

# Les photodiodes

## 5.1. Effet photoélectrique

La photodiode est basée sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité d'une substance à émettre des électrons quand elle est frappée par un rayonnement lumineux. L'énergie du photon est  $w = hv$ . Cette énergie est croissante avec la fréquence du rayonnement lumineux.

Dans le cas d'une substance sensible à l'effet photoélectrique, si nous soumettons cette substance à un rayonnement « lumineux » de longueur d'onde variable et faisons diminuer cette longueur d'onde, il arrive un seuil où apparaît un courant électrique. Continuant à faire décroître la longueur d'onde, le courant électrique passe par un maximum  $\lambda_p$ , puis diminue linéairement. Le seuil noté en fréquence  $\nu_c$  ou en longueur d'onde  $\lambda_c$ , est fonction uniquement de la nature du matériau. La variation de courant électrique en fonction de l'énergie reçue, est exprimée par la sensibilité de la photodiode en ampères par watts.

Pour l'intervalle de longueur d'onde où le phénomène photoélectrique existe, il est possible d'exprimer cette sensibilité par l'équation :

$$S = \frac{\eta_e \cdot q}{h \cdot \nu} \quad [\text{Eq 5.1}]$$

$\eta_e$  = rendement quantique externe  
 $q$  = charge de l'électron

$h$  = constante de Planck  
 $\nu$  = fréquence du rayonnement

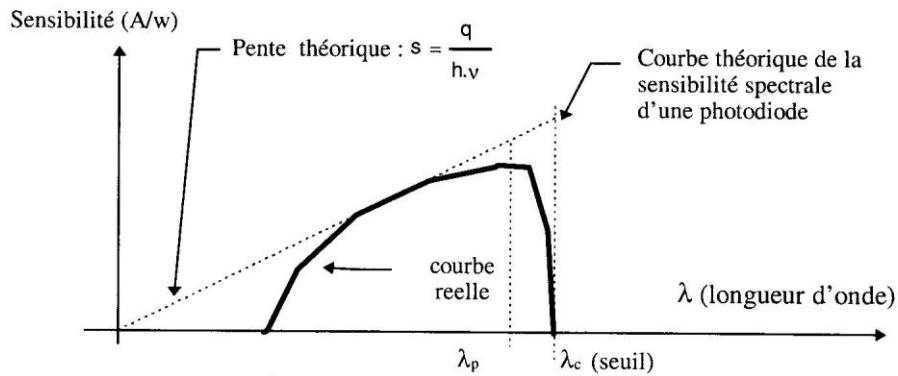


Figure 5.1. Sensibilité de la photodiode

La figure 5.1 présente cette variation de sensibilité en fonction de la longueur d'onde. La courbe en trait plein correspond à une courbe réelle, la courbe en pointillés aux valeurs théoriques. La différence entre les deux courbes provient des variations du rendement quantique externe en fonction de la longueur d'onde.

Matériaux	Si	Ge	GaInAsP
$\lambda_c$	1,13 $\mu\text{m}$	1,91 $\mu\text{m}$	1,5 $\mu\text{m}$
ev(électron volt)	1,1	0,65	1,4

Tableau 5.1. Valeur de  $\lambda_c$  pour différents types de semi-conducteurs

A partir de la lecture du tableau 5.1, il apparaît évident que le choix du détecteur est fonction de la longueur d'onde pour laquelle il doit travailler.

## 5.2. La photodiode

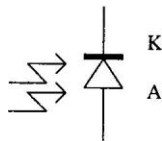


Figure 5.2. Symbole de la photodiode

Une photodiode est réalisée autour d'une jonction semi-conductrice de type P.N.

## Fonctionnement

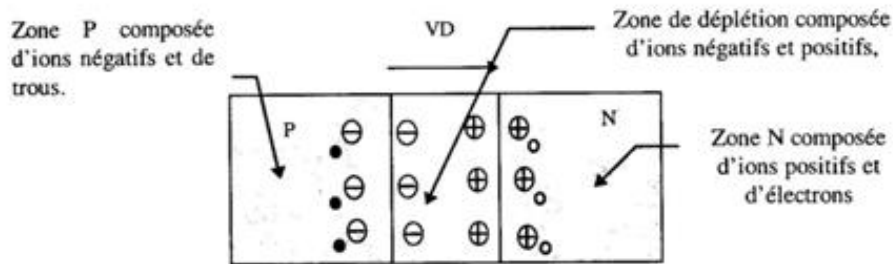


Figure 5.3. Structure de la jonction PN

Le courant  $I$  traversant la jonction PN est donné par l'équation 5.2 :

$$I = I_0 \left( e^{\frac{q \cdot V_d}{K \cdot T}} - 1 \right) \quad [\text{Eq 5.2}]$$

Quand un semi-conducteur est exposé à un flux lumineux, les photons sont absorbés à condition que l'énergie du photon ( $E_{ph} = h\nu$ ) soit supérieure à la largeur de la bande interdite ( $E_g$ ). Ceci correspond à l'énergie nécessaire que doit absorber l'électron afin qu'il puisse quitter la bande de valence (où il sert à assurer la cohésion de la structure) vers la bande de conduction, le rendant ainsi mobile et capable de générer un courant électrique. L'existence de la bande interdite entraîne l'existence d'un seuil d'absorption tel que  $h\nu_0 = E_g$ . Lors de l'absorption d'un photon, deux phénomènes peuvent se produire :

- La photoémission : c'est la sortie de l'électron hors du matériau photosensible. L'électron ne peut sortir que s'il est excité près de la surface.
- La photoconductivité : l'électron est libéré à l'intérieur du matériau. Les électrons ainsi libérés contribuent à la conductivité électrique du matériau.

Lorsque les photons pénètrent dans le semi-conducteur munis d'une énergie suffisante, ils peuvent créer des photoporteurs (électrons et trous d'électrons) en excès dans le matériau. On observe alors une augmentation du courant. Deux mécanismes interviennent simultanément :

- Il y a création de porteurs minoritaires, c'est-à-dire des électrons dans la région P et des trous dans la région N. Ceux-ci sont susceptibles d'atteindre la ZCE par diffusion et d'être ensuite propulsés vers des zones où ils sont majoritaires. En effet, une fois

dans la ZCE, la polarisation étant inverse, on favorise le passage des minoritaires vers leur zone de prédilection. Ces porteurs contribuent ainsi à créer le courant de diffusion.

- Il y a génération de paires électron trou dans la ZCE, qui se dissocient sous l'action du champ électrique ; l'électron rejoignant la zone N, le trou la zone P. Ce courant s'appelle le courant de transit ou photocourant de génération.

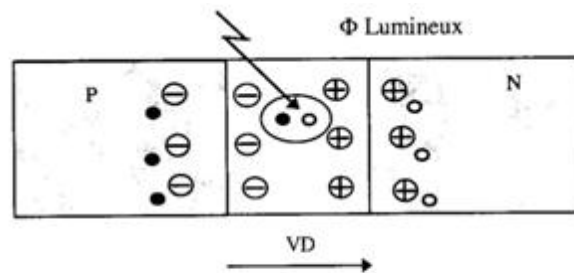


Figure 5.4. Influence des photons sur la jonction PN

Ces deux contributions s'ajoutent pour créer le photocourant  $I_{ph}$  qui s'additionne au courant inverse de la jonction. L'expression du courant traversant la jonction est alors :

$$I_d = I_s \left( e^{\frac{E_q}{nU_t}} - 1 \right) - I_{ph}$$

### 5.3. La photodiode PIN

La photodiode PIN est composée d'une zone P pouvant être traversée par la lumière, un isolant I et une zone N.

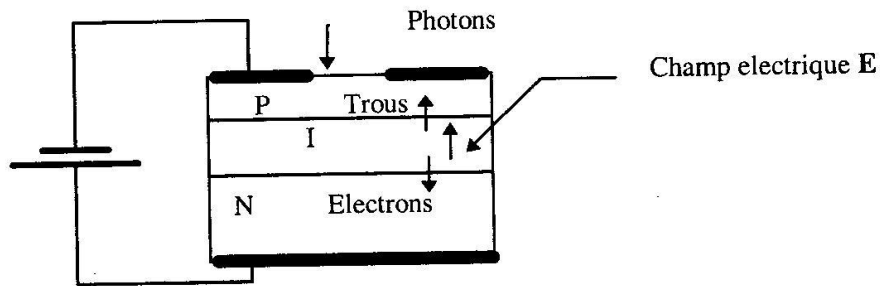


Figure 5.5. La photodiode PIN

### 5.3.1. Courbe $i_d = f(v_{ak})$

Les courbes de la figure 5.6 correspondant à  $I_d = f(V_{ak})$  pour différentes valeurs de flux lumineux, nous montrent qu'en l'absence de lumière, la photodiode se comporte comme une diode classique ayant une zone conductrice et une zone non conductrice.

Dès que des photons rencontrent la jonction PN, il y a création de paires électrons trous. Cette modification, de la quantité de porteurs électrons trous entraîne un courant dans la jonction PN, mais dans la zone qui était précédemment non conductrice.

Plus il y a de photons, plus le courant électrique circulant dans la jonction est intense.

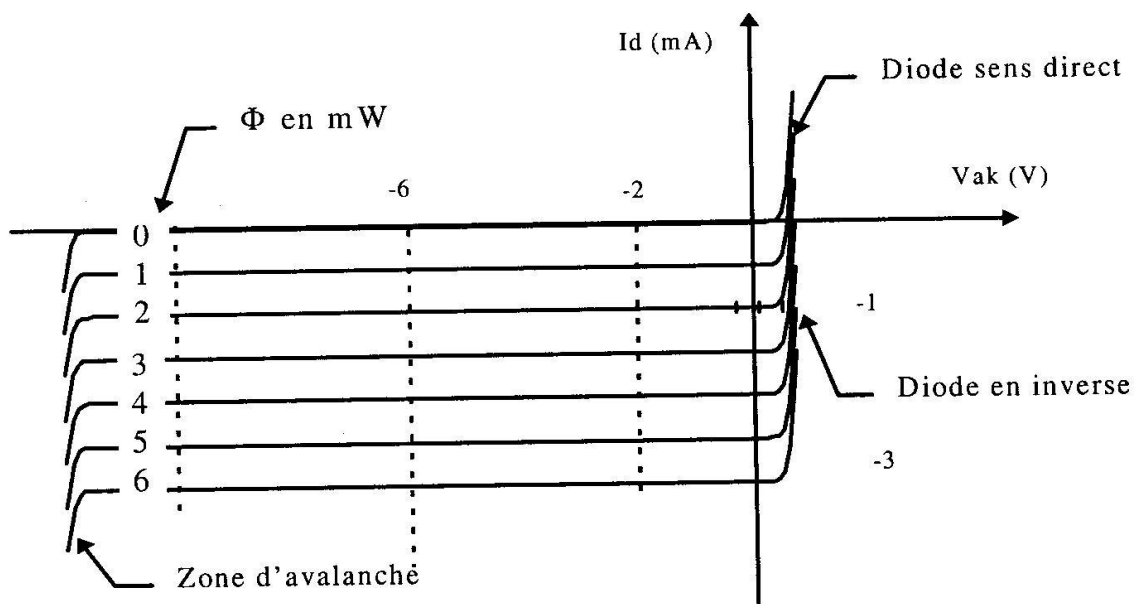
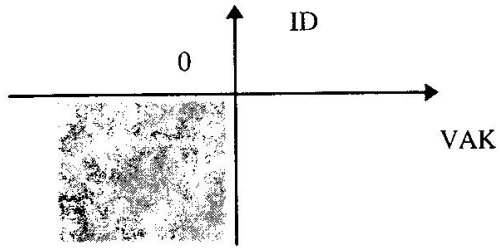
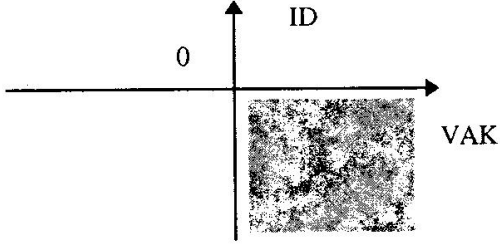


Figure 5.6. Caractéristique d'une photodiode

Ce graphique est composé de quatre quadrants : Il y a deux quadrants dans lesquels la photodiode fonctionne en effet photoélectrique :

	
<p><b>Le mode photoconducteur</b></p>	<p><b>Le mode photovoltaïque</b></p>
<p>Le mode photoconducteur correspond à un récepteur de courant, la photodiode est utilisée en détecteur.</p>	<p>Le mode photovoltaïque correspond à un générateur de courant. Ce mode est souvent utilisé en « cellule solaire ».</p>

### 5.3.3. Le mode photoconducteur

Pour le mode photoconducteur, la photodiode est polarisée en inverse. générateur de tension, composé d'une source de tension  $V$  et d'une résistance réalise cette polarisation.

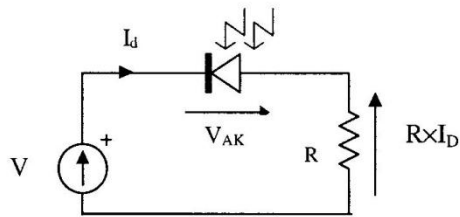


Figure 5.9. Polarisation d'une photodiode en mode photoconducteur

De ce schéma découle la droite de charge de la photodiode<sup>1</sup>. Le point de fonctionnement de la photodiode est situé à l'intersection de la droite de charge et de la caractéristique de la photodiode.

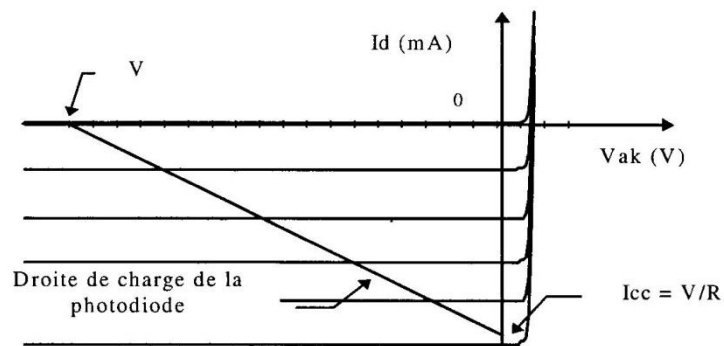


Figure 5.10. Droite de charge de la photodiode

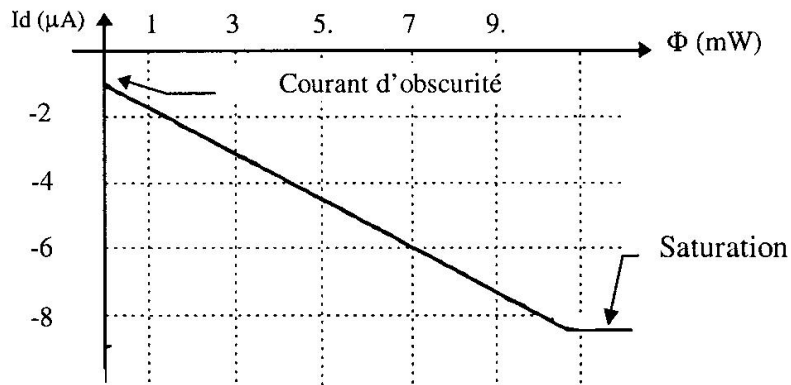
La droite de charge est définie par l'équation de la maille :  $V - R \cdot I_d = V_{KA}$  est représentée par la figure 5.10. Cette équation définit deux points remarquables :

- l'un étant l'intersection avec l'axe  $V_{AK}$  pour  $I_d = 0$  correspondant à  $V$ ,
- l'autre avec l'intersection avec l'axe  $I_d$  pour  $V_{AK} = 0$  soit  $I_{cc} = V/R$ .

La pente de cette droite est donc fonction de la valeur de la résistance de charge  $R$ . A partir de ce montage, il est possible d'étudier la variation de courant  $I_d$  en fonction du flux reçu. C'est ce qui est représenté par la figure 5.11.

Cette courbe est une droite croissante (négativement), le courant circulant dans la photodiode est proportionnel au flux reçu.

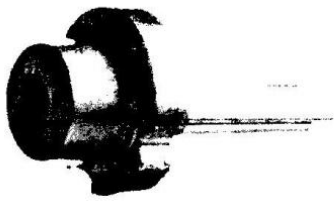
1. Rappelons que la droite de charge correspond au lieu des points de fonctionnement.



**Figure 5.11.** Courbe  $I_d = f(\Phi)$ . Le courant  $I_d$  est proportionnel au flux reçu

Si la résistance de charge est de forte valeur et que le flux est amené à croître, le point de fonctionnement de la photodiode peut sortir des limites de la droite de charge. Le courant prend une valeur maximale et devient constant même si le flux continue à augmenter. En ce cas, il n'y a plus linéarité (la figure 5.11 représente à droite une zone dans laquelle il n'y a plus de linéarité).





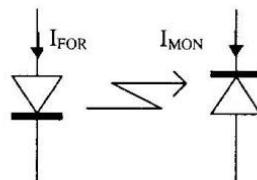
*Diode Laser de faible ou moyenne puissance associée à une photodiode de monitoring (doc. Sony)*



*Diode Laser pulsée équipée du boîtier de commande (doc. Power technologie).*

**Figure 4.1.** Exemples de diodes Laser

Le composant « diode Laser » regroupe deux composants : la diode d'émission Laser traversée par un courant  $I_{\text{forward}}$  (figure 4.2 gauche) et une photodiode, appelée diode de contrôle ou de monitoring (figure 4.2 droite), qui fournit un courant  $I_{\text{mon}}$  image de la puissance de sortie. Grâce à un asservissement, cette photodiode permet de réguler la puissance d'émission de la diode Laser.



**Figure 4.2.** Symbole du composant « diode Laser »

#### 4.1.1. Etude des caractéristiques du composant « diode Laser »

A partir des caractéristiques suivantes, il est possible de vérifier que la diode Laser commence à « Laser » lorsque le courant dépasse le « coude » de la caractéristique. La température a une grande influence sur la puissance de sortie de la diode Laser. En effet, si la température du composant croît, la puissance rayonnée diminue. Sans précautions particulières, la diode Laser ne peut conserver une puissance de sortie constante.

Les constructeurs proposent deux caractéristiques : la puissance de sortie en fonction du courant de commande  $I_f$  pour la diode Laser et le courant de

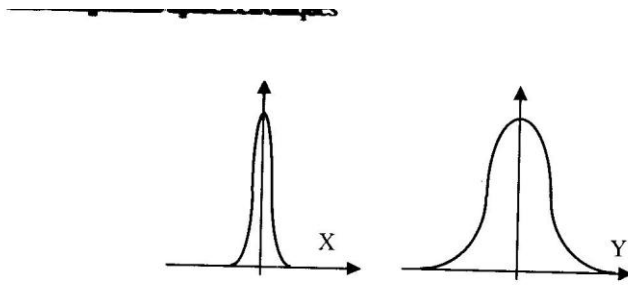


Figure 4.4. Diagramme d'émission d'une diode Laser

#### 4.1.3. Spectre d'une diode Laser

Suivant la technologie de la diode Laser, son spectre d'émission peut être de type monomode ou multimode<sup>1</sup>. S'il est multimode, et pour une puissance d'émission identique, l'ensemble des modes forme un spectre. L'enveloppe du spectre se déplace vers des longueurs d'onde croissantes lorsque la température augmente (figure 4.5).

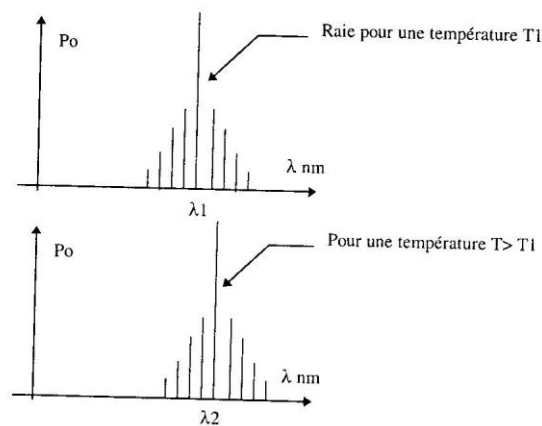


Figure 4.5. Spectre d'émission d'une diode Laser, influence de la température

#### 4.2. Alimentation électrique d'une diode Laser

Les principes d'alimentation sont identiques à ceux utilisés pour une LED classique. En effet, la diode Laser doit être polarisée en un point de repos défini par un courant  $I_{fo}$ .

1. Le spectre d'un laser monomode ne contient qu'une longueur d'onde alors que pour un laser multimode, il y a plusieurs longueurs d'ondes.

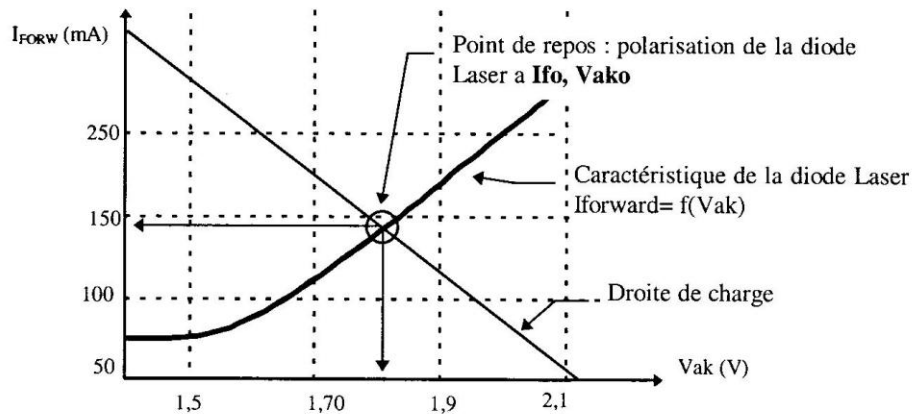


Figure 4.6. Courbe  $I_{forward} = f(V_{AK})$

Il existe donc une droite de charge (correspondant à la caractéristique du générateur).

#### 4.2.1. Exemple de mise en œuvre d'une diode Laser

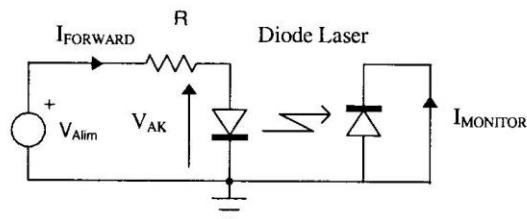


Figure 4.7. Schéma minimum d'alimentation d'une diode Laser

Pour réaliser correctement la mise en œuvre d'une diode Laser, il faut tout d'abord fixer la valeur de la puissance optique qu'elle doit émettre. De cette puissance optique, il est possible de définir, grâce aux caractéristiques du composant fournies par le constructeur, le point de fonctionnement de la diode. Ce point correspond, d'une part, au courant  $I_{FORWARD}$  et, d'autre part, à la tension  $V_{AK}$ .

De ces deux valeurs électriques, et connaissant la tension d'alimentation, il est possible de fixer la valeur de la résistance  $R$ .

Il est possible de réaliser une synthèse des trois caractéristiques du module diode Laser :  $I_{\text{MON}} = f(P_o)$ ,  $P_o = f(I_{\text{FORWARD}})$  et  $I_{\text{FORWARD}} = f(V_{\text{AK}})$ . Le graphe de la figure 4.8 illustre cette synthèse.

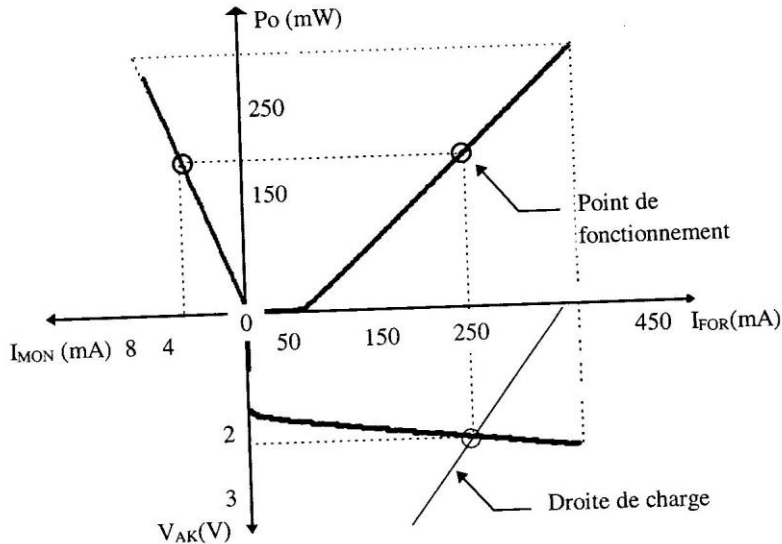


Figure 4.8. Ensemble des courbes de fonctionnement du module diode Laser

A partir de ce graphe (4.8), il est possible de retrouver les valeurs des différents points de fonctionnement  $I_{\text{FOR}0}$ ,  $P_o0$  et  $I_{\text{MON}0}$  reliés entre eux par les pointillés.

#### 4.2.2. Influence de la température sur les points de repos

La puissance électrique absorbée par la diode Laser, n'est pas entièrement émise sous forme optique. Une partie importante de cette puissance électrique est transformée en calories. Cela a pour conséquence d'augmenter la température de la jonction, puis de celle du boîtier. Dans le cas où ces calories excédentaires ne sont pas dissipées, la puissance optique émise s'atténue, puis s'estompe, même si le courant  $I_{\text{FORW}}$  est inchangé.

Le graphe 4.9 permet de vérifier que le point de repos est modifié lors de l'élévation de température du boîtier.

La valeur de  $P_o$  diminue, ce qui a pour effet d'atténuer le courant  $I_{\text{MON}}$  issu de la diode de monitoring. Il est évident que la diode Laser ne peut fonctionner

correctement dans ces conditions. Il faut donc prévoir lors de l'élaboration du montage, soit un radiateur pour dissiper les calories, ce qui est possible pour les montages de faible puissance, soit le refroidissement du composant en utilisant un module Peltier (voir chapitre 17).

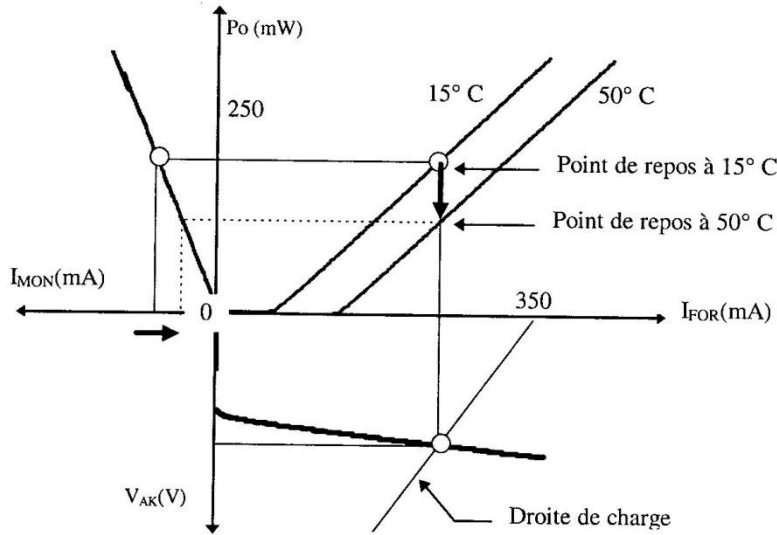


Figure 4.9. Influence de la température sur le point de repos

En complément à ces précautions d'ordre thermique, il est indispensable d'insérer la diode Laser dans un asservissement en puissance, afin de rendre constante la puissance optique émise (voir chapitre 5).

#### 4.2.3. Modulation de la diode Laser

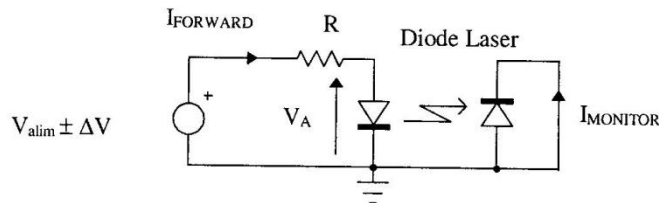


Figure 4.10. Modulation de la diode Laser