Présentation de l'optique géométrique par le principe de Fermat

Niveau

L3

Commentaires du jury

2017 Les applications à des systèmes optiques réels sont trop souvent absents de cette leçon. Jusqu'en 2013, le titre de cette leçon était *Présentation de l'optique géométrique par le principe de Fermat. Exemples.*
2014 La leçon doit illustrer ce que le principe de Fermat apporte de plus que les lois de la réfraction et de la réflexion. Les analogies avec d'autres principes variationnels sont appréciées.

Bibliographie

— Leçon de Benjamin Monnet : ce lien.
— *Optique géométrique*, **BFR**
— *Optique géométrique*, **Maurel**
— *Optique : fondements et applications*, **Pérez**
— *Optique : une approche expérimentale et pratique*, **Houard**

Pré-requis

— Principe de moindre action.
— Bases de l'optique géométrique
— Vecteur de Poynting

Expériences

— Courbure d'un rayon lumineux dans un milieu à gradient d'indice ? Genre une cuve avec un gradient de concentration de sel...
— Angles de réflexion/réfraction ? Est-ce qu'on peut trouver quelque chose qui va un peu plus loin ?...

Table des matières

Introduction

Il paraît très intuitif qu'un "rayon lumineux" se propage en ligne droite (exemple : LASER). C'est pour ca qu'en optique géométrique, on trace des droites. Mais qu'est-ce qui est à l'origine de cela ? → On va montrer qu'à partir d'un seul principe, on peut retrouver toute l'optique géométrique. Il faut trouver quelque chose pour plus motiver la leçon . On a déjà parler d'optique géométrique, Il paraît très intuitif qu'un "rayon lumineux" se propage en ligne droite (exemple : LASER). C'est pour ca qu'en optique géométrique, on trace des droites. Mais regardez, si je fait passer le laser dans une cuve stratifié, les rayons ils sont courbes. Ok alors pourquoi on a toujours fait des rayon rectiligne jusqu'à présent ? C'est ce que l'on va essayer de comprendre ici, et nous allons notamment montrer que l'on a uniquement besoin d'un seul principe : Le principe de Fermat

Transition :
On va commencer par expliciter ce principe puis voir ce qui en découle

1 Principe de Fermat

Transition :

Pour ce faire il faut bien comprendre les outils que l'on utilise et en particulier il nous faut revenir sur cette notion de rayon lumineux qui nous semble assez intuitive mais qui correspond à une approximation qu'il faut maîtriser

1.1 Approximation du rayon lumineux

On sait que le lumière est une onde électromagnétique. Nous savons que ce que les récepteurs (tel que nos yeux) sont sensible à la valeur moyenne du vecteur de Poynting, c'est donc ce vecteur de Poynting que nous allons utiliser pour décrire la lumière :

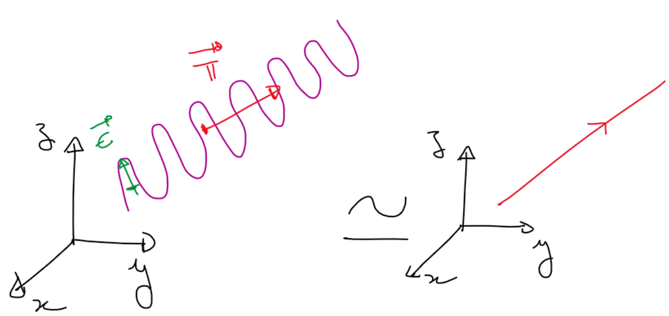

Figure 1 – *Modélisation d'un rayon lumineux*

Ainsi on peut décrire facilement modéliser comment la lumière par des rayon en ne considérant que ce vecteur de Poynting. Pour ce faire une idée de ce qu'est un rayon lumineux on peut utiliser un laser. **Expérience :** Laser avec poussière de craie

Pour être sûr de ne pas avoir de problème de diffraction, dans l'optique géométrique on suppose : $\lambda << D$ où D est la distance typique de variation de notre système (ça peut par exemple être la distance caractéristique de variation de ϵ_r *C'est pas plutôt l'extension spatiale des appareils qqu'on utilise qui compte ?*) Ainsi on peut résumer l'approximation d'un rayon lumineux dans l'optique géométrique par :

Rayon lumineux : ligne tangente à la direction de l'énergie (vecteur de Poynting) tel que $\lambda << D$

Il est intéressant de se demander comment appliquer l'optique géométrique à d'autres systèmes : par exemple peut-on appliquer l'optique géométrique et donc la modélisation des rayons aux ondes acoustiques ? C'est possible, cependant il faudra faire attention que l'approximation des milieux continus reste valable en acoustique, aussi cela rajoute une contrainte basse à λ.

1.2 Chemin optique et différentielle (ou premier énoncé de Fermat et chemin optique)

Transition :
Fermat, non content de l'approche de Descartes de l'optique énonce le principe suivant : "La lumière choisit le trajet dont le temps est le plus court". C'est un principe de minimisation et nous allons voir comment on peut l'exprimer plus formellement et on va également se rendre compte qu'il convient de le modifier légèrement.

Mais avant ça il faut comprendre ce qu'il veux dire. Une manière simple de comprendre le principe de fermat est avec l'analogie du maître-nageur (qui permet de sentir le fait qu'on va minimiser quelque chose...) On voit que le sauveteur va sauver plus vite la personne si il choisit bien son trajet. C'est exactement comme la lumière.

Pour pouvoir utiliser concrètement le principe de Fermat il nous faut le formaliser un petit peu. Pour cela on va commencer par caractériser le "trajet" que Fermat décrit et pour cela nous allons utiliser la notion de chemin optique (on pourrait par exemple projeter au tableau le principe tel qu'énoncé par Fermat puis surligner les parties que l'on études une à une)

On veux caractériser un trajet. le temps de trajet d'écrit :

$$\Delta t = \int_{t(A)}^{t(B)} \mathrm{d}t \tag{1}$$

Or on sait que $v = c/n$ on peut donc opérer un changement de variable $vdt = ds$:

$$\Delta t = \frac{1}{c}\int_{A}^{B} n\,\mathrm{d}s \tag{2}$$

Plutôt que d'écrire en temps qui n'est pas visible dans une construction géométrique on va plutôt introduire une distance : le chemin optique (distance que parcourrait la lumière dans le vide pendant la même durée) :

$$(AB) = c\Delta t = \int_{A}^{B} n\,\mathrm{d}s \tag{3}$$

On a donc une quantité qui caractérise le trajet d'un rayon : Le chemin optique.

Le principe de Fermat nous dit donc que l'on va minimiser le temps de trajet et donc le chemin optique.

Différentielle de chemin optique :
Soit on le met là (je pense ?), soit on le met dans les prérequis, mais je pense qu'il faut en parler non ?

On considère un rayon lumineux de A à B. On déplace B à $B' = B + \mathrm{d}B$: nouveau chemin $\mathrm{d}(AB) = (AB') - (AB)$. *(avec une figure c'est plus clair :))*

Alors $\mathrm{d}\vec{B} = \vec{AB'} - \vec{AB}$

Donc $\mathrm{d}(AB) \approx (\vec{AB'} - \vec{AB}) \cdot u_{\vec{AB}}$

Transition :

Cependant on observe que dans le cas d'une reflexion sur un miroir le trajet minimisant le temps de trajet et celui reliant A et B sans passer par le miroir,

Il nous faut donc modifier le principe de fermat.

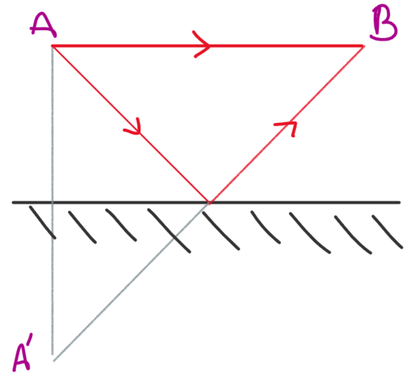

FIGURE 2 – *Réflexion sur un miroir : le trajet des rayons n'est pas forcément le plus court !*

1.3 Énoncé du principe de Fermat

Le chemin optique est stationnaire.

On peut préciser ce que l'on entend par stationnaire : On considère un chemin $\mathcal{C}$ reliant deux points A et B, et un chemin proche $\mathcal{C}'$, obtenu en modifiant légèrement $\mathcal{C}$. Le chemin $\mathcal{C}$ est dit **stationnaire** si le chemin optique $\mathcal{C}'$ est plus long que $\mathcal{C}$.

Autrement dit, $(AB)_{\mathcal{C}} \leq (AB)_{\mathcal{C}'}$.

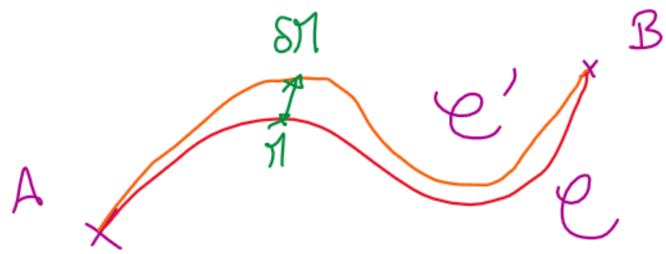

FIGURE 3 – *Ce qu'on entend par stationnaire*

On veut minimiser le temps de trajet... Cela rappelle un autre problème de minimisation en physique :

Minimiser $\mathcal{S} = \int\limits_{t_1}^{t_2} \mathcal{L}(q, \dot{q}, t)\mathrm{d}t \implies$ L'équation d'Euler-Lagrange : $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}}) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} = 0$

	Mécanique	Optique géométrique
Lagrangien	$\mathcal{L} = T - U$	$n\|\dot{\vec{r}}\|$
Action	$S = \int_{t_1}^{t_2} (T - U)\mathrm{d}t$	$S = \int_A^B n \ \mathrm{d}s = \int_{t_a}^{t_b} n(\vec{r})\|\dot{\vec{r}}\|\mathrm{d}t$

Ici, $\mathcal{S}$ est directement le chemin optique. On le rend donc stationnaire.

Transition : On va retrouver les lois de l'optique géométrique avec ce principe !

2 Lois de l'optique géométrique

On reste en milieux homogènes (par morceaux) et isotropes.

2.1 Milieu homogène isotrope

Dans un milieux homogène d'indice n le chemin optique entre deux point A et B s'écrit :

$$(AB) = n \int_A^B \mathrm{d}s \tag{4}$$

Cette quantité est minimale pour une ligne droite. Demandez au bébé qui marche avec ses petits genoux qui ont mal sur le carrelage (comme disait mon prof de maths de cinquième...) : le plus court chemin entre 2 points est une droite.

2.2 Principe de retour inverse de la lumière

On peut retrouver le retour inverse de la lumière. Pour cela on doit montrer que pour n quelconque, que la lumière aille de A vers B ou de B vers A, cela ne modifie pas le chemin optique, ainsi, le trajet de la lumière déterminer par minimisation du chemin optique sera le même

$$(AB) = \int_A^B n\mathrm{d}s = -\int_B^A n\mathrm{d}s \tag{5}$$

On pose $\mathrm{d}s' = \mathrm{d}s$, ce qui correspond a faire le chemin en sens inverse :

$$(AB) = \int_B^A n\mathrm{d}s' = (BA) \tag{6}$$

2.3 Lois de Snell-Descartes

Éxpériences réflexion/réfraction
Réflexion : avec un miroir. réfraction : avec un prisme, vu du dessus (flexcam ?).

2.3.1 Réflexion

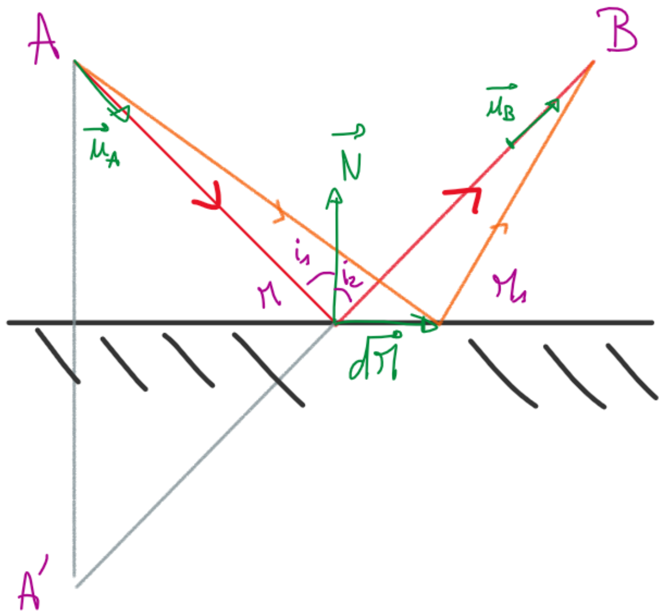

Figure 4 – *Réflexion*

Pour déterminer le trajet prédit par le principe de Fermat, on va déplacer le point M

$$(AB) = n(AM + MB) \tag{7}$$

On veux que le chemin soit stationnaire ce qui est équivalent à écrire : $\mathrm{d}(AB) = \mathrm{d}AM + \mathrm{d}MB = 0$ Ceci peut se réécrire comme

$$\begin{align} 0 &= \vec{u}_A \cdot \mathrm{d}\vec{M} - \vec{u}_B \cdot \mathrm{d}\vec{M} \tag{8}\\ &= (\vec{u}_A - \vec{u}_B) \cdot \mathrm{d}\vec{M} \tag{9}\end{align}$$

Ceci a deux conséquences, la première c'est que comme $\mathrm{d}\vec{M}$ est tangente à la surface, on sait donc que $(\vec{u}_A - \vec{u}_B)$ est dirigé selon la normale à la surface $\vec{N}$. Donc en définissant le plan incident par $(\vec{u}_A, \vec{N})$, le rayon sortant est dans ce plan. De plus on peut récrire l'équation avec les angles d'incidence et réfléchi : $\sin(i_1) = \sin(i_2)$. On a donc :

$$i_1 = i_2 \tag{10}$$

2.3.2 Réfraction

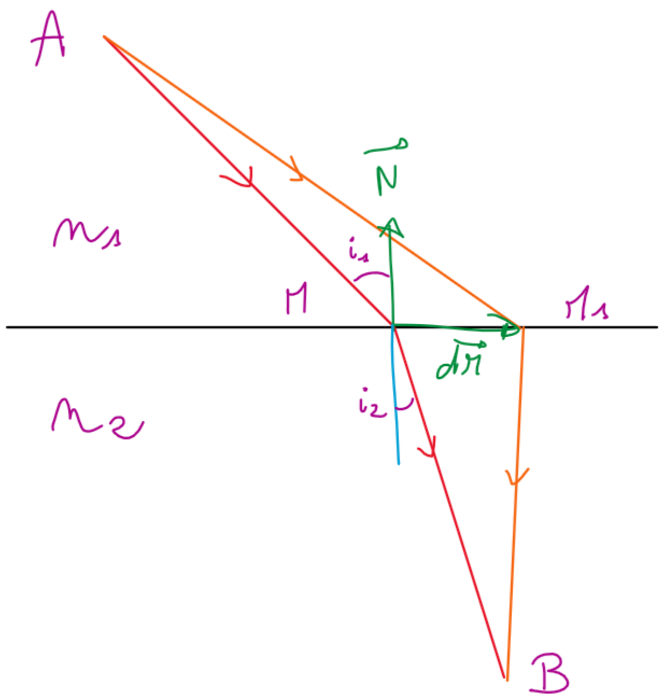

FIGURE 5 – *Réfraction*

Avec le même raisonnement nous obtenons :

$$0 = (n_1\vec{u}_A - n_2\vec{u}_B) \cdot \mathrm{d}\vec{M} \tag{11}$$

On retrouve alors que le rayon réfléchi appartient au plan d'incidence et on a de plus :

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2) \tag{12}$$

Ici, il faut passer rapidement en disant "de même, avec le même raisonnement, on trouve ça".

2.4 Loi de Malus

Les rayons lumineux sont orthogonaux aux surfaces de phase.

On considère un rayon dans un milieu pas forcément homogène, entre un point A (fixe) et un point M que l'on va déplacer le long d'une surface d'onde. On écrit le chemin optique $L(M)$:

$$L(M) = \int_A^M n\,\mathrm{d}s \tag{13}$$

On peut exprimer la différentielle de L (en déplaçant M de $\mathrm{d}\vec{M}$ vers M') :

$$\begin{aligned}
\mathrm{d}L(M) &= L(M') - L(M) && (14)\\
&= \int_A^{M'} n(P)\vec{u}\cdot\mathrm{d}\vec{P} - \int_A^{M} n(P)\vec{u}\cdot\mathrm{d}\vec{P} && (15)\\
&= n(M)\vec{u}\cdot\mathrm{d}\vec{M} && (16)
\end{aligned}$$

Le chemin effectivement pris par le rayon est tel que $\mathrm{d}L(M) = 0$ d'après le principe de Fermat. On a donc $\vec{u}\,\mathrm{d}\vec{M} = 0$. **Les surfaces d'ondes sont localement perpendiculaires aux rayons.**

2.5 Stigmatisme

Système stigmatique : un système optique est dit stigmatique si l'image d'un point A par ce système est un point A'. Autrement dit, tous les rayons issus de A doivent passer par A'. D'après le principe de Fermat, le chemin optique est le même pour tout ces rayons.

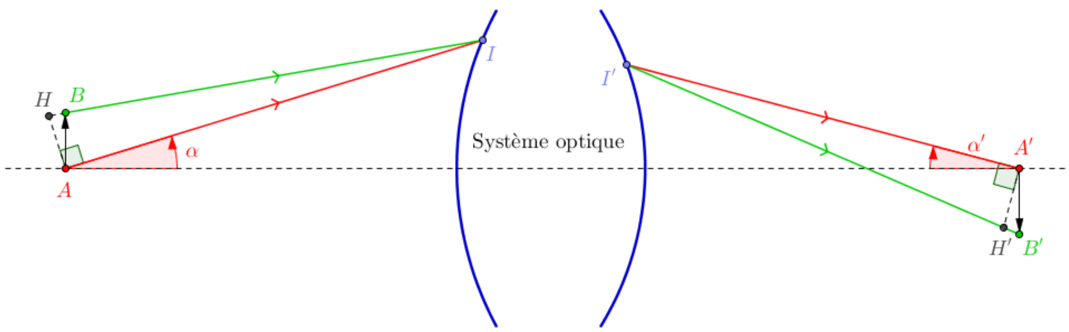

FIGURE 6 – *Schéma pour démo condition d'Abbe. wikipédia*

Retrouvons la condition des sinus d'Abbe : On suppose B infiniment proche de A, de sorte que le rayon passant par I émerge en I' pour lorsqu'il est issu de A comme de B. On prend un système optique à symétrie cylindrique (comme tous les systèmes optiques...). En supposant le système stigmatique :

$$\begin{cases} \mathcal{L}_{AA'} = \text{cste} \\ \mathcal{L}_{BB'} = \text{cste}' \end{cases} \tag{17}$$

quels que soient les rayons lumineux considérés, d'après le principe de Fermat. La différence entre les deux chemins est donc également constante :

$$\mathcal{L}_{AA'} - \mathcal{L}_{BB'} = \text{cste}'' \tag{18}$$

Or,

$$\mathcal{L}_{AA'} - \mathcal{L}_{BB'} = n(\overline{AI} - \overline{BI}) + n'(\overline{I'A'} - \overline{I'B'}) \tag{19}$$

Comme B est proche de A, on écrit :

$$\begin{cases} \overline{AI} = \overline{AH} + \overline{HI} \approx \overline{HI} \\ \overline{A'I'} = \overline{A'H'} + \overline{H'I'} \approx \overline{H'I'} \end{cases} \tag{20}$$

Donc

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{AA'} - \mathcal{L}_{BB'} &= n\overline{HB} - n'\overline{H'B'} \\ &= n\overline{AB}\sin\alpha - n'\overline{A'B'}\sin\alpha' \end{aligned} \tag{21}$$

On se place en $\alpha = 0$. Le rayon n'est pas dévié, donc $\alpha' = 0$ et ainsi $\sin\alpha = \sin\alpha' = 0$, d'où $\text{cste}'' = 0$. On en déduit la condition des sinus d'Abbe :

$$n\overline{AB}\sin\alpha - n'\overline{A'B'}\sin\alpha' = 0 \tag{22}$$

2.6 Dioptre sphérique

Éventuellement, selon le temps dont on dispose. Je n'en vois pas trop l'intérêt pour le coup. *Disons que les lentilles sont au coeur de l'optique géométrique... .*

Transition : Qu'est ce que le principe de fermat apporte de plus ? Il permet de prendre en compte les milieux non homogène qu'on retrouve dans différents milieux : l'océan stratifié induit un gradient d'indice (expérience ou vidéo), des fluctuation de température (induisant des mirages , photo ?). Cependant on peut aussi mettre à profits ces variation d'indice comme avec la fibre optique à gradient d'indice. Il peut être marrant de noter que les baleines utilisent les différentes stratifications de l'océan pour communiquer à longue distance (on peut faire de l'otique géométrique avec les ondes sonores) C'est un sujet de centrale que tu connais peut être.

3 Milieux non homogènes

3.1 Équation des rayons lumineux

Pour un milieux non homogène on peut toujours appliquer le principe de fermat et on doit donc minimiser le chemin optique :

$$L_{(AB)} = \int_A^B n \, \mathrm{d}s = \int_A^B n\left(\vec{r}(t)\right) |\dot{\vec{r}}| \, \mathrm{d}t \tag{23}$$

Pour cela, on peut utiliser un outil de la mécanique analytique : l'équation d'Euler-Lagrange, en identifiant le lagrangien $\mathcal{L} = n\left(\vec{r}(t)\right) \|\dot{\vec{r}}\|$.

Alors l'équation d'Euler Lagrange s'écrit :

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial}{\partial \dot{\vec{r}}}(n|\dot{\vec{r}}|)\right) = \frac{\partial}{\partial \vec{r}}(n|\dot{\vec{r}}|) \implies \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(n\frac{\dot{\vec{r}}}{|\dot{\vec{r}}|}\right) = |\dot{\vec{r}}| \, \vec{\mathrm{grad}} \; n \tag{24}$$

Alors avec $\mathrm{d}s = |\dot{\vec{r}}|\mathrm{d}t$, il vient l'**équation du rayon lumineux :**

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}(n\vec{u}) = \vec{\mathrm{grad}}(n) \tag{25}$$

où $\vec{u} = \frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}s}$ la direction du rayon.

Détail du calcul
Le Lagrangien : $\mathcal{L} = n\left(\vec{r}(t)\right) \|\dot{\vec{r}}\|$.

$$0 = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{r}_i}\right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial r_i} \tag{26}$$

$$0 = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{n\left(\vec{r}(t)\right) \dot{r}_i}{\|\dot{\vec{r}}\|}\right) - \frac{\partial n\left(\vec{r}(t)\right)}{\partial r_i}\|\dot{\vec{r}}\| \tag{27}$$

$$\frac{1}{\|\dot{\vec{r}}\|}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{n\dot{r}_i}{\|\dot{\vec{r}}\|}\right) = \left(\boldsymbol{\nabla} n\right)_i \tag{28}$$

Pour les rayon qui vont vers les haut gradient. On peut réécrire l'équation des rayon en :

$$\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}s}\vec{u} + n\frac{\mathrm{d}\vec{u}}{\mathrm{d}s} = \vec{\boldsymbol{\nabla}} n \tag{29}$$

ca nous dit que $\vec{\boldsymbol{\nabla}} n$ est une combinaison linéaire de $\vec{u}$ et $\frac{\mathrm{d}\vec{u}}{\mathrm{d}s}$. Donc $\boldsymbol{\nabla} n$ appartient au demi-plan vers l'intérieur de la courbure (car $\frac{\mathrm{d}\vec{u}}{\mathrm{d}s}$ est vers l'intérieur et n positif). Donc les rayons se courbent vers les plus fort gradients.

Transition :
Cette courbure des rayons permet d'expliquer les mirages ! !

3.2 Mirages

On considère un milieux tel que $n(z) = n_0\sqrt{1 + \frac{z}{z_0}}$. Ce peut être le cas dans un gaz avec un gradient de température. On peut écrire l'équation des rayons :

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}(n\vec{u}) = \vec{\mathrm{grad}}(n) \tag{30}$$

Calculons chaque termes :

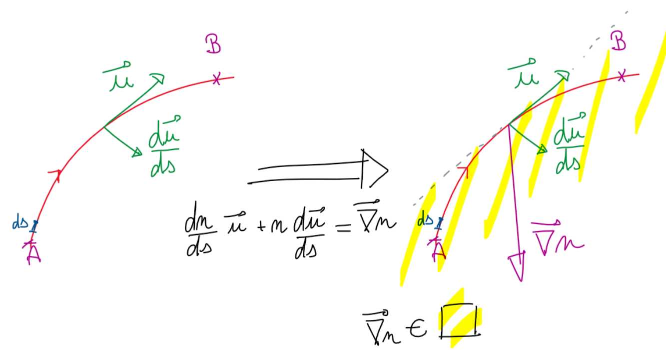

Figure 7 – *le schéma est pas ouf, mais en commentant en le faisant je pense que ca peut être très clair*

— $\vec{\text{grad}}(n) = \frac{n_0^2}{2z_0 n(z)}\begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix}$

— Pour $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}(n\vec{u})$.
Tout d'abord on remarque qu'en considérant le rayon dans le plan $(0XZ)$, et en remarquant que $\frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}s}$ est unitaire, on peut écrire : $\frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}s} = \begin{pmatrix}\sin(\theta)\\0\\\cos(\theta)\end{pmatrix}$ De plus on a $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s} = \frac{\partial x}{\partial s}\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial s}\frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial z}{\partial s}\frac{\partial}{\partial z} = \sin(\theta)\frac{\partial}{\partial x} + \cos(\theta)\frac{\partial}{\partial z}$

Dans la direction Ox on a :

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\left(n\sin(\theta)\right) = 0 \tag{31}$$

On a donc $n(z)\sin(\theta) = cst = K$
Dans la direction Oy on a en utilisant la relation trouvée :

$$\frac{n_0^2}{2z_0 n(z)} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\left(n\cos(\theta)\right) \tag{32}$$

$$= \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\left(n\sin(\theta)\frac{\partial z}{\partial x}\right) \tag{33}$$

$$= n(z)\sin(\theta)\left(\sin(\theta)\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\right) \tag{34}$$

On a utiliser la On a donc l'équation

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{n_0^2}{2z_0 K^2} \tag{35}$$

Donc

$$z = \frac{n_0^2}{2z_0 K^2}x^2 + Ax + B. \tag{36}$$

Les rayons ont donc une trajectoire parabolique, ceci explique les mirages.
Mirages inférieurs, supérieurs. Petit modèle proposé dans la leçon de Benjamin.

3.3 Fibre Optique

On a donc vu que l'on pouvait courber des rayon si l'indice n'est pas homogène, considérons maintenant deux milieux d'un contre l'autre de telle sort que l'indice face un triagle on a alors le profile suivant. On peut donc guider un rayon. C'est le principe de la fibre optique à gradient d'indice. (je propose de ne pas faire de calcul, juste un schéma et dire voilà on peu guider comme ça, et si on veux on peu dire que ça améliore la transmission d'info par rapport à une fibre à saut d'indice. Soit on fait mirages + modèle (avec calculs donc), soit on fait fibre optique avec calcul. Moi j'aime pas trop la fibre optique mais c'est pas un argument...

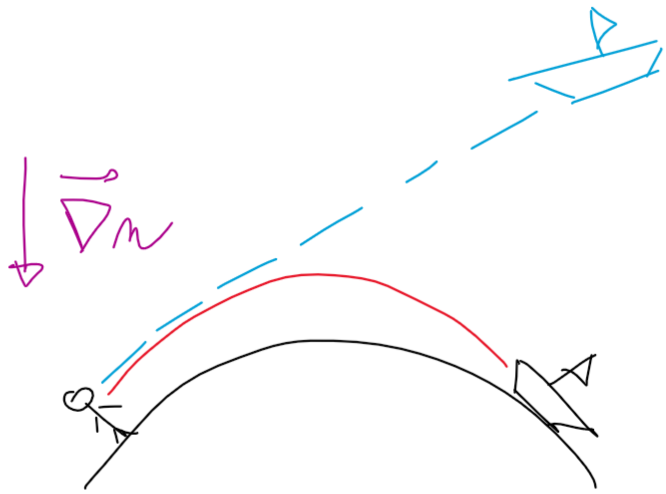

Figure 8 – *mirage supérieur*

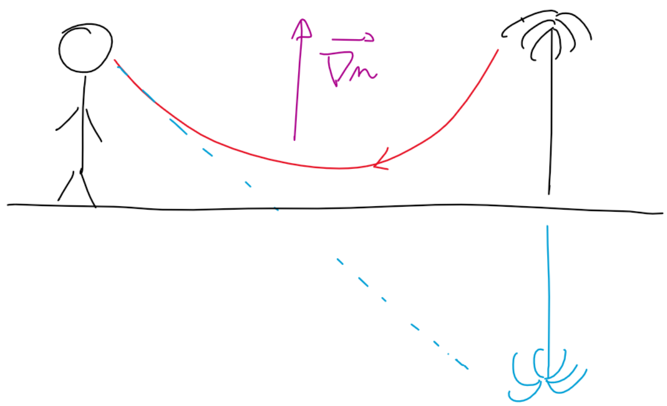

Figure 9 – *mirage inférieur*

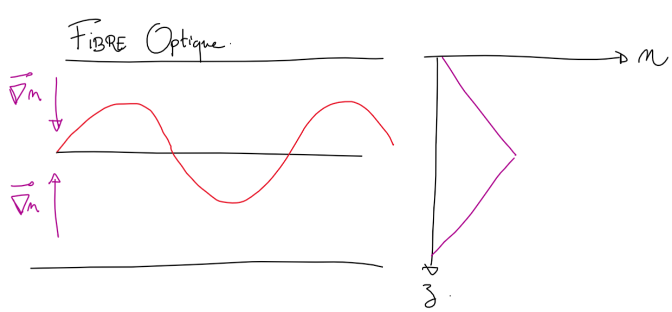

Figure 10 – *fibre optique à gradient d'indice*

Conclusion

On a vu que l'optique géométrique tenait dans un seul principe de minimisation : on a retrouvé les lois que l'on utilise d'habitude. On retrouve une analogie avec ce qu'on voit en mécanique avec le principe de Maupertuis et la deuxième loi de Newton. Mais le formalisme présenté permet d'aller plus loin : on a fait de l'optique dans des milieux non homogènes pour expliquer les mirages, ou à partir desquels on fabrique des fibres optiques et des lentilles à gradient d'indice (utile en imagerie (*wikipédia*)).

En revanche, si on enlève l'hypothèse $\lambda \ll D$:

Expérience : Laser avec poussière de craie et un diaphragme très serré : On observe de la diffraction ! La diffraction n'est pas décrite dans l'optique géométrique.

4 Questions

- Est-ce que c'est comme cela que l'on vous a introduit un rayon ? Comment introduire cette notion à des lycéens ? N'y a t'il pas d'autres manière plus intuitive ?
  - On peut imaginer un tube de lumière (un cylindre) dont on fait tendre le rayon vers 0.
- Pourquoi prenons-nous $\lambda << D$? Est-ce que c'est nécessaire dans le cadre de l'électromagnétique où l'on s'est mis ?
  - On est obligé de parler de $\lambda << D$ car on doit avoir ϵ_r qui varie lentement devant la taille du système pour parler de rayons.
- Quel principe a d'abord été énoncé par Fermat ? Quelle date ? C'est avant ou après Descartes ?
  - La nature agit toujours par les voies les plus courtes et les plus simples. (1657)
  - Le principe de Fermat se place après les découvertes de Snell-Descates (Snell :1621 et Descartes :1637 dans La Dioptrique.)
- La notion de chemin optique peut être vue comme un temps exprimé par une longueur (c'est moyen une question)
  - Le chemin optique entre deux point dans un milieux matériel est équivalent à la distance que parcourait la lumière si elle se propager dans le vide en le même temps.
- Comment peut-on illustrer le fait que le chemin doit être stationnaire ? Pourquoi est-ce mieux de le prendre stationnaire ?
  - Considérer la réflexion sur un miroir plan et la propagation directe entre deux points n'est pas un bon exemple car il n'y a pas les même contraintes dans les deux cas. En effet dans le cas de la réflexion par le miroir, on minimise sous contrainte de passer par le miroir, ce qui n'est pas le cas dans pour une propagation directe (il n'y pas de contrainte).
  - On peut alors prendre l'exemple de miroirs en formes de "cuvette", ou le cas d'un point scelle.
  - A priori, l'énoncé du principe de Fermat avec le chemin stationnaire est plus complet et permet notamment de rendre compte des exemples cités au dessus.
- v dans le changement de variable pour le chemin optique, c'est quelle type de vitesse ?
  - C'est la vitesse de phase
- Bien insister sur les arguments importants dans la démonstration de la propagation en ligne droite (notamment la factorisation de n dans un milieu homogène).
- Pourquoi dit-on parfois que la propagation rectiligne dans la milieu homogène est l'analogue de la première loi de Newton ?
  - Dans un milieu homogène, il n'y a pas de variation susceptible de modifier la trajectoire du rayon tout comme en l'absence de force (ou avec des forces qui se compensent) un objet conserve son mouvement rectiligne uniforme.
  - On peut faire une analogie "pas de force" = "milieu homogène"
- Le retour inverse de la lumière est-il toujours valable ?
  - Le retour inverse de la lumière n'est valable que s'il n'y à pas de dissipation sur le trajet. En effet, si on utilise des polariseurs par exemples, on peut constater que le retour inverse de la lumière ne marche plus.
- Pourquoi quand on fait la différentiel du chemin optique dans le cas de la réflexion sur un miroir, on ne fait intervenir que dM ? Pourquoi ne modifie t-on pas A est B
  - On cherche le rayon qui passe par A et B donc nécessairement on ne fait pas ces points. Quand on fait la différentielles de chemin optique, a priori on considère un déplacement infinitésimale du chemin en gardant le déplacement nulle aux extrémités.

- Parfois, on peut trouver des formulation des lois de Descartes avec 3 ou 2 lois. Pourquoi et dans quels cas ?
  - Quand on travaille avec des angles orientés, nous n'avons besoin que de deux loi : rayon incident et réfléchie dans le même plan et la relation sur les angles.
  - Si les angles ne sont pas orientés, il est nécessaire de préciser en plus que le rayon traverse la normale. En effet, sinon, on n'exclue pas le fait que le rayon puisse "revenir sur ses pas".
- Qu'est ce qu'un angle de réfraction limite ?
- Que sont les points de Weiestrass
  - Des points rigoureusement stigmatique pour une sphère ?
- Existe-t-il beaucoup de systèmes rigoureusement stigmatiques ?
  - Non, les miroirs pour tout points et des ellipse pour deux points
- Quelle est la définition de l'applanetisme ?
  - Un système est applanatéique si un objet dans un plan perpendiculaire à l'axe optique admet une image pas le système également perpendiculaire à l'axe optique
- Quelle définition facile on peut donner de l'indice optique ? (niveau lycée)
  - n quantifie a quelle point la lumière est ralenti par le milieu. On peut le définir cor $n = \frac{c}{n}$
- A-t-on plus de chance de voir les mirages en été ou en hivers ? sur quelles surfaces ?
  - Pour les mirages chaud, on en voit souvent en été au dessus des routes. La capacité thermique de goudron permet de chauffer l'air juste au dessus de manière "efficace"
  - Pour les mirages froid, en été aussi, mais au dessus des océans. En effet les couches intérieurs de l'océan constituent de très bon réservoirs de températures. Ceci peut permettre l'apparition d'un gradient quand la température augmente au dessus de la surface de l'eau.
- Qu'est ce qu'un mirage gravitationnel ?
  - La déformation des rayon du à un astre très massif permettant d'observer un autre astre derrière le premier.

5 Remarques

- Le plan est OK mais on peut traiter moins de cas (sauter Mallus ou les sinus d'Abbe) pour être moins pressé par le temps et passer plus de temps sur la troisième partie avec les applications.
- Prendre le temps de bien faire ressortir les arguments importants des démonstrations.
- Être plus précis sur les près-requis : mettre par exemple mécanique Lagrangienne.
- Revoir comment mieux introduire la nécessité de prendre le chemin optique stationnaire.
- Penser à plus décrire l'expérience même si on commence par l'utiliser en manipulation d'introduction.