

**Compétences visées:**

- Savoir définir l'impédance caractéristique d'une ligne comme étant l'impédance à placer en bout de ligne permettant de l'adapter.
- Connaître les effets d'une ligne adaptée, en court-circuit ou coupée sur le signal en entrée de la ligne.
- Savoir déterminer la longueur d'une ligne de transmission ou localiser un défaut à partir d'un chronogramme du signal en entrée d'une ligne non adaptée.
- Connaître les principes de propagation de la lumière dans une fibre optique : réfraction et réflexion totale.
- Savoir déterminer les caractéristiques principales d'une fibre optique à partir d'une documentation technique : type de fibre, longueur(s) d'onde, atténuation, bande passante, angle d'ouverture, débit maximum.

## Table des matières

<b>I</b>	<b>Généralités sur les lignes de transmission</b>	<b>3</b>
A	Définition et rôle de l'impédance caractéristique . . . . .	3
A-1	Impédance d'une ligne . . . . .	3
A-2	Vitesse de propagation . . . . .	4
B	Effets de terminaison d'une ligne . . . . .	4
C	Analyse temporelle des réflexions . . . . .	4
C-1	Ligne ouverte . . . . .	5
C-2	Ligne court en court circuit . . . . .	5
C-3	Mesure de la longueur d'une ligne . . . . .	6
C-4	Localisation d'un défaut . . . . .	8
<b>II</b>	<b>La fibre optique : une ligne de transmission optique</b>	<b>9</b>
A	Notions de base en optique . . . . .	9
A-1	- Le principe de Fermat . . . . .	9
A-2	Vitesse de la lumière . . . . .	9
B	L'indice optique . . . . .	10
C	Vocabulaire d'optique . . . . .	10
D	Lois de Snell-Descartes . . . . .	11
D-1	Cas général . . . . .	11
D-2	Réfraction à l'interface d'un dioptre . . . . .	11
D-3	La réflexion totale . . . . .	12
E	Principe de fonctionnement de la fibre optique . . . . .	14
E-1	Différents types de fibres . . . . .	14
E-2	Fibre optique à saut d'indice . . . . .	15
F	Grandeurs caractéristiques d'une fibre optique . . . . .	15
F-1	Longueur(s) d'onde . . . . .	15
F-2	Atténuation . . . . .	16
F-3	Bande passante . . . . .	16
F-4	Angle d'ouverture et ouverture numérique . . . . .	17

## I Généralités sur les lignes de transmission

### A Définition et rôle de l'impédance caractéristique

#### A-1 Impédance d'une ligne

##### Définition : Impédance caractéristique

L'**impédance caractéristique**  $Z_c$  d'une ligne de transmission est l'impédance que doit présenter la charge située à l'extrémité de la ligne pour que celle-ci soit **adaptée**.

Elle se calcule également à partir de la formule :

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_l}{C_l}}$$

où :

- $L_l$  est l'inductance linéique de la ligne de transmission, exprimée en henrys par mètre (H/m),
- $C_l$  est la capacité linéique de la ligne de transmission, exprimée en farads par mètre (F/m).

##### Propriété : Conséquence de l'adaptation

Lorsque la charge en bout de ligne est égale à l'impédance caractéristique, **aucune onde réfléchie ne revient vers la source** : toute l'énergie est transmise à la charge.

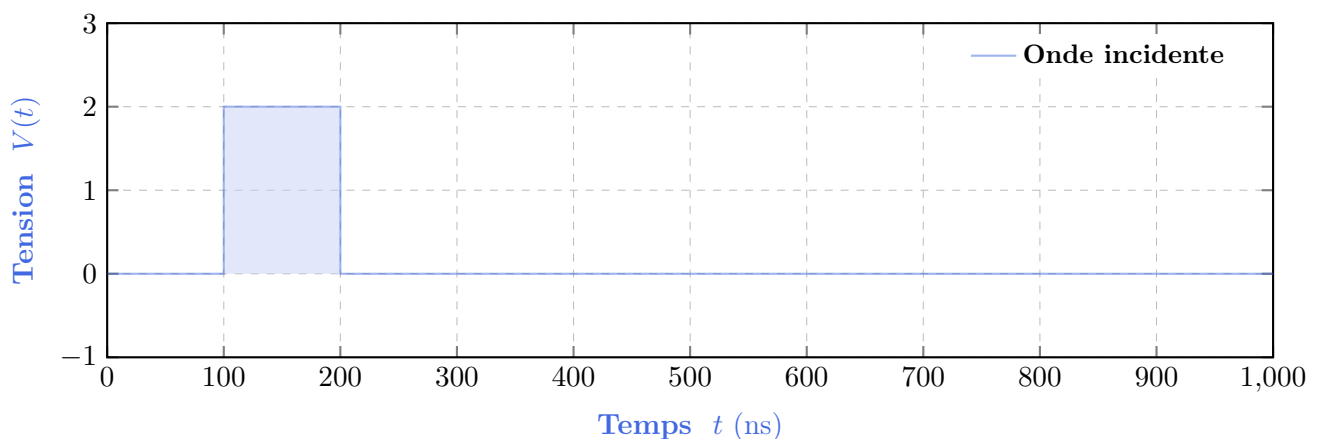


FIGURE 1 – Chronogramme d'une impulsion sur une ligne adaptée

## A-2 Vitesse de propagation

### Définition : Vitesse de propagation dans une ligne de transmission

La vitesse  $v$  de propagation d'une onde électromagnétique dans une ligne de transmission est donnée par la relation :

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_l C_l}}$$

où :

- $L_l$  est l'inductance linéique de la ligne (H/m),
- $C_l$  est la capacité linéique de la ligne (F/m).

Cette vitesse est nécessairement inférieure à la vitesse de la lumière dans le vide.

## B Effets de terminaison d'une ligne

### Définition : Impédance de charge

L'impédance de charge  $Z_L$  est l'impédance électrique placée à l'extrémité d'une ligne de transmission. Elle modélise le comportement du dispositif ou du circuit raccordé au bout de la ligne.

### Propriété : Réflexion sur une ligne non adaptée

Si l'impédance de charge  $Z_L$  est différente de l'impédance caractéristique  $Z_c$ , une partie de l'onde est **réfléchie**. Le coefficient de réflexion est donné par :

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c} = \frac{A_{incident}}{A_{reflechie}}$$

Cela peut entraîner **des déformations du signal**.

### Exemple

- Si la ligne est **ouverte** ( $Z_L \rightarrow \infty$ ), alors  $\Gamma = +1$ .
- Si la ligne est en **court-circuit** ( $Z_L = 0$ ), alors  $\Gamma = -1$ .
- Si la ligne est **adaptée** ( $Z_L = Z_c$ ), alors  $\Gamma = 0$ .

## C Analyse temporelle des réflexions

### Définition : Chronogramme de réflexion

Un chronogramme représentant la tension en entrée d'une ligne permet de visualiser les allers-retours d'une onde sur la ligne. Chaque écho observé correspond à une réflexion sur une discontinuité (défaut, terminaison non adaptée).

## C-1 Ligne ouverte

### Propriété : ligne en boucle ouverte

En boucle ouverte, l'information se retrouver bloquée au bout du câble. Ne pouvant pas aller au delà, elle est entièrement réfléchiée.

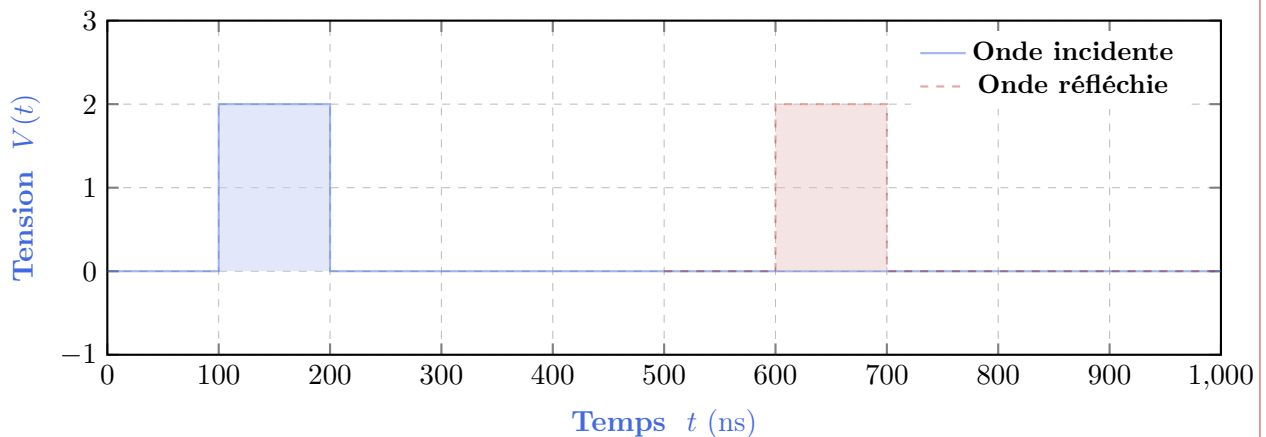


FIGURE 2 – Chronogramme de réflexion d'une ligne ouverte

## C-2 Ligne court en court circuit

### Propriété : ligne en boucle fermée

Dans le cas d'une boucle fermée (court-circuit), l'onde incidente atteint l'extrémité de la ligne sans pouvoir s'y propager davantage. Elle est alors entièrement réfléchiée vers la source, avec un **changement de signe**, comme si elle «rebroussait chemin» par le câble.

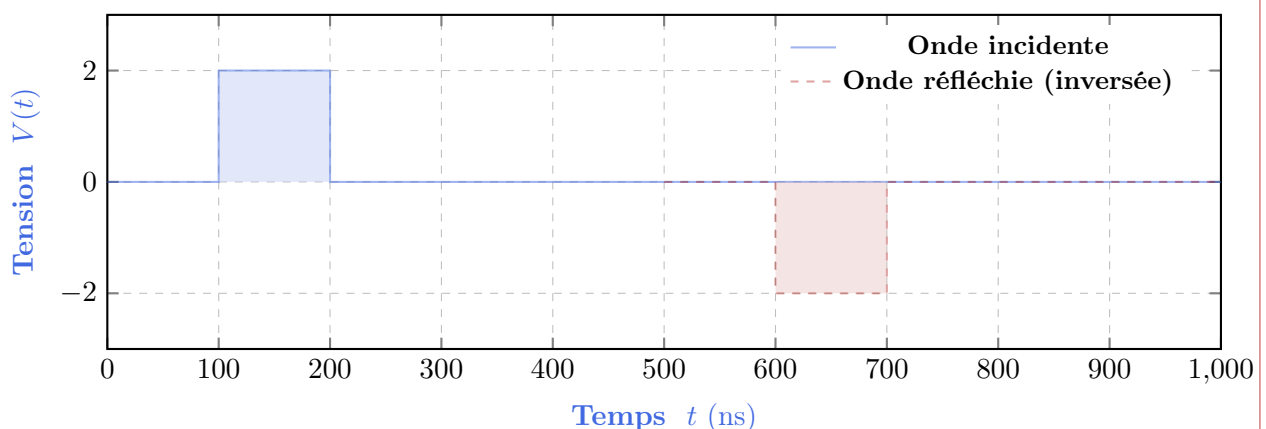


FIGURE 3 – Chronogramme de réflexion sur une ligne en court-circuit

### C-3 Mesure de la longueur d'une ligne

#### Exercice 1 Mesure de la longueur d'une ligne (★)

Une ligne de transmission est qui n'est pas adaptée, on ne connaît pas sa longueur exacte. Il a besoin de connaître sa longueur afin d'établir la facture de son client.

**Q1** Le technicien envoie une impulsion depuis l'émetteur et observe, à l'oscilloscope, une onde réfléchie revenant après un délai  $\Delta t = 500$  ns.

**Q2** Sachant que la vitesse de propagation dans la ligne est  $v = 2 \times 10^8$  m/s, calculez la longueur totale  $L$  de la ligne.

**Q3** Expliquez pourquoi le délai mesuré correspond à un aller-retour de l'onde.

**Q4** Que peut-on conclure si aucune onde réfléchie n'est détectée ?

#### Exercice 2 Etude d'une paire torsadée - *BTS SNEC 2019* (★★)

La liaison entre la carte LASERBOARD et la caméra PTZ est assurée à l'aide d'un câble conçu pour la transmission de données numériques. Le cahier des charges impose trois conditions sur la liaison filaire entre le laser et la caméra.

- Le temps de détection doit être inférieur à 1 s.
- L'écart entre les niveaux des signaux représentant les deux niveaux logiques doit être supérieur à 4V à la sortie du câble pour un bon décodage de la trame.
- Les caractéristiques données par les documents techniques doivent être validés à moins de 5% près par les mesures.

La longueur du câble peut atteindre 200m et ses principales caractéristiques issues de la documentation constructeur sont présentées ci-dessous :

#### REQUIREMENTS AND TEST METHODS

##### Electrical:

Nominal resistance conductor	78.7 $\Omega$ /km
Nominal resistance shield	11.0 $\Omega$ /km
Nominal capacitance conductor to conductor	42.0 pF/m
Nominal capacitance conductor to shield + other cond.	75.5 pF/m
Nominal impedance @ 1 MHz	120 $\Omega$
Nominal velocity of propagation	66 %
Nominal attenuation @ 1 MHz	1.97 dB/100m

FIGURE 4 – Extrait de la documentation constructeur du câble

Le câble étant enterré sous la piste recevant les avions, le technicien veut vérifier l'état du câble à partir de deux tests simples dont le schéma de câblage est présenté ci-dessous :

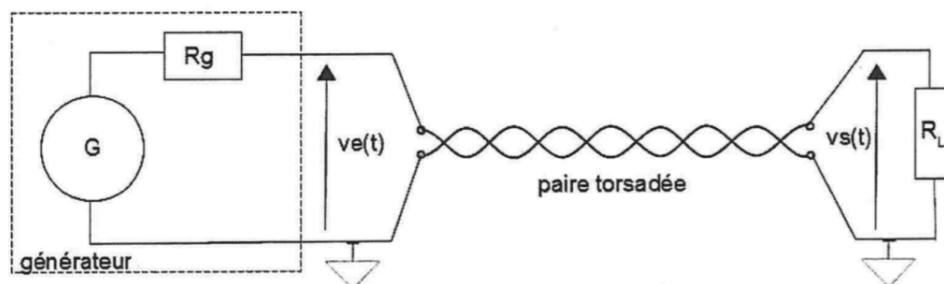


FIGURE 5 – Extrait de la documentation constructeur du câble

Le premier test est un **test impulsionnel**, la tension issue du générateur est notée  $v_e(t)$  et est comprise entre 0 V et 5 V. La paire différentielle torsadée possède une résistance caractéristique, notée  $R_c = 120 \Omega$ . La ligne est adaptée.

**Q1** Quelle est la valeur de la résistance de charge  $R_L$  ?

**Q2** Pourquoi la ligne doit être adaptée pour garantir un bon fonctionnement du système ?

On donne ci-dessous le résultat du test impulsionnel :

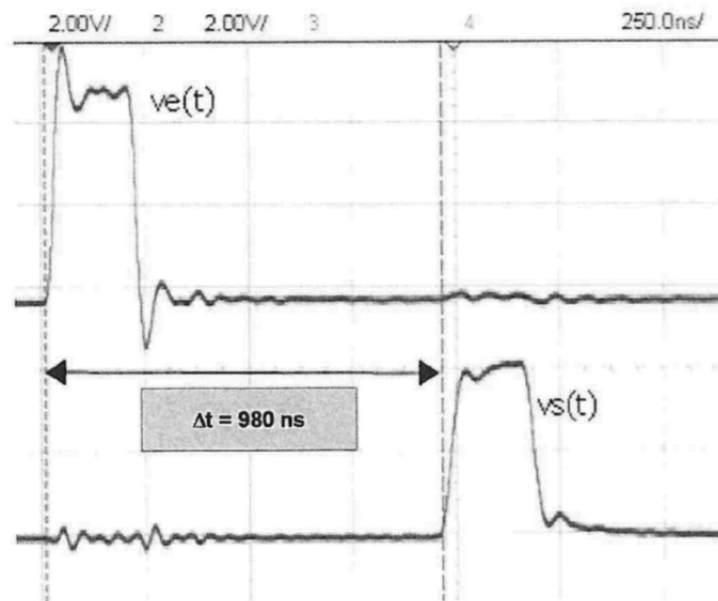


FIGURE 6 – Chronogramme du test impulsionnel

**Q3** Déterminer la vitesse de propagation (notée  $v_{mes}$ ) du signal dans la ligne sachant que le câble fait 200m de long.

**Q4** Montrer que la valeur de la vitesse de propagation donnée par le constructeur,  $v_{constr} = 1,98 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

**Q5** Les deux résultats sont-ils compatibles avec le cahier des charges ?

### Données

La vitesse de propagation de la lumière dans le vide est notée  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

### Propriété : Mesure de la longueur d'une ligne

Le temps  $\Delta t$  entre l'émission de l'impulsion et la réception de la réflexion permet de déterminer la longueur  $L$  de la ligne :

$$L = \frac{v \cdot \Delta t}{2}$$

où  $v$  est la vitesse de propagation du signal dans la ligne.

## C-4 Localisation d'un défaut

✎ Exercice 3

 Câble croqué (★ ★)

Une ligne de transmission, initialement **adaptée** ( $Z_L = Z_c$ ), transporte un signal vers un consommateur.

**Q1** Que signifie une ligne adaptée ? Que se passe-t-il au niveau des réflexions sur la ligne dans ce cas ?

**Un défaut est apparu quelque part le long de la ligne**, provoquant des perturbations sur le signal reçu.

**Q2** Le technicien envoie une onde avec un générateur et l'observe à l'oscilloscope. Le chronogramme est le suivant :

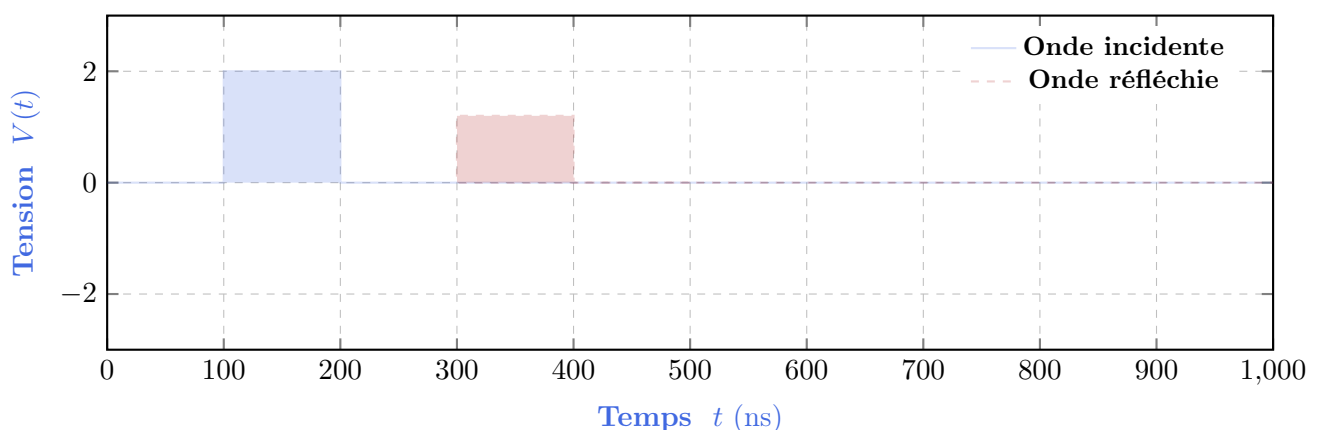


FIGURE 7 – Chronogramme de réflexion sur une ligne en court-circuit

**Q3** Expliquez pourquoi une onde réfléchie apparaît si la ligne était initialement adaptée.

**Q4** Sachant que la vitesse de propagation dans la ligne est  $v = 2 \times 10^8$  m/s, calculez la distance entre le point d'émission et le défaut.

**Q5** Expliquez pourquoi le délai mesuré correspond à un aller-retour de l'onde.

**Q6** Si la longueur totale de la ligne est de 150 m, où se trouve le défaut par rapport à l'émetteur ?

**Q7** Pourquoi l'onde réfléchie a une amplitude plus faible ? Calculer le coefficient de réflexion.

### Propriété : Localisation d'un défaut

Le temps  $\Delta t$  entre l'envoi de l'impulsion et sa réflexion permet de calculer la position du défaut :

$$d = \frac{v \cdot \Delta t}{2}$$

où  $v$  est la vitesse de propagation du signal dans le câble.



## II La fibre optique : une ligne de transmission optique

### A Notions de base en optique

#### A-1 - Le principe de Fermat

##### Définition : Le principe de Fermat

Le trajet emprunté par la lumière entre deux points est celui qui minimise le temps de parcours. Dans un milieu homogène et isotrope, cela se traduit par un trajet en ligne droite.

##### Remarque

- Un milieu est dit homogène lorsque ses propriétés physiques sont les mêmes en tout point.
- Un milieu est dit isotrope lorsque ses propriétés sont identiques dans toutes les directions.

#### A-2 Vitesse de la lumière

##### Propriété : Célérité

Dans le vide, la vitesse de la lumière notée  $c$  (pour célérité) vaut :

$$c_0 = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

##### Exercice 4 Mission Appolo 11 (★)

Lors de la mission Appolo 11, les américains sont allés sur la Lune. Ils y ont posé un miroir dans l'objectif de pouvoir mesurer la distance Terre-Lune avec beaucoup de précision.

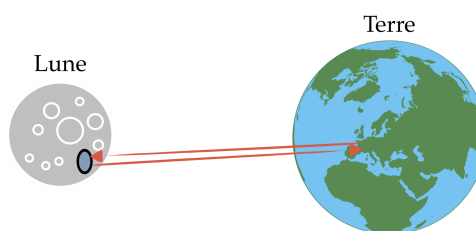


FIGURE 8 – Schéma Terre-Lune

Un expérimentateur pointe un laser sur le miroir et chronomètre le temps que met le laser à revenir. Il mesure alors un temps :  $\Delta t = 2,56 \text{ s}$ .

**Q1** Calculer la distance Terre-Lune.

## B L'indice optique

### 📖 Définition : Indice optique

L'indice optique  $n$  d'un milieu est défini comme le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide  $c_0$  et sa vitesse  $v$  dans le milieu considéré.

$$n = \frac{c_0}{v}$$

### ✎ Exercice 5 Exemples d'indices optiques (★)

Voici l'indice optique de différents milieux :

Milieu	Indice Optique	Vitesse de la lumière
Vide	1.000	
Air	1.0003	
Eau	1.333	
Verre (silice)	1.46	
Diamant	2.42	
Plexiglas	1.49	
Huile	1.47	

FIGURE 9 – Tableau d'indices optiques

**Q1** Compléter le tableau ci-dessus.

## C Vocabulaire d'optique

### 📖 Définition : Les indispensables

Un **dioptre** est une surface qui sépare deux milieux transparents d'indices optiques différents. La **normale** est un trait de construction perpendiculaire au dioptre.

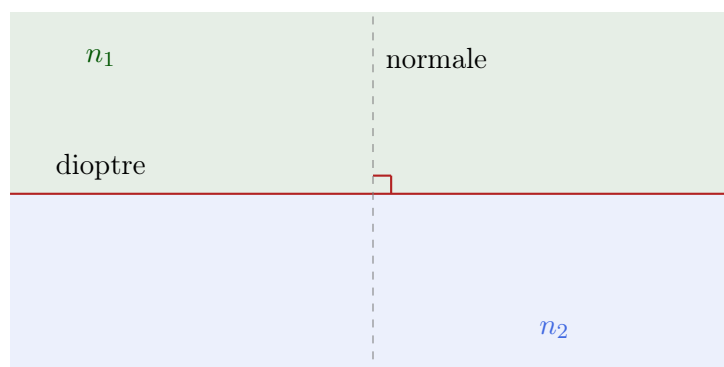


FIGURE 10 – Dioptr et normale

## D Lois de Snell-Descartes

### D-1 Cas général

#### Propriété : Trois rayons caractéristiques

Quand un rayon lumineux **incident** s'approche d'un dioptré, il apparaît un rayon **réfléchi** et un rayon **réfracté**, on peut le résumer à l'aide d'un schéma :

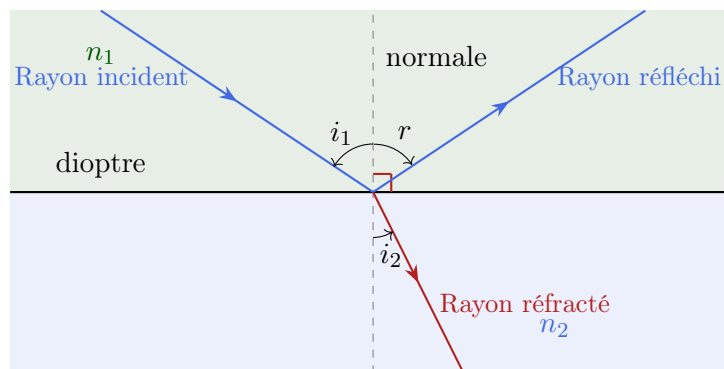


FIGURE 11 – Les trois rayons caractéristiques

### D-2 Réfraction à l'interface d'un dioptré

#### Définition : Les deux lois de la réfraction

1. Le rayon incident, le rayon réfracté, le rayon réfléchi et la normale sont dans un même plan.
2. La relation qui lie l'angle d'incidence  $i_1$  et l'angle de réfraction  $i_2$  :

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$$

où  $n_1$  et  $n_2$  sont les indices de réfraction des milieux 1 et 2 respectivement.

#### Remarque

- Si  $n_2 > n_1$ , alors  $i_2 < i_1$  : le rayon se **rapproche de la normale**.
- Si  $n_2 < n_1$ , alors  $i_2 > i_1$  : le rayon **s'écarte de la normale**.

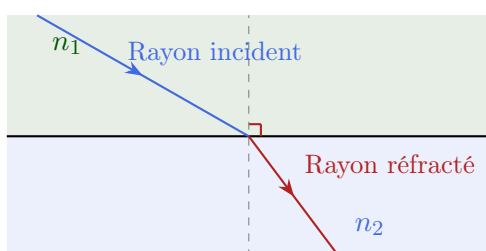


FIGURE 12 – Réfraction quand :  $n_1 < n_2$

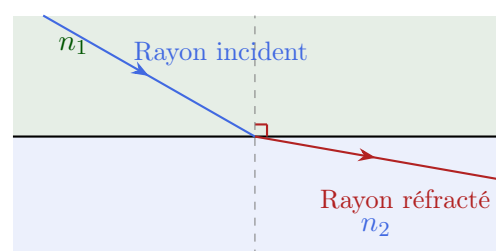


FIGURE 13 – Réfraction quand :  $n_1 > n_2$

**Exercice 6** Un bijoutier physicien (★)

Le diamant, l'oxyde de zirconium et la moissanite sont identifiables par leur indice de réfraction. Pour connaître la nature d'une pierre, un bijoutier l'éclaire avec un angle d'incidence connu. **De la mesure de l'angle de réfraction, il en déduit l'indice de réfraction de la pierre.** Auparavant, il procède au réglage de son dispositif en éclairant une émeraude avec un angle d'incidence  $i = 35^\circ$ . Il mesure alors l'angle de réfraction  $r_1 = 21^\circ$

**Données**

Indices de réfraction de cristaux :

- Émeraude :  $n = 1,6$
- Diamant :  $n = 2,4$
- Oxyde de zirconium :  $n = 2,1$
- Moissanite :  $n = 2,7$

L'indice de réfraction de l'air vaut 1.

**Q1** Déterminer la valeur théorique de l'angle de réfraction dans l'émeraude. Le dispositif est-il bien réglé ?

Pour la pierre qu'il souhaite identifier, il mesure un angle de réfraction  $r_2 = 16^\circ$ .

**Q2** Déterminer l'indice de réfraction de la pierre que le bijoutier souhaite identifier.

**Q3** Identifier la nature de cette pierre à l'aide des données.

**D-3 La réflexion totale****Définition : La réflexion totale**

La réflexion totale est un phénomène optique qui se produit lorsqu'un rayon lumineux rencontre le dioptre sans se propager dans le deuxième milieu.

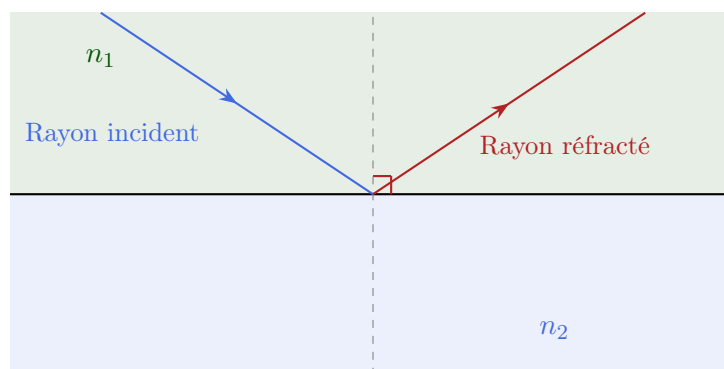


FIGURE 14 – Cas de la réflexion totale

### Propriété : Conditions de réflexion totale

La réflexion totale se produit uniquement si les conditions nécessaires suivantes sont respectées :

- Le rayon lumineux doit passer de l'indice de réfraction  $n_1$  à un milieu ayant un indice de réfraction  $n_2$  tel que  $n_1 > n_2$ .
- L'angle d'incidence  $i$  doit être supérieur à un certain angle limite  $i_{\text{lim}}$ , appelé **angle de la réflexion totale**, tel que :

$$\sin(i_{\text{lim}}) = \frac{n_2}{n_1}$$

### Exercice 7 Etude d'un prisme - IUT Génie Biologique Créteil (★ ★ ★)

Un rayon lumineux monochromatique traverse un prisme en verre d'angle  $A$ , comme représenté sur la Figure 15. Le rayon arrive avec un angle d'incidence  $i$  sur la première face du prisme. Il subit une première réfraction avec un angle  $\theta$ , traverse le prisme, puis ressort en subissant une seconde réfraction avec un angle  $\theta'$ , formant un angle d'émergence  $i'$ . La déviation globale du rayon est notée  $D$ , c'est-à-dire l'angle entre la direction initiale et la direction finale du rayon.

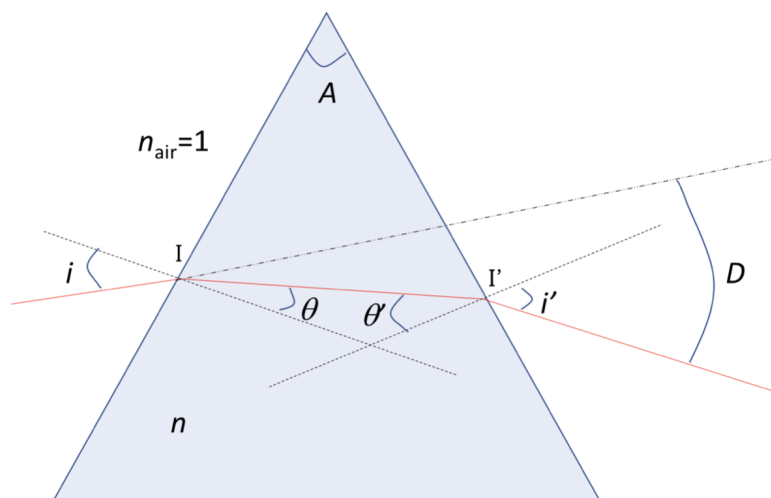


FIGURE 15 – Déviation d'un rayon lumineux par un prisme optique (schéma simplifié)

**Q1** Rappeler les lois de Snell-Descartes utilisées aux deux interfaces du prisme (entrée et sortie).

**Q2** En exprimant la somme des angles  $\widehat{IAI'} + \widehat{AI'I} + \widehat{I'I'A}$ , montrer que les angles  $\theta$  et  $\theta'$  à l'intérieur du prisme vérifient la relation :

$$A = \theta + \theta'$$

#### Rappel

La somme des angles dans un triangle a pour valeur  $180^\circ$ .

Appelons E le point où se croisent les prolongements des rayons incidents et émergents. Nous obtenons alors le triangle EII.

**Q3** Exprimer les angles  $\widehat{IEI'}$ ,  $\widehat{I'I'E}$  et  $\widehat{EII'}$  en fonction de  $D$ ,  $i$ ,  $i'$ ,  $\theta$  et  $\theta'$ , puis montrer que :

$$D = i - \theta + \theta' - i'$$

**Q4** Exprimer l'angle de déviation  $D$  en fonction des angles d'incidence  $i$ , d'émergence  $i'$  et de l'angle du prisme  $A$ .

**Q5** En déduire que :

$$D = i + i' - A$$

## E Principe de fonctionnement de la fibre optique

### E-1 Différents types de fibres

#### Propriété : Plusieurs types

Il existe **trois grandes familles** de fibres optiques :

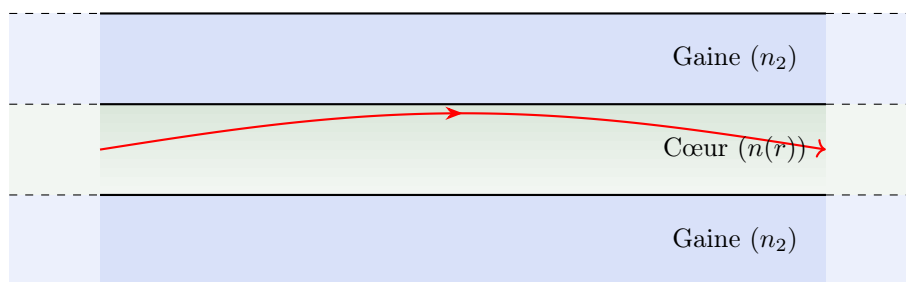


FIGURE 16 – **Fibre à gradient d'indice** : l'indice décroît progressivement du centre vers l'extérieur

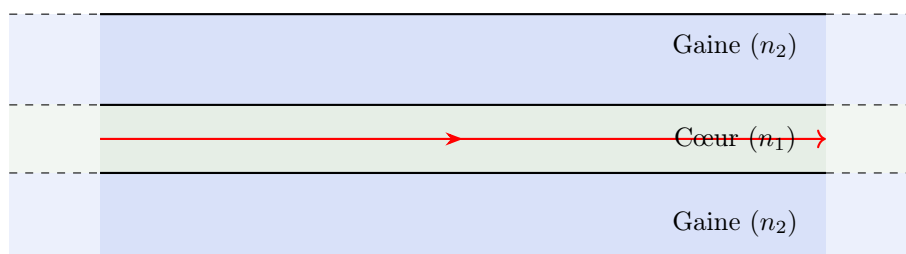


FIGURE 17 – **Fibre monomode** : Le rayon est confiné au centre de la fibre (cœur très fin).

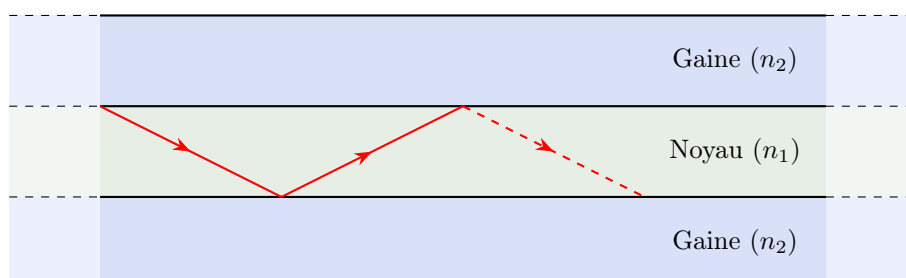


FIGURE 18 – **Fibre à saut d'indice** : le cœur et la gaine sont d'indices différents

**Exemple**

Vous pouvez retrouver une animation qui permet de visualiser les rayons sur le site de *l'académie de Nantes* :

**E-2 Fibre optique à saut d'indice****Propriété : Principe de fonctionnement d'une fibre optique à saut d'indice**

La lumière est **guidée par rebonds successifs** (réflexion totale) à l'intérieur du cœur, sans quitter la fibre, ce qui permet une transmission efficace de l'information optique sur de longues distances.

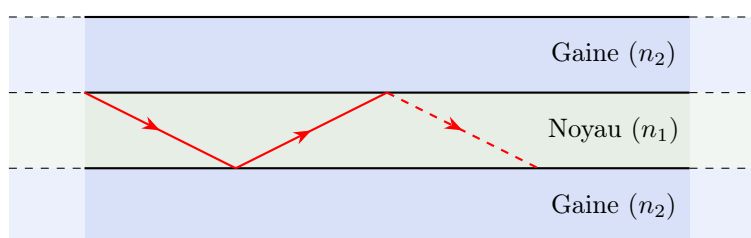


FIGURE 19 – Schéma représentant un morceau d'une fibre d'une fibre optique à saut d'indice

**F Grandeurs caractéristiques d'une fibre optique****F-1 Longueur(s) d'onde****Définition : Longueur d'onde en fibres optiques**

Les **longueurs d'onde** utilisées en fibre optique correspondent à des fenêtres de transmission où l'atténuation est minimale. Les principales sont :

- 850 nm : fibre multimode (LED),
- 1310 nm : fibre monomode (laser),
- 1550 nm : fibre monomode.

**Remarque**

Le choix de la longueur d'onde influe directement sur les performances (atténuation, dispersion) et sur le coût des composants.

## F-2 Atténuation

### Définition : Atténuation linéique dans une fibre

L'**atténuation linéique** représente la perte de puissance optique en fonction de la distance. L'atténuation s'exprime par la formule :

$$A = \frac{10}{L} \log_{10} \left( \frac{P_{\text{entrée}}}{P_{\text{sortie}}} \right)$$

avec  $A$  en dB.km<sup>-1</sup>,  $P_{\text{entrée}}$  et  $P_{\text{sortie}}$  en watts.



### Exercice 8

### Caractéristique d'une fibre optique (★)

On donne les caractéristiques d'une famille de fibres optiques ci-dessous :

Affaiblissement à 850 nm	≤ 2,60 dB/km (2,50 dB/km typique)
Affaiblissement à 1300 nm	≤ 0,70 dB/km (0,60 dB/km typique)
Régularité de la pente d'affaiblissement à 850 nm	Discontinuité locale ≤ 0,30 dB
Variation d'affaiblissement à 850 nm dans la plage -30 à +60°C	≤ 0,30 dB/km
<b>Bande passante</b>	
Bande passante à 850 nm	≥ 1500 MHz.km
Bande passante à 1300 nm	≥ 500 MHz.km
Bande passante effective à 850 nm	≥ 2000 MHz.km
<b>Caractéristiques géométriques</b>	
Diamètre de cœur	50 +/- 2,5 μm
Ouverture numérique	0,20 +/- 0,02
Diamètre de la gaine optique	125,0 +/- 2,0 μm

FIGURE 20 – Caractéristique de la fibre optique

- Q1** Calculer l'atténuation pour un rayonnement à 850nm et pour une longueur de fibre de 10km.  
**Q2** Calculer l'atténuation pour un rayonnement à 1300nm et pour une longueur de fibre de 20km.  
**Q3** Calculer l'angle maximal d'un rayon lumineux avec l'axe de symétrie de la fibre.

## F-3 Bande passante

### Définition : Bande passante

La **bande passante** correspond à la gamme de fréquences que la fibre peut transmettre sans dégradation importante du signal.



### Propriété : Unités

Elle s'exprime en MHz.km ou GHz.km. Plus la bande passante est grande, plus le débit possible est élevé.

### Remarque

- Fibre multimode : dispersion intermodale importante  $\Rightarrow$  bande passante limitée.
- Fibre monomode : bande passante très élevée.

## F-4 Angle d'ouverture et ouverture numérique

### Définition : Ouverture numérique

L'**ouverture numérique (NA)** d'une fibre optique caractérise sa capacité à capter la lumière. Elle dépend des indices du cœur ( $n_1$ ) et de la gaine ( $n_2$ ) :

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

### Propriété : Angle d'acceptance maximal

L'angle d'acceptance maximal est donné par :

$$\theta_{\max} = \arcsin\left(\frac{NA}{n_0}\right)$$

où  $n_0$  est l'indice du milieu d'entrée (souvent  $n_0 = 1$ ).

### Exercice 9 Étude complète d'une fibre optique (★ ★)

On étudie la fibre optique suivante, ayant  $n_1 = 1,48$  et  $n_2 = 1,46$ . Sa longueur est  $L = 1,00$  km. On donne l'indice de réfraction de l'air :  $n_{\text{air}} = 1,00$ .

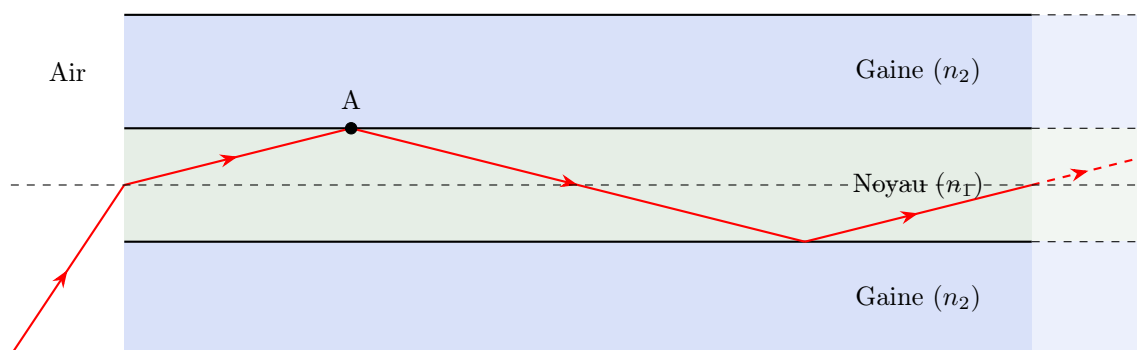


FIGURE 21 – Schéma de la fibre optique

On note  $\theta$  l'angle d'incidence du rayon entrant dans la fibre optique. On note  $\theta_1$  l'angle réfracté lié au l'entrée du rayon dans la fibre. On note  $i_1$  l'angle entre la normale et le rayon incident au point A.

**Q1** Tracer la normale au point A et placer les angles  $\theta$ ,  $\theta_1$  et  $i_1$  sur le schéma de la Figure 21.

**Q2** À quelle famille de fibre optique appartient cette fibre ?

**Q3** Peut-on observer le phénomène de réflexion totale du faisceau lumineux lors du passage de l'air au cœur de la fibre ? Justifier votre réponse.

**Q4** Déterminer la valeur de l'angle limite noté  $i_{\text{limite}}$  permettant d'obtenir réflexion totale lors du passage du cœur à la gaine.

On suppose que  $\theta = 10^\circ$  :

**Q5** Déterminer la valeur de l'angle  $\theta'$ .

**Q6** Déterminer la valeur de l'angle  $i_1$ .

**Q7** Y-a-t-il réflexion totale entre le cœur et la gaine ?

On suppose que  $\theta = 20^\circ$  :

**Q8** Déterminer la valeur de l'angle  $\theta'$ .

**Q9** Déterminer la valeur de l'angle  $i_1$ .

**Q10** Y-a-t-il réflexion totale entre le cœur et la gaine ?

#### Rappel

L'ouverture numérique  $ON$  de ce type de fibre peut se calculer à l'aide de la formule :

$$ON = \sin(\theta_{\text{limite}}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

**Q11** En déduire la valeur limite de  $\theta$ , notée  $\theta_{\text{limite}}$ , permettant d'obtenir la réflexion totale entre le cœur et la gaine.

Jusqu'à la fin de l'exercice, on suppose que  $\theta = \theta_{\text{limite}} = 14^\circ$  :

**Q12** Déterminer la valeur de l'angle  $\theta'$ .

**Q13** Déterminer la valeur de la plus petite durée de parcours  $t_{\text{min}}$  de la lumière dans le cœur de la fibre.

**Q14** Déterminer la valeur de la plus grande durée de parcours  $t_{\text{max}}$  de la lumière dans le cœur de la fibre.

On admettra que la plus grande longueur du trajet est  $L' = \frac{L}{\cos \theta'}$ .

**Q15** En déduire la différence de temps  $\Delta t$  de cette fibre.

#### Rappel

Le produit longueur-bande passante de cette fibre est donné par la formule suivante :

$$\Delta f \times L = \frac{0,35}{\Delta t}$$

**Q16** En déduire la bande passante  $\Delta f$  de cette fibre.