



## Télécommunication optique ( ELE107) Examen Final 2013-2014 - Semestre II

### SOLUTION

**Exercice 1 (15 points)** : Répondre très brièvement aux questions suivantes :

1. Comment on distingue les conducteurs, semi-conducteurs et les isolants ?
2. Donner 3 avantages des sources optoélectroniques.
3. Quel est le principe de l'émission de lumière dans les composants optoélectroniques.
4. Quelle tension faut-il appliquer à une diode laser pour réaliser l'inversion de population.
5. Que signifie le mot LASER.
6. Que veut dire courant de seuil d'une diode laser ?
7. Comment se comporte la diode laser au dessous de seuil.
8. Quelle est l'avantage de double hétérojonction dans une diode laser.
9. Quelle est la définition générale de l'efficacité quantique d'une source optoélectronique
10. Quelle est l'influence de température sur la caractéristique flux- courant de diode laser
11. Nommer 3 caractéristiques nécessaires que doit avoir une photodiode.
12. Que veut dire longueur d'onde de seuil d'une photodiode.
13. Que veut dire sensibilité spectrale d'une photodiode
14. Quels sont les facteurs qui limitent le temps de réponse d'une photodiode.
15. Quelles sont les sources principales de courant d'obscurité

#### Solution 1

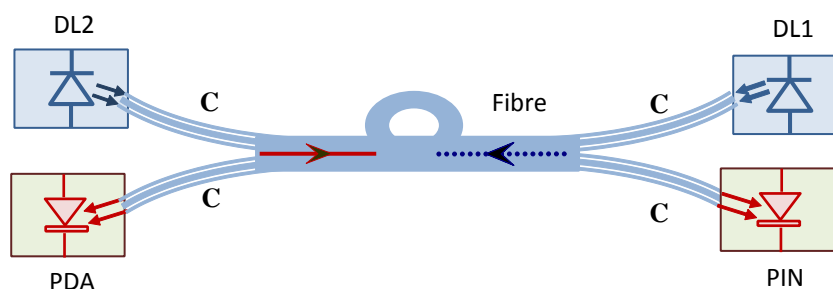
1. On distingue les conducteurs, semi-conducteurs et les isolants par la largeur de la bande interdite (gap).
2. Les avantages des sources optoélectroniques
  - petites dimensions en rapport avec celles du cœur des fibres optiques,
  - de la relative facilité que l'on a à moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant,
  - le spectre optique est relativement étroit
  - les longueurs d'onde disponibles compatibles avec les fenêtres spectrales des fibres optiques
  - faible consommation énergétique.
3. Le principe physique de l'émission de lumière dans tous les composants Optoélectroniques est l'électroluminescence.

4. L'inversion de population est réalisable avec la tension externe  $V$  si  $eV = E_g$ .
5. *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*
6. C'est l'intensité du courant à partir de laquelle déclenche l'effet laser
7. Au dessous d'une valeur de seuil du courant, la diode laser se comporte comme diode électroluminescente (l'émission est spontanée).
8. Le confinement des porteurs des charges, avec des courants de faible valeur, est réalisable en utilisant une structure à double hétérojonction.
9. L'efficacité quantique représente le rendement du système.  $\eta = \frac{\text{Nb des photons émis}}{\text{Nb des électrons injectés}}$
10. Décalage à droit
11. Une photodiode doit avoir
  - Une grande sensibilité à la longueur d'onde du signal incident.
  - Une grande bande passante (ou grande vitesse de réponse) et réponse en fréquence linéaire pour conserver la forme du signal d'entrée avec la variation brusque du flux des photons.
  - Un faible bruit additionnel donc haute fidélité de conversion.
  - Stabilité de caractéristique flux-courant, sans influence des conditions extérieures.
  - Haute efficacité quantique.
  - Faibles dimensions pour l'efficacité de couplage avec la fibre.
12. Seuls les photons d'énergie supérieure à la largeur de bande interdite du semi-conducteur sont absorbés de manière utile ce qui correspond à la longueur d'onde de seuil

$$\lambda_s \mu\text{m} = \frac{1.24}{E_g \text{ eV}}$$

13. La sensibilité spectrale d'une photodiode est définie par le photocourant généré par unité de puissance optique incidente  $S_\lambda = \frac{I_p}{P_i}$
14. Les principaux facteurs qui limitent le temps de réponse d'une photodiode sont :
  - le temps de transit des porteurs à travers la zone désertée.
  - la vitesse de diffusion des minoritaires à travers la couche qui reçoit la lumière
  - l'influence de la capacité de transition qui limite directement la bande passante de la diode.
15. Les deux sources principales de courant d'obscurité en polarisation inverse sont :
  - La génération thermique
  - La fuite de surface

### Exercice 2 (85 points) :



On transmet sur une même fibre optique :

- Dans un sens, un signal vidéo en bande de base (0.5 MHz), en utilisant à l'émission une diode laser (DL1) à  $\lambda_1 = 1.5 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda = 100 \text{ nm}$  couplant une puissance optique de 5 mW, à la réception une photodiode à avalanche de sensibilité spectrale  $S_\lambda = 0.8 \text{ A/W}$  et de facteur de gain  $M_p = 60$ .
- Dans l'autre sens, des données à bas débit, en utilisant à l'émission une diode laser à  $\lambda_2 = 0.85 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda = 100 \text{ nm}$  couplant une puissance optique de 0.5 mW, à la réception une photodiode PIN de sensibilité spectrale  $S_\lambda = 0.6 \text{ A/W}$

Les composantes optoélectroniques sont munies par des coupleurs (C) à fibres identiques, chacune de longueur 1 m, introduit une atténuation maximale équivalente à  $\alpha_C = 3 \text{ dB/km}$

La fibre optique à saut d'indice a pour caractéristiques : Longueur :  $L = 10 \text{ km}$ , Rayon du cœur :  $a = 10 \mu\text{m}$ , ouverture numérique ;  $ON = 0.38$ , différence relative des indices :  $\Delta = 3.3\%$ , et :

	à $\lambda_2 = 0.85 \mu\text{m}$	à $\lambda_1 = 1.5 \mu\text{m}$
Atténuation intrinsèque	2.5 dB/km	0.6 dB/km
Facteur de dispersion chromatique $M_d$	100 ps nm <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup>	2 ps nm <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup>

### 1. Etude de fibre :

- (a) Calculer les valeurs des indices de réfraction des couches cœur et gaine de la fibre. Quelle est la valeur de l'angle d'acceptance.
- (b) Combien des modes peut-on guider pour chaque longueur d'onde.
- (c) Calculer, pour chacune des sources, la largeur maximale de la bande passante de cette fibre en négligeant les dispersions du guide et de polarisation.
- (d) Cette fibre est-elle capable de transmettre le signal vidéo ? pourquoi ?

### 2. Photodiode :

- (a) Calculer l'intensité du photocourant généré par chacune des photodiodes.
- (b) Calculer l'efficacité quantique apparente de chacune des photodiodes.

### 3. DL1 :

La couche active de diode laser (DL1) est fabriquée à la base d'alliages quaternaires  $\text{GaInAsP}$ , dont la longueur est :  $200 \mu\text{m}$ , la permittivité diélectrique est  $\epsilon = 13,2$  et toutes les pertes intrinsèques sont équivalentes à  $\alpha_i = 600 \text{ m}^{-1}$ .

Dans les conditions normales, on relève la puissance optique (émis à l'extérieur) en fonction de l'intensité du courant appliqué :

$I \text{ mA}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$P \text{ mW}$	0.1	0.15	0.2	0.25	1.4	2.8	4.2	5.6	7	8.4	9.8	11.2

- (a) Déterminer l'expression de facteur de gain de seuil  $g_s$  et calculer sa valeur numérique.
- (b) Si les informations sont injectées dans la fibre sous forme des impulsions de durée de 10 ns dont l'énergie optique est uniformément répartie sur la toute la section de la fibre. Combien des photons doit contenir chaque impulsion.
- (c) Tracer le graphe de  $P$  en fonction de  $I$
- (d) Déduire par deux méthodes différentes l'intensité du courant de seuil.
- (e) Quelle est l'efficacité quantique de diode

## Solution 2

### 1. Etude de fibre :

$$(a) \Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{(ON)^2}{2n_1^2} \Rightarrow n_1 = \frac{ON}{\sqrt{2\Delta}} = \frac{0.38}{\sqrt{2 \times 3.3 \times 10^{-2}}} = 1.4791 \simeq 1.48$$

$$ON^2 = n_1^2 - n_2^2 \Rightarrow n_2 = \sqrt{n_1^2 - (ON)^2} = \sqrt{(1.4791)^2 - (0.38)^2} = 1.4295 \simeq 1.43$$

$$\alpha_c = \arcsin ON = \arcsin(0.38) = 0.38980 \text{ rad} = 22.334^\circ.$$

$$(b) M = \frac{V^2}{2} = \frac{(kaON)^2}{2} = 2 \left( \frac{\pi a ON}{\lambda} \right)^2$$

$$\lambda_1 = 1.5 \mu\text{m} \rightarrow M_1 = \left\lfloor 2 \left( \frac{\pi a ON}{\lambda_1} \right)^2 \right\rfloor = \left\lfloor 2 \left( \frac{\pi \times 10 \times 0.38}{1.5} \right)^2 \right\rfloor = 126 \text{ modes}$$

$$\lambda_2 = 0.85 \mu\text{m} \rightarrow M_2 = \left\lfloor 2 \left( \frac{\pi a ON}{\lambda_2} \right)^2 \right\rfloor = \left\lfloor 2 \left( \frac{\pi \times 10 \times 0.38}{0.85} \right)^2 \right\rfloor = 394 \text{ modes}$$

### (c) Dispersion intermodale :

$$\Delta\tau_n = \frac{Ln_1\Delta}{c} = \frac{10 \times 10^3 \times 1.48 \times 3.3 \times 10^{-2}}{3 \times 10^8} = 1.628 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$\Delta\tau_n$  est indépendante de la source.

Calculons la dispersion chromatique pour chacune des sources :

$\Delta\tau_m = M_d L \Delta\lambda$  et on a  $\Delta\lambda = 100 \text{ nm}$  pour les deux sources

- Pour  $\lambda_1 = 1.5 \mu\text{m}$  :  $M_d = 2 \text{ ps nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$   
 $\Rightarrow \Delta\tau_{m1} = 2 \times 20 \times 100 = 4000 \text{ ps} = 4 \times 10^{-9} \text{ s}$

- Pour  $\lambda_2 = 0.85 \mu\text{m}$  :  $M_d = 100 \text{ ps nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$   
 $\Rightarrow \Delta\tau_{m2} = 100 \times 20 \times 100 \times 10^{-12} = 2.0 \times 10^{-7} \text{ s}$

La dispersion totale est :  $\Delta\tau = \sqrt{\Delta\tau_n^2 + \Delta\tau_m^2}$  et  $B = \frac{1}{\Delta\tau}$

-  $\lambda_1 \rightarrow \Delta\tau_1 = \sqrt{(1.628 \times 10^{-6})^2 + (4 \times 10^{-9})^2} = 1.628 \times 10^{-6}$

$$\Rightarrow B_{1\text{max}} = \frac{1}{1.628 \times 10^{-6}} =$$

-  $6.1425 \times 10^5 \text{ Hz} = x \text{ MHz}$ , Solution is : 0.614 25

-  $\lambda_2 \rightarrow \Delta\tau_2 = \sqrt{(1.628 \times 10^{-6})^2 + (2.0 \times 10^{-7})^2} = 1.6402 \times 10^{-6}$

$$\Rightarrow B_{2\text{max}} = \frac{1}{1.6402 \times 10^{-6}} \text{ Hz} = 6.0968 \times 10^5 \text{ Hz}$$

(d) La fibre est capable de transmettre le signal vidéo puisque sa bande passante est plus grande que celle du signal vidéo

### 2. Photodiode :

(a) Le signal émis par les sources se propage dans les coupleurs ( $\alpha_C = 3 \text{ dB/km}$ ) et dans la fibre ( $\alpha_F = 0.6 \text{ dB/km}$ ) :

$$P_S = P_e \times 10^{-\frac{2\alpha_C L_C}{10}} \times 10^{-\frac{\alpha_F L_F}{10}}$$

- La puissance incidente sur PDA est :

$$P_{S1} = 5 \times 10^{-\frac{2 \times 3 \times 0.001}{10}} \times 10^{-\frac{0.6 \times 10}{10}} = 5 \times 10^{-0.0006} \times 10^{-0.6}$$

$$= 5 \times 0.99862 \times 0.25119 = 1.2542 \text{ mW}$$

L'intensité du photocourant est  $I_p = S_\lambda P_{S1} = 0.8 \times 1.2542 = 1.0034 \text{ mA}$

L'intensité du courant multiplier est  $I_M = M_p I_p = 60 \times 1.0034 = 60.204 \text{ mA}$

- La puissance incidente sur PIN est :

$$P_{S2} = 0.5 \times 10^{-\frac{2 \times 3 \times 0.001}{10}} \times 10^{-\frac{0.6 \times 10}{10}} = 0.5 \times 10^{-0.0006} \times 10^{-0.6}$$

$$= 0.5 \times 0.99862 \times 0.25119 = 0.12542 \text{ mW}$$

L'intensité du photocourant est  $I_p = S_\lambda P_{S2} = 0.6 \times 0.12542 = 7.5252 \times 10^{-2} \text{ mA}$

$$(b) \eta_a = \frac{N_e}{N_p} = \frac{I_p h\nu}{eP} = \frac{I_p hc}{P e\lambda} = \frac{I_p 1.24}{P \lambda_{\mu\text{m}}} = S_\lambda \frac{1.24}{\lambda_{\mu\text{m}}}$$

$$\text{- Pour la PDA : } \eta_a = 0.8 \times \frac{1.24}{1.5} = 0.66133$$

$$\text{- Pour la PIN : } \eta_a = 0.6 \times \frac{1.24}{0.85} = 0.87529$$

### 3. DL1 :

(a) Question de cours, à démontrer la formule :  $g_s = \alpha_i + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R}$

$$n = \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{13.2} = 3.6332 \rightarrow R = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \left( \frac{3.6332-1}{3.6332+1} \right)^2 = 0.323$$

$$g_s = 600 + \frac{1}{200 \times 10^{-6}} \ln \left( \frac{1}{0.323} \right) = 6250.5 \text{ m}^{-1}$$

$$(b) N_p = \frac{E}{h\nu} = \frac{P \times \delta t}{h\nu} = \frac{P \times \delta t \times \lambda}{hc}$$

$$= \frac{0.6 \times 10^{-3} \times 10 \times 10^{-9} \times 1.5 \times 10^{-6}}{6.6260755 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 4.5276 \times 10^7$$

(c) Graphe : Voir page 6

(d) Le graphe de  $P(I)$  montre que  $I_s \simeq 20 \text{ mA}$

$$\text{d'autre part } P_e = \frac{1}{2} \eta_i \frac{hc}{\lambda e} \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} (I - I_s) = \frac{\eta_i 1.24 \alpha_m}{2 \lambda_{\mu\text{m}} g_s} (I - I_s)$$

$\eta_i$  est l'efficacité interne.

$I \text{ mA}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$P \text{ mW}$	0.1	0.15	0.2	0.25	1.4	2.8	4.2	5.6	7	8.4	9.8	11.2

$$\text{Soit : } P_1 = 7 = K(45 - I_s)$$

$$P_2 = 11.2 = K(60 - I_s)$$

$$\text{donc : } \frac{P_1}{P_2} = \frac{7.2}{11} = \frac{(45 - I_s)}{(60 - I_s)}$$

$$7(60 - I_s) = 11.2(45 - I_s) \Rightarrow$$

$$I_s = \frac{11.2 \times 45 - 7 \times 60}{11.2 - 7} = 20.0 \text{ mA}$$

$$(e) \text{ On a : } P_e = \frac{\eta_i 1.24 \alpha_m}{2 \lambda_{\mu\text{m}} g_s} (I - I_s) = \frac{\eta_e 1.24}{2 \lambda_{\mu\text{m}}} (I - I_s)$$

$$\Rightarrow \eta_i = \frac{2g_s \lambda P_e}{1.24 \alpha_m (I - I_s)} = \frac{2 \times 6250.5 \times 1.5 \times P_e}{1.24 \times 5650.5 \times (I - 20)} = \frac{2.6763 P_e}{I - 20}$$

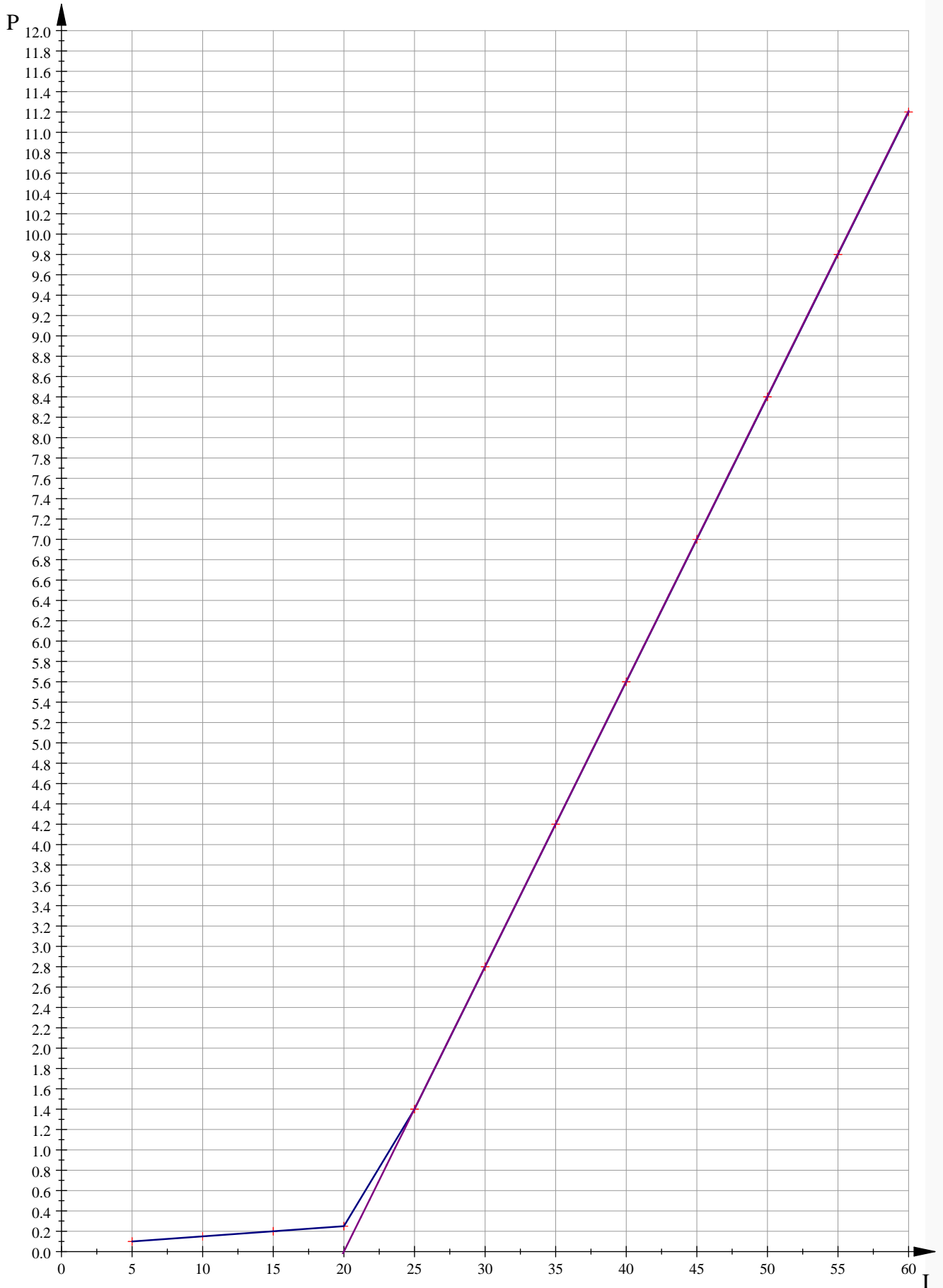
D'après le tableau :

$$\text{Pour } I = 55, P_e = 9.8 \text{ alors : } \eta_i = 2.6763 \frac{9.8}{55 - 20} \approx 75\%$$

$$\text{Pour } I = 40, P_e = 5.6 \text{ alors } \eta_i = 2.6763 \frac{5.6}{40 - 20} \approx 75\%$$

Si on demande de calculer l'efficacité externe :

$$\text{On a } \eta_e = \eta_i \frac{\alpha_m}{g_s} = 0.75 \times \frac{5650.5}{6250.5} = 0.67801$$



Graphe de  $P(I)$  de DL2