

# ÉLECTROCINÉTIQUE

Soignez la présentation et la rédaction, qui doit être complète et concise. Tout résultat doit être justifié, et mis en valeur. Les résultats doivent d'abord être écrits sous forme littérale et doivent être homogènes. Les résultats numériques doivent avoir un nombre de chiffres significatifs vraisemblable. Les schémas doivent être clairs, suffisamment grands et lisibles. Si vous n'arrivez pas à montrer un résultat, admettez-le clairement et poursuivez.

## CALCULATRICES AUTORISÉES

### I. Photodiode

#### I.1. Caractéristique

Une photodiode est dipôle électro-optique dont la caractéristique électrique dépend de la puissance lumineuse moyenne qu'elle reçoit au niveau de sa surface sensible. Une photodiode, représentée sur la figure 1, a une loi de fonctionnement donnée par

$$i(u) = I_0 \left( e^{u/V_0} - 1 \right) - I_p$$

où  $I_0$  et  $V_0$  sont des constantes strictement positives, et où l'intensité  $I_p$ , nommée « photocourant », est proportionnelle à la puissance lumineuse  $\mathcal{P}_\ell$  reçue, selon la loi

$$I_p = k\mathcal{P}_\ell$$

avec  $k$  une constante strictement positive.

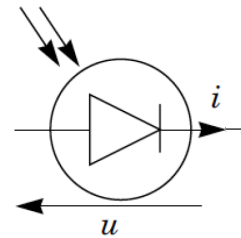


FIGURE 1 – Schéma électrique d'une photodiode

1. Rappeler les unités SI d'une intensité et d'une puissance, et leur correspondance en unités fondamentales. En déduire l'unité SI de  $k$ .
2. Déterminer la tension  $u_{CO}$  de la diode en circuit ouvert, en fonction de  $V_0$ ,  $I_p$  et  $I_0$ .
3. Déterminer l'intensité  $i_{CC}$  de court-circuit de la diode.
4. Représenter graphiquement l'allure de la caractéristique de la diode  $i(u)$ . On y placera, entre autres, les grandeurs  $u_{CO}$  et  $i_{CC}$ .
5. Dans quel domaine de la caractéristique la photodiode fournit-elle une puissance positive au circuit dans lequel elle se trouve ?
6. On considère une photodiode recevant une puissance lumineuse  $\mathcal{P}_\ell = 1,0 \text{ mW}$ . Calculer  $u_{CO}$  et  $i_{CC}$ , en prenant  $I_0 = 10 \mu\text{A}$ ,  $V_0 = 26 \text{ mV}$  et  $k = 0,50 \text{ uSI}$ .

Afin de simplifier l'analyse, dans toute la suite on représentera désormais la caractéristique  $i(u)$  de façon approchée, par deux segments de droite (cf. figure 2) :

- pour  $u < u_{CO}$ ,  $i = -I_p - I_0$  ;
- pour  $i > -I_p - I_0$ ,  $u = u_{CO}$ .

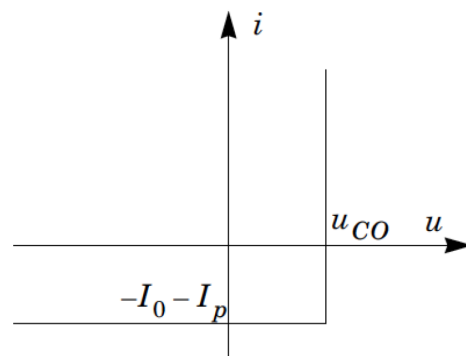


FIGURE 2 – Caractéristique courant-tension simplifiée.

## I.2. Utilisation en cellule photovoltaïque

On branche un résistor de résistance  $R_c$  aux bornes de la photodiode.

7. a) Déterminer la tension  $u$  et l'intensité  $i$  du courant en fonction de  $R_c$ ,  $I_p$ , et  $I_0$  et  $u_{CO}$ . On pourra raisonner graphiquement et on sera amené à distinguer 2 cas selon la valeur de  $R_c$ . On introduira la résistance  $R_0 = \frac{u_{CO}}{I_0 + I_p}$ .
- b) Déterminer la puissance  $\mathcal{P}$  fournie par la photodiode en fonction de  $R_c$ ,  $u_{CO}$ ,  $I_0$  et  $I_p$ .
- c) Représenter l'allure de la courbe  $\mathcal{P}(R_c)$ .
- d) Déterminer la puissance maximale, notée  $\mathcal{P}_{\max}$  et calculer sa valeur pour  $\mathcal{P}_\ell = 1,0 \text{ mW}$ . On donnera l'expression et la valeur de la résistance  $R_c$  réalisant ce maximum, qu'on notera  $R_{\text{opt}}$ .

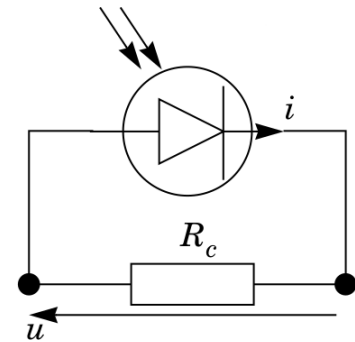


FIGURE 3 – Cellule photovoltaïque

8. On définit le rendement de conversion de la photodiode par  $\eta = \mathcal{P}_{\max}/\mathcal{P}_\ell$ .
  - a) Exprimer  $\eta$  en fonction de  $V_0$ ,  $k$  et de la quantité  $x = k\mathcal{P}_\ell/I_0$ . Calculer la valeur de  $\eta$  pour  $\mathcal{P}_\ell = 1,0 \text{ mW}$ .
  - b) Dans la limite  $x \rightarrow \infty$ , que pensez-vous du modèle utilisé pour décrire la caractéristique de la diode?
  - c) De manière générale, justifier que le modèle simplifié de la figure 2 surévalue le facteur  $\eta$ .
9. On associe en série un nombre  $N$  de photodiodes identiques, chacune recevant la même puissance lumineuse  $\mathcal{P}_\ell$ .
  - a) Procéder comme à la section I.1. pour modéliser le dipôle constitué des  $N$  photodiodes par une caractéristique formée de deux demi-droites analogue à celle de la figure 2. On précisera les expressions du courant  $i_{CC_N}$  et de la tension  $u_{CO_N}$  correspondant.
  - b) Déterminer la puissance maximale  $\mathcal{P}_{N \max}$  et préciser la valeur notée  $R_{N \text{opt}}$  de la résistance qu'on doit brancher aux bornes de cette association série pour récupérer la puissance  $\mathcal{P}_{N \max}$ .
10. Reprendre les questions précédentes pour une association parallèle de  $N$  photodiodes. On précisera en particulier la nouvelle valeur notée  $R_{N||\text{opt}}$  permettant de récupérer la nouvelle puissance maximale, notée  $\mathcal{P}_{N||\text{max}}$  dont on donnera également l'expression.
11. On souhaite alimenter une résistance  $R_c = 1,0 \text{ k}\Omega$  par un ensemble de photodiodes associées soit en série, soit en parallèle, chacune étant soumise à la même puissance lumineuse  $\mathcal{P}_\ell = 1,0 \text{ mW}$ . Déterminer le nombre de photodiodes et la manière de les connecter (soit en série, soit en parallèle) permettant de récupérer un maximum de puissance dans  $R_c$ . Quelle est alors la valeur du rendement de conversion  $\eta$ ?

## I.3. Utilisation en détecteur

On utilise désormais la photodiode comme détecteur de lumière, afin de mesurer la puissance lumineuse  $\mathcal{P}_\ell$ . On utilise pour cela le montage de la figure 4 dans lequel la source de tension idéale fournit une tension  $E$  négative.

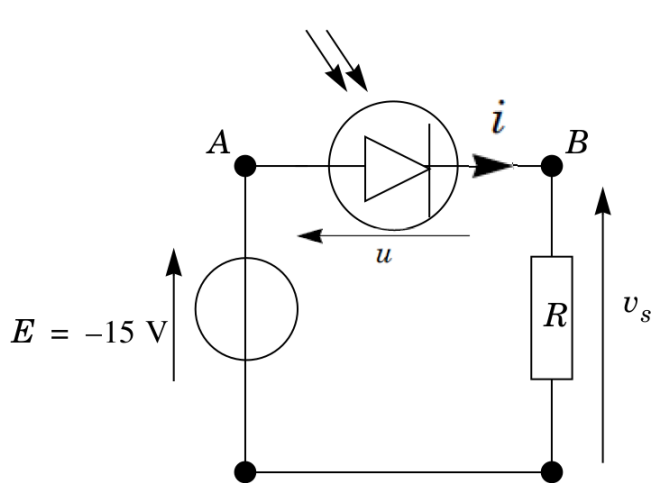


FIGURE 4 – Utilisation de la photodiode en récepteur. La tension  $E$  est négative.

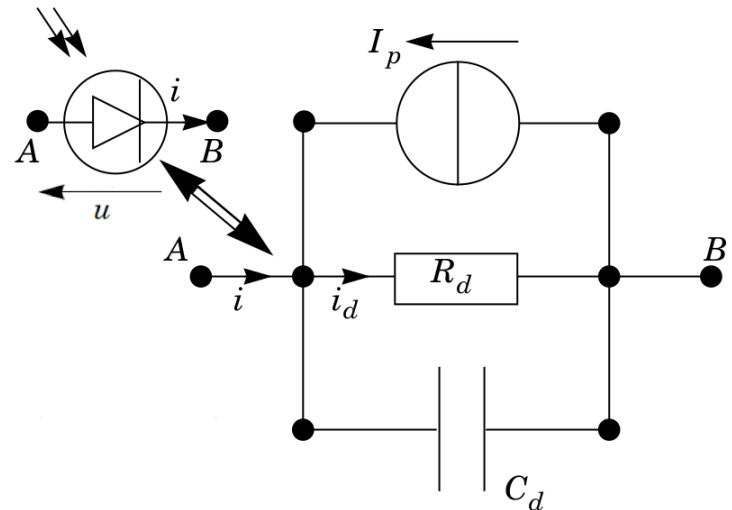


FIGURE 5 – Modélisation d'une diode soumise à une tension  $u$  négative.

On admet que quand la tension  $u$  à laquelle est soumise la photodiode est strictement inférieure à  $u_{CO}$ , on peut la modéliser par le dipôle de la figure 5 dans lequel le photocourant  $I_p$  est celui défini à la section 1.1. ( $I_0$  est supposé négligeable). On prendra  $R_d = 10 \text{ M}\Omega$ ,  $C_d = 2,0 \text{ pF}$ ,  $R = 10 \text{ k}\Omega$  et  $E = -15 \text{ V}$ .

### Réponse statique

On se place ici en régime stationnaire, de sorte que l'on peut négliger la présence de la capacité  $C_d$  dans le modèle.

12. Comment doit-on modifier la caractéristique simplifiée de la figure 2 pour tenir compte de la résistance  $R_d$ ? On représentera l'allure correspondante.
13. a) Quel est le point de fonctionnement dans l'hypothèse où  $u < u_{CO}$ ? On exprimera  $i$  et  $u$  en fonction de  $E$ ,  $I_p$ ,  $R$  et  $R_d$ .  
On supposera la condition  $u < u_{CO}$  vérifiée dans toute la suite.
- b) On note  $\alpha$  le coefficient de proportionnalité (positif) donnant les variations de  $|v_s| = -v_s$  en fonction de celles de  $\mathcal{P}_\ell$ . Donner l'expression de  $\alpha$  et sa valeur numérique.
14. Déterminer en fonction de  $u_{CO}$ , de  $E$  et des paramètres nécessaires la puissance lumineuse maximale  $\mathcal{P}_{\ell \max}$  pour laquelle on a  $u < u_{CO}$ . Calculer sa valeur numérique.
15. Déterminer de même le seuil de détection, ie la puissance lumineuse minimale notée  $\mathcal{P}_{\ell \min}$  pour laquelle la tension  $v_s$  est minimale en valeur absolue :  $|v_s|_{\min} = 20 \text{ mV}$ .

### Réponse à une impulsion lumineuse

On s'intéresse maintenant à la réponse du détecteur lorsqu'il est exposé à une impulsion lumineuse de durée  $\Delta t$  telle que

$$\mathcal{P}_\ell(t) = P_0 \quad \text{si } t \in [0, \Delta t] \quad \text{et} \quad \mathcal{P}_\ell(t) = 0 \quad \text{si } t \notin [0, \Delta t].$$

Cette réponse n'est pas instantanée à cause de la capacité  $C_d$  (cf figure 5).

16. Montrer que la tension  $v_s(t)$  évolue de façon continue.
17. On suppose qu'avant l'impulsion lumineuse, le circuit était en régime stationnaire (la photodiode étant donc dans l'obscurité). Donner l'expression de  $v_s(t = 0)$  dans ces conditions, valeur qu'on notera par la suite  $v_{S0}$ .
18. En raisonnant sur un circuit asymptotique en régime stationnaire, établir l'expression du régime permanent  $v_{S\infty}$  vers lequel  $v_s(t)$  convergerait pour  $t \rightarrow \infty$  si l'impulsion était de durée infinie.

- 19.** On cherche maintenant à établir l'équation différentielle vérifiée par  $v_S(t)$  en présence d'une puissance lumineuse  $\mathcal{P}_\ell(t)$  variable.
- En appliquant la loi des nœuds en A, exprimer le courant  $i_d$  qui traverse  $R_d$  de A vers B en fonction de  $I_p$ , de  $i$  et de la dérivée de la tension  $u$  (et des paramètres nécessaires).
  - En déduire l'équation différentielle entre  $v_S(t)$  et  $\mathcal{P}_\ell(t)$  dans le cas général. On introduira la constante de temps  $\tau$  du circuit en fonction des paramètres nécessaires.
- 20.** Déterminer la tension  $v_S(t)$  observée pour  $t \in [0, \Delta t]$ . Représenter graphiquement l'allure de  $v_S(t)$ . On précisera les valeurs remarquables sur le graphe. On pourra supposer que  $\Delta t > \tau$  pour ce graphe.
- 21.** Déterminer ensuite la tension  $v_S(t)$  observée pour pour  $t > \Delta t$ . Représenter son allure en prolongeant le graphe précédent, en ajoutant aussi les valeurs remarquables.

Le montage détecteur de la figure 4 est utilisé dans un système de communications optiques dans lequel l'information est transmise sous forme binaire, par le biais d'impulsions de durée  $\Delta t$  ajustable. On appelle « bande passante »  $B$  du système de détection le nombre maximal d'impulsions pouvant être détectées par unité de temps.

En aval du détecteur, l'algorithme de traitement numérique ne valide une impulsion que si  $v_S(t)$  dépasse (en valeur absolue) la valeur  $v_{S2} = \frac{v_{S0}}{2} + \frac{v_{S\infty}}{2}$  après être d'abord descendu au moins sous (en valeur absolue) la valeur  $v_{S1} = \frac{3v_{S0}}{2} + \frac{v_{S\infty}}{4}$ .

- 22.** Établir l'expression de la durée minimale  $\Delta t_m$  entre les commencements de deux impulsions successives, en fonction de  $\tau$ . En déduire l'expression de la bande passante  $B$  en fonction de  $\tau$ , puis sa valeur numérique pour  $P_0 = 1 \text{ mW}$ .

\* \* \* FIN DE L'ÉPREUVE \* \* \*