

# LA FIBRE OPTIQUE<sup>†</sup>

## OBJECTIFS

- Coupler (injecter) de façon optimale un faisceau laser dans une fibre optique.
- Identifier les différentes caractéristiques de propagation de la lumière d'une fibre optique monomode, d'une fibre optique légèrement multimode et d'une fibre optique hautement multimode.
- Utiliser Fiji pour analyser des images.
- Ouvrir un fichier de données dans Python.
- Produire des figures de qualité à l'aide de Python.

## À FAIRE AVANT LA SÉANCE DE LABORATOIRE

Installez Fiji et écoutez la vidéo qui présente le logiciel (sur le Portail).

Écoutez la vidéo pour apprendre à *walk the beam* (sur le Portail).

Lisez ce document.

Faites les calculs préalables dans la section EXPÉRIMENTATION.

## RÉFÉRENCES POUR LA THÉORIE

A.H. Cherin, "An Introduction to Optical Fibers", McGraw-Hill (1983), Chapitre 5 "The Step-Index Fiber".

P.A. Bélanger, "Optical Fiber Theory", World Scientific (1993), Chapitre 4 "The Step-Index Fiber".

## THÉORIE

### A) Ouverture numérique (NA) d'une fibre à saut d'indice

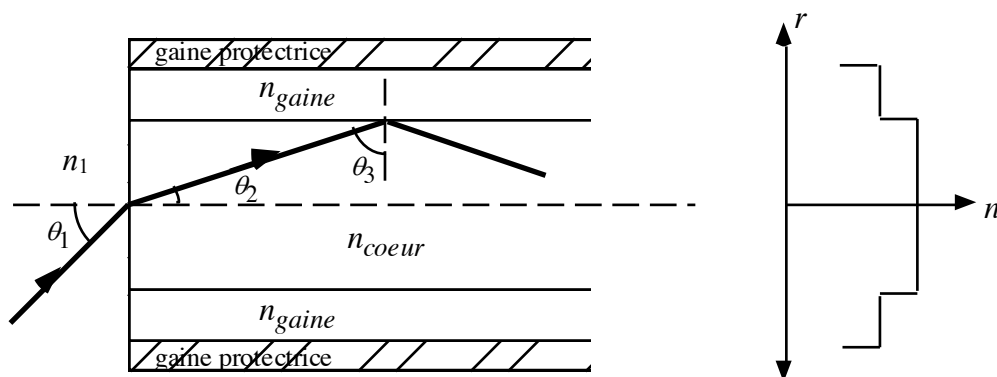


Figure 1 : Schéma de la propagation d'un rayon dans une fibre optique vue de côté.

<sup>†</sup> Expérience et protocole préparés par Valérie Pineau Noël, M. Réal Tremblay, MM Guy Rousseau et Daniel Gingras.

L'ouverture numérique (NA) représente une mesure de la quantité maximum de lumière qu'un système optique peut accepter. Elle correspond au produit de l'indice de réfraction du milieu par le sinus de l'angle du rayon extrême dans ce milieu, i.e. :

$$NA = n_i \sin(\theta_{i \max})$$

Dans le cas d'une fibre optique,  $\theta_1 = \theta_{\max}$  lorsque  $\theta_3 = \theta_{\text{critique}} = \theta_c$

$$NA = n_1 \sin(\theta_{1 \max}) = n_{\text{coeur}} \sin(\theta_2) = n_{\text{coeur}} \sin(90^\circ - \theta_c) = n_{\text{coeur}} \cos(\theta_c) = n_{\text{coeur}} \sqrt{1 - \sin^2(\theta_c)}$$

mais comme  $\sin(\theta_c) = \frac{n_{\text{gaine}}}{n_{\text{coeur}}}$  alors

$$\Rightarrow NA = n_{\text{coeur}} \sqrt{1 - \left( \frac{n_{\text{gaine}}}{n_{\text{coeur}}} \right)^2} = \sqrt{n_{\text{coeur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2}$$

D'autre part, on sait que la fréquence normalisée (V) est donnée par

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_{\text{coeur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2}$$

alors

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} NA$$

où  $a$  est le rayon du cœur de la fibre et  $\lambda_0$  est la longueur d'onde du faisceau dans le vide.

## B) Approximation gaussienne

Pour un laser He-Ne, l'intensité du mode fondamental a un profil spatial gaussien, c'est-à-dire que l'intensité en fonction de la distance radiale suit la relation

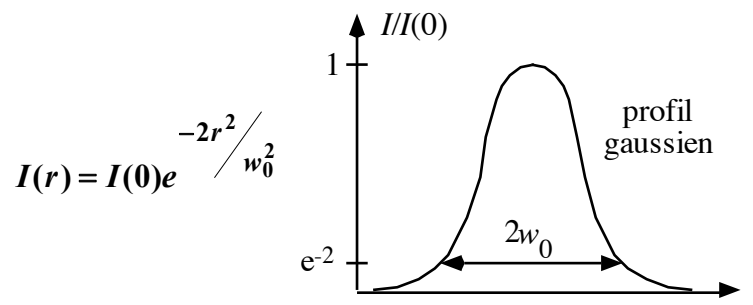


Figure 2

où  $I(0)$  est l'intensité au centre du faisceau et  $w_0$  est le rayon du faisceau lorsque l'intensité est  $1/e^2$

fois  $I(0)$ . Dans une fibre optique, le profil spatial du mode fondamental  $LP_{01}$  se rapproche d'un profil gaussien quand la longueur d'onde du faisceau est près de la longueur d'onde de coupure du prochain mode supérieur. La figure 3 montre le profil spatial du mode  $LP_{01}$  et un profil gaussien dans un tel cas (ceci correspond à un  $V$  légèrement inférieur à 2.405).

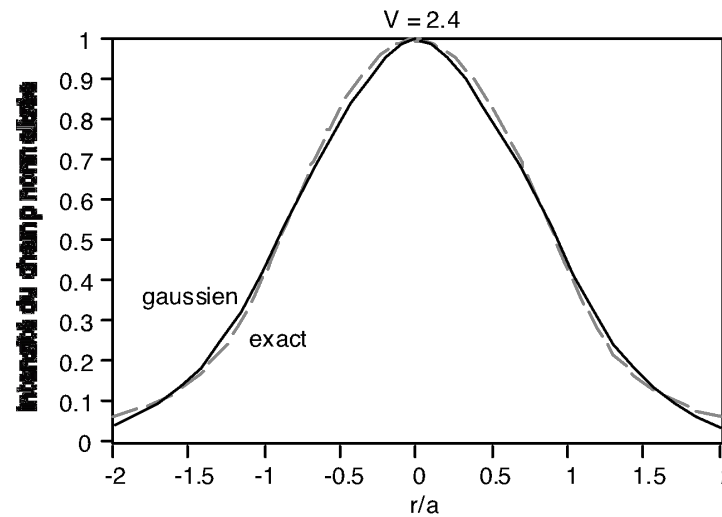


Figure 3

La figure 4 montre aussi le profil spatial du mode  $LP_{01}$  et un profil gaussien mais pour  $V=1.8$ . On voit que la différence entre les deux profils est plus importante qu'à la figure 3.

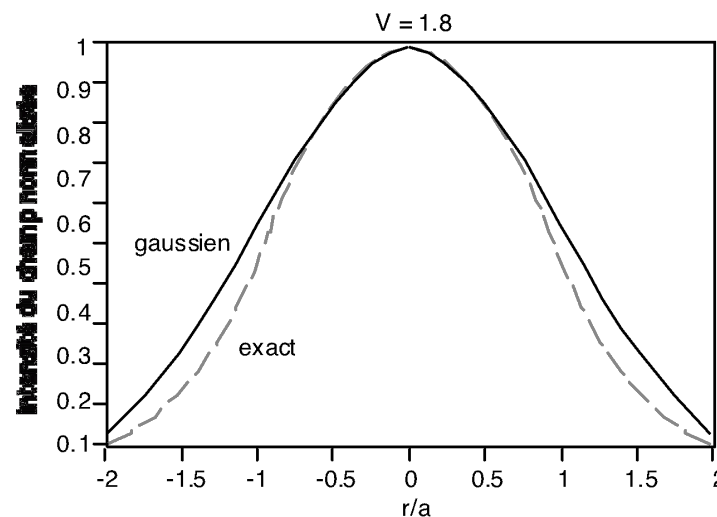


Figure 4

En général, il est acceptable d'utiliser l'approximation gaussienne pour  $2 < V < 2.405$ .

La taille du profil gaussien du mode fondamental de la fibre est donnée par l'approximation

$$w_0 = a \left( 0.65 + 1.619V^{-1.5} + 2.879V^{-6} \right)$$

où  $a$  est le rayon du cœur de la fibre et  $V$  est la fréquence normalisée décrite plus haut.

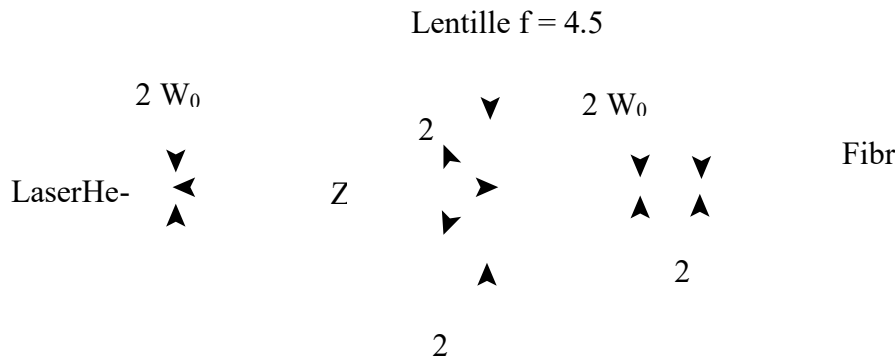
Bien souvent, le rayon du cœur n'est pas donné. Cependant, on peut facilement le calculer à partir de la longueur d'onde de coupure et de l'ouverture numérique qui sont deux paramètres généralement donnés dans les fiches de spécifications. À partir de la formule de la fréquence normalisée, on trouve :

$$V_c = \frac{2\pi a}{\lambda_c} NA$$

où  $V_c = 2.405$  est une constante et  $\lambda_c$  est la longueur d'onde de coupure.

Pour une longueur d'onde donnée, si  $V < V_c$ , la fibre est monomode et si  $V > V_c$ , la fibre est multimode (voir figure 7 de l'annexe A).

### C) Couplage d'un faisceau laser dans une fibre



**Figure 5**

Lorsque l'on veut injecter un laser dans une fibre optique avec un maximum d'efficacité, il est nécessaire de placer le bout de la fibre à l'étranglement du faisceau laser, c'est-à-dire là où son diamètre est le plus petit (voir figure 5). La formule utilisée pour calculer l'efficacité d'injection est

$$T = \left( \frac{2w_1w_2}{w_1^2 + w_2^2} \right)^2$$

où  $w_1$  et  $w_2$  sont respectivement la taille du faisceau laser incident sur la fibre et la taille du mode de la fibre. Attention ! Cette formule est bonne seulement lorsque le bout de la fibre est placé à l'étranglement du faisceau laser.

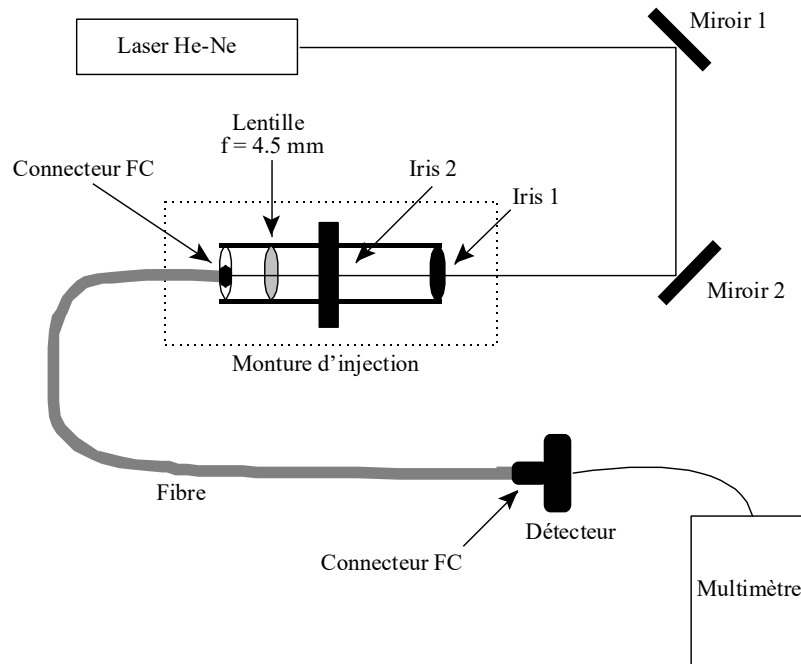
En général, le faisceau laser est beaucoup trop gros pour que le couplage soit acceptable. On

utilise alors une lentille pour focaliser le faisceau laser dans la fibre. En choisissant une lentille appropriée, il est possible de trouver la distance laser/lentille ( $Z$ ) pour laquelle la taille du faisceau laser après la lentille ( $w_{0\text{ image}}$ ) est exactement la même que la taille du mode de la fibre ( $w_{\text{LP01}}$ ), ce qui nous donne une efficacité d'injection théorique de 100%. Les formules utilisées pour trouver la distance optimale sont :

$$w_{\text{objectif}} = w_{0\text{laser}} \sqrt{1 + \left( \frac{Z\theta}{w_{0\text{laser}}} \right)^2} \quad \text{et} \quad w_{0\text{image}} = \frac{\lambda f}{\pi \cdot w_{\text{objectif}}}$$

## EXPÉRIMENTATION

**Schéma de base du montage :**



**Figure 6**

Le montage comprend une source laser He-Ne ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ) d'environ 1.5 mW dont le diamètre du faisceau à la sortie du laser ( $2W_{0\text{laser}}$ ) est 0.63 mm et la divergence du faisceau ( $2\theta$ ) est 1.3 mrad. Les deux miroirs et les deux iris servent à aligner le faisceau laser dans la fibre optique. La lentille, ayant une longueur focale d'environ 4.5 mm, focalise le faisceau laser sur le bout de la fibre. Un détecteur (photodiode) branché sur un multimètre permet de lire la puissance à la sortie de la fibre.

### Calcul préalable au laboratoire :

En utilisant les caractéristiques du laser ( $2W_{0\text{laser}}$ ,  $2\theta$  et  $\lambda$ ), de la lentille ( $f$ ) et de la fibre ( $\lambda_c$  et NA qui sont données dans les fiches de spécifications placées en annexe B) ainsi que les

formules données dans la partie théorique (formules encadrées), tracer la courbe de l'efficacité de couplage (T) en fonction de la distance (Z) pour la fibre monomode (FS-SN-3224). *Quelle serait la distance optimale pour cette fibre?*

**Au laboratoire :**

1. Produisez le montage de la figure 6. Les composantes que vous avez besoin devraient être à portée de main. Au besoin, n'hésitez pas à aller fouiller dans les tiroirs à l'entrée du laboratoire et demander de l'aide au responsable.
2. Prenez la mesure du signal à l'entrée de la fibre. La photodiode et le multimètre donnent une mesure en ampère. Pour obtenir la puissance en watts, utilisez la courbe de calibration de la photodiode (placée à l'annexe B).  
*Est-ce la même valeur que celle donnée par le fabricant?*
3. Brancher la fibre hautement multimode à la monture d'injection et à la photodiode.
4. Calculer le paramètre V pour la nouvelle fibre. La fibre est-elle bien multimode à la longueur d'onde du laser He-Ne?
5. Injectez le faisceau laser dans la fibre optique. Suivez la vidéo du Portail de cours qui vous présente la technique *walk the beam*. Ajustez les miroirs jusqu'à un couplage optimal.  
*Comment pouvez-vous vérifier que votre couplage est optimal?*  
*Est-ce que la valeur mesurée correspond à la valeur théorique de la courbe?*
6. Lorsque votre couplage est optimal, prenez une photo avec votre téléphone cellulaire du patron que vous observez sur un écran à la sortie de la fibre.

**À cette étape, allez montrer votre photo à un responsable.**

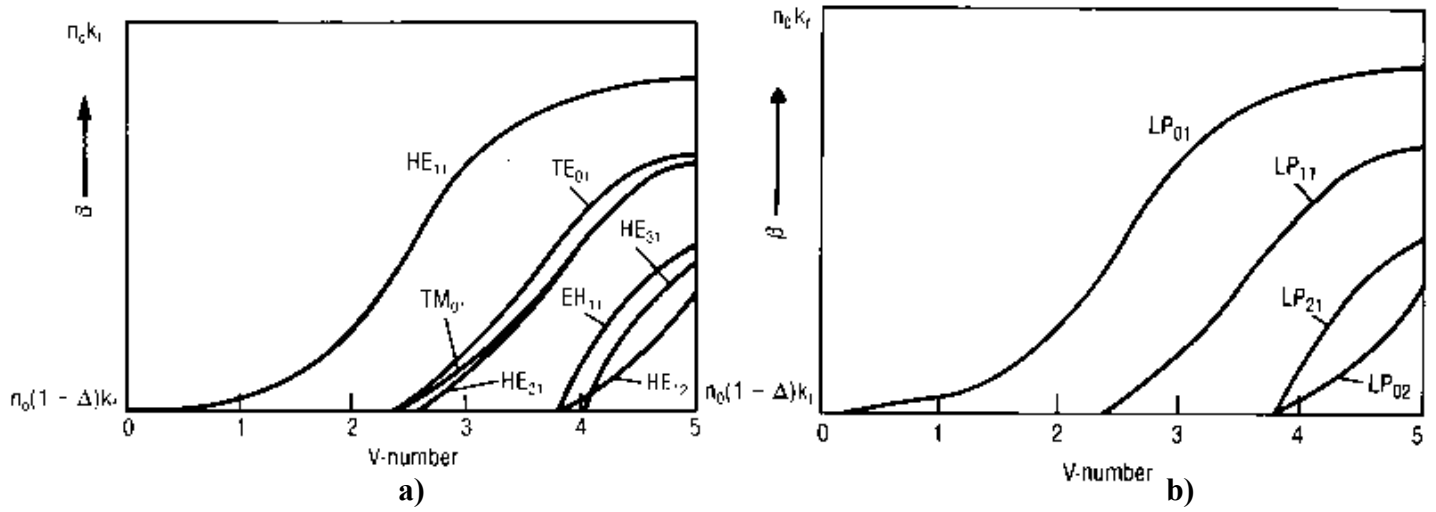
*Est-ce que vous croyez que votre photo est de bonne qualité?*

7. Utilisez Fiji pour extraire des données de l'image prise en 6.
8. Utilisez Python pour produire des graphiques.
9. Refaite les étapes 2 et 6 pour la fibre multimode, puis la fibre monomode.
10. Pour la fibre monomode, mesurer la distance laser-lentille sur le montage et comparez avec la valeur optimale calculée précédemment. En se fiant à la courbe de T vs Z tracée précédemment, trouver l'efficacité d'injection « théorique » que vous devriez obtenir pour la distance mesurée sur le montage.  
*Pourquoi ce calcul n'est-il pas valide pour les fibres multimodes?*
11. Lorsque vous avez terminé, défaites votre montage et rangez les composantes que vous avez utilisées.

**Quelques questions de réflexion lors de votre expérience. N'hésitez-pas à faire usage de votre curiosité et de jouer avec le montage :**

- Dans une fibre multimode, pourquoi est-ce que la variation de la position et de l'angle d'entrée du faisceau laser influencent le patron observé à la sortie?
- Que se passe-t-il si vous déplacez la fibre en observant le patron à la sortie pour chaque type de fibre? (appliquez de légères(!) tensions, torsions, déformations)
- Quelles sont les différences visuelles entre les patrons de sortie des différentes fibres optiques? Pourquoi y-a-t-il des différences?
- Quels sont les avantages et les inconvénients d'utiliser une fibre multimode plutôt d'une fibre monomode?
- Quels sont les modes observés dans les différents patrons à la sortie des fibres optiques (voir annexe I)?
- Que se passe-t-il si vous utiliser une lentille d'injection avec une focale différente?

## ANNEXE I



Designation of LP modes	Traditional designation and number of modes	Number of degenerate modes
$LP_{01}$	$HE_{11} \times 2$	2
$LP_{11}$	$TE_{01}, TM_{01}, HE_{21} \times 2$	4
$LP_{21}$	$EH_{11} \times 2, HE_{31} \times 2$	4
$LP_{02}$	$HE_{12} \times 2$	2
$LP_{31}$	$EH_{21} \times 2, HE_{41} \times 2$	4
$LP_{12}$	$TE_{02}, TM_{02}, HE_{22} \times 2$	4
$LP_{41}$	$EH_{31} \times 2, HE_{51} \times 2$	4
$LP_{22}$	$EH_{12} \times 2, HE_{32} \times 2$	4
$LP_{63}$	$HE_{13} \times 2$	2
$LP_{51}$	$EH_{41} \times 2, HE_{61} \times 2$	4

c)

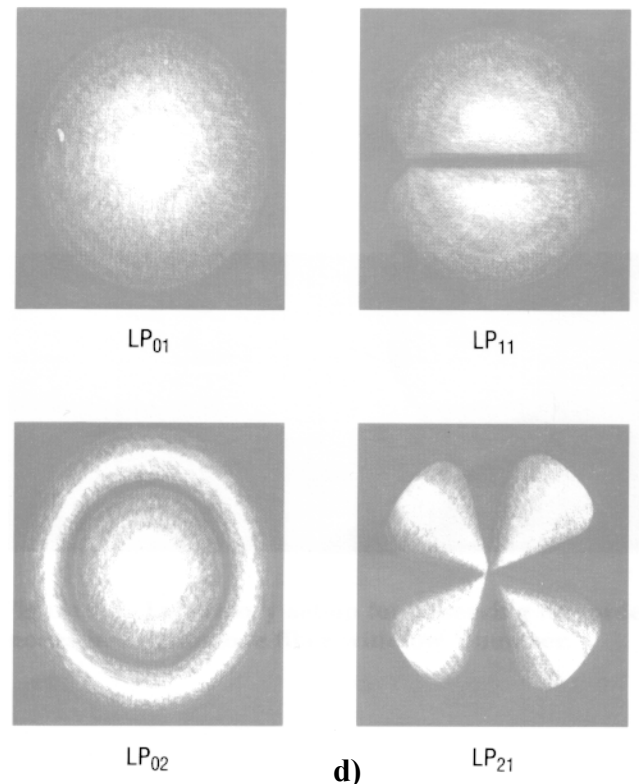


Figure 7 : Relation de dispersion  $\beta$  vs V : solution exacte (figure a) et solution approximative (figure b). Liens entre les modes LP, HE et EH (figure c). Distribution en intensité de quatre premiers modes LP d'une fibre à saut d'indice (figure d).



**ANNEXE II****Caractéristiques des fibres :****Fibre monomode*****Thorlabs FS-SN-3224***

Design Wavelength: 630 nm  
NA: 0.12  
Cladding  $\pm 2\mu\text{m}$ : 125  $\mu\text{m}$   
Jacket  $\pm 15\mu\text{m}$ : 250  $\mu\text{m}$   
Cut-Off Wavelength: 620 nm  
Attenuation Typical: 10 dB/km

**Fibre légèrement multimode*****Newport F-SS***

Operating Wavelength (nm) : 1550  
Index Profile : Step  
NA : 0.11  
Cladding Dia. ( $\mu\text{m}$ ) :  $125 \pm 2$   
Coating Dia. ( $\mu\text{m}$ ) :  $245 \pm 15$   
Maximum Att. (dBkm) : 0.4  
Cut-off Wavelength (nm) :  $1250 \pm 60$

## Fibre hautement multimode

### *Newport F-MLD*

Operating Wavelength (nm) : 850/1300  
Index Profile : Graded  
NA : 0.29  
Cladding Dia. ( $\mu\text{m}$ ) :  $140 \pm 3$   
Core Dia. ( $\mu\text{m}$ ) :  $100 \pm 4$   
Attenuation (dBkm) : 5.0/3.0 @850/1300 nm

### *Caractéristique des photodiodes :*

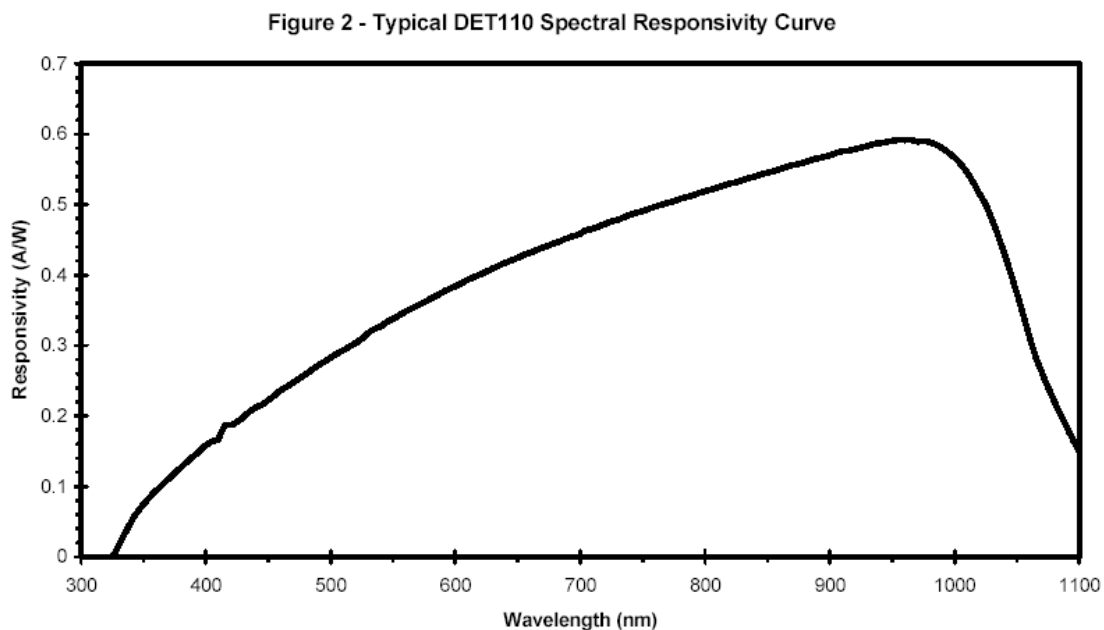


Figure 8 : Caractéristiques de la photodiode THORLABS DET110