

# Montage de physique 23 : Capteurs et transducteurs.

Yoann Genolini et Arnaud Ghibaudo

Année 2012-2013

## Rapports du jury

- 2012,2011,2010** : « Les notions de temps de réponse des capteurs et de fonction de transfert des transducteurs sont essentielles. On devrait aussi s'intéresser aux qualités de fidélité, sensibilité et justesse qui permettent de transformer ces capteurs en instruments de mesure. »
- 2009** : « La différence entre capteurs et transducteurs est trop souvent méconnue. De ce fait, les candidats se limitent en général à l'étude de différents capteurs sans aborder les transducteurs. »
- 2008** : « Le jury a assisté cette année à des études de haut-parleurs électrodynamiques dénuées de signification physique. En particulier les mesures du rendement sonore, des longueurs d'onde et du diagramme de rayonnement du HP sont très sensibles à l'environnement. »
- 2007** : « Le montage ne peut se résumer à un catalogue plus ou moins exhaustif des capteurs. Le jury attend au moins une étude approfondie des propriétés de l'un des capteurs présentés ainsi que celle d'un transducteur. Les principes physiques qui sous-tendent le fonctionnement des capteurs étudiés ne peuvent être ignorés des candidats. »
- 1997** : « Le moteur pas-à-pas est aussi un transducteur électromécanique. »

## Bibliographie

- Roger Duffait, *Expériences d'électronique - Agrégation de Sciences Physiques* (CAN, dynamo)
- Lucien Quaranta, *Dictionnaire de physique expérimentale, tome 4 : L'électricité* (dynamo)
- Roger Duffait, *Expériences d'optique - Agrégation de sciences physiques.*
- Sextant, *Optique expérimentale*

## Table des matières

|          |  |          |
|----------|--|----------|
| <b>1</b> | <b>Un transducteur électromécanique : la dynamo</b>                    | <b>2</b> |
| 1.1      | Présentation générale . . . . .  | 2        |
| 1.2      | Linéarité de la conversion vitesse tension en circuit ouvert . . . . . | 2        |
| 1.3      | Rendement de la dynamo . . . . .                                       | 3        |
| <b>2</b> | <b>Chaîne d'acquisition de l'information</b>                           | <b>5</b> |
| 2.1      | Affichage de la tension via un CAN simple rampe . . . . .              | 5        |
| 2.2      | Temps de réponse de la chaîne . . . . .                                | 5        |
| <b>3</b> | <b>Photodiode</b>  | <b>5</b> |
| 3.1      | Description . . . . .  | 5        |
| 3.2      | Caractéristique . . . . .  | 5        |
| 3.3      | Linéarité . . . . .  | 7        |
| 3.4      | Réponse spectrale . . . . .  | 8        |
| 3.5      | Temps de réponse . . . . .   | 10       |

## Matériel (quasi-exhaustif)

**Pour la partie I :** les deux moteurs couplés servant à l'asservissement en vitesse, générateur de courant/tension, deux multimètres, une alimentation continue pour le capteur de vitesse, oscilloscope.

**Pour la partie II :** un convertisseur analogique-numérique (CAN) simple rampe avec un chrono-compteur.

**Pour la partie III :** lampe Quartz-Iode (+anticalorique), diode laser, polariseurs, filtres interférentiels, thermopile, photodiodes, nanovoltmètre, boîte à décades de résistances, oscilloscope, GBF à masse flottante.

## Introduction

Les termes *transducteur* et *capteur* sont voisins mais doivent être bien distingués sur le plan pratique. Un transducteur est un système qui transforme une grandeur physique en une autre. C'est le cas de la machine à courant continu, que nous allons étudier en génératrice. Un transducteur peut être caractérisé par la relation entre sa réponse (signal de sortie) et la commande (signal d'entrée) : c'est la fonction de transfert. On peut s'intéresser par exemple à la linéarité (ou non linéarité), la réversibilité, la bande passante, au rendement, au temps de réponse et aux phénomènes d'hystérésis. Dans le cas de la génératrice, qui a pour but de convertir de l'énergie, nous nous intéresserons à la linéarité et au rendement de l'opération de transfert, caractéristiques pertinentes pour optimiser son utilisation.

La notion de capteur est, quant à elle, intimement liée à la mesure. La mesure d'une grandeur physique se fait toujours via une chaîne d'acquisition de l'information, au bout de laquelle l'expérimentateur peut lire (via l'oeil, son propre transducteur) une valeur quantifiée. Dans ce montage, on définit par « capteur » le premier élément de cette chaîne d'acquisition de l'information. Le capteur est donc a priori un transducteur. Nous verrons, dans la deuxième partie, que la pertinence de la valeur mesurée via le capteur dépend aussi bien des caractéristiques de la chaîne d'acquisition que de celles propres au capteur. Nous avons donc choisi dans une troisième partie d'étudier en détail un capteur optique : la photodiode, dont nous étudierons la linéarité, la sensibilité, la réponse spectrale et le temps de réponse.

## 1 Un transducteur électromécanique : la dynamo

La dynamo permet de convertir de l'énergie mécanique en énergie électrique. Les dynamos sont très présentes dans la vie de tous les jours (dynamo de vélo, alternateur de voiture). De manière générale, on réserve cette appellation à des machines à courant continu produisant une force électromotrice ayant un faible taux d'ondulation.

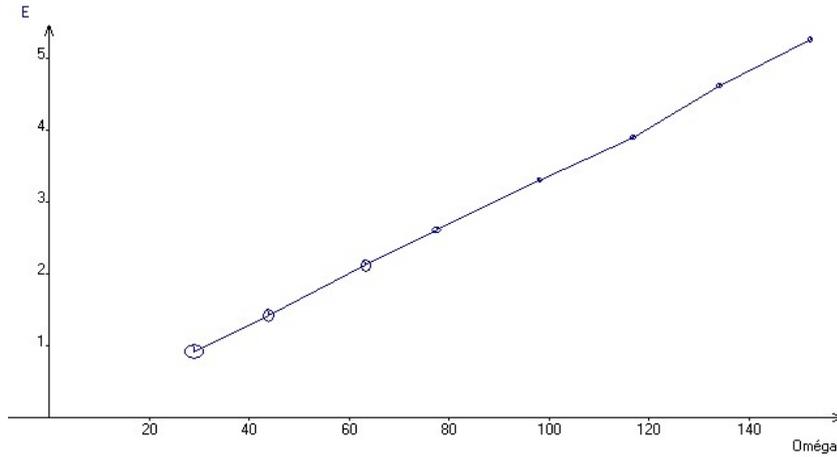
### 1.1 Présentation générale

Pour mettre la conversion électromécanique en évidence, on peut faire tourner une bobine dans un champ magnétique constant. On mesure à l'oscilloscope la tension aux bornes de la bobine. La force électromotrice induite est égale à la circulation du champ électrique induit dans les brins en rotation de la bobine et est donc proportionnelle à la vitesse de rotation pour une position donnée de la bobine. Avec le rotor bipolaire, on voit que la tension est tantôt positive et tantôt négative. Pour redresser la tension, on a recours à une astuce technologique qui consiste à faire un commutateur mécanique : le collecteur. Cette pièce inverse les pôles de la bobine toutes les demi-périodes : la tension est redressée mais varie toujours beaucoup. Pour des utilisations commerciales on augmente le nombre de bobines dans le rotor (rotors multipolaires) et on commute sur les maxima de chaque circuit. Le redressement multiphasé permet d'obtenir une tension possédant un taux d'ondulation très faible (quelques pour cent). On peut refaire l'expérience avec un moteur du commerce à aimant permanent (moteur servant au montage asservissement) et déterminer son nombre de pôles.

### 1.2 Linéarité de la conversion vitesse tension en circuit ouvert

On peut montrer que cette tension presque continue  $E$  est proportionnelle à la vitesse de rotation  $\Omega$  du moteur :  $E = k\phi\Omega$ , où  $k$  est une constante dépendant du moteur et  $\phi$  le flux magnétique maximal à travers un pôle du rotor. Ici  $\phi$  ne peut être modifié puisque les moteurs sont à aimants permanents. On fait varier la vitesse d'entraînement de la dynamo  $\Omega$  en utilisant le moteur couplé. On mesure la vitesse grâce à un capteur optique qui renvoie une tension continue dépendant de manière affine de la vitesse de rotation (radians par seconde). On obtient la figure 1.

La pente de la droite donne accès au flux efficace  $K = k\phi$  :

FIGURE 1 – Linéarité :  $E$  en fonction de  $\Omega$ .

$$K = 35.10^{-3} \pm 2.10^{-3} \text{ Vsrad}^{-1} \quad (1)$$

*Remarque* - Cette relation est à la base du fonctionnement des dynamo tachymétriques, pour lesquelles on essaie d'étendre au maximum ce domaine de linéarité.

### 1.3 Rendement de la dynamo

Une caractéristique essentielle à l'optimisation du fonctionnement de la dynamo est son rendement. Celui-ci est défini comme la puissance utile (électrique) que l'on récupère en sortie de la dynamo sur la puissance totale fournie. Dans le calcul de la puissance totale, plusieurs types de pertes sont à prendre en compte : les pertes fer (hystérésis uniquement pour un moteur à aimants permanents : courants de Foucault), les pertes joules dues à la résistance  $R_{\text{induit}}$  de l'induit, les pertes mécaniques dues au couple de frottement statique  $\Gamma_s$ . Ne pouvant accéder facilement aux pertes hystérésis, on ne les prend pas en compte dans l'expression du rendement  $\eta$ . On définit donc :

$$\eta = \frac{P_{\text{sortie}}}{P_{\text{totale}}} = \frac{P_{\text{sortie}}}{P_{\text{sortie}} + P_{\text{joules}} + P_{\text{méca}}} = \frac{UI}{UI + R_{\text{induit}}I^2 + \Gamma_s\Omega} \quad (2)$$

Il faut donc déterminer  $R_{\text{induit}}$  et  $\Gamma_s$  de manière à déterminer le rendement  $\eta$ .

$R_{\text{induit}}$  peut être obtenu à l'aide de l'ohmmètre (dans ce cas il faut prendre plusieurs mesures pour différentes positions du collecteur et faire la moyenne) ou de la pente de la caractéristique avec charge de la dynamo (figure 2). On trouve :

$$R_{\text{induit}} = 4,4 \pm 0,4 \Omega \quad (3)$$

Pour mesurer  $\Gamma_s$  le couple de frottement statique, on établit un petit modèle de la dynamo fonctionnant en moteur (figure 3).

Les équations dynamiques du système sont pour la partie électrique :

$$-V_{\text{alim}} + R_{\text{induit}}i + L\frac{di}{dt} + E(\omega) = 0 \quad (4)$$

Pour la partie mécanique :

$$J_m \frac{d\omega}{dt} = -\Gamma_s + \Gamma_{\text{électromagnétique}} \quad (5)$$

Or on a montré que  $E(\Omega) = K\Omega$  et l'étude théorique de la machine à courant continu montre que  $\Gamma_{\text{électromagnétique}} = Ki$ . En régime permanent :  $V_{\text{alim}} = R_{\text{induit}}I + K\Omega$  et  $\Gamma_s = KI$ . On obtient :

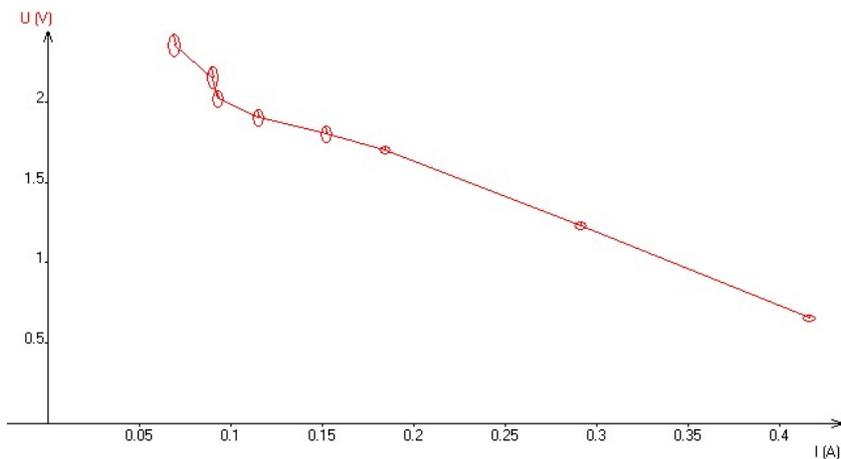


FIGURE 2 – Résistance : U en fonction de I.

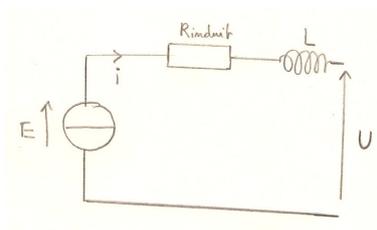


FIGURE 3 – Modèle de la dynamo fonctionnant en moteur.

$$\Omega = \frac{1}{K} (V_{alim} - \frac{R_{induit} \Gamma_s}{K}) \tag{6}$$

On voit donc que  $\Omega > 0$  si  $V_{alim} = \frac{R_{induit} \Gamma_s}{K}$ . On mesure  $V_{limite} = 1,82$  V et on en déduit  $\Gamma_s$  :

$$\Gamma_s = 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ Nm} \tag{7}$$

Vérifier la reproductibilité. Cela nous permet de déterminer le rendement à  $\Omega = 105 \pm 2$  rad/s (figure 4).

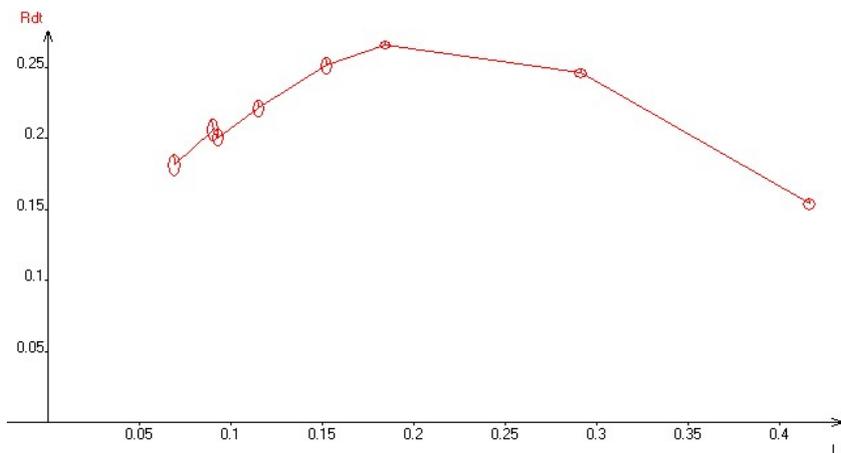


FIGURE 4 – Rendement : η en fonction de I.

**Transition** - On vient de voir comment il était possible de caractériser le transducteur électromécanique qu'est la dynamo, pour ce faire on utilisait un capteur optique de vitesse qui renvoyait une tension continue

pour une vitesse de rotation donnée. La mesure de la tension se fait via un voltmètre qui affiche une valeur sur son écran. On va essayer de voir les paramètres limitants de cette chaîne d'acquisition en étudiant la conversion de cette tension par un convertisseur analogique-numérique.

## 2 Chaîne d'acquisition de l'information

### 2.1 Affichage de la tension via un CAN simple rampe

En fait dans un multimètre on effectue une première conversion purement analogique tension-temps (ou tension-fréquence) puis une conversion analogique-numérique du temps. Mesurer un temps c'est compter le nombre de signaux d'horloge pendant une certaine durée.

Un CAN simple rampe réalise dans un premier temps une rampe de tension uniformément croissante  $V(t)$  que l'on compare à la tension à mesurer  $V_e$ . On mesure alors le temps que met  $V(t)$  pour atteindre  $V_e$  et connaissant la rampe, on en déduit  $V_e$ .

Le convertisseur analogique numérique simple rampe est constitué d'un intégrateur (RC) qui forme une rampe  $V(t) = \frac{-E_{ref}t}{RC}$  suivi d'un comparateur. Le temps entre le début de la rampe et le basculement du comparateur peut être suivi via une horloge (Jeulin) qui peut être commandée soit à l'ouverture soit à la fermeture d'un interrupteur. Pour  $E_{ref} = -5$  V,  $R = 5$  M $\Omega$ ,  $C = 1$   $\mu$ F la pente est de 1 V/s. Le temps affiché en secondes est alors égal à la tension en Volts. Le temps de réponse de la chaîne est grand...

### 2.2 Temps de réponse de la chaîne

Pour avoir un temps de réponse plus faible, on augmente la pente en jouant sur  $RC$  ou  $E_{ref}$ . On montre que l'on peut diminuer considérablement le temps de réponse même si l'on perd en précision. (On montre la moins bonne reproductibilité de la mesure de tension). Il est possible d'améliorer la précision de la mesure en modifiant le montage et en utilisant par exemple un convertisseur double rampe. Reste à voir si une amélioration du temps de réponse de la chaîne est nécessaire. De plus, on peut se poser la question de la linéarité de la chaîne en se demandant si elle le reste en présence du capteur. Ces dernières remarques nous poussent à nous intéresser aux caractéristiques du premier élément de la chaîne d'acquisition de l'information : le capteur.

**Transition** - Le capteur utilisé dans le cas du moteur est un capteur optique constitué d'une DEL, d'une roue dentée et d'un photorécepteur. Nous allons maintenant nous intéresser à la caractérisation de la photodiode.

## 3 Photodiode

### 3.1 Description

Une photodiode est une jonction PN capable d'absorber des photons pour les « transformer » en électrons. Une photodiode permet donc de convertir un signal lumineux en un signal électrique : c'est un transducteur, que nous allons utiliser ici en tant que capteur. L'absorption d'un photon d'énergie  $h\nu$  peut provoquer le passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction. Une partie des photons absorbés dans les zones P et N créent des électrons à un niveau d'énergie « plat », qui vont donc être peu mobiles et qui vont créer un *courant de diffusion*. En revanche, les photons absorbés dans la zone de charges d'espace (ZCE) peuvent créer des électrons qui seront soumis au champ électrique présent dans la ZCE. On a donc création d'une paire électron-trou dans la ZCE et l'électron va se diriger de la zone P vers la zone N, générant ainsi un *courant inverse* (ou *photocourant*) dans le circuit. C'est donc ce courant qui va nous intéresser.

En pratique, c'est la zone P qui reçoit le flux lumineux au niveau de sa surface extérieure. La différence principale entre une photodiode et une diode classique que l'on utilise en électronique réside dans le fait que la zone P de la photodiode est généralement petite, afin que les photons atteignent plus facilement la ZCE.

### 3.2 Caractéristique

La caractéristique de la photodiode en l'absence de lumière est celle d'une diode classique :

$$I_d = I_s \left( \exp \left( \frac{eV_d}{k_B T} \right) - 1 \right) \quad (8)$$

où  $I_s$  est le *courant d'obscurité*, de l'ordre de quelques nanoampères.

Nous avons vu que la présence de lumière provoque la création d'un photocourant  $I_{ph}(\phi)$  (où  $\phi$  est le flux lumineux reçu), la relation précédente se modifie simplement :

$$I_d = I_s \left( \exp \left( \frac{eV_d}{k_B T} \right) - 1 \right) - I_{ph}(\phi) \quad (9)$$

On peut tracer cette caractéristique pour différentes valeurs du flux  $\phi$ . Pour cela, on utilise un GBF<sup>1</sup> et une résistance (figure 5).

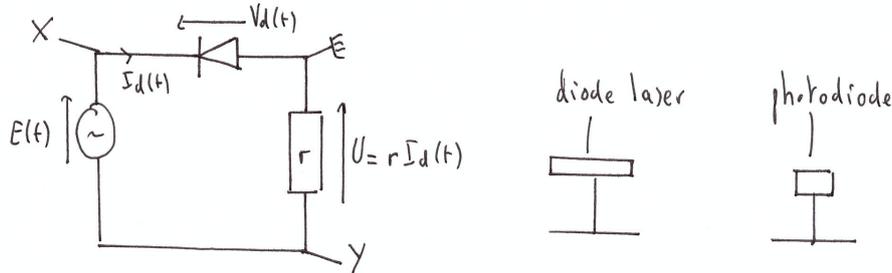


FIGURE 5 – Montage pour la caractéristique de la photodiode.

**Manipulation :** [live] on allume l'oscilloscope (préréglé sur le mode XY avec les calibres qui vont bien). On envoie un signal suffisamment lent pour voir un point lumineux se déplacer sur l'écran de l'oscilloscope (environ 1 Hz. On fait un premier *persist* lorsque la photodiode est simplement éclairée par la lumière ambiante, puis on allume la diode laser et on effectue un deuxième *persist*. [préparation] On a déterminé un couple  $(E, r)$  satisfaisant aux conditions.

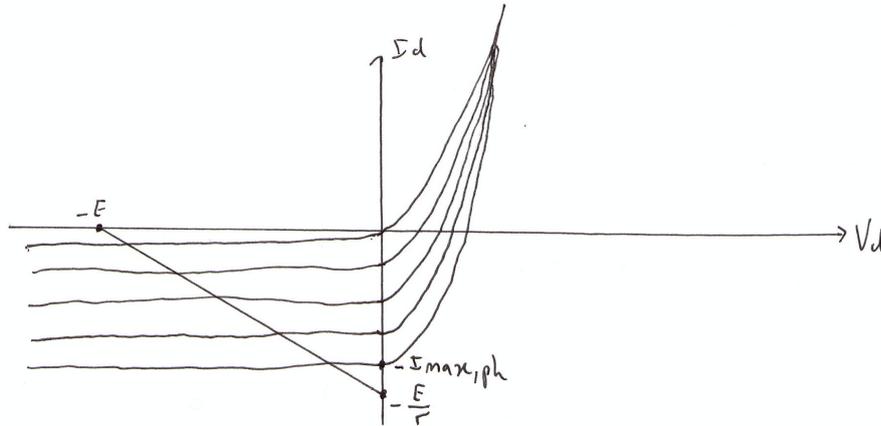


FIGURE 6 – Caractéristique de la photodiode et polarisation.

Il apparaît alors une zone (le quadrant  $I_d < 0$  et  $U_d < 0$ ) pour laquelle le courant varie très peu en fonction de la tension aux bornes de la photodiode et, comme nous le verrons dans la suite, le photocourant  $I_{ph}$  varie linéairement avec le flux  $\phi$ . C'est cette zone qui va donc nous intéresser, pour cela, il faut utiliser un circuit de polarisation permettant de rester dans cette zone de linéarité. Cela revient à choisir la valeur de la tension  $E$  délivrée par un générateur de tension continue et la valeur de la résistance  $r$ . Il n'y a pas de règle absolue et cette polarisation dépend de la photodiode. On veut pouvoir rester dans le quadrant  $I_d < 0$  et  $U_d < 0$ . Pour cela, il faut vérifier la relation :

$$U_d \simeq -E + rI_{ph}(\phi) \leq 0, \quad \forall I_{ph} \quad (10)$$

On a donc la condition (figure 6) :

1. Il est plus pratique d'utiliser un GBF à masse flottante, cela permet de positionner la masse de l'oscilloscope entre la photodiode et la résistance et donc de mesurer directement ce que l'on veut.

$$I_{ph,max} \leq \frac{E}{r} \quad (11)$$

En pratique, on choisit d'abord une tension  $E$  pas trop élevée puis on choisit  $r$  en fonction. Ici, nous avons choisi  $E = 2 \text{ V}$  et  $r = 5 \text{ k}\Omega$ .

**Transition** - Nous avons donc placé ici la photodiode dans le rôle d'un capteur : elle doit nous permettre de mesurer un flux lumineux incident quelconque. Comme tout capteur, son domaine de fonctionnement sera limité et nous allons tout d'abord nous demander si la relation entre le photocourant et le flux lumineux est linéaire, ce qui est la relation la plus simple afin de mesurer une grandeur.

### 3.3 Linéarité

On va montrer que la réponse de la diode dans le domaine de polarisation est linéaire avec le flux incident. Pour cela, on va utiliser une diode laser<sup>2</sup> et un système polariseur-analyseur. On mesure la tension aux bornes de la résistance du circuit de polarisation à l'aide d'un voltmètre (figure 7).

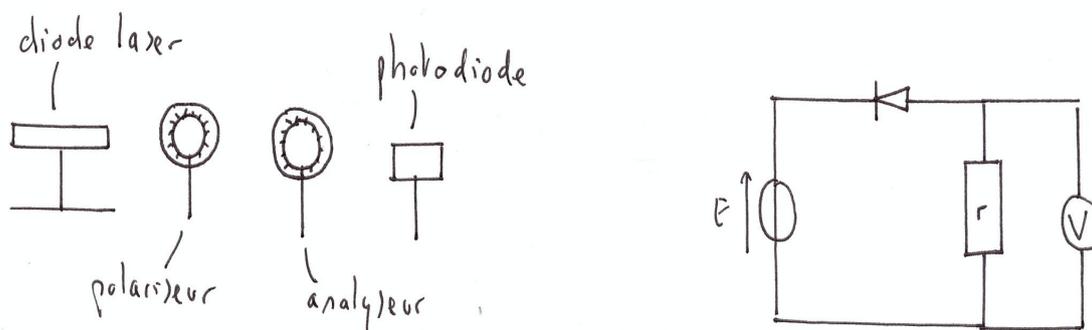


FIGURE 7 – Montage permettant d'obtenir la linéarité de la photodiode.

On écrit la loi de Malus :

$$\phi = \phi_0 \cos^2(\theta + \epsilon) \quad (12)$$

où  $\epsilon$  représente l'erreur systématique due à la lecture de l'angle de l'analyseur et à celle de l'angle du polariseur.

Pour réduire l'effet de cette erreur systématique, on effectue les mesures pour des angles  $\theta$  et  $-\theta$ . On aura alors :

$$\frac{\phi(\theta) + \phi(-\theta)}{2} = \phi_0 \cos^2(\theta) + o(\epsilon) \quad (13)$$

**Manipulation** : [live] faire la mesure pour un angle et son opposé. [préparation] On a pris quelques points entre  $\theta = 0$  et  $\theta = \frac{\pi}{2}$  et on a fait un fit linéaire.

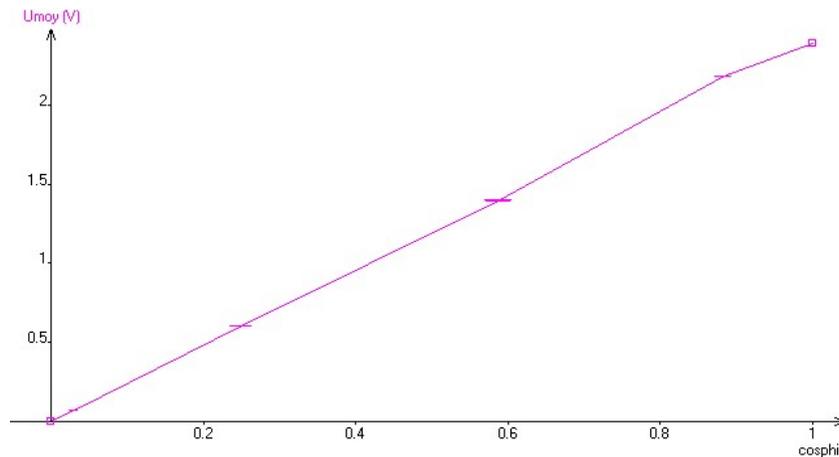
On trace alors l'intensité délivrée par la photodiode  $I_d \simeq I_{ph}$  en fonction de  $\cos^2(\theta)$  (figure 8).

On remarque alors que l'on obtient une relation linéaire. Si on note  $\alpha$  la pente de cette courbe, on a :

$$I_{ph} = \alpha \cos^2(\theta) = \frac{\alpha}{\phi_0} \phi_0 \cos^2(\theta) = \frac{\alpha}{\phi_0} \phi \quad (14)$$

On trouve :

2. Nous déconseillons d'utiliser un laser He-Ne, qui a un temps de chauffe considérable et qui présente des fluctuations de puissance assez importantes (de l'ordre de 10%). On perd légèrement en directivité et en finesse spectrale, mais l'effet est négligeable devant le problème de fluctuations du laser He-Ne. Il faut faire attention (comme avec un laser) à la puissance délivrée par la diode : au-delà de 1 mW, nous devons a priori utiliser des lunettes de protection (classe 3A, de 1 mW à 5 mW). Ici, la diode laser a une puissance de 3 mW. On peut noter que les montages réalisés ici présentent peu de risques de réflexions malheureuses.

FIGURE 8 – Linéarité :  $U = rI_{ph}$  en fonction de  $\cos^2(\theta)$ .

$$\alpha = 478 \pm 2 \mu\text{A} \quad (15)$$

On a donc bien montré que le courant délivré par la photodiode est proportionnel au flux lumineux reçu. Le coefficient  $\frac{\alpha}{\phi_0}$  est appelé *sensibilité* de la photodiode. Pour déterminer ce coefficient, il nous manque seulement  $\phi_0$ . On le détermine à l'aide du puissance-mètre (Thorlabs)<sup>3</sup> :

$$\phi_0 = 1,934 \pm 0.002 \text{ mW} \quad (16)$$

On obtient :

$$\frac{\alpha}{\phi_0} = 247 \pm 0,04 \mu\text{A/mW} \quad (17)$$

**Transition** - En fait, pour montrer la linéarité du photocourant avec le flux lumineux, nous nous sommes placés dans le cas d'une source quasi-monochromatique. Que se passe-t-il si l'on modifie la longueur d'onde de notre source ? C'est ce que nous allons voir, en s'intéressant à la réponse spectrale de la photodiode.

### 3.4 Réponse spectrale

Si l'on revient sur la description physique de la photodiode, pour qu'un électron puisse passer de la bande de valence vers la bande de conduction, il faut qu'il absorbe un photon d'énergie  $h\nu$  vérifiant :

$$h\nu \geq E_{gap} \quad (18)$$

où  $E_{gap}$  est l'énergie de gap entre la bande de valence et la bande de conduction. Cela revient à écrire :

$$\lambda \leq \frac{hc}{E_{gap}} \quad (19)$$

Ainsi, au-delà d'une certaine valeur de la longueur d'onde, il n'y a plus de création de paires électron-trou possible. De plus, tous les photons absorbés ne donnent pas naissance à une paire électron-trou dans la ZCE : on définit alors le *rendement quantique*  $\eta$ . Si on note  $\phi_p$  le flux de photons, on le relie au flux lumineux  $\phi$  par :

$$\phi_p = \frac{\phi}{h\nu} = \frac{\lambda}{hc} \phi \quad (20)$$

3. On a aussi un *Laser check* dans la collection, qui ne nécessite pas d'ordinateur

Et l'intensité  $I_{ph}$  est proportionnelle au flux de photons au rendement près :

$$I_{ph} = \eta \phi_p = \frac{\eta \lambda}{hc} \phi = S(\lambda) \phi \quad (21)$$

où  $S(\lambda) = \frac{\eta \lambda}{hc}$  est la *sensibilité spectrale* (ou le *facteur de réponse spectrale en courant*) de la photodiode.

Ainsi, dans ce modèle simple, la sensibilité augmente linéairement avec la longueur d'onde, jusqu'à atteindre la longueur d'onde critique. Dans la réalité, le rendement quantique dépend de la longueur d'onde, la linéarité n'est donc pas parfaite et la coupure est moins nette. Les caractéristiques spectrales de la photodiode dépendent principalement du matériau utilisé.

Afin de déterminer la réponse spectrale de la photodiode, nous allons utiliser une lampe Quartz-Iode (avec un filtre anticalorique) et un jeu de filtres interférentiels pour sélectionner différentes longueurs d'onde (dans le visible principalement). Dans ce système, la lampe Quartz-Iode n'a pas du tout un spectre plat, le filtre anticalorique constitue un filtre spectral qu'on ne sait pas caractériser et chaque filtre interférentiel sélectionne une raie (à  $\pm 5$  nm) avec une certaine atténuation (qui dépend notamment du niveau de propreté du filtre) : le flux arrivant sur la photodiode dépend donc fortement de la longueur d'onde  $\lambda$  :  $\phi = \phi(\lambda)$ .

Pour répondre à ce problème, nous allons utiliser une *thermopile*. Il s'agit d'un détecteur *thermique* (alors que la photodiode est un détecteur *photonique*). La particularité de ce type de détecteurs est de générer un signal qui ne dépend pas de la longueur d'onde sur une large gamme spectrale. Nous allons donc pouvoir normaliser le signal de la photodiode par celui de la thermopile. En effet, si nous écrivons :

$$U_{ph} = r I_{ph} = r \beta(\lambda) \phi(\lambda) \quad (22)$$

$$U_{th} = k \phi(\lambda) \quad (23)$$

où  $\beta$  est un facteur dépendant de la longueur d'onde  $\lambda$  et  $k$  est un facteur indépendant de  $\lambda$ .

On a donc :

$$\boxed{\frac{U_{ph}}{U_{th}} = \frac{r \beta(\lambda)}{k} = \gamma(\lambda)} \quad (24)$$

où  $\gamma(\lambda)$  représente la sensibilité de la photodiode à un coefficient de proportionnalité constant près. Cela nous suffit pour avoir l'allure de la réponse spectrale de la photodiode. On trace donc  $\gamma$  en fonction de  $\lambda$ , à l'aide du montage donné en figure 9.

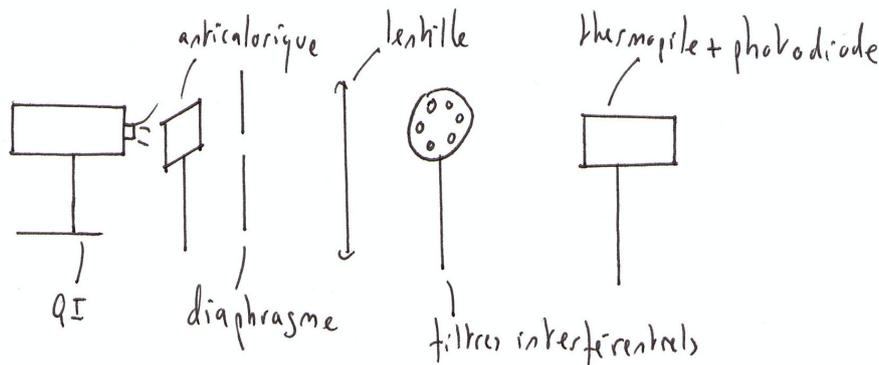


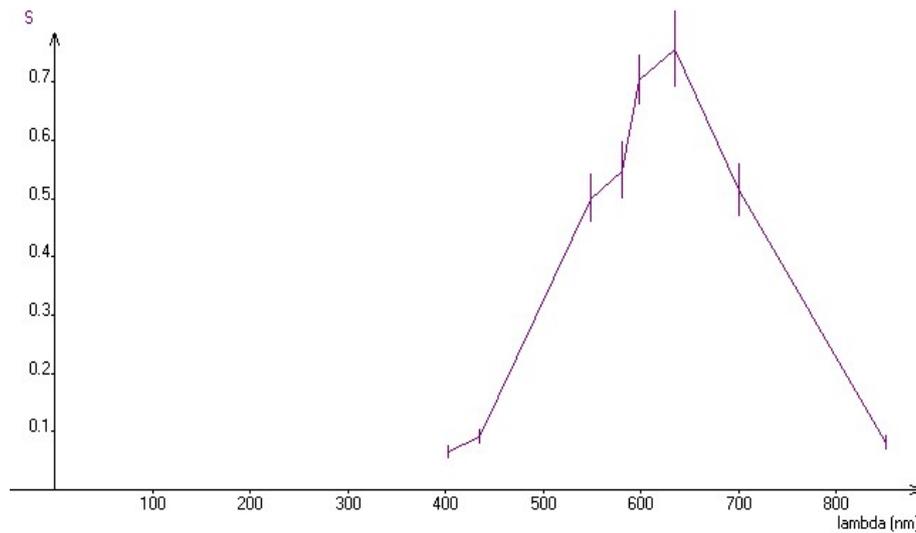
FIGURE 9 – Montage pour obtenir la réponse spectrale de la photodiode.

**Manipulation** : [live] déplacer l'ensemble photodiode-thermopile vers le montage avec la QI. Faire une mesure des deux tensions  $U_{ph}$  et  $U_{th}$ . [préparation] On a tracé la sensibilité spectrale en fonction de la longueur d'onde pour quelques longueurs d'onde qui balayent la gamme visible<sup>4</sup>.

On obtient la courbe figure 10.

On remarque donc que la photodiode a une réponse maximale dans le rouge.

4. Ici, nous nous sommes amusés à faire un peu d'infrarouge. Ce n'est pas si bancal que ça, car on arrive vraiment à voir des tensions non négligeables. Cela reste néanmoins approximatif, mais permet de donner une tendance.

FIGURE 10 – Sensibilité spectrale :  $\gamma_\lambda$  en fonction de  $\lambda$ .

### 3.5 Temps de réponse

Concernant le temps de réponse, celui-ci est en fait fixé par le filtre passe-bas constitué par la résistance  $r$  et la capacité de la photodiode. En effet la photodiode présente une capacité parasite qui dépend des matériaux utilisés et qui augmente avec la surface du capteur. Pour un  $r$  donné, une petite photodiode aura donc un temps de réponse plus court. La dépendance de ce temps de réponse en  $r$  rappelle bien que la mesure à l'aide de la photodiode ne peut pas être considérée en-dehors de la chaîne d'acquisition de l'information. Ainsi, mesurer avec précision le photocourant peut signifier diminuer le temps de réponse de la mesure. Pour mettre en évidence ce temps de réponse on peut générer des impulsions lumineuses à l'aide de la diode laser utilisée précédemment. On montre alors que le temps de réponse dépend de la résistance.

## Conclusion

Dans ce montage nous avons vu comment on pouvait différencier le terme capteur du terme transducteur, le premier étant associé plus directement à la mesure, le second à la conversion de puissance (mécanique en électrique pour la dynamo par exemple). Dans un cas comme dans l'autre, certaines caractéristiques sont essentielles à leur utilisation, c'est le cas de la linéarité. L'optimisation du fonctionnement des transducteurs fait appel au rendement, pour les capteurs on parlera de sensibilité et on pourra s'intéresser à d'autres paramètres, comme le temps de réponse.

Enfin nous avons vu que certains paramètres pouvaient être modifiés par la chaîne d'acquisition de l'information dans le cadre des capteurs.