

—  $E_{gap} \simeq 1.31 \text{ eV}$

## 4 Etude du temps de réponse

Je n'ai pas eu le temps de faire cette partie lors de ma présentation, mais j'ai eu un problème avec la deuxième manip qui m'a retardée. Je pense qu'elle est présentable si tout se passe bien avant et si vous choisissez cette ordre là. En tout cas une chose est sûre, il y a un choix à faire sur l'ordre des manip parce que la réponse spectrale et le temps de réponse sont les caractéristiques primordiales de ces récepteurs, c'est celles auxquelles on fait attention lorsqu'on veut les utiliser ensuite. Voyez avec laquelle des deux vous êtes le plus à l'aise pour la mettre en premier.

### Liste du matériel :

- GBF
- Multimètre
- Oscilloscope
- LED (couleur choisie = rouge), photodiode PIN 10
- Plaquette d'électronique avec le montage transimpédance
- Sonde d'oscilloscope (à accorder)

Pour l'étude du temps de réponse, il vaut mieux rester sur le montage à résistance de charge (switch vers le bas de l'interrupteur sur la plaquette du département). Tout est bien décrit dans le polycopié de JBD que j'ajoute à la suite de cette partie et dans le compte rendu de Louis Heitz sur les effets capacitifs (2020). Attention, le temps de réponse d'un photorécepteur dépend du circuit dans lequel ce composant est inséré. En pratique on préfère utiliser un montage transimpédance pour avoir un temps de réponse plus court mais ici un circuit transimpédance avec un ALI rendrait plus complexe la fonction de transfert qui ne serait plus un premier ordre.

On utilise la plaquette du département prévu à cet effet. On envoie une tension continue sur la photodiode (quelques volts, potentiomètre V0) avec une légère modulation (signal créneau à 100 mV environ) à 500 Hz environ. On choisit une fréquence suffisamment faible pour que le régime permanent soit atteint et suffisamment grande pour la rapidité de la mesure. Il faut placer une résistance (200  $\Omega$ ) en série de la LED pour la protéger. On place une forte résistance en série avec la photodiode pour convertir le courant produit en une tension importante (on a pris  $R_m = 38.88 \text{ k}\Omega$ ). On place également un voltmètre aux bornes de la photodiode pour relever sa tension (on le retire lors de la mesure du temps de montée, ça perturbe le signal). Puis on mesure le temps de montée à 63% de la tension aux bornes de la résistance pour en déduire  $\tau = RmC$  et donc C, en faisant varier la tension de polarisation de la photodiode.

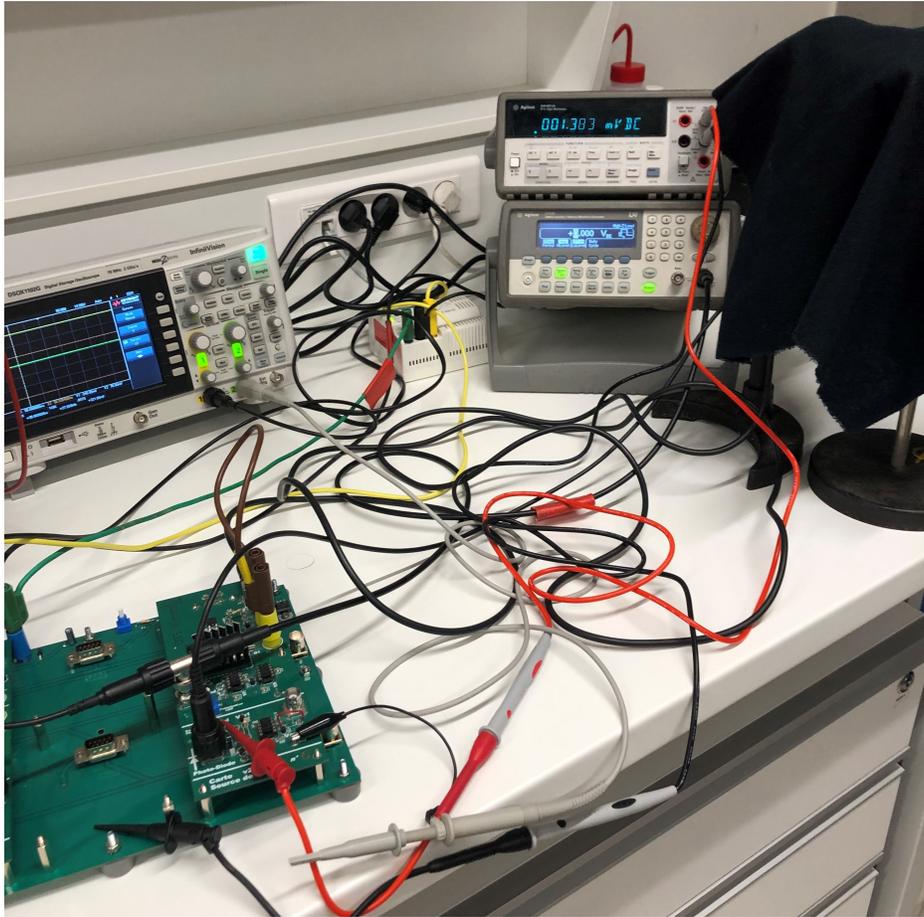


FIGURE 15 – Etude du temps de réponse - Montage ou sac de noeuds...

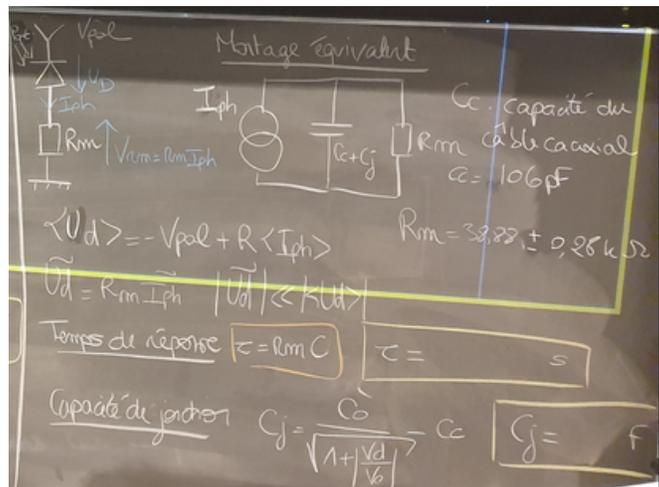


FIGURE 16 – Etude du temps de réponse - Principe

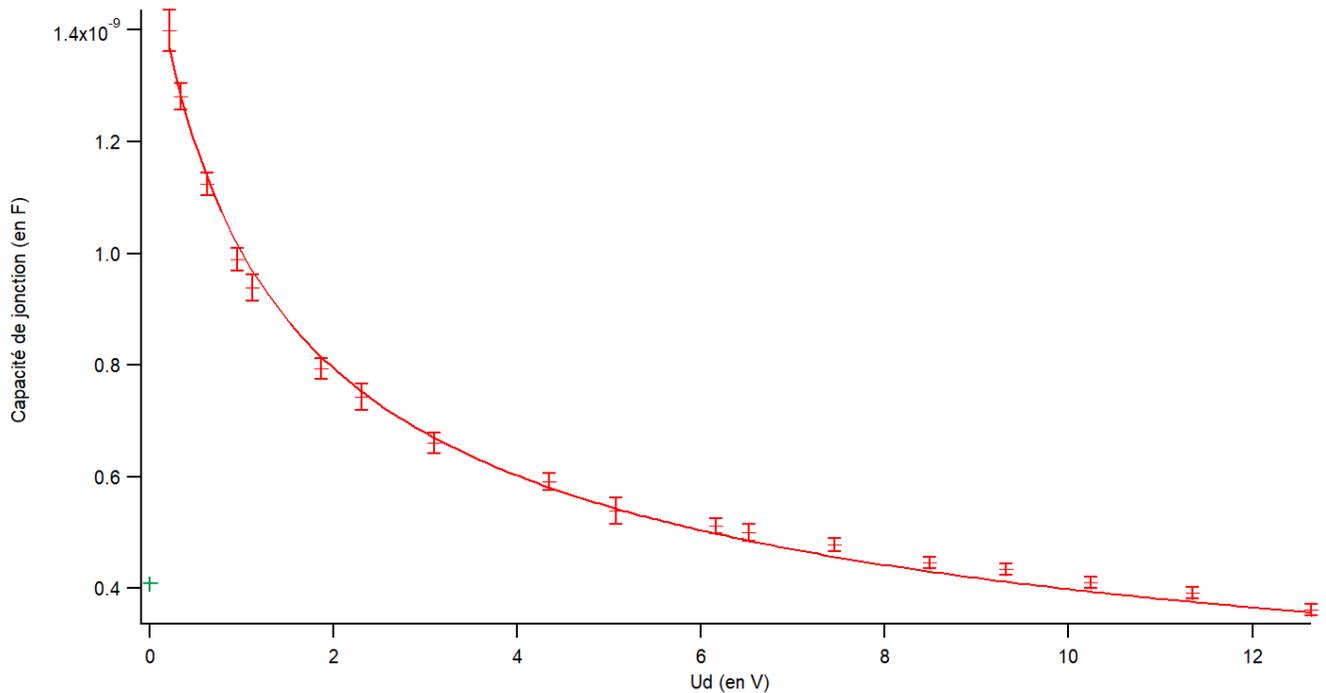


FIGURE 17 – Etude du temps de réponse - Graphe obtenu

Quelques conseils supplémentaires de choses à ne pas oublier :

- Penser à utiliser une sonde différentielle accordée à l'oscilloscope ou utiliser des montages suiveurs pour s'affranchir de la capacité du câble coaxial. Le cas échéant, mesurer la capacité du câble coaxial au RLC mètre pour la soustraire à la mesure.

- Attention à bien retirer le voltmètre à chaque mesure de temps de montée

- Couvrir avec un tissu noir l'ensemble LED+Photodiode

- Préléver  $U_d$  qui est la tension aux bornes de la photodiode et non  $V_{pol}$

## Etude de la capacité de jonction d'une photodiode

- Travail expérimental et rédaction du document :

Jean-Baptiste Desmoulin (P.R.A.G.)  
mail : [desmouli@physique.ens-cachan.fr](mailto:desmouli@physique.ens-cachan.fr)

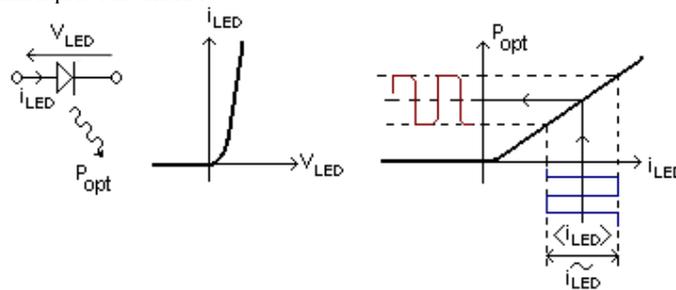
L'expérience proposée consiste à envoyer un flux lumineux qui varie en créneau sur une photodiode afin de déterminer le temps de réponse de cette dernière. De ce temps de réponse, nous déduirons sa capacité de jonction. Nous nous intéresserons, en particulier, à l'évolution de cette capacité avec la tension de polarisation inverse appliquée sur la photodiode

### I. Principe de l'expérience.

L'expérience comporte un circuit émetteur de flux lumineux et un circuit récepteur. Les deux circuits sont disponibles sur une même maquette (ENSC349). La diode électroluminescente employée est une diode rouge. La photodiode caractérisée est de type PIN10. Elle présente une surface sensible de 1 cm<sup>2</sup> environ et comporte une capacité de jonction importante, de l'ordre de la centaine de pF. Elle fonctionne dans le visible.

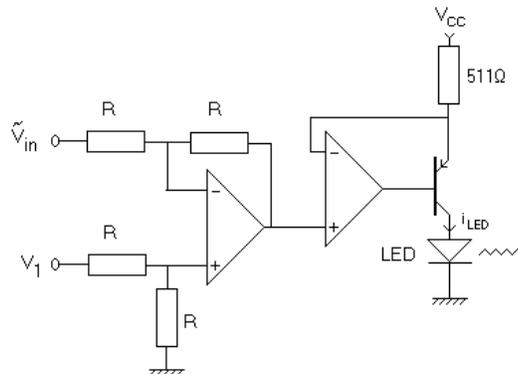
- *Le circuit chargé de créer le flux lumineux de test.*

Le flux lumineux en créneau sera obtenu à partir d'une diode électroluminescente dans laquelle on injectera un courant en forme de créneau. En effet, en statique, le comportement d'une diode électroluminescente peut être représenté par les caractéristiques suivantes :



Dès que le courant injecté dans le composant dépasse une valeur donnée, la puissance optique émise va évoluer de façon affine par rapport au courant. Pour obtenir un flux lumineux évoluant temporellement en forme de créneau, il va falloir que le courant présente une composante continue afin d'être polarisé dans la zone affine. Sa partie variable donnera l'allure de la variation de puissance optique.

Le circuit électronique utilisé pour créer le flux lumineux d'allure voulue présente la structure suivante :



Il permet d'obtenir un courant dans la diode électroluminescente vérifiant :

$$i_{LED} = \frac{V_{cc} - (V_1 - \tilde{V}_{in})}{R_o} = \langle i_{LED} \rangle + \tilde{i}_{LED}$$

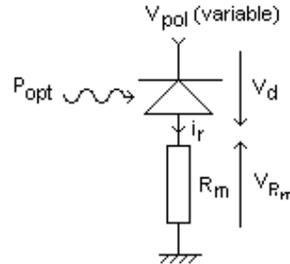
La tension  $V_1$  est continue et réglable avec un potentiomètre situé sur la maquette. La tension  $V_{in}$  est une tension variable en créneau, sans composante continue, appliquée par un GBF.  $R_o$  est une résistance de  $511\Omega$ .

Sur le plan dynamique, on fera en sorte de rendre le temps de réponse de la photodiode le plus long possible, afin que le temps de réponse de la diode électroluminescente soit négligeable devant ce dernier et que l'on puisse considérer les créneaux de flux lumineux obtenus comme parfaits, vis-à-vis de la photodiode.

- *Le circuit chargé de détecter le flux lumineux : photodiode et conversion tension/courant.*

La photodiode va convertir la puissance optique reçue en un courant pratiquement proportionnel à cette puissance. Ce courant sera ensuite converti en tension pour être directement visualisable sur un oscilloscope.

Le circuit employé se présente sous la forme suivante :



La tension de polarisation  $V_{pol}$  est une tension positive réglable, qui permet d'assurer une polarisation en inverse de la photodiode. La résistance  $R_m$  est une résistance de précision destinée à convertir le courant de sortie de la photodiode en une tension observable.

Sous l'action d'un flux lumineux variable autour d'une valeur moyenne, le courant émis par la photodiode présentera également une valeur moyenne et une variation. Il en sera donc de même pour la tension aux bornes de la résistance de mesure. Sachant que nous allons chercher à étudier l'évolution du temps de réponse de la photodiode en fonction de la tension aux bornes de cette dernière, il va falloir faire en sorte que cette tension soit à pratiquement continue. La tension  $V_d$  aux bornes de la photodiode est donnée par

$$V_d = -V_{pol} + V_{R_m}$$

Pour limiter l'ondulation sur  $V_d$ , il faudra limiter l'ondulation sur  $V_{R_m}$ . Pour ça, on fera en sorte que la valeur moyenne du flux lumineux soit grande devant sa variation. Ainsi, l'ondulation sur  $V_d$  sera négligeable et  $V_d$  pourra être assimilée à sa valeur moyenne.

Par ailleurs, la diode est reliée à la maquette par un câble BNC. Pour tenir compte de ce câble sur le comportement du circuit, il faudra penser à ajouter, en parallèle sur la photodiode, une capacité de  $100\text{ pF}$  par mètre de câble.

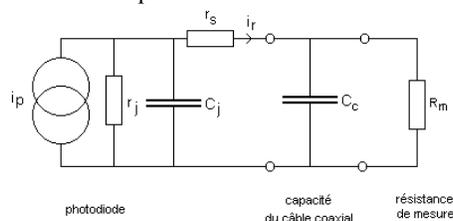
Pour comprendre le temps de réponse de ce circuit, on va le modéliser en régime de petits signaux.

$$\langle V_d \rangle + \tilde{V}_d = -\langle V_{pol} \rangle + \langle V_{R_m} \rangle + \tilde{V}_{R_m}$$

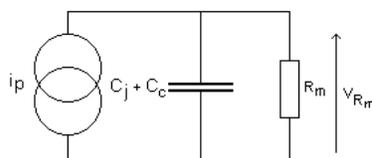
Si on ne conserve que les variations, on arrive à

$$\tilde{V}_d = \tilde{V}_{R_m}$$

Ce qui signifie qu'on se ramène au schéma équivalent suivant :



La résistance  $r_j$  est une résistance de fuite que l'on considérera comme infinie. La résistance  $r_s$  est une résistance de connectique que nous supposons très faible devant la résistance de mesure  $R_m$  qui vaut  $100\text{ k}\Omega$ . La capacité  $C_j$  est la capacité de jonction que nous voulons étudier. Compte tenu des simplifications faites, le système étudié se présente, en régime de petits signaux, sous la forme suivante :



On a donc

$$\tilde{i}_p = (C_j + C_c) \cdot \frac{d\tilde{V}_{R_m}}{dt} + \frac{\tilde{V}_{R_m}}{R_m}$$

Sachant que  $i_p$ , le photocourant est pratiquement proportionnel à la puissance optique reçue, la relation entre la puissance optique d'entrée et la tension de sortie est de la forme

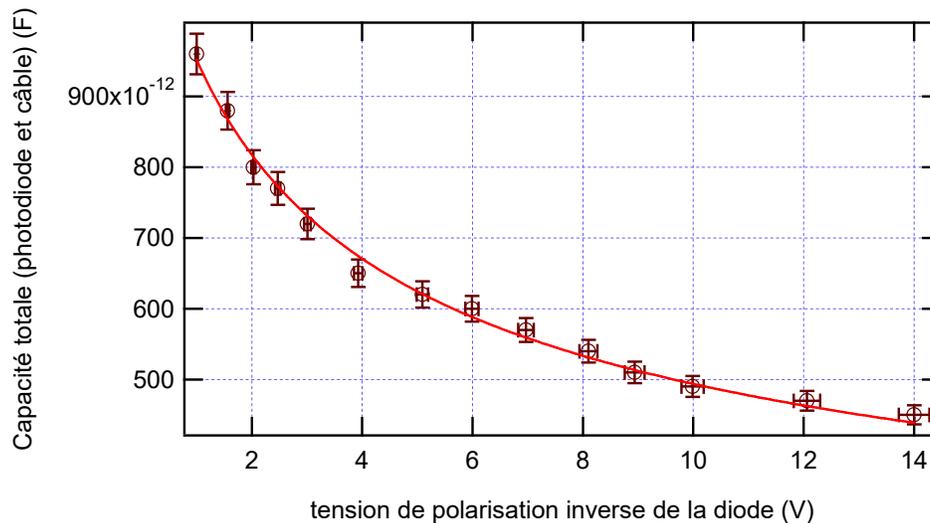
$$\frac{\tilde{V}_{R_m}}{\tilde{P}_{opt}}(p) = \frac{K}{1 + R_m \cdot (C_j + C_c) \cdot p}$$

En mesurant le temps réponse à 63% du système, connaissant  $R_m$ , on en déduit une capacité qui est la somme de la capacité de jonction et de la capacité rapportée par le câble coaxial.

Remarque : pour réaliser la conversion courant/tension, on aurait pu employer un circuit transconductance à amplificateur opérationnel, mais il s'agit en fait d'une fausse bonne idée. En effet, dans ce cas, on ne peut plus déduire la capacité de jonction du temps de réponse, car ce n'est plus la résistance  $R_m$  qui intervient dans le temps de réponse à 63% mais la résistance de connectique  $r_s$ , que nous ne connaissons pas.

## II. Résultats expérimentaux et discussion.

Expérimentalement, on mesure la tension aux bornes de la diode avec un voltmètre afin d'éviter les problèmes de masse. Le temps de réponse est mesuré à partir de la tension aux bornes de  $R_m$ , récupérée avec une sonde de tension d'oscilloscope afin d'éviter d'introduire une capacité de mesure trop importante en parallèle avec  $R_m$ . Compte tenu de la faiblesse de la variation de flux lumineux, le signal récupéré en sortie de la photodiode sera fortement perturbé, essentiellement par un signal à 50 Hz. Nous travaillerons à une fréquence voisine du kHz et nous moyennerons les traces sur lesquelles nous ferons nos mesures de temps de montée. Il faut noter que la prise de mesures est assez lente à cause du moyennage.



On fait un ajustement avec une fonction de la forme

$$C = C_c + \frac{C_o}{\sqrt{1 + |V_d|/V_o}}$$

Dans l'ajustement, on force  $C_c$  à 100 pF afin de prendre en compte la capacité du câble coaxial qui relie la photodiode au circuit. L'autre terme correspond à la capacité d'une jonction abrupte polarisée en inverse. On obtient, par l'ajustement,  $C_o = 1.11 \pm 0.03$  nF . et  $B = 1.45 \pm 0.10$  V.

Pour la photodiode, le constructeur donne une valeur de capacité de jonction comprise entre 300 et 400 pF sous 10V pour la photodiode PIN10. Expérimentalement, pour 10V, nous avons trouvé une capacité globale légèrement inférieure à 500 pF ce qui correspond, pour la seule capacité à un peu moins de 400 pF ce qui est cohérent.

***Conclusion.***

Le fait que la capacité de jonction d'une photodiode diminue avec la valeur absolue de la tension inverse de polarisation explique que l'on polarise les photodiodes le plus fortement possible en inverse quand cherche à diminuer leur temps de réponse. C'est indispensable quand on cherche à observer des fluctuations rapides de puissance optique (télécom, ...). Il faut cependant veiller à ne pas dépasser la tension de claquage.

***Références.***

TP Phytem sur l'étude d'un photorécepteur en statique et en dynamique, conçu et écrit par Bernard Journet.

***Liste de matériel.***

Maquette sur l'étude d'un photorécepteur (ENSC349 ) avec la photodiode PIN10 et une LED rouge associée au kit ENSC349.

Deux pieds d'optique permettant de maintenir l'émetteur et le récepteur accolés.

Une alimentation stabilisée +15V/-15V.

Un GBF.

Un multimètre et deux pinces crocodiles.

Un oscilloscope Agilent ou HP (avec curseur en X et en Y simultanément) avec deux sondes de tension.

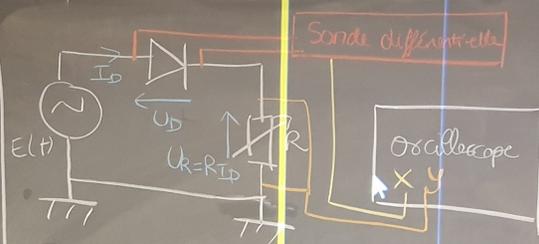
# Tableau complet

## MP 12 PHOTORÉCEPTEURS



Oeil : temps de Réponse :  $\sim 0,1$  s  
 Réponse spectrale : visible (400, 800) nm

### I) Caractéristique courant-tension de la photodiode

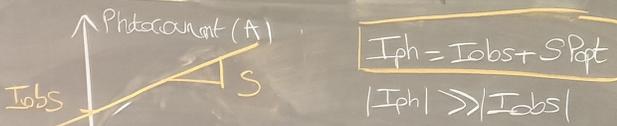


Tension de polarisation variable  $E(t) = E_0 \cos(2\pi f t)$   
 avec  $f = 1$  Hz  $-8V \leq E_1 \leq 8V$   
 $E_1 = 8V$

Droite de charge  $I_D = \frac{E - U_D}{R}$

Loi de Malus  $P_{opt} = P_{inc} \cos^2(\theta)$

$P_0 = \pm W$   $\Delta P_{opt} = P_{opt} \sqrt{\left(\frac{\Delta P_0}{P_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \theta \sin(2\theta)}{\cos^2(\theta)}\right)^2}$



$I_{obs} = \pm A$

Sensibilité :  $S = \frac{\delta I_{ph}}{\delta P_{opt}} = A/W$

Rendement quantique  $\eta = \frac{hcS}{\lambda e}$

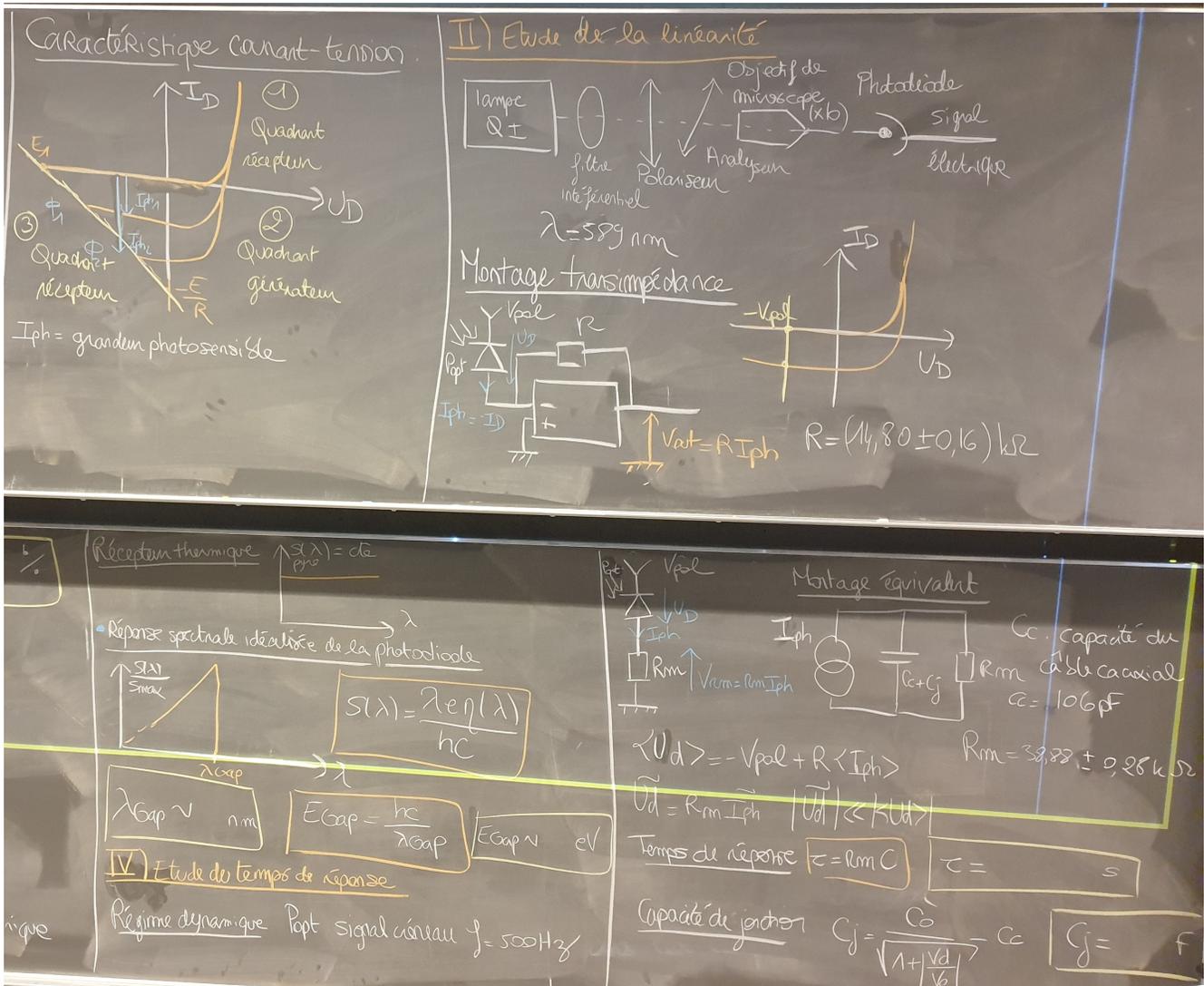
$\eta = \pm \frac{b}{\dots}$

### III) Réponse spectrale de la photodiode



Réponse spectrale de la lampe

Détermination à l'aide d'un détecteur pyroélectrique



## Remarques

Rapport du jury : "Dans ce montage, les questions classiques de métrologie peuvent être abordées : sensibilité, bande passante et temps de réponse. Il importe de distinguer les détecteurs photoniques et thermiques, notamment du point de vue de leur réponse spectrale. Plus généralement, il faut connaître les principes physiques des photo détecteurs utilisés et pouvoir justifier les liens entre ces principes et les caractéristiques métrologiques. Il faut également, lorsqu'on cherche à effectuer une étude spectrale, faire attention à la réponse spectrale de tous les éléments du montage, y compris celle des éventuels polariseurs et analyseurs. Remarquons pour finir que la notion de point de fonctionnement peut être utile pour bien expliquer et justifier un montage avec photodiode."

## Bibliographie

- Sextant, Optique expérimentale (en particulier pour la réponse spectrale de la photodiode, et la description des photorécepteurs notamment celle du pyromètre)

- Physique expérimentale, ALD etc (il y a une grosse partie du bouquin pour ce montage, allez le lire)
- Comptes rendus de 2010 [ici](#), et sur les effets capacitifs
- Notices Etude spectrale d'un récepteur [ici](#); puissance mètre optique [ici](#)

## Questions

- Quels sont les photorécepteurs de l'oeil? Ce sont les cônes pour la vision diurne (RVB) et les bâtonnets.

- Pourquoi utilise-t-on une sonde différentielle? Pour éviter les problèmes de masse, si elle n'était pas présente, on court-circuiterait la résistance.

- Pourquoi avoir choisi  $f=1$  Hz lors du tracé de la caractéristique à l'oscilloscope? Pour pouvoir visualiser à l'oeil le balayage de la caractéristique lorsque la fréquence et donc la tension envoyée sinusoïdale varie. De plus, on ne peut pas augmenter  $f$  sans limite car la caractéristique tracée est une caractéristique statique.

- Comment fonctionne un filtre interférentiel? On appelle ça aussi un filtre dichroïque.

Leur principe de fonctionnement est semblable à celui d'une cavité Fabry-Perot, constituée d'une lame à faces parallèles transparente dont les faces d'entrée et de sortie sont rendues très réfléchissantes par un dépôt de couches diélectriques multiples. Si l'épaisseur de la cavité est un multiple de  $\lambda/2$ , les interférences entre les différentes ondes transmises sont constructives pour la longueur d'onde  $\lambda$ . On obtient donc des maxima de transmission centrés sur ces longueurs d'onde. Ces maxima sont d'autant plus aigus que le coefficient de réflexion des deux faces de la cavité est grand. Pour les longueurs d'onde non transmises, la quasi totalité de l'énergie est réfléchi. En pratique, on superpose plusieurs cavités de ce type pour obtenir la courbe de transmission désirée. Pour améliorer les performances des filtres interférentiels, les fabricants les accolent souvent à des filtres colorés. On peut s'en rendre compte en observant par réflexion un filtre dit interférentiel : l'une des faces semble métallique (côté du filtre interférentiel qui réfléchit pratiquement toutes les longueurs d'onde), l'autre est colorée. L'intérêt de ces filtres est qu'ils transmettent un intervalle spectral beaucoup plus étroit ( $= 10$  nm) que les filtres usuels à colorants. Il faut les éclairer du côté filtre interférentiel car ils absorbent alors très peu d'énergie, donc ne s'échauffent pas. Un inconvénient est qu'ils sont assez sensibles à l'inclinaison du faisceau. Pour obtenir les spécifications du constructeur, il faut les éclairer sous incidence normale. Par ailleurs, ces filtres transmettant un faible intervalle spectral, ils conduisent à des expériences peu lumineuses.

- A quoi sert l'objectif de microscope? Focaliser les rayons lumineux et donc récupérer un maximum de puissance en sortie. On pourrait aussi mettre une lentille pour focaliser mais c'est sans doute plus efficace comme ça.

- Pourquoi doit-on multiplier la lecture de la longueur d'onde par 2 sur le monochromateur? On est à l'ordre 2 du réseau dans le monochromateur.

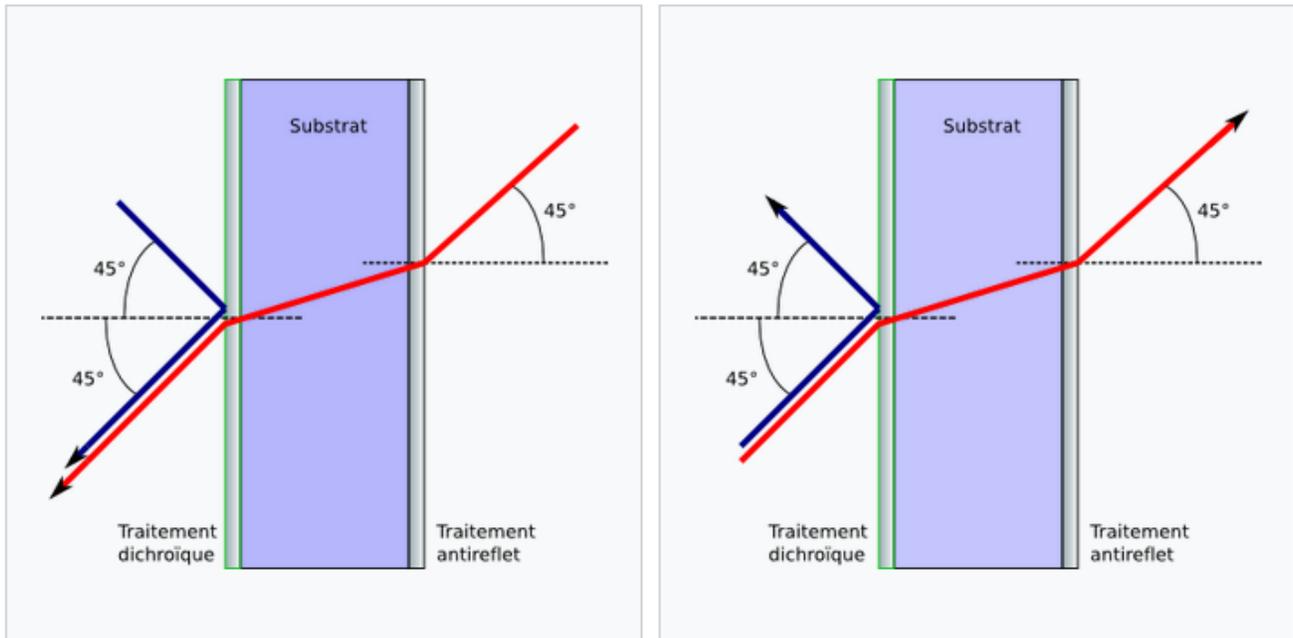
- Pourquoi dans le grand 2 la droite de charge est verticale? Si on considère que l'ALI est idéal,  $V_+ = V_-$  donc  $U_d = -V_{pol}$ .

- Comment obtient-on la formule du rendement quantique? cf partie 2

- Calcul de  $E_{gap}$  et commentaires :  $E_{gap}$  est de l'ordre de 1.3 eV donc c'est le bon ordre de grandeur pour le semi conducteur

- Exemple de matériau semi conducteur : silicium

- Pourquoi la chute de la réponse spectrale de la photodiode n'est pas directe? La couche mince polycristalline comporte de nombreux défauts et donc la chute n'est pas aussi drastique



Mélange de faisceaux par un miroir dichroïque. Séparation de couleurs par un miroir dichroïque

FIGURE 18 – Schéma de principe

qu'en théorie. On peut passer de la bande de valence à la bande de conduction grâce à elles.

- Que se passe-t-il à forte longueur d'onde ? Si la longueur d'onde est trop grande, les photons incidents ont une énergie inférieure à celle du gap du semi conducteur et aucun photon n'est détecté.

- Comment fonctionne un détecteur pyroélectrique ? Le rayonnement incident crée une modification de température du détecteur. Certains corps, dits ferroélectriques, ont une polarisation électrique permanente. Cette polarisation électrique décroît lorsque la température augmente. Le moment dipolaire électrique par unité de volume  $P$  se traduit par l'apparition de charges superficielles,  $\sigma = \pm P$ , sur les deux faces perpendiculaires à l'axe de polarisation. En régime permanent, des charges extérieures mobiles neutralisent ces charges superficielles et la différence de potentiel entre les deux faces disparaît.

- Autres exemples de photorécepteurs thermiques ? Thermopile, bolomètre

- Quel est l'intérêt du montage transimpédance ? Il assure une polarisation en inverse et permet de travailler à  $V_{pol}$  constant. Il permet aussi d'avoir un temps de réponse plus faible, plus la tension de polarisation augmente et plus la capacité de jonction devient faible.

Manip supplémentaire : Refaire le montage pour la linéarité entre le photocourant et le flux lumineux en court-circuitant la photodiode avec un ampèremètre. Cette astuce permet d'étudier plus rapidement la linéarité entre le photocourant et la puissance optique entrante de la photodiode.

## Remarques

On pouvait aussi se concentrer sur 2 types de quadrants et étudier le côté photovoltaïque.