MP12 - Photorécepteurs.

12 janvier 2017 - Présentée par Jérémy SAUTEL

Correction : A.-E. BADEL [1], C.-E. LECOMTE [2]

Le présent compte-rendu a pour but de résumer et compléter la discussion qui a suivi la présentation de la leçon en classe. Bien entendu, il est partiel et partial, et n'est qu'un point de vue qui n'engage que son auteur. Rappelons que c'est vous qui présenterez les leçons en fin d'année, et que c'est donc à vous de décider de ce que vous voulez en faire.

Rapport du jury

Je résume ici les attentes du jury pour ce montage spécifiquement, extraite des rapports du jury des années précédentes. Ceux-ci sont compilés dans le Book 2017.

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 et du temps de réponse. Plus généralement, il faut connaître les principes physiques des photodétecteurs 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. Ne pas confondre une photodiode nue avec un bloc formé d'une photodiode et d'un circuit de polarisation.

Ce montage se prête à l'utilisation à la fois des composants fondamentaux et de matériel grand public (photodiode, cellule solaire, capteur CCD, bolomètre...). Trop de candidats utilisent une photodiode sans en connaître suffisamment les propriétés.

Il existe d'autres photorécepteurs que la photodiode. Un éclairement d'intensité variable peut s'obtenir en utilisant deux polariseurs conformément à la loi de Malus.

Le temps de réponse d'un photorécepteur peut dépendre du circuit dans lequel ce composant est inséré.

Les termes de résolution (plus petite variation détectable de la grandeur d'entrée) et de sensibilité (rapport de la variation de la grandeur de sortie à la variation de la grandeur d'entrée qui l'a provoquée) ne sont pas de vagues concepts substituables : ils ont une définition et un sens précis. De même, lorsque la résolution spectrale est étudiée, elle est rarement définie convenablement. L'une des difficultés pour l'étude des photorécepteurs est que les mesures absolues sont difficiles, car elles nécessitent l'emploi de thermopiles ou d'autres détecteurs à sensibilité spectrale relative constante sur une large étendue spectrale. On peut contourner cette difficulté en faisant des hypothèses sur le spectre d'émission de telle ou telle source, mais il faut alors le préciser sans ambiguïté. Les thermopiles comportent souvent un filtre optique infrarouge qu'il convient de retirer avant utilisation.

Remarques générales

1 Forme

Le montage qui a été présenté est dans l'ensemble de bonne facture : les différentes manipulations présentées sont pertinentes et ont leur place dans ce montage. Pour chaque expérience, le rôle de chacun des éléments du montage a bien été décrit et le but de l'expérience expliqué.

Le tableau est soigné et globalement bien tenu. Il faut y inscrire, pour chaque expérience, un schéma complet et annoté, l'allure des courbes, la loi théorique, les résultats expérimentaux, le résultat final avec incertitudes et sa valeur attendue.

Le rythme de parole est soutenu mais pas trop rapide. Il faut bien garder à l'esprit que le jury recrute des professeurs, et que le dynamisme, la prestance et l'enthousiasme du candidat ne sont pas négligeables dans la notation. On peut cependant regretter quelques familiarités qui donnent une impression de flou. Par exemple, à la place de "*On prend une incertitude en gros de 2°, d'ailleurs la graduation est de 5°.*", plutôt dire "*La graduation est de 5°, on choisit comme incertitude une demi-graduation, c'est-à-dire 2°.*". Évitez également de vous approprier les éléments du montage : "ma" résistance, etc. Enfin, évitez de prendre l'habitude de vous référer au polycopié que vous avez rédigé : il n'existera pas le jour J.

Le temps a globalement bien été géré : le montage a duré 39 minutes. L'introduction était assez courte, ce que le jury attend : il faut rapidement commencer les manipulations. On peut regretter l'absence de conclusion : c'est l'occasion de revenir sur les différentes manipulations, et quelques applications. Cela peut être l'objet d'une petite expérience de conclusion (voir plus loin). L'introduction et la conclusion influent sur le ressenti qu'a le jury sur votre exposé. Il faut bien les soigner. Vous pouvez prendre un peu de temps pour les noter sur une feuille de brouillon afin d'être fluide, de

1. anne-emmanuelle.badel@ac-lyon.fr
2. charlesedouard.lecomte@ens-lyon.fr http://perso.ens-lyon.fr/charlesedouard.lecomte

ne rien oublier et de ne pas perdre de temps.

Veillez à organiser votre table de façon à ce que les instruments de mesures (oscilloscope, multimètres, etc.) soit facilement visibles du jury.

Je conseille toujours à tous la lecture du rapport du jury[3] sur le montage de physique de 2016, qui est complet sur les attentes du jury sur cette épreuve. Prenez le temps de le lire plusieurs fois au cours de l'année, surtout les conseils généraux pour le montage.

2 Fond – conseils pour la présentation

Le choix a été fait lors du montage de ne pas réaliser les caractéristiques des différents composants (photodiode, photorésistance) mais de directement utiliser l'ensemble "capteur-conditionnement", pour remonter aux caractéristiques initiales (photocourant pour la photodiode, résistance de la photorésistance). Cela peut se justifier, en particulier cela évite un tracé fastidieux et peu intéressant des caractéristiques. Il faut cependant savoir les tracer, et connaître les principes physiques des composants. De plus, sachez justifier que le conditionnement ne pose pas problème lors de la mesure (voir plus loin).

La distinction entre capteur photonique et capteur thermique, demandée par le jury à plusieurs reprises, a bien été faite.

Le jury rappelle qu'il est impératif de réaliser des mesures pendant la présentation, que l'on peut ajouter à celles réalisées en préparation si besoin. Les mesures réalisées en préparation ont peu de valeur si une mesure n'est pas convenablement réalisée devant le jury (voir Réponse spectrale).

Concernant les incertitudes, il faut questionner le but du montage : s'agit-il d'un montage à visée métrologique ou le but est-il la mise en évidence de phénomènes physiques ? On se situe ici plus dans le premier cas, la discussion des incertitudes est fondamentale. C'était un point faible du montage : chaque incertitude doit être correctement et rigoureusement justifiée, et on veillera à utiliser préférentiellement un **appareil de mesure** : multimètre, fréquencemètre, etc. et consulter l'incertitude dans la notice des appareils : elle est souvent la somme d'une fraction de la mesure et d'une valeur constante. Si les incertitudes apparaissent sur un graphique, il faut être en mesure de justifier comment ces dernières ont été calculées, et le traitement qu'en fait le logiciel. Attention, un GBF, un oscilloscope (pour la mesure précise d'une tension), une boîte à décades **ne constituent pas** un appareil de mesure.

Retour sur la présentation

Introduction (1 min)

L'introduction situait bien le sujet et la problématique du montage, l'annonce du plan n'est pas forcément nécessaire. Elle n'était pas trop longue, ce qui est positif.

Il aurait fallu faire apparaître plus clairement la définition d'un photorécepteur, on peut également la noter au tableau. La définition de Sextant [3], p.57 : "*Capteur qui transforme le rayonnement électrique en un signal, généralement électrique*" me paraît concise et correcte. On peut discuter le fait d'ajouter l'étage optique et l'électronique de traitement dans l'ensemble photorécepteur, comme le propose [1]. Ceci n'est pas le point de vue dans la plupart de la littérature (Asch, Techniques de l'ingénieur) qui distinguent le capteur en lui-même et le conditionnement. Mais il permet de garder à l'esprit les limitations pouvant résulter du conditionnement (voir Réponse dynamique).

Si vous êtes stressé au début d'un montage, pensez à écrire l'introduction sur un brouillon, cela évitera des silences si vous ne trouvez plus vos mots, et permettra de commencer le montage sur de bonnes bases. Ceci est également valable pour la conclusion.

1 Fonctionnement et linéarité de la photodiode (22 min)

Cette partie a été d'une longueur correcte, même si on peut y gagner un peu de temps, lors de l'étude de la photorésistance en particulier.

1.1 Étude primaire de la photodiode (10 min)

Le protocole de mesure de la linéarité, utilisant la loi de Malus, est correctement expliquée, ainsi que le rôle de chaque élément.

Il faut veiller à mieux justifier pourquoi on peut utiliser le modèle de l'AO idéal :

- Les courants d'entrée sont de l'ordre du pA donc cela ne pose pas de problème ici.
- La limitation du courant en sortie (égal au courant dans la photodiode) n'est pas atteinte.
- Le réglage de l'offset peut induire un décalage constant des mesures.
- Le slew-rate, de l'ordre de 15 V/μs n'est pas gênant a priori pour l'étude de la réponse dynamique, mais précisez-le.
- On peut prendre en compte le modèle à l'ordre 1 de l'AO pour voir la limitation en fréquence. En reprenant le schéma et les notations du polycopié, avec $E = 0$:

$$U + Ri = V_S$$

Or $V_S = \underline{\mu}(U - 0)$ donc :

$$\frac{1 - \underline{\mu}}{\underline{\mu}} V_s = RI$$

Donc $V_s = -RI$ dans la mesure où $\left|\underline{\mu}\right| \gg 1$, i.e. $\omega \ll \omega_0 \mu_0 \approx 10^6$ rad/s.

Pour la mesure de la résistance, n'oubliez pas de la mesurer à l'ohmmètre et incorporez son incertitude (voir notice de l'ohmmètre) dans le résultat final. Quant

3. À l'adresse http://media.devenirenseignant.gouv.fr/file/externe/63/7/rj-2016-agregation-externe-physique-chimie-physique_609637.pdf

à l'incertitude sur la tension, comparez la valeur d'incertitude du voltmètre lue dans la notice avec les fluctuations de valeur observées.

Pour l'étude de la photodiode, comme celle de la photorésistance qui va suivre, deux approches sont possibles :

— Étudier le capteur déjà conditionné. Dans ce cas, la valeur de R, le comportement de l'AO importent peu, on étudie les caractéristiques de l'ensemble.

— Étudier la photodiode seule, et se servir du conditionnement comme un moyen d'accéder au photocourant (à la résistance dans le cas de la photorésistance) : dans ce cas, il faut à tout prix mentionner l'incertitude sur la résistance, et les hypothèses de l'AO idéal. C'est ce choix qui a été fait ici.

Enfin, veillez à exprimer la sensibilité en unité de mesure (nA ou V en fonction de votre choix) par unité de flux. Vous pouvez mesurer le flux à l'aide d'un puissancemètre [4]. Gardez à l'esprit que ce puissancemètre n'est qu'une photodiode correctement étalonnée : attention à bien spécifier la longueur d'onde de travail sur le puissancemètre !

1.2 La photorésistance (12 min)

Le conditionnement de la photorésistance, ainsi que le choix de la résistance du montage potentiométrique, ont bien été expliqués. Celui-ci pose moins de difficulté que pour la photodiode : c'est simplement un pont diviseur de tension.

Les mêmes commentaires peuvent être faits sur la sensibilité (expression en unité de mesure (volts ou grandeur électrique initiale) par ϕ_0 ou W/m^2 (mesure de ϕ_0 avec un puissancemètre commercial)).

Le principe de la mesure étant le même qu'avec la photodiode, vous pouvez exécuter les mesures assez rapidement (ne faire qu'une valeur d'angle). De plus, il n'est pas forcément nécessaire de réaliser de nouveau des mesures en pleine lumière pour montrer la non-linéarité de la photorésistance. Contentez-vous d'enlever les filtres, montrez la valeur de tension sur le multimètre, et présentez les résultats obtenus en préparation. Cela vous permet de gagner cinq minutes pour traiter avec soin la réponse spectrale.

2 Réponse spectrale de la photodiode (10 min 30)

Les mesures du photocourant pour différentes radiations ont été faites en utilisant des filtres colorés. Aucune incertitude n'est fournie pour la largeur de ces filtres (i.e. l'incertitude sur la longueur d'onde) : on pourra utiliser la valeur proposée par [1], i.e. 5 nm.

Seules les mesures de tension aux bornes de la thermopile réalisées en préparation ont été présentées. Il faut garder à l'esprit que des mesures réalisées en préparation ne valent presque rien : le jury ne peut pas observer votre capacité à manipuler, et rien ne prouve au jury que vous n'avez pas inventé ces mesures. Deux solutions sont alors possibles :

— Réaliser un point de mesure devant le jury. Il est probable que ce point tombe à côté vu la difficulté des manipulations avec la thermopile. Justifier alors l'écart (température de la salle, intensité de la quartz-iode, placement de la photopile, etc.) et analysez ensuite les points obtenus en préparation.

— Refaire quelques points (trois ou quatre) bien répartis en longueur d'onde sur le spectre visible. C'est un peu plus gourmand en temps, mais c'est ce qui sera le mieux récompensé. Expliquez également pourquoi vous devez refaire tous les points.

3 Comparaison des temps de réponse pour la photodiode et la photorésistance (5 min 30)

La mesure est réalisée au moyen d'un stroboscope : là encore l'expérience est bien expliquée.

Pour l'étude du temps de réponse, il y avait visiblement saturation de l'amplificateur opérationnel. Pour diminuer la luminosité, vous pouvez éloigner le stroboscope ou rajouter des densités optiques par exemple. Vous pouvez également utiliser une diode laser modulée par un signal TTL, ou un dispositif de hacheur optique (voir [1]). Dans tous les cas, il est difficile de justifier l'origine du temps de montée observé : temps d'augmentation de la luminosité du stroboscope, temps de réponse de la diode laser, conditionnement, etc. Cela permet juste d'affirmer que ces temps sont de l'ordre de la μs et permettent la mesure des temps de montée et de descente de la photorésistance.

Le temps de réponse de la photodiode est dû à des capacités de jonctions, de l'ordre de 200 pF. Mais il y a également la capacité du câble coaxial (environ 50 pF/m) et celle de l'oscilloscope (quelques dizaines de pF), qui ne sont pas négligeables. Il est donc délicat d'essayer de remonter au temps de réponse de la photodiode seul.

Pour des explications théoriques de la réponse dynamique des photorécepteurs, [1] est complet et assez concis.

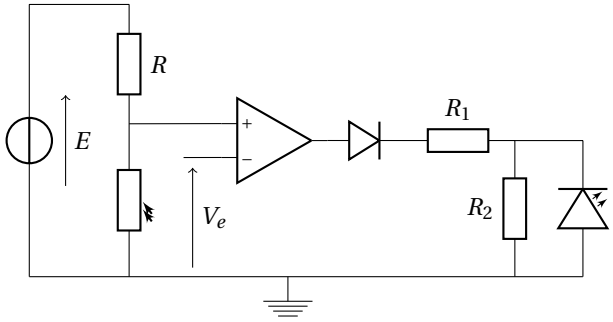
Conclusion

Il est impératif de garder assez de temps pour conclure. Il vous restait un peu plus d'une minute pour le faire : c'est suffisant. La conclusion peut être l'occasion de récapituler rapidement les différentes mesures et leur intérêt. Comme l'introduction, elle ne doit pas être trop longue car le jury n'attend pas que vous restiez trop longtemps sans manipuler.

Il est possible de réaliser une petite expérience pour illustrer une application d'un photorécepteur. En récupérant le signal issu de la photodiode et en le comparant

4. Par exemple THORLABS P17.18.

avec un signal constant, on peut illustrer le principe de l'allumage des lampadaires municipaux.



Le signal est récupéré en sortie du conditionnement, on peut choisir $R = 10$ kΩ comme lors du montage. On compare ensuite avec une tension constante (si $E = 10$ V, on peut choisir $V_e = 5$ V). Si la lumière est éteinte, la résistance de la photorésistance est grande, v_+ est très supérieur à v_-, et ainsi $v_s = V_{\text{sat}}$. Inversement, si la lumière est allumée, $v_s = -V_{\text{sat}}$. La fin du montage convertit les tensions de $+V_{\text{sat}}$ et $-V_{\text{sat}}$ en 5 V et 0 V : on peut choisir $R_1 = 3{,}9$ kΩ et$R_2 = 2$ kΩ. On peut remplacer la DEL par un étage amplificateur de puissance-lampe.

Questions

Les questions servent d'abord à éclaircir les points peu clairs du montage, tester votre connaissance des appareils et dispositifs utilisés, puis ensuite à tester vos connaissances plus largement. Voilà quelques points qui pourraient être discutés lors des questions. La séance de questions durera au maximum 20 minutes le jour J.

- Définir un photorécepteur.
- Hypothèses de l'amplificateur opérationnel.
- Incertitudes.
- Quelle est la nature du conditionnement de la photorésistance. Pourquoi ne pas en utiliser un autre ?

  Le montage est un montage potentiométrique. Pour mesurer des variations de résistances, on utilise aussi souvent des ponts (voir TP Capteurs et le conditionnement de la jauge de contrainte) mais cela requiert un faible déséquilibre du pont. Le montage potentiométrique semble être le plus adapté à ce montage.

- Pourquoi faire des mesures à $\pm\theta$?

  On minimise l'erreur systématique dû à un mauvais repérage de l'extinction. Pour que cela soit efficace, il faut que la fonction soit paire (la valeur attendue à $+50°$ et à -50° est la même).

- Pourquoi ne pas utiliser un laser ?

  Certains lasers peuvent avoir des plans de polarisation fluctuant, et l'intensité n'est pas toujours constante. Enfin, le temps de chauffe est également grand.

- Quelle hypothèse est nécessaire pour définir la notion de sensibilité spectrale ?

  Comme expliqué dans [1], p.157, la réponse du photorécepteur résulte des réponses $s(\lambda)$ associée à chacune des longueurs d'onde λ :

  $$S = \int_0^{+\infty} s(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda$$

  Si le photorécepteurs est linéaire, $s(\lambda)$ est proportionnel au flux spectral $\phi(\lambda)$ et on peut ainsi définir la réponse spectrale $\gamma(\lambda)$ telle que :

  $$S = \int_0^{+\infty} \gamma(\lambda)\,\phi(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda$$

- Principe de la thermopile.

  Le rayonnement incident est absorbé et la température est mesurée au moyen de thermocouples, utilisant l'effet Seebeck. Pour un schéma de principe assez clair, on pourra consulter [1], p.165. Pour une explication de l'effet Seebeck, on peut lire DGLR [5], p.518.

Je reste à votre disposition par mail si vous avez d'autres questions.

Références

[1] Fruchart M., Lidon P., Thibierge É., Champion M. et Le Diffon A., Physique expérimentale : optique, mécanique des fluides, ondes et thermodynamique, De Boeck, 2016

[2] Asch G., Les capteurs en instrumentation industrielle, Dunod, 2010

[3] Sextant, Optique expérimentale, Hermann, 1997

[4] Taillet R., Villain L. et Febvre P., Dictionnaire de physique

[5] Diu B., Guthmann C., Lederer D., and Roulet B, Thermodynamique, Hermann, 2007.