les courants de polarisation de l'amplificateur opérationnel sont négligeables devant le photocourant, le convertisseur courant-tension a une impédance d'entrée nulle, et ce montage permet de s'affranchir de l'impédance d'entrée de l'appareil mesurant  $U_R$  (ici le Voltmètre). Disons que le montage à ampli-op est plus facile à réaliser mais est moins pédagogique et son utilisation nuirait à la compréhension du propos.

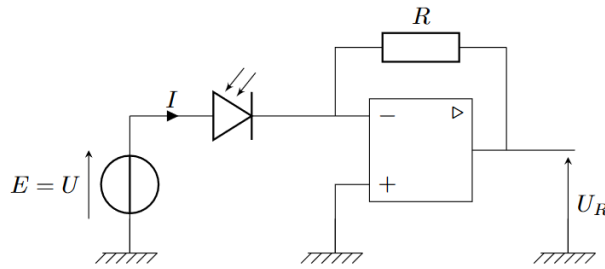


FIGURE 1.4 – Schéma du montage à amplificateur opérationnel

## 2 Temps de réponse d'une photorésistance

⚡ *Jolidon, p.165* ⚡ *Sextant, p.69*

La réponse dynamique d'un capteur est caractérisée par le (ou les) temps de réponse du capteur, donc ici de la photodiode par exemple.

Mesurer un temps de réponse nécessite de soumettre le photorécepteur à un brusque saut d'éclairement entre deux valeurs (saut aussi brusque que possible nous y reviendrons). Il s'agit alors de mesurer le temps nécessaire au photo récepteur pour que la grandeur photosensible atteigne une fraction définie de sa valeur asymptotique. Cette fraction est de la pure convention, nous mesurerons donc des temps de réponse à 90 %, ie quand la grandeur aura atteint 90 % du saut entre ses valeurs initiale finale. Il est bien évident que des temps de réponse mesurés à 90 ou 80 % seront différents mais seront (normalement) du même ordre de grandeur.

On se propose dans cette partie de comparer les temps de réponse de la photodiode déjà étudiée et d'un autre phoorécepteur que l'on détaillera plus tard, une photorésistance.

Il convient d'abord de créer un éclaircissement dont l'intensité varie de manière discontinue comme un créneau. Dans la collection, 3 systèmes permettent ceci :

- Une diode LASER commandée en signal TTL (Transistor-Transistor LOic) créé par un GBF (mais on ne connaît pas précisément le temps de réponse de la didoe)
- Un hacheur optique qui module le flux lumineux d'un LASER par rotation de pales opaques (mais ne permet pas d'avoir une vraie discontinuité du faisceau)
- Un stroboscope qui crée une lumière hachée (mais dont on ignore la vraie variation temporelle)

On va préférer la diode LASER car même si on ne connaît pas son temps de montée précisément, on sait qu'il est de l'ordre de la nanoseconde. On donc faire l'hypothèse raisonnable que les temps de réponse qu'on va mesurer sont bien supérieurs et utiliser le LASER commandé en TTL.

### Discussion sur la source variable ⚡ *Jolidon, p.168*

Le profil temporel de l'éclairement doit être proche d'un profil de type créneau. En effet, pour que les mesures soient pertinentes il faut s'assurer que le temps de variation de la grandeur photosensible soit bien bien dû au photorécepteur lui-même et non pas à la source. Cas à éviter : si le temps caractéristique de variation d'éclairement (temps de montée de la dedio LASER) est bien plus grand que le temps de réponse du récepteur alors le temps mesuré sera dû à la source et on s'en tape de caractériser la source.

Avec une diode LASER de temps de montée de l'ordre de la nanoseconde on est bon.

Plusieurs expériences sont donc possibles :

### Expérience : Évolution du temps de réponse de la photodiode avec $R$

☞ Jolidon, p.172

☹ ?

- Bien régler la fréquence de la tension de commande TTL pour une bonne visibilité du signal sur l'oscillo : une fréquence de 10 kHz convient
- Brancher la photodiode dans un montage à résistance de charge avec  $R$  compris entre 5 à 40 k $\Omega$ . Prendre  $E_0 = -10$  V pour polariser la diode en inverse et regarder la tension  $U$  à l'oscillo (regarder  $U$  et  $I$  c'est pareil pour le temps de réponse car  $R$  c'est une impédance réelle) On trouve des temps de l'ordre de la dizaine de  $\mu$ s donc largement grand devant la ns du LASER
- Tracer  $\tau_m$  et  $\tau_d$  les temps de montée et de descente en fonction de  $R$  et modéliser ça part une droite de pente  $\alpha_i$  homogène à une capacité (la somme des capacités de la photodiode  $\sim 100$  pF, du coax  $\sim 110$  pF et de l'oscillo = 12 pF), le temps de réponse est donc un **temps de réponse global du système**. Le Jolidon trouve  $\alpha_m = 443$  pF et  $\alpha_d = 462$  pF.
- Diminuer  $R$  améliore donc la rapidité du récepteur mais il faut pas que ça soit au détriment d'autres caractéristiques..

### Montage électrique de la photorésistance ☞ Jolidon, p.176

Les variations de l'éclairement se traduisent par des variations de conductivité qu'on doit convertir en variations temporelles de tension. Comme des variations de conductivités sont équivalentes à des variations de résistivité et donc de résistance, il faut fixer la tension aux bornes de la photorésistance et mesurer le courant. On utilise pour ça un montage inverseur à AO avec  $E_0 = 5$  V et  $R_2 = 1$  k $\Omega$ . Dans cette situation la conductance vaut  $1/R_1 = -\frac{1}{R_2 E_0} u$  et ainsi les variations de  $U$  sont pertinentes.

### Expérience : Comparaison photodiode / photorésistance

☞ Jolidon, p.176

☹ ?

- Choisir soit un LASER/TTL soit un hacheur de vitesse angulaire 20 rad/s et avec le faisceau à 5 cm de l'axe.
- Mesurer les  $\tau_i$  sur les variations de  $U$  à l'oscillo
- Changer de récepteur et mesurer ces mêmes  $\tau_i$  pour la photodiode (c'est supposé être bien plus faible). On peut même mettre les deux en même temps avec le stroboscope et superposer les signaux.

### Une photorésistance ?

Une photorésistance est un photorécepteur qui exploite les caractéristiques d'un matériau sme-conducteur : sous l'effet d'un rayonnement lumineux la conductivité d'un SC augmente. Ceci est dû à la création d'une paire électron-trou.

### 3 Taille d'un capteur CCD

#### But

Déterminer les caractéristiques d'une barette CCD, en particulier la taille de ses pixels.

☞ Pas de Bouquin...

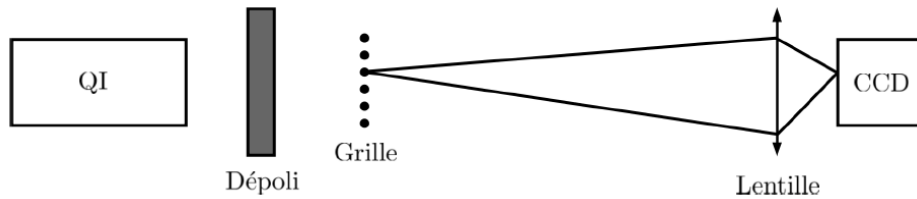


FIGURE 3.1 – Montage utilisé pour mesurer la taille d'un pixel

- On visualise le signal de la CCD à l'oscillo.
- On doit redéterminer  $f'$  avec la méthode de BESSEL : en notant  $L > 4f'$  la distance objet-écran, il existe deux positions de lentilles, distantes de  $\Delta x$ , pour lesquelles l'image est nette :

$$f' = \frac{L^2 - \Delta x^2}{4L}$$

- On utilise une grille parce que c'est plus simple de voir les bords qu'une fente paraît-il... Dans ce cas il faut que, comme pour une fente, l'image sur la barette de contiennent qu'une zone claire, le reste étant sombre.
- Il est difficile de vérifier si l'image est bien pile sur la barette... Dans ce cas, déplacer le capteur jusqu'à trouver le maximum d'intensité à l'oscillo

#### Principe

La barette fonctionne ainsi : les pixels s'activent à tour de rôle pendant une très faible durée (de l'ordre de la nano-seconde)  $\delta t$ . L'intensité délivrée correspond donc pendant ce temps à l'intensité reçue par le pixel considéré. La barette parcourt donc tous ses pixels à une fréquence de 1 Mhz !

#### Expérience : Mesure de la taille d'un pixel

☞ Pas de livre :'(

⊖ 10 min

Sur l'oscillo, on trouve un signal en petit créneaux proportionnel à l'intensité lumineuse. Chaque petite marche de temps  $\delta t$  correspond à un pixel. On trouve aussi le temps  $\Delta t$  correspondant alors à la zone claire (forte intensité comparée aux autres pixels) et donc l'image de la fente. Le nombre de pixels éclairés par la fente est alors :

$$N = \frac{\Delta t}{\delta t}$$

Alors il suffit de connaître la taille de l'image  $A'B'$  pour remonter à la taille d'un pixel  $a$  :

$$\delta a = \frac{A'B'}{N}$$

#### Détermination de $A'B'$

Pour ce faire, on peut :

- Soit mesurer la taille de l'image en remplaçant la caméra par un écran avec du papier millimétré... Pas ouf vu qu'on n'est pas sûr de le remettre pile au bon endroit.
- Soit la déduire de la taille de l'objet avec le grandissement de la lentille :

$$A'B' = AB \frac{OA'}{OA} = AB \frac{f'}{OA - f'}$$

Dans ce cas, il faut avoir mesuré bien proprement toutes les longueurs mises en jeu.

Notamment pour AB, la taille de la fente, on aura un résultat plus précis avec une grille dont on connaît le pas, plutôt qu'avec une fente random dont il faudrait mesurer la taille...

### Idée

On s'est demandé pourquoi se faire chier avec une image et tout et tout... Finalement à l'oscillo, on doit être capable de trouver la période  $T$  correspondant au balayage de toute la barette. Donc si on connaît la taille  $d$  de la barette, on a simplement

$$a = d \div \underbrace{\frac{T}{\delta t}}_{\text{Nombre de pixels de la barette}}$$

On peut alors remonter au nombre de pixel de la barette et le comparer à la valeur donnée.

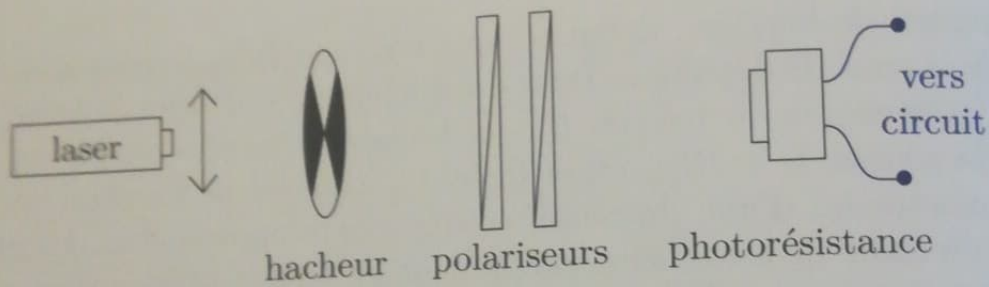
### Valeurs attendues

Caliens indique que la barette possède 2048 pixels de  $14 \mu\text{m}$  chacun. La fréquence de balayage de toute la barette est  $f_0 \sim 1 \text{ Mhz}$ . C'est-à-dire que le temps d'activité d'un pixel est :

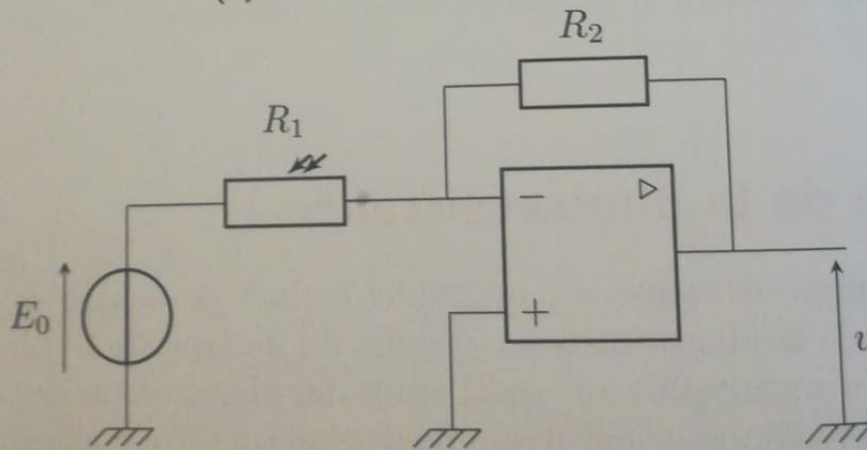
$$\delta t = \frac{1}{2048 * f_0} \sim 1 \text{ ns}$$

Au passage, à l'heure où j'écris ça, on n'a pas encore vérifié les valeurs, mais ça m'étonne  $10^6$  images par seconde...





(a) Schéma de l'expérience.



(b) Schéma électrique.

6 - Dispositif d'étude de la réponse dynamique d'une photorésistance. (a) Le mode laser élargie par une lentille de courte focale éclaire une photorésistance dans un montage inverseur à AO. Le flux qu'elle émet est modulé périodiquement par le hacheur et contrôlé par un doublet de polariseurs. (b) Le montage est alimenté par une tension continue  $E_0$ , et la tension  $u$  de sortie est mesurée.

Montage électronique