

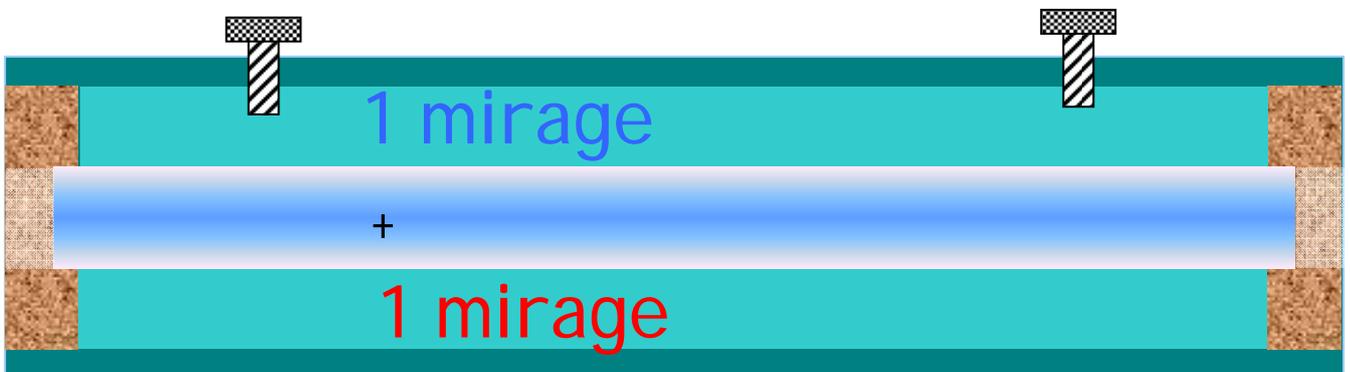


Finale Nationale des Olympiades de Physique  
Vendredi 27 janvier 2006

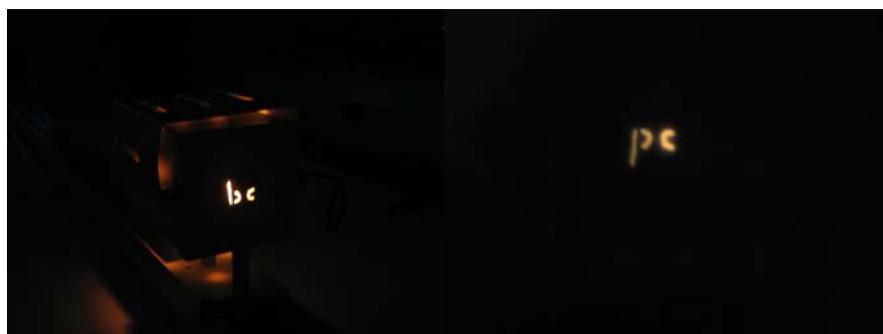
Au Palais de la Découverte

Clémence BERNARDY et Perrine CAGNEAUX

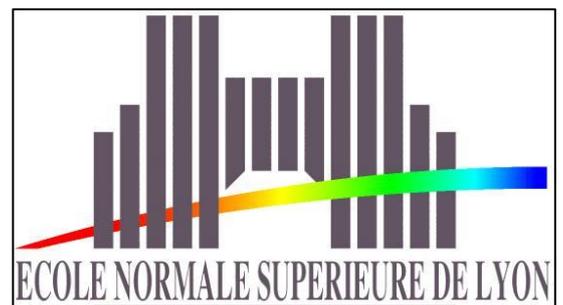
Présentent



= une belle image (de la physique)



Nos partenaires



## Sommaire

Introduction	4
I) De Descartes aux Mirages	6
A) Propagation de la lumière dans un milieu isotrope.	6
B) Les lois de la réfraction.	6
C) Les mirages.	8
D) La modélisation mathématique des mirages.	10
E) La modélisation expérimentale des mirages.	14
1) Le choix des conditions expérimentales.	14
a) Le choix de la lumière utilisée.	14
b) Le choix du moyen de visualisation du faisceau.	14
c) Le choix de l'espèce chimique.	15
2) « Les mirages in-vitro »..	16
a) Les mirages supérieurs.	16
b) Les mirages inférieurs.	18
F) L'analyse de mirage.	20
1) Mirages supérieurs.	20
2) Mirages inférieurs.	23
II) Des mirages à Einstein	29
A) La combinaison de mirages inférieurs et supérieurs dans la nature	29
B) Notre idée : additionner des mirages	31
C) La simulation par le logiciel Optgé	32
D) Notre première idée : les polymères.	33
E) « La lentille à air chaud »	34
F) Le retour aux polymères	36
G) La « lentille à mirages permanents »	39
1) La fabrication	39
2) Schéma de fonctionnement	40
3) Résultats	41
Conclusion	43
Bibliographie	44
Webographie	45
Remerciements	46
Ce que nous ont apporté les Olympiades de Physique 1	47
Ce que nous ont apporté les Olympiades de Physique 2	49

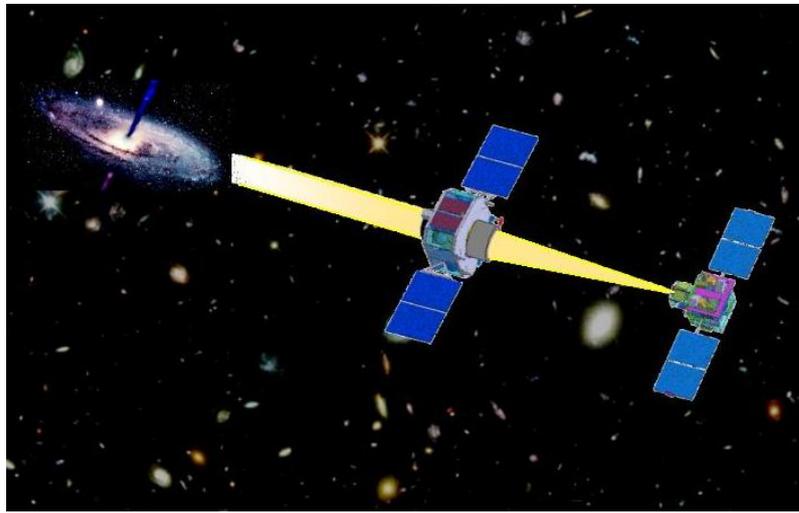
Nous avons connu les Olympiades en classe de Première. En effet nous avons participé aux Olympiades de Chimie, notre sujet : «les polymères ». Ce qui nous a permis de découvrir le travail des lauréats des Olympiades de Physique 2005, qui étudiaient la physique du karaté. Nous partagions le même laboratoire le mercredi après midi.



Marion, François, Guillaume et Claire  
La physique du karaté, CNAM janvier 2005.

Leur travail nous a beaucoup intéressées, et nous a donné envie de nous investir dans un tel projet. Nous avons donc commencé à nous intéresser à leur façon de travailler, pour nous familiariser avec les Olympiades de Physique. C'est alors que nous avons appris qu'ils allaient découvrir le CEA de Saclay. Parallèlement nous travaillions sur nos TPE, qui portaient sur « la radioactivité et ses risques pour la santé », C'est pourquoi cette visite nous a particulièrement été utile. Ils nous ont ramené beaucoup de documentation qui nous a permis d'obtenir une note honorable aux TPE. Nous regrettons d'ailleurs que ces TPE aient été supprimés. C'est aussi pour cela que nous avons voulu participer aux différentes Olympiades.

Ils nous ont raconté ce qu'ils avaient vu. Nous avons appris que ça allait de la physique fondamentale à l'étude du climat en passant par le prion de la vache folle ou les polymères des OLED. Ils nous ont également parlé d'un télescope à rayons X, sans lentille.



Le télescope Simbol-X (image CEA Saclay)

Il fonctionne par réflexion ! Nous avons eu des difficultés à comprendre ce système. En discutant nous en sommes arrivés à parler des mirages. C'est ainsi que nous avons décidé de nous intéresser aux différents types de mirages et pourquoi pas combiner deux mirages : inférieur et supérieur. Sur le papier cela paraissait simple, mais la physique étant une science expérimentale, nous ne pouvons annoncer aucun résultat à l'avance...

# I) De Descartes aux mirages.

## A) Propagation de la lumière dans un milieu isotrope

Un milieu est dit isotrope s'il a les mêmes caractéristiques dans toutes les directions de l'espace. Dans ces conditions la lumière se propage en ligne droite avec une célérité  $v$ , tel que :

$$n_{\text{milieu}} = \frac{c}{v}$$

Où :

- o  $c$  est la célérité de la lumière dans le vide et vaut  $299792458 \text{ m.s}^{-1}$  par définition (on prend habituellement  $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$ )
- o  $v$  est la célérité de la lumière dans le milieu considéré, pour une radiation monochromatique et dans des conditions données de température, de pression ...
- o  $n$  est le rapport des deux grandeurs précédentes, c'est l'indice de réfraction. C'est un nombre sans dimension, il caractérise un milieu dans des conditions données.

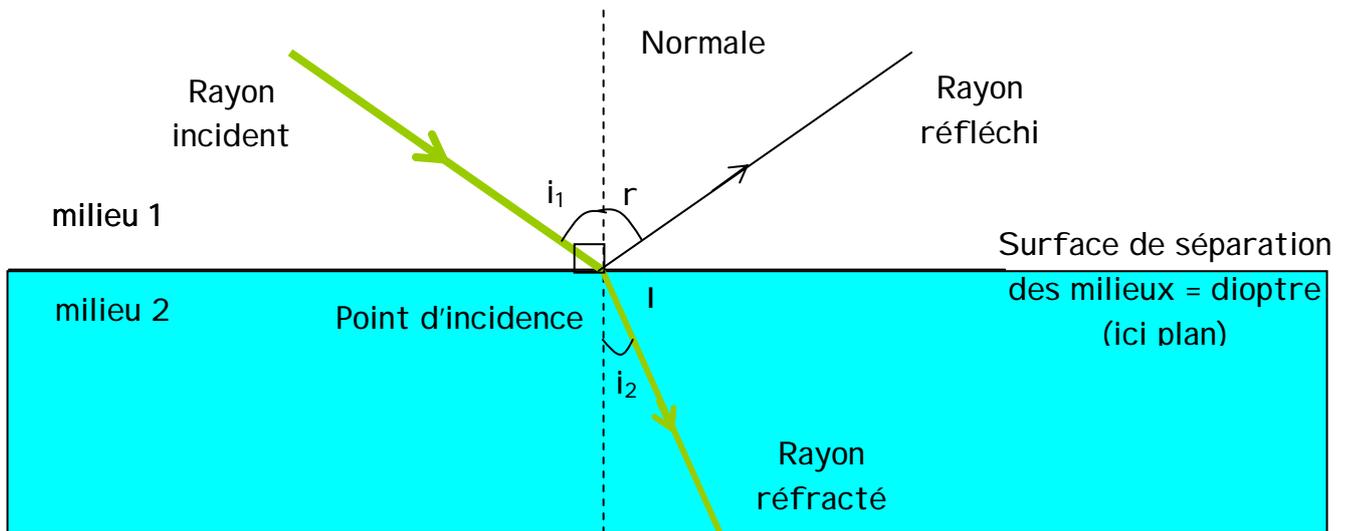
Ainsi d'après le Hand Book pour une longueur d'onde de 589 nm

Espèce chimique	n
Eau	1,333
Acétone (propan-2-one)	1,358
Cyclohexane	1,423
Ethanol	1,361
Diamant	2,418
Tribromure de bore	1,312
Pyrrargyrite $\text{Ag}_3\text{SbS}_3$	3,081
Cinabre $\text{HgS}$	3,143

L'indice de réfraction dépend de l'espèce chimique, mais aussi des conditions de température, de pression, et de la longueur d'onde dans le vide de la radiation monochromatique.

## B) Les lois de la réfraction.

Nous avons vu en 2<sup>nde</sup> que lorsqu'un rayon lumineux incident passe d'un milieu 1 (supposé isotrope) à un milieu 2 (lui aussi supposé isotrope), il change de direction, on dit qu'il est réfracté.



D'après les lois de Snell-Descartes, les trois rayons sont dans un même plan appelé plan d'incidence.

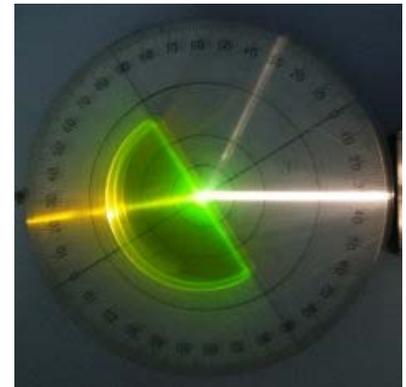
Tous les angles sont mesurés par rapport à une perpendiculaire au dioptre passant par le point d'incidence : la normale.

On peut alors écrire que :

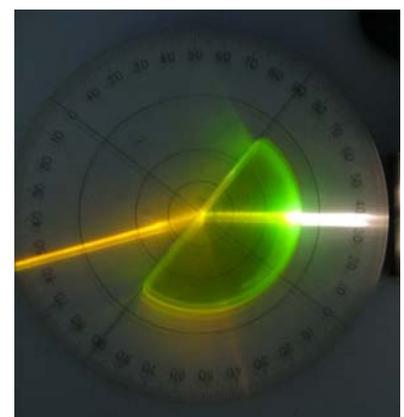
$$n_1 \cdot \sin(i_1) = n_2 \cdot \sin(i_2)$$

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

Lorsque le milieu 1 est moins réfringent que le milieu 2, le rayon réfracté se rapproche de la normale.



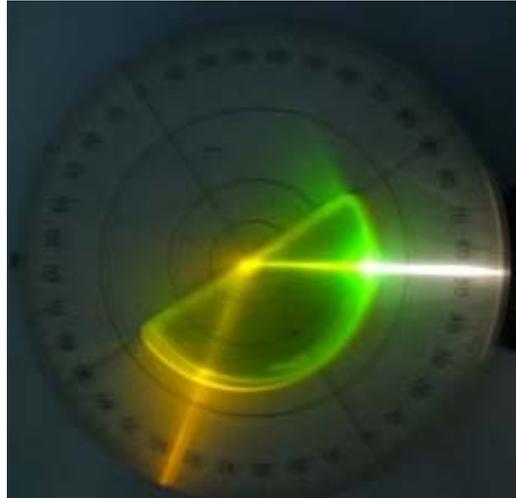
Lorsque le milieu 1 est plus réfringent que le milieu 2, le rayon réfracté s'écarte de la normale.



Cependant l'angle  $i_2$  ne peut être supérieur à  $90^\circ$ , il existe un angle limite,  $i_{lim}$ , au-delà duquel il n'y a plus de réfraction possible. Le faisceau incident est alors complètement réfléchi on parle de réflexion totale

Pour  $i_{lim}$ ,  $\sin i_2 = 1$  d'où :

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



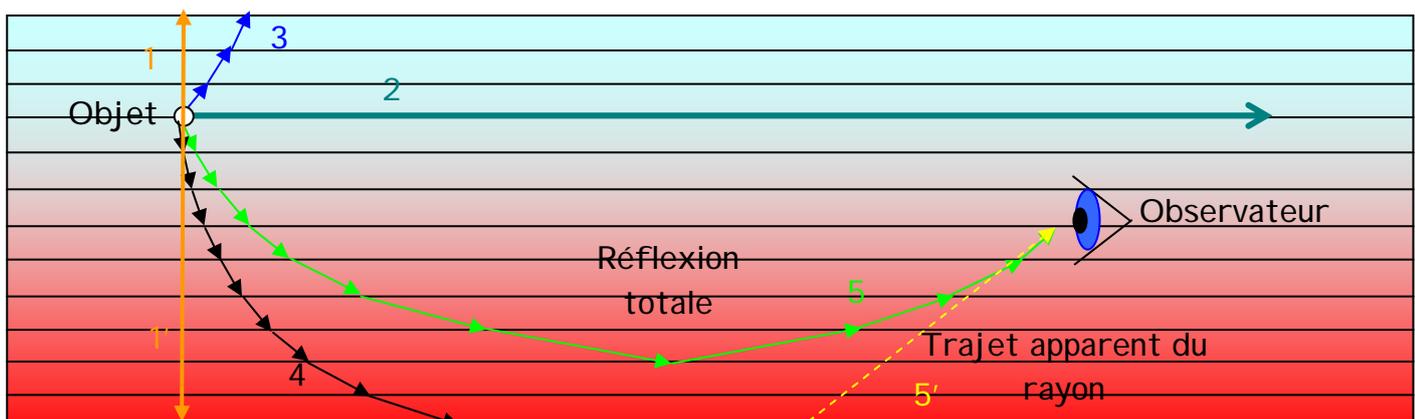
Par exemple lorsqu'on passe de l'eau ( $n_1 = 1,33$ ) à l'air ( $n_2 = 1$ ), l'angle limite est tel que  $\sin(i_{lim}) = \frac{1}{1,33} = 0,752$  soit  $i_{lim} \approx 49^\circ$ . Tout rayon ayant une incidence supérieure environs  $50^\circ$  est réfléchi, cela explique le fait que la surface d'une piscine se comporte comme un miroir, pour un observateur situé au fond et observant vers le haut.

### C) Les mirages

Les mirages atmosphériques se manifestent, lorsque l'air n'est plus un milieu homogène (isotrope) mais se compose d'une infinité de couches horizontales supposées isotropes. On parle alors de milieu optique stratifié.

Dans ce cas, pour les rayons qui se dirigent vers des strates d'indice plus faible, l'angle du faisceau réfracté est plus grand que celui du faisceau incident. Pour certains d'entre eux, cela se produit jusqu'à atteindre l'angle limite. A partir de ce moment le faisceau repart vers des milieux d'indice plus élevé.

Sur le schéma ci-dessous nous avons représenté les différents cas de figure possibles lorsque l'indice de réfraction diminue vers le bas.



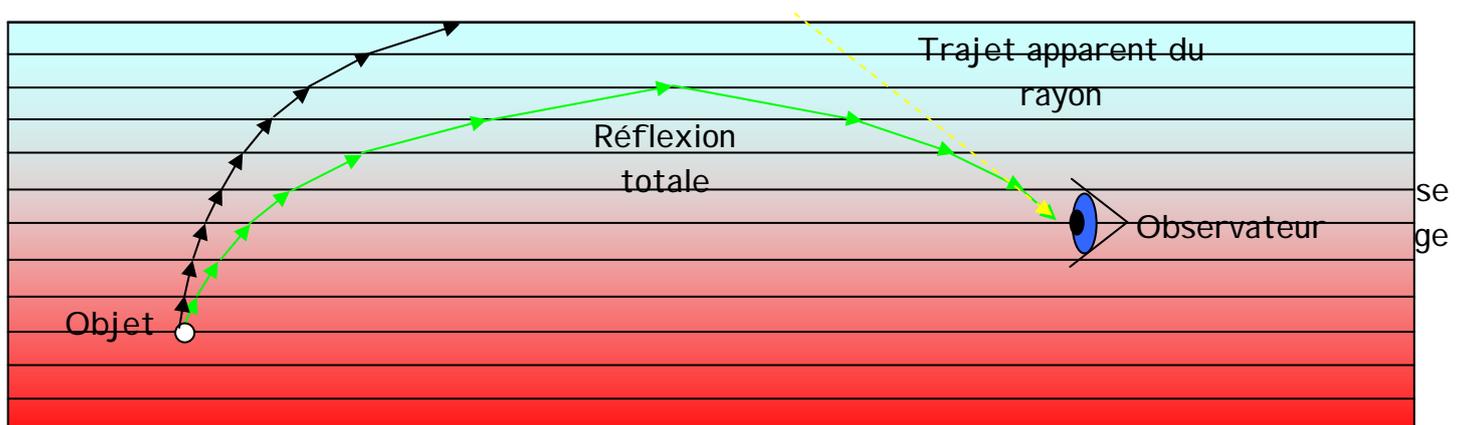
- Pour les rayons 1 et 1', l'incidence est normale ( $i_1 = 0$ ) par conséquent il n'y a pas de réfraction, les rayons se propagent en ligne droite.
- Pour le rayon 2, il est horizontal, il se propage dans un milieu homogène donc en ligne droite.
- Pour le rayon 3, il se propage vers un milieu de plus en plus réfringent. Il subit donc une réfraction, le rayon réfracté se rapproche de plus en plus de la normale, jusqu'à ce que l'angle devienne nul. Il subit alors le sort des rayons 1 et 1'.
- Pour le rayon 4, il se propage vers un milieu de moins en moins réfringent. Il subit donc une réfraction, le rayon réfracté s'écarte de plus en plus de la Normale, jusqu'à ce qu'il touche le sol.
- Pour le rayon 5, il se propage vers un milieu de moins en moins réfringent. Comme le rayon 4, il s'écarte de plus en plus de la Normale, jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur de l'angle limite, il est alors complètement réfléchi. Il repart alors vers le haut en se comportant comme le rayon 3. A moins qu'il ne rencontre l'œil d'un observateur (ou l'objectif d'un appareil photographique) qui aura l'impression que le rayon est en fait 5'. On parle alors de mirage.

Il y a des rayons que nous avons écartés de cette représentation pour plus de clarté.

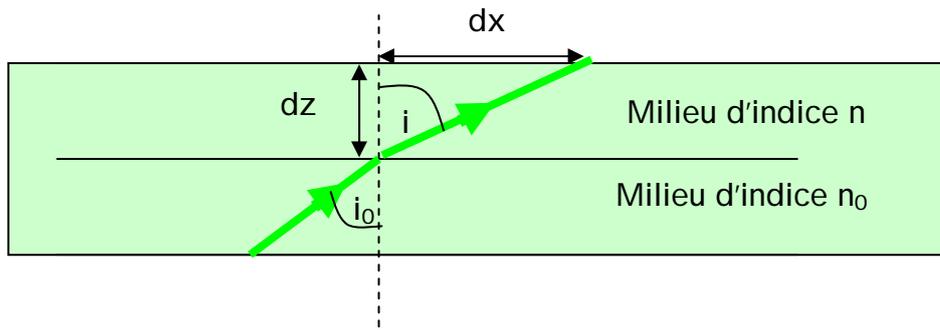
- Tous ceux qui partent vers la gauche et subissent le même sort.
- Il y a d'autres rayons 5, les uns passent sous l'œil, d'autres au dessus.

Le schéma ci-dessus représente un mirage inférieur, il se manifeste quand le gradient d'indice de réfraction est négatif vers le bas (il diminue lorsqu'on descend). C'est lui qui se manifeste lorsque la route est surchauffée, on parle alors de mirage chaud.

Le schéma ci-dessous montre ce qu'il se passe, lorsqu'on a un gradient d'indice négatif vers le haut, c'est une figure symétrique de la précédente.



## D) La modélisation mathématique des mirages



D'après la seconde loi de Descartes :  $n_0 \cdot \sin(i_0) = n \cdot \sin(i)$

Soit encore :

$$\tan(i) = \frac{\text{coté opposé}}{\text{coté adjacent}} = \frac{dx}{dz}$$

Et  $\tan(i) = \frac{\sin(i)}{\cos(i)}$  on élimine le cosinus

$$\tan(i) = \frac{\sin(i)}{\sqrt{1 - \sin^2(i)}} \quad \text{car } \sin^2(i) + \cos^2(i) = 1$$

Or  $n_0 \cdot \sin(i_0) = n \cdot \sin(i)$  soit  $\sin(i) = \frac{n_0 \cdot \sin(i_0)}{n}$

d'où la nouvelle expression de  $\tan(i) = \frac{\frac{n_0 \cdot \sin(i_0)}{n}}{\sqrt{1 - \left(\frac{n_0 \cdot \sin(i_0)}{n}\right)^2}}$

$$= \frac{n_0 \cdot \sin(i_0)}{n \cdot \sqrt{1 - \frac{n_0^2 \cdot \sin^2(i_0)}{n^2}}}$$

$$= \frac{n_0 \cdot \sin(i_0)}{\sqrt{n^2 - n_0^2 \cdot \sin^2(i_0)}}$$

Hypothèse  $n = n_0 \sqrt{1 + kz}$ , modèle plus communément admis,

Donc  $n^2 = n_0^2 + n_0^2 kz$

$$\frac{dx}{dz} = \frac{n_0 \cdot \sin(i_0)}{\sqrt{n^2 - n_0^2 \cdot \sin^2(i_0)}} = \frac{n_0 \sin(i_0)}{\sqrt{n_0^2 + n_0^2 kz - n_0^2 \cdot \sin^2(i_0)}}$$

$$dx = \frac{n_0 \sin(i_0)}{\sqrt{n_0^2 (1 + kz - \sin^2(i_0))}} \cdot dz$$

$$dx = \frac{n_0 \sin(i_0)}{n_0 \cdot \sqrt{1+kz-\sin^2(i_0)}} \cdot dz$$

$$dx = \frac{\cancel{n_0} \sin(i_0)}{\cancel{n_0} \cdot \sqrt{1+kz-\sin^2(i_0)}} \cdot dz$$

$$dx = \frac{\sin(i_0)}{\sqrt{1+kz-\sin^2(i_0)}} \cdot dz$$

$$dx = \frac{\sin(i_0)}{\sqrt{kz+\cos^2(i_0)}} \cdot dz$$

Si on intègre en prenant comme origine le point  $x = 0$  et  $z = 0$

$$\int_0^x dx = \int_0^z \frac{\sin(i_0)}{\sqrt{kz+\cos^2(i_0)}} \cdot dz$$

D'après XCAS, un logiciel de calcul formel,

Une primitive de  $\int_0^z \frac{\sin(i_0)}{\sqrt{kz+\cos^2(i_0)}} \cdot dz$  est  $\left[ \frac{2\sin(i_0) \cdot \sqrt{\cos^2(i_0) + k \cdot z}}{k} \right]$

$$x = \left[ \frac{2\sin(i_0) \cdot \sqrt{\cos^2(i_0) + k \cdot z}}{k} \right]_0^z$$

$$x = \frac{2\sin(i_0) \cdot \sqrt{\cos^2(i_0) + k \cdot z}}{k} - \frac{2\sin(i_0) \cdot \sqrt{\cos^2(i_0) + 0}}{k}$$

$$x = \frac{2\sin(i_0) \cdot \sqrt{\cos^2(i_0) + k \cdot z} - 2\sin(i_0) \cdot \sqrt{\cos^2(i_0)}}{k}$$

Or  $\sqrt{\cos^2(i_0)} = \pm \cos(i_0)$  la suite de la démonstration est faite avec :  $\sqrt{\cos^2(i_0)} = +\cos(i_0)$

$$x = \frac{2\sin(i_0) \cdot \sqrt{\cos^2(i_0) + k \cdot z} - 2\sin(i_0) \cdot \cos(i_0)}{k}$$

$$x = \frac{2\sin(i_0) \cdot \sqrt{\cos^2(i_0) + k \cdot z} - \sin(2 \cdot i_0)}{k}$$

$$x \cdot k = 2\sin(i_0) \cdot \sqrt{\cos^2(i_0) + k \cdot z} - \sin(2 \cdot i_0)$$

$$x \cdot k + \sin(2 \cdot i_0) = 2\sin(i_0) \cdot \sqrt{\cos^2(i_0) + k \cdot z}$$

$$\frac{x \cdot k + \sin(2 \cdot i_0)}{2\sin(i_0)} = \sqrt{\cos^2(i_0) + k \cdot z}$$

$$\left( \frac{x \cdot k + \sin(2 \cdot i_0)}{2\sin(i_0)} \right)^2 = \left( \sqrt{\cos^2(i_0) + k \cdot z} \right)^2$$

$$\left( \frac{x \cdot k + \sin(2 \cdot i_0)}{2\sin(i_0)} \right)^2 = \cos^2(i_0) + k \cdot z$$

$$\frac{x^2.k^2 + 2.x.k.\sin(2.i_0) + \sin^2(2.i_0)}{4\sin^2(i_0)} = \cos^2(i_0) + k.z$$

$$\frac{x^2.k^2 + 2.x.k.\sin(2.i_0) + \sin^2(2.i_0)}{4\sin^2(i_0)} - \cos^2(i_0) = k.z$$

$$\frac{\frac{x^2.k^2 + 2.x.k.\sin(2.i_0) + \sin^2(2.i_0)}{4\sin^2(i_0)} - \cos^2(i_0)}{k} = z$$

$$\frac{x^2.k^{\cancel{2}}}{4.\cancel{k}.\sin^2(i_0)} + \frac{2.x.\cancel{k}.\sin(2.i_0)}{4.\cancel{k}.\sin^2(i_0)} + \frac{\sin^2(2.i_0)}{4.k.\sin^2(i_0)} - \frac{\cos^2(i_0)}{k} = z$$

$$\frac{x^2.k}{4.\sin^2(i_0)} + \frac{\cancel{2}.\sin(i_0).\cos(i_0)}{\cancel{2}.\sin^2(i_0)}.x + \frac{(2.\sin(i_0).\cos(i_0))^2}{4.k.\sin^2(i_0)} - \frac{\cos^2(i_0)}{k} = z$$

$$\frac{k}{4.\sin^2(i_0)}.x^2 + \frac{\cos(i_0)}{\sin(i_0)}.x + \frac{\cancel{4}.\sin^2(i_0).\cos^2(i_0)}{\cancel{4}.k.\sin^2(i_0)} - \frac{\cos^2(i_0)}{k} = z$$

$$\frac{k}{4.\sin^2(i_0)}.x^2 + \frac{1}{\tan(i_0)}.x + \frac{\cos^2(i_0)}{k} - \frac{\cos^2(i_0)}{k}$$

Soit enfin :

$$z = \frac{k}{4.\sin^2(i_0)}.x^2 + \frac{1}{\tan(i_0)}.x$$

Nous admettons sans démonstration que si on prend comme origine des altitudes z, le sol que l'équation devient :

$$z = \frac{k}{4.\sin^2(i_0)}.x^2 + \frac{1}{\tan(i_0)}.x + z_0$$

Or nous avons supposé que  $\sqrt{\cos^2(i_0)} = +\cos(i_0)$ .

Or le même raisonnement avec  $\sqrt{\cos^2(i_0)} = -\cos(i_0)$  aboutit à

$$z = \frac{k}{4.\sin^2(i_0)}.x^2 - \frac{1}{\tan(i_0)}.x + z_0$$

Quelle est la bonne équation ??

Une équation du type  $y = ax^2 + bx + c$ , admet un sommet donc sa dérivée s'annule, soit :  
 $y' = 2ax + b = 0$

Soit pour  $x = \frac{-b}{2a}$  donc si b est positif, on devrait avoir un mirage avant l'entrée dans le milieu stratifié, nous retiendrons donc le cas où b est négatif c'est-à-dire :

$$z = \frac{k}{4.\sin^2(i_0)}.x^2 - \frac{1}{\tan(i_0)}.x + z_0$$

C'est l'équation d'une parabole !

La dimension de  $k$  étant  $L^{-1}$ , notre équation est homogène puisque  $\sin(i_0)$  et  $\tan(i_0)$  sont sans dimension. De plus elle n'est définie que si  $\sin^2(i_0)$  et  $\tan(i_0)$  sont différents de 0, c'est-à-dire  $i_0 \neq 0$ , dans ce cas il n'y a pas de réfraction, ce n'est donc même pas la peine de parler de mirage.

Réfléchissons à la portée de cette équation.

- Si  $k = 0$ , le milieu est homogène l'équation devient  $z = 0 \cdot x^2 - \frac{1}{\tan(i_0)} \cdot x + z_0$

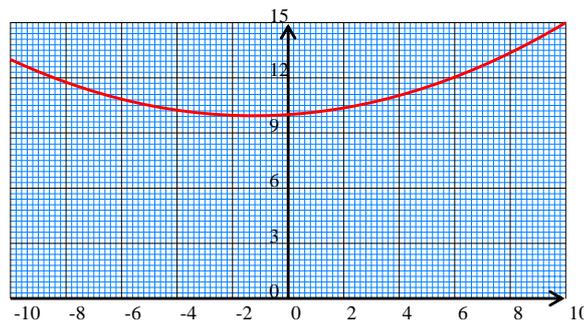
Soit encore  $z = -\frac{1}{\tan(i_0)} \cdot x + z_0$

Soit l'équation d'une droite affine, de coefficient directeur  $-\frac{1}{\tan(i_0)}$  ce qui est tout à fait logique étant donné la convention pour mesurer l'angle  $i_0$ , le coefficient directeur

« classique » aurait été  $\tan(\frac{\pi}{2} - i_0)$ . Or  $\tan(\frac{\pi}{2} - i_0) = \cotan(i_0) = \frac{1}{\tan(i_0)}$

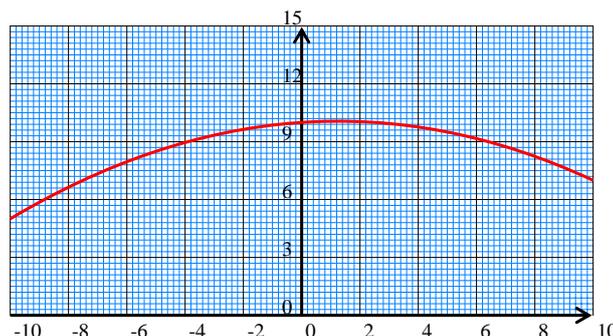
- Si  $k$  est positif, les indices de réfraction croissent donc lorsque l'altitude augmente, les indices les plus faibles sont donc vers le bas et en toute logique, nous devrions avoir un mirage inférieur. C'est effectivement ce que prévoit notre équation puisque pour une parabole de type  $y = ax^2 + bx + c$  si  $a$  est positif alors la parabole présente un sommet dirigé vers le bas.

Ex la représentation graphique de la fonction  $y = 0,04x^2 + 0,1x + 10$ .



- Si  $k$  est négatif, les indices de réfraction décroissent donc lorsque l'altitude augmente, les indices les plus faibles sont donc vers le haut et en toute logique, nous devrions avoir un mirage supérieur. C'est effectivement ce que prévoit notre équation puisque pour une parabole de type  $y = ax^2 + bx + c$  si  $a$  est négatif alors la parabole présente un sommet dirigé vers le haut.

Ex la représentation graphique de la fonction  $y = -0,04x^2 + 0,1x + 10$ .



## E) La modélisation expérimentale des mirages

Après l'étude théorique, nous avons souhaité reproduire au laboratoire des « mirages » dans des cuves, c'est ce que nous appellerons des mirages in-vitro.

### 1) Le choix des conditions expérimentales

#### a) Le choix de la lumière utilisée.

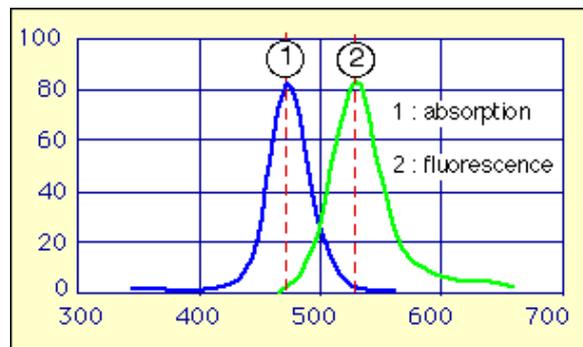
Nous avons plusieurs sources de lumière à notre disposition. Nous avons choisi d'utiliser un laser car il produit une lumière monochromatique. L'eau comme beaucoup de milieux est un milieu dispersif, ce choix s'imposait donc.

Nous disposons dans notre lycée de différents lasers, parmi lesquels un laser vert ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ) et un laser rouge ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ).

L'indice de réfraction étant fonction de l'inverse du carré de la longueur d'onde (loi de Cauchy), nous avons choisi d'utiliser le vert, car l'indice de réfraction est plus grand pour cette radiation.

#### b) Le choix du moyen de visualisation du faisceau

Classiquement on utilise du lait ou une espèce chimique colloïdale, pour visualiser le passage d'un faisceau de lumière. Nous avons choisi d'utiliser la fluorescéine, une espèce chimique qui fluoresce (réémet une partie de la lumière absorbée)



Ci-dessous les deux faisceaux qui traversent une cuve contenant de l'eau et de la fluorescéine.



Eau pure  
(On ne voit rien !)



Eau + lait  
(Le vert est plus diffusé)



Eau + fluorescéine  
(Seul le vert est visible)

Il n'y a pas photo, si on peut dire ! Pour être complètement honnête, précisons que les deux lasers ont la même puissance 3 mW.

c) Le choix de l'espèce chimique

Ne nous restait plus qu'à trouver l'espèce chimique qui nous permettrait d'avoir un gradient d'indice sur une gamme la plus grande possible, nous avons donc pris un échantillon de chacune des espèces chimiques solubles disponibles dans le laboratoire de notre lycée (du moins celles qu'on nous a autorisé à utiliser). Nous avons d'office éliminé toutes les espèces chimiques colorées comme le permanganate de potassium, le diiode et celle dont le prix était prohibitif.

Nous avons ensuite emprunté le réfractomètre d'Abbé à la section biochimie du lycée, et mesuré les indices de réfractions de différentes solutions.

Les réglages qui s'imposent classiquement (étalonnages) n'étaient pas nécessaires puisque nous recherchions l'espèce la plus réfringente.

Les résultats des mesures à 23°C sont consignés dans le tableau ci-dessous

Espèce chimique	indice
Acétate de sodium	1,375
Acide citrique	1,389
Acide oxalique	1,342
Acide tartrique	1,367
Chlorure d'ammonium	1,385
Chlorure de Calcium	1,442
Chlorure de potassium	1,367
Chlorure de sodium	1,379
Eau distillée	1,333
Eau salée à 300g.L <sup>-1</sup>	1,375
Éthanol	1,364
Glucose	1,374
Glycine	1,330
Iodure de potassium	1,473
Nitrate d'ammonium	1,392
Nitrate de potassium	1,356
Nitrate de sodium	1,382
Saccharose	1,370
Sel de Seignette	1,382
Soude 10mol	1,433
Sulfate de sodium	1,369
Thiosulfate de sodium	1,381

Il nous semblait alors que le choix d'une solution de chlorure de calcium s'imposait puisque c'est elle qui a l'indice le plus élevé :1,442.

Nous avons refait les mesures 3 jours après pour vérifier (et nous entraîner à manipuler le réfractomètre). Nous avons obtenu les mêmes résultats, excepté pour la solution de saccharose pour laquelle l'indice de réfraction avait augmenté de manière significative en passant de 1,370 à 1,445.

Nous avons donc refait les solutions, mais en faisant une saturation à chaud, les résultats étaient les mêmes après un retour à 20°C, sauf pour le saccharose qui passait à 1,459. C'est donc cette espèce chimique que nous retiendrons, car elle a l'indice de réfraction le plus élevé. De plus elle n'est ni chère ni difficile à trouver !

## 2) « Les mirages in-vitro ».

### a) Les mirages supérieurs.

Dans un premier temps nous avons voulu travailler avec du sucre solide au fond d'une éprouvette graduée, qui fut laissée à l'abandon pendant 15j, pour cause de vacances et d'oubli !

Nous avons tout de même étudié son profil d'indice. Pour cela, nous avons prélevé quelques gouttes tous les 5 mm en commençant par le haut de manière à perturber le moins possible le milieu stratifié (la pipette était descendue bouchée afin de ne prélever que dans la zone d'échantillonnage).

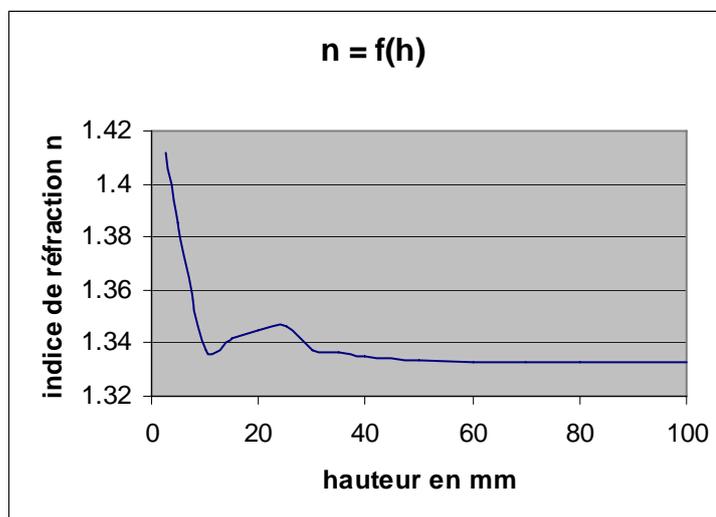


Le prélèvement



La mesure

Voici les premiers résultats :

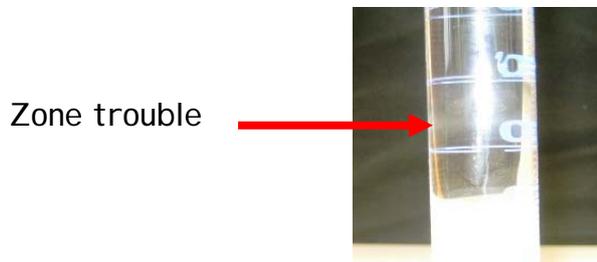


Surprenant à plus d'un titre !

Tout d'abord au bout de 15 jours, la solution n'était pas homogène !

Ensuite au fur et à mesure que nous descendions, l'indice augmentait, puis il se remettait à décroître.

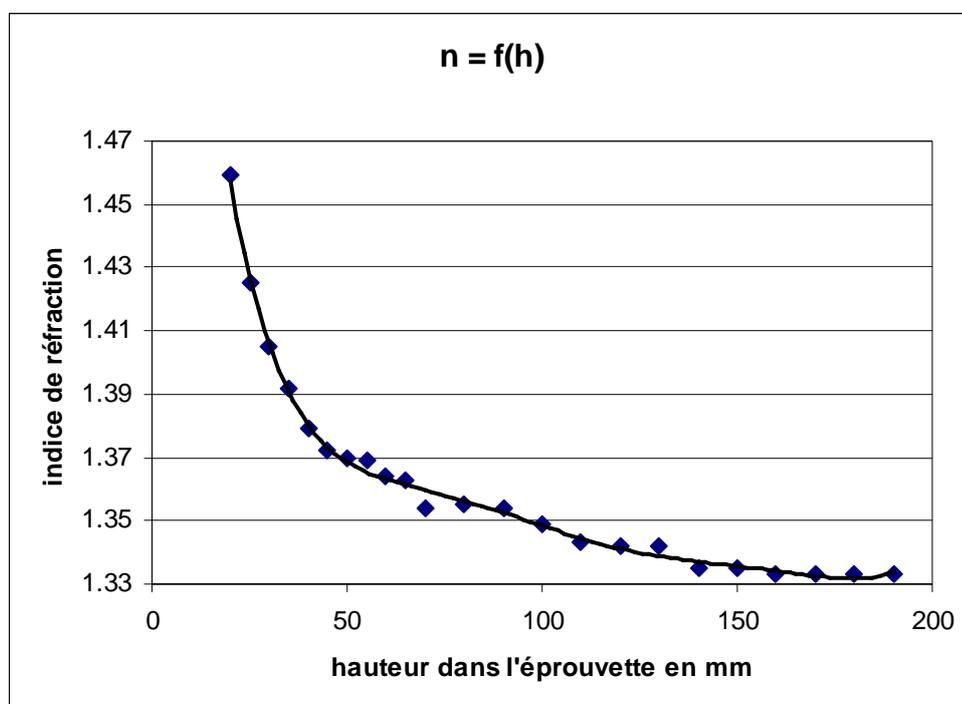
En observant de plus près l'éprouvette graduée, nous avons eu la surprise de voir l'erreur !



Nous avons remarqué une zone trouble, c'est dans cette zone que l'indice baissait ! Un petit coup de microscope nous donnait l'explication : il s'agissait de bactéries et levures qui avaient consommé le saccharose. A partir de cet instant, nous avons décidé de ne travailler qu'à partir de solution très concentrée préparée à chaud (destruction des microbes) et d'ajouter « le conservateur pour empois d'amidon » au cas où nous aurions dû conserver la solution un certain temps.

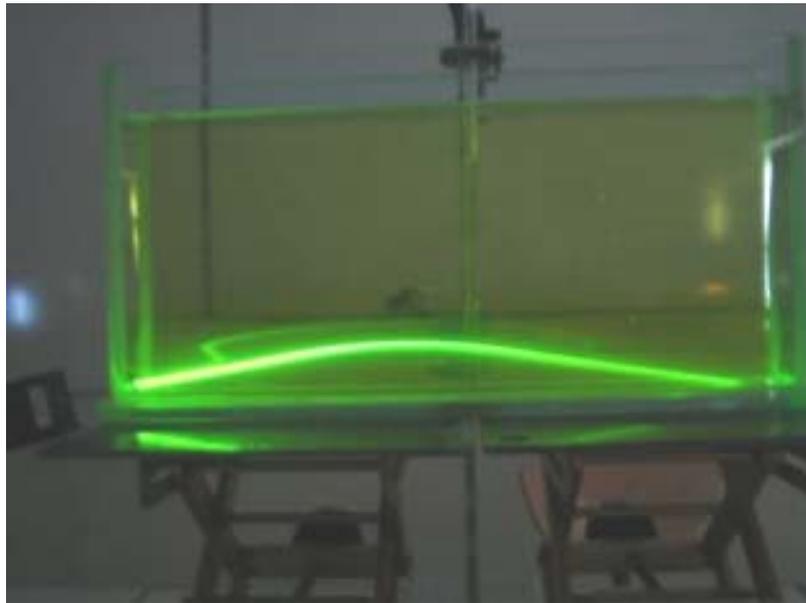
Nous avons de nouveau établi le profil d'indice, en partant d'une solution à 60% en masse (60g de saccharose pour 40 g d'eau).

Les résultats :



Aux erreurs de manipulation près (certes nous aurions dû multiplier les mesures) on peut dire que le profil n'est pas linéaire !

Nous avons ensuite rempli une cuve avec 4 litres d'une « solution » de fluorescéine. Puis nous avons introduit, à l'aide d'un entonnoir et d'un tube en verre, 1 litre d'une solution de saccharose à 60% (en masse), au fond de la cuve. Après 3j, nous avons obtenu la photographie suivante.



Le résultat obtenu est bien un mirage supérieur, le gradient d'indice est en effet négatif vers le haut, la concavité est dans le sens attendu. On peut aussi remarquer que sur cette photographie la rainure du tableau apparaît sur élevée.

#### b) Les mirages inférieurs

Le problème, dans ce cas était d'avoir des couches d'indice élevé en haut, or ce sont les plus denses. Il fallait donc les maintenir en haut, au moins pendant le temps de l'expérience. Nous avons opté pour le glaçon d'une solution de saccharose marquée à la fluorescéine dans de l'eau chaude, 40°C, contenant aussi notre marqueur de faisceau.

Les principes sont les suivants :

- On peut amener facilement en surface une solution concentrée par la fusion du glaçon.
- La solution libérée par la fusion est plus dense, et descend dans la cuve.
- L'eau de fusion étant plus froide que l'eau chaude de la cuve elle tend aussi à descendre, et l'eau chaude à monter.
- L'eau chaude ayant un indice plus faible que l'eau froide, cela aide aussi à obtenir un gradient négatif vers le bas.

Nous avons aussi tenté d'établir le profil d'indice en essayant de prélever aux différentes altitudes à l'aide de scoubidous (petits tuyaux souples). Malheureusement cela n'a pas fonctionné, les morceaux de ruban adhésif servant à les maintenir contre les parois s'étaient décollés. Faut de temps nous n'avons pas pu refaire l'expérience, qui bien que très simple dans le principe est relativement longue à préparer. La dissolution de 600g de saccharose dans 400 g d'eau est assez lente, il faut ensuite attendre que cela refroidisse,

avant la congélation. L'obtention du précieux glaçon n'est pas facile puisqu'il faut descendre assez bas en température ( $- 25^{\circ}\text{C}$ ), sinon on a « des glaçons mous ».

Enfin après tous ces efforts nous avons pu obtenir la photographie suivante en seulement 3 minutes



Ici aussi le résultat espéré est obtenu, on a une concavité vers le bas, il s'agit donc bien d'un mirage inférieur.

La photographie n'est pas très probante, mais notre cuve s'est ouverte par le bas avant que nous ayons le temps de trouver les réglages de l'appareil. Bilan une demi-heure à passer la serpillière dans le labo de chimie (avant de partir en philo), et notre cuve détruite.

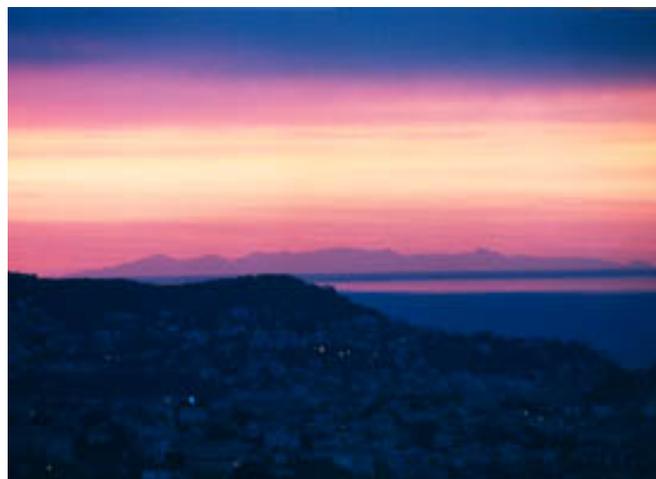
## F) L'analyse de mirage

L'étude théorique est une chose, la reproduire en est une autre, encore fallait-il nous confronter à la (dure) réalité du terrain. Nous sommes donc parties à la recherche de mirages.

### 1) Mirages supérieurs.

Une rapide recherche sur internet, nous avait montré que la Corse pouvait être visible depuis le continent (Nice). Or Perrine a une sœur qui travaille à Monaco. Elle y est donc partie en mission au mois de juillet, malheureusement ce fut un échec (voir « Ce que nous ont apporté les Olympiades de Physique 2 » à la fin du dossier)

Voici donc le genre de photographie que nous aurions dû obtenir.



La Corse vue depuis Menton (source : internet)

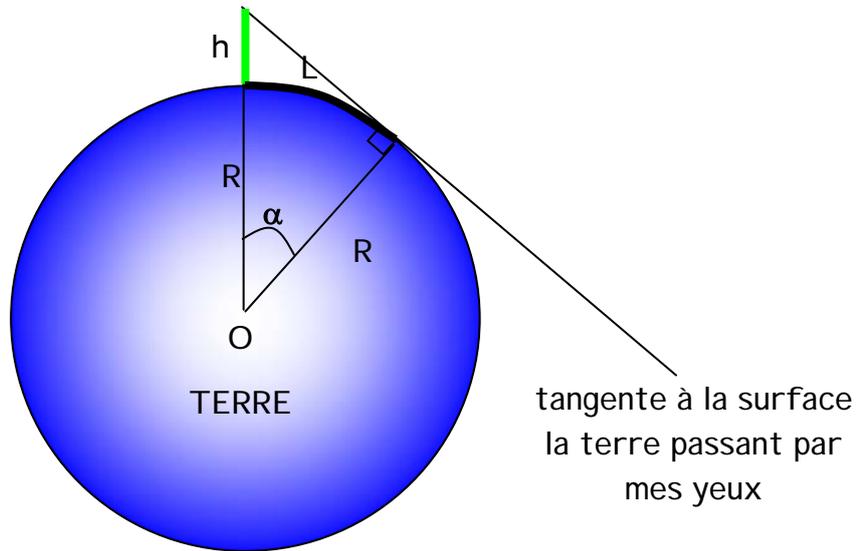
Nous avons demandé à M. BURIDANT, si c'était le même phénomène qui explique le fait, que depuis Boulogne sur mer, on voit très régulièrement les côtes anglaises avec une taille variable. Au début, lui aussi a beaucoup douté. Puis après une recherche sur internet, il a eu la confirmation de notre hypothèse par M. Benjamin HUARD, physicien au CEA. Inutile d'aller chercher très loin ce que nous avons en haut de la côte de notre lycée. « Tirez les premiers Messieurs les Anglais », la trajectoire des boulets est aussi parabolique que celle de nos mirages, au moins théoriquement. Et puis ne l'oublions surtout pas, la lumière que nous recevons est anglaise.

Avant de nous lancer dans l'exploitation du mirage, il fallait savoir ce que nous pouvions voir. Nous avons contacté l'IGN (Institut Géographique National), pour connaître les dimensions exactes de la terre au niveau de Boulogne et Douvres.

Le rayon de la terre est très exactement à Boulogne  $R = 6376666,92$  m

Or nos yeux sont situés à environs 1,60 m du sol, ce qui leur donne une altitude :

$R+h = 6376668,52$  m si nous calculons la distance à laquelle se trouve pour nous l'horizon :



$$\cos \alpha = \frac{R}{R+h}$$

Et l'abscisse curviligne, vaut :

$L = R \times \alpha = R \times \text{acos}(\cos \alpha)$  où  $\text{acos}(\cos \alpha) = \text{arccosinus}$  est l'inverse de la fonction cos

Ce qui nous donne :  $L = R \times \text{acos} \left( \frac{R}{R+h} \right)$

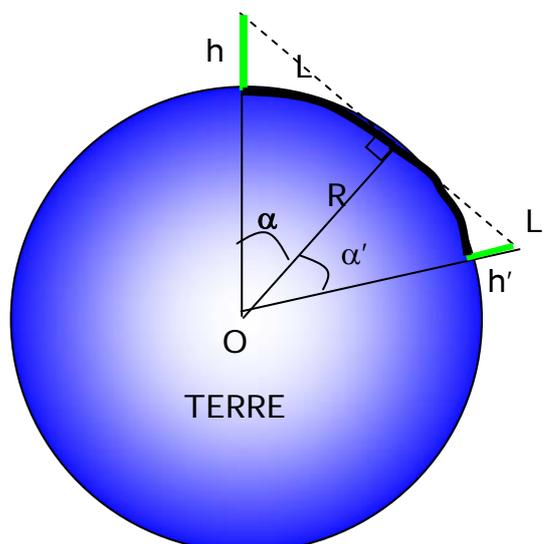
Soit numériquement avec une calculatrice en radians :

$$L = 6376666,92 \times \text{acos} \left( \frac{6376666,92}{6376666,92 + 1,60} \right) = 4517 \text{ m}$$

L'horizon est pour nous donc à environs 4,5 km lorsque nous sommes sur la plage au niveau de la mer.

Avec la même formule en montant au pied du Mont Lambert (la colline derrière le lycée), on trouve 41,1 km pour la ligne d'horizon, or les côtes anglaises les plus proches sont situées à au moins 50 km, et encore il s'agit de côtes plates, les falaises de Douvres, sont situées à 51,5 km.

Il faut donc chercher la taille minimale d'un objet pour être vu depuis ce site !



Nous savons que  $L + L' = 51,5$  km et que  $L = 41,1$  km

D'où  $L' = 51,5 - 41,1 = 10,4$  km

$$\text{Donc } \frac{L'}{R} = \alpha' \text{ et } \cos \alpha' = \frac{R}{R + h'}$$

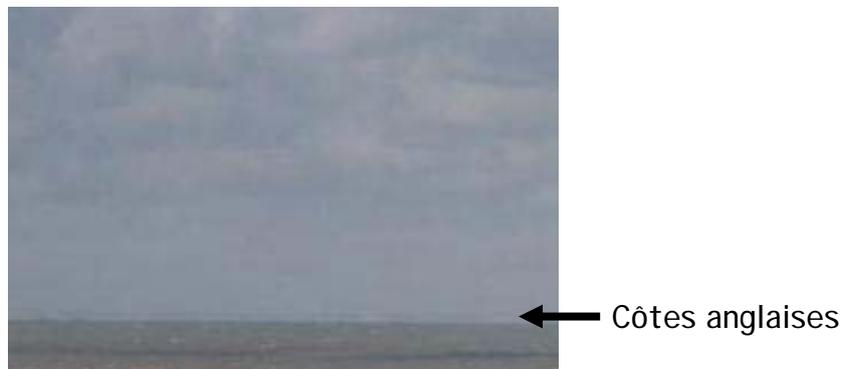
$$\text{D'où } h' = \frac{R - R \times \cos\left(\frac{L'}{R}\right)}{\cos\left(\frac{L'}{R}\right)} \text{ ce qui donne : } h' = 8,4 \text{ m}$$

Donc depuis la colline derrière le lycée on peut voir ce qui se trouve à Douvres, tant que cela dépasse 8,4 m. Les falaises de Douvres faisant à peu près 100 m de haut on peut considérer qu'on peut les voir entièrement.

L'angle apparent sous lequel on peut les voir est :  $\beta = \frac{H}{D} = \frac{100}{51491} = 1,94 \cdot 10^{-3}$  rad soit

l'équivalent d'à peu près l'angle sous lequel on voit un objet de 2 mm à 1m.

Voici ce qu'on distingue habituellement :



Juste un fin trait sur l'horizon

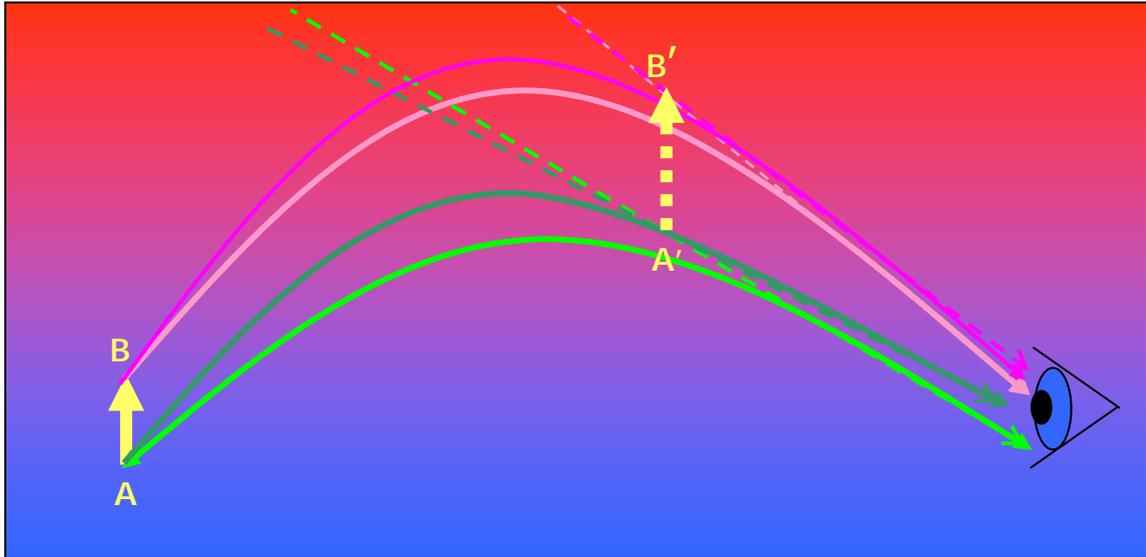
Mais certains jours :



On voit tous les détails, nous avons mesuré l'angle apparent en utilisant la méthode de la visée (on peut encore considérer qu'il y a égalité entre l'angle et sa tangente), nous avons

trouvé un angle de  $\beta' = \frac{32}{656} = 4,98 \cdot 10^{-2}$  rad

L'angle sous lequel on les voit est  $\frac{4,98.10^{-2}}{1,94.10^{-3}} = 28$  fois plus grand, il y a donc bien un phénomène qui explique cela c'est le mirage supérieur.



La figure ci-dessus illustre le fait que des rayons issus d'un objet semble se croiser, en un lieu donné et donne une image virtuelle, droite et agrandie.

## 2) Mirages inférieurs

Pour les mirages inférieurs dans notre région, le Nord-Pas-de-Calais, l'observation est limitée au ciel se réfléchissant sur la route par beau temps. Nous avons pu en voir quelques-uns, mais à chaque fois c'était sur l'autoroute. Il était donc impossible de s'arrêter pour pouvoir prendre des mesures de température. Nous avons toutefois pu estimer que la distance entre nous et le mirage était comprise entre 100 et 200 m. Pour obtenir des images originales, et des mesures, nous avons contacté un ancien professeur du lycée parti enseigner au Gabon. Il nous a répondu qu'il n'observait pas de mirage mais de nombreux orages (pour la partie sciences physiques) et des éléphants (pour la partie SVT).

Après cet échec, nous avons décidé de contacter les 159 proviseurs des lycées et collèges français de l'hémisphère sud dont nous avons trouvé l'adresse sur :

<http://www.aefe.diplomatie.fr/AEFE/Agence.nsf/Recherches>.

Puis nous avons élargi notre recherche aux établissements de l'Amérique du Nord (36 établissements). Sur les 195 mails expédiés, 24 nous ont été retournés pour des raisons allant de l'erreur d'adresse, au serveur n'acceptant pas le message. Chaque fois que nous avons envoyé en nombre les messages, nous avons pris la précaution d'utiliser la CCI (copie carbone invisible) pour éviter la propagation de virus informatique.

Nous leur avons demandé de nous faire une photographie d'un mirage en prenant les dimensions suivantes :

- o La distance photographe-objet photographié,
- o La taille de l'objet photographié,

- o La hauteur sol-appareil photographique,
- o Relever la température en fonction de la hauteur par rapport au sol.

En contrepartie nous leur cédon's le fruit de nos recherches, pour une exploitation en : IDD, TPE ou autre à condition de citer leurs sources comme nous nous sommes engagées à le faire.

Nous avons reçu cinq demandes de collaboration de la part de :

M. Jean Martial DEBILLY  
Professeur de Sciences Physiques.  
Lycée Louis Massignon.  
Abu-Dhabi.  
Emirats Arabes Unis.

Mme Marilyn'e FACQ-LOPEZ.  
Professeure de Sciences Physiques.  
Lycée franco-argentin.  
Buenos-Aires.  
Argentine.

Mme Valérie SAVRE.  
Professeure de Sciences Physiques.  
Lycée français La Pérouse.  
San Francisco.  
USA.

M. Nicolas MOUGET  
Professeur de Sciences Physiques  
Lycée La Fontaine  
Niamey  
Niger

M. Nicolas GROUSSARD  
Professeur de Sciences Physiques.  
Lycée Verdun  
Beyrouth  
Liban

Bien sûr, ce n'était ni une chose aisée, ni gagnée d'avance. Mais le 08/11/2005, nous avons reçu un mail de M. Jean Martial DEBILLY avec une photo accompagnée de mesures de température. MIRACLE Ô MIRAGE.

Cette photo a été prise dans le Sultanat d'Oman, avec comme coordonnées GPS : 23°21,476' N .058°40,457' E, ce qui après avoir été mis dans Google Earth, nous donne les images suivantes :



Et en zoomant un peu :



On retrouve bien la route en question dans le mail

Voici la photo :



Une belle photo de désert mais en zoomant un peu !



On voit un mirage inférieur. Ce n'est pas le superbe mirage que l'on peut trouver sur internet ou dans les livres, mais c'est nôtre mirage ou plutôt celui qu'on partage avec M. Jean Martial DEBILLY.

Les mesures :

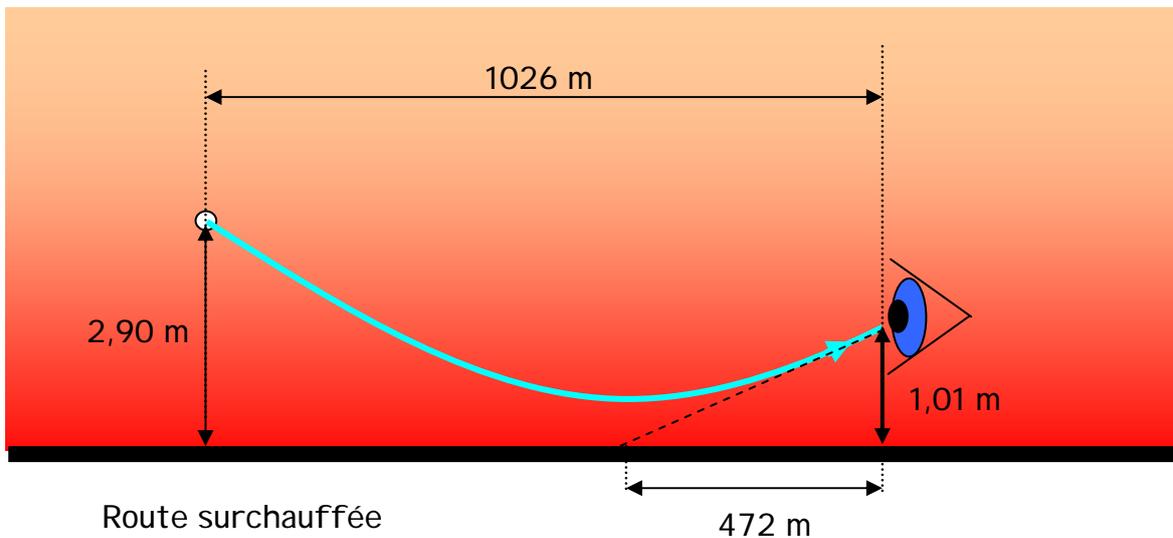
*Distance appareil-objet: 1026m*

*Taille objet: 2.90m*

Appareil-"image":472m

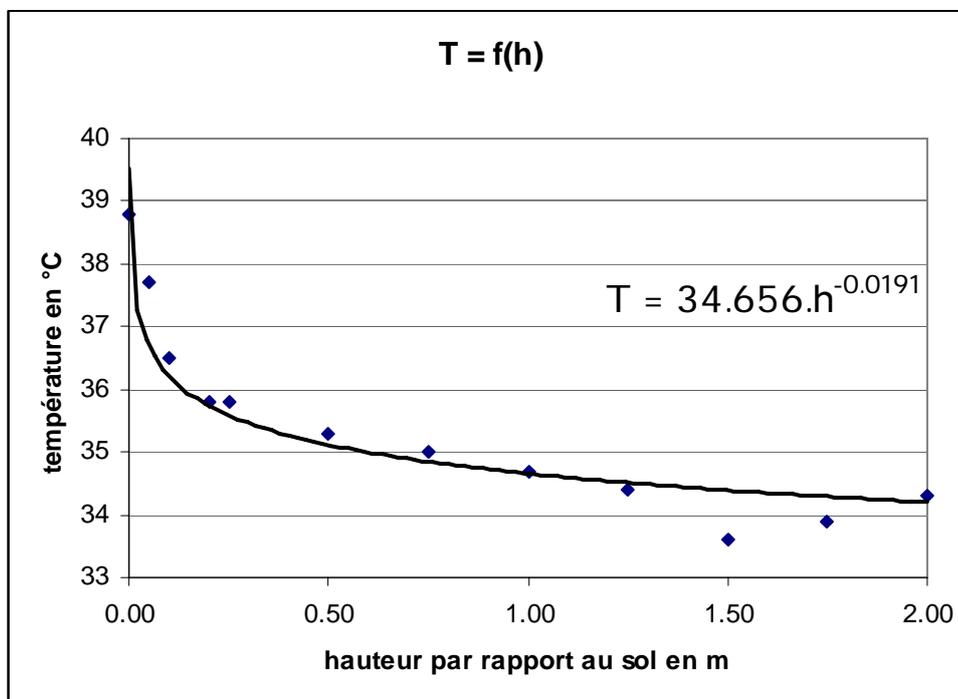
Hauteur de prise de photo:1.01m

L'image est bien située entre l'objet et l'appareil photo



Faute de temps nous n'avons pas pu analyser complètement ces données et établir l'équation de la parabole qui satisfasse ces coordonnées, et celle de l'intersection de la tangente « à l'œil », coupant la route.

Cependant nous avons pu analyser les données de température. , elles sont reportées dans le graphique ci-dessous :

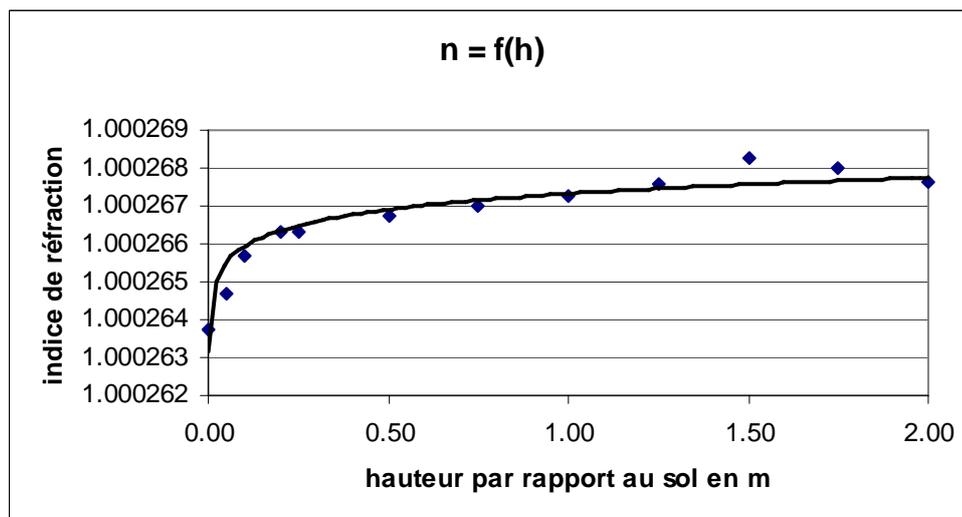


Monsieur DEBILLY a tenu à nous préciser que les valeurs avaient été perturbées par le passage de voiture sur la route)

La température n'évolue pas de manière linéaire, contrairement à ce qu'avaient affirmé nos camarades du lycée Faidherbe en 2004. La température évolue en fonction de  $h^{-0.0191}$  soit en fonction de l'inverse de la racine 50<sup>ème</sup>  $\frac{k}{\sqrt[50]{h}}$  ! C'est un peu trop compliqué pour nous.

Pour établir le profil d'indice, nous avons utilisé la relation du physicien Edlen qui a consacré sa vie à déterminer l'indice de réfraction de l'air dans différentes conditions. Un site internet (cf. Webographie) permet de les calculer directement.

Nous avons choisit arbitrairement 590 nm comme longueur d'onde, l'humidité était de 10% et la pression de 1045 hPa d'après Météo France



On a bien un gradient d'indice négatif vers le bas, donc un mirage supérieur. On note qu'au delà de 1m - 1,5m le milieu est assez homogène, ce qui permet d'avoir une vision directe de l'objet en même temps que le mirage.

Nous avons reçu également de la part de Mme Marilynne Facq-Lopez, une série de 21 photos de mirages prises en Argentine, présentant toutes un intérêt scientifique pour l'étude des mirages. Nous choisissons de n'en présenter qu'une partie.

Sur la série ci-dessous illustre ce qui se passe lorsqu'on se déplace latéralement. La distance mirage, observateur est la même, mais les objets se reflétant sur la route ne sont pas les mêmes. L'image du panneau indicateur de la première photo, va progressivement apparaître lors du déplacement vers la gauche du photographe (il y a apparemment pas mal de circulation sur cette route).



Panneau



Image du  
panneau

## II) Des mirages à Einstein

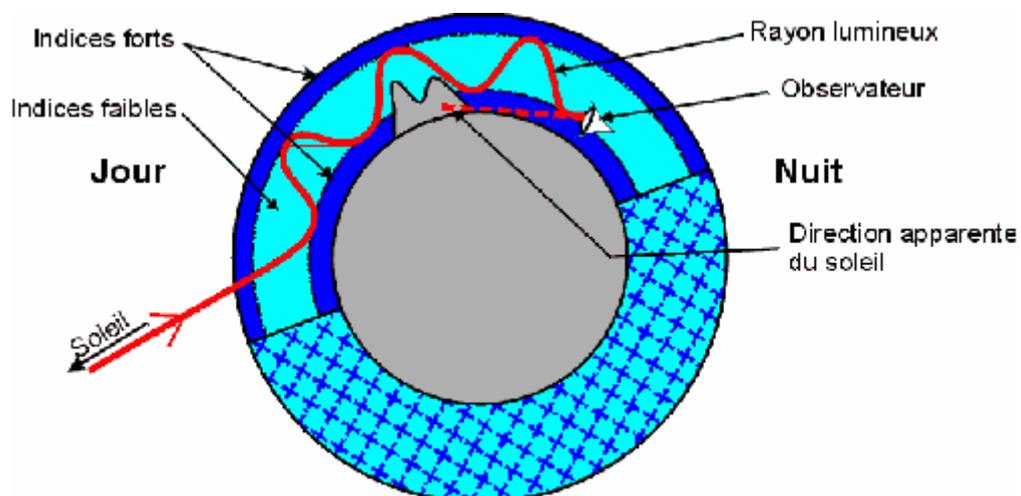
### A) La combinaison de mirages inférieurs et supérieurs dans la nature

Dans la nature on peut observer des mirages plus complexes, comme les « Fata Morgana » ou l'effet Novaya-Zemlya, qui résultent de la combinaison naturelle spectaculaire d'un mirage inférieur et d'un mirage supérieur.

Les *Fata Morgana* sont des combinaisons de mirages où l'image d'un point est un segment vertical, ce qui confère à un horizon légèrement irrégulier l'apparence d'un paysage rempli de tours et de parapets et sont à la base de nombreuses légendes



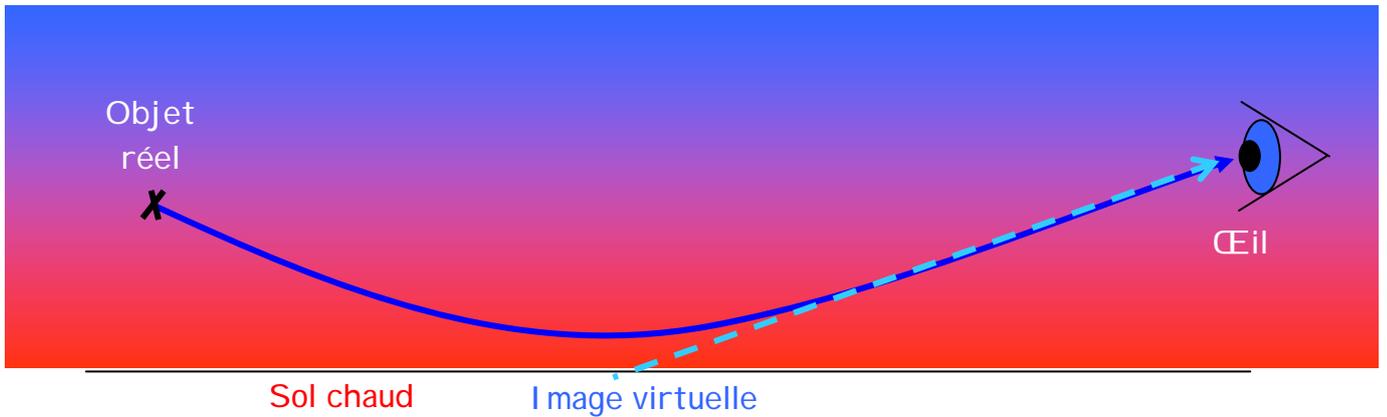
L'effet Novaya Zemlya est un exemple spectaculaire qui résulte d'un profil particulier de l'indice de réfraction atmosphérique : l'atmosphère agit en l'occurrence comme un guide d'onde. Une partie de la lumière émise par le Soleil se propage selon une trajectoire inhabituelle et peut atteindre le côté de la Terre plongé dans l'obscurité (où elle est alors observée).



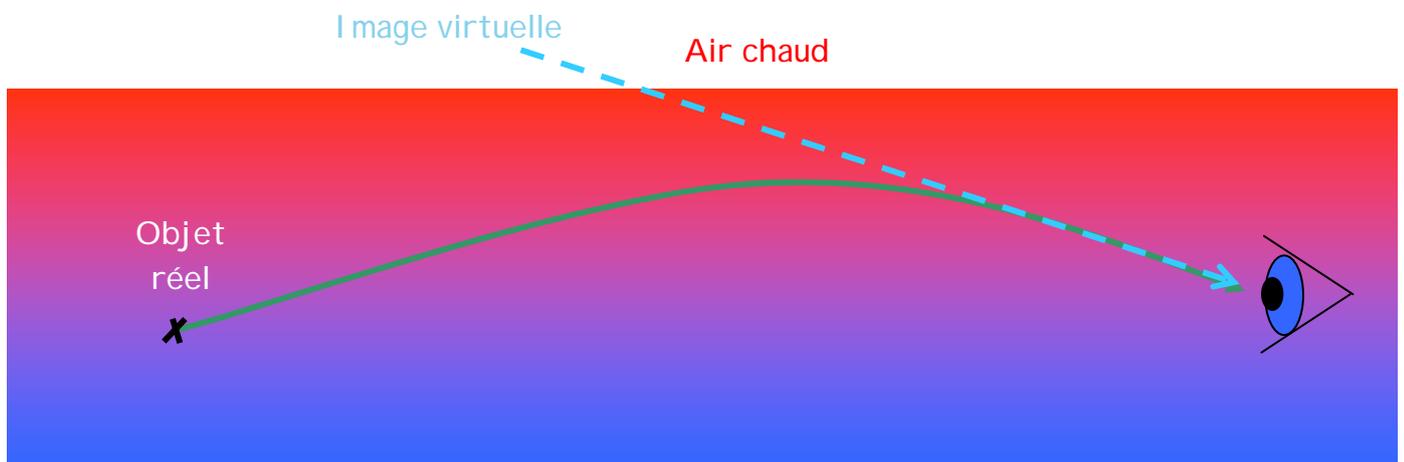
Source internet (La main à la pâte)

## B) Notre idée : additionner des mirages

Comme nous l'avons déjà dit lors d'un mirage inférieur la lumière se propage comme indiqué sur le schéma ci-dessous :

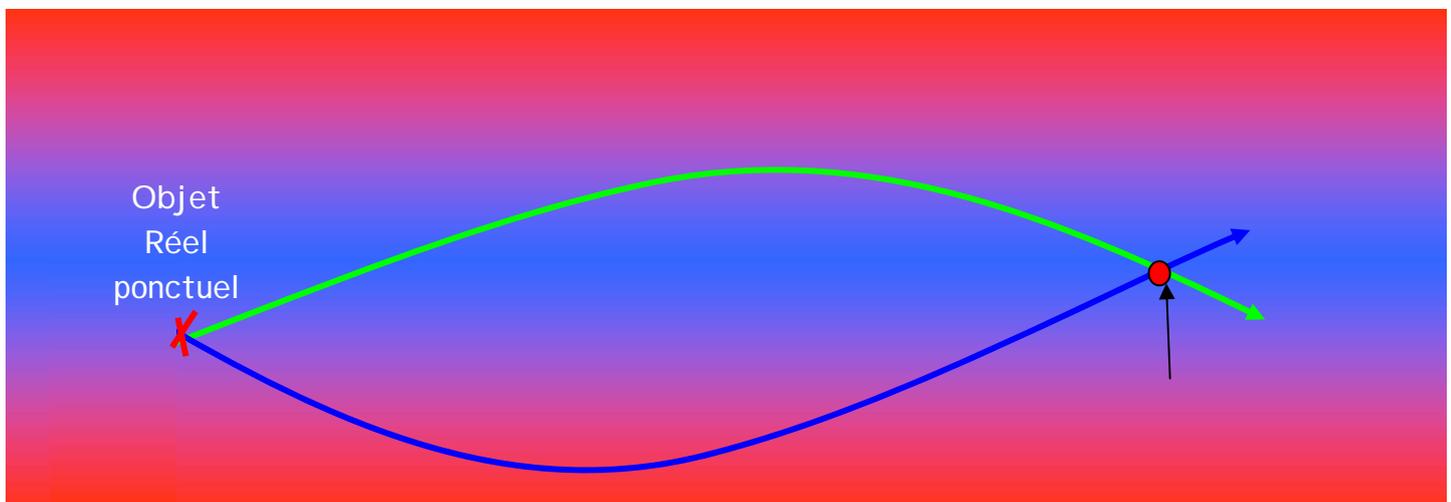


Et lors d'un mirage supérieur :

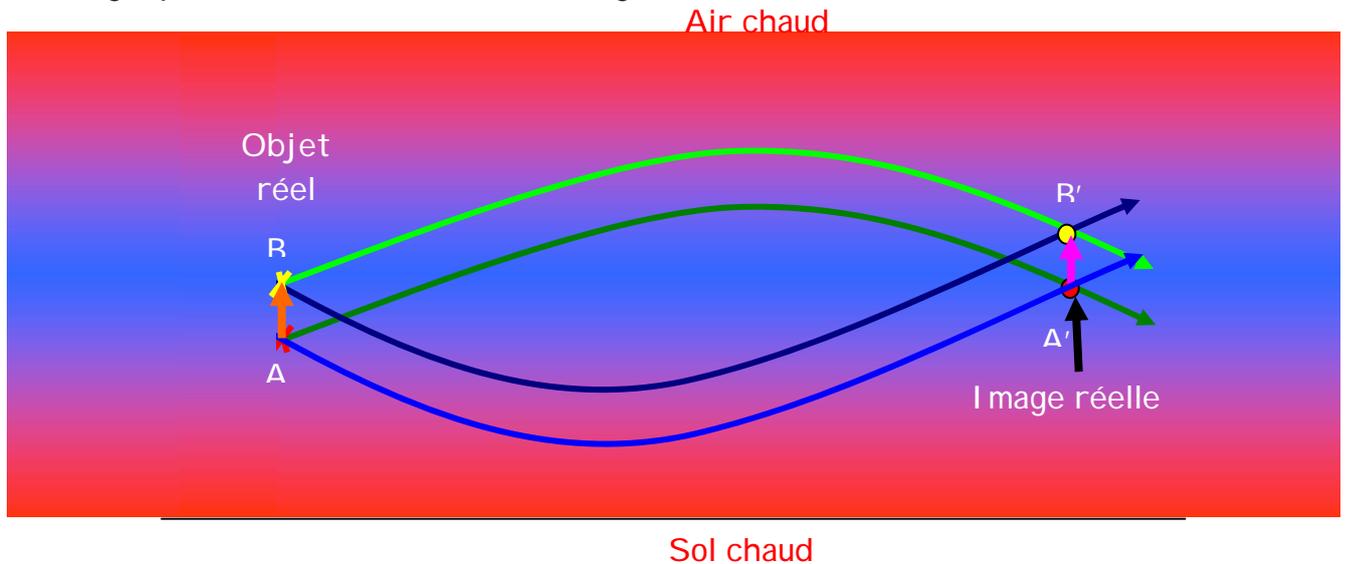


En traçant sur le tableau les deux schémas nous nous sommes aperçu que :

Air chaud



Un point objet donne un point image. De plus si on s'intéresse aux points situés au voisinage, par translation on obtient la figure suivante :



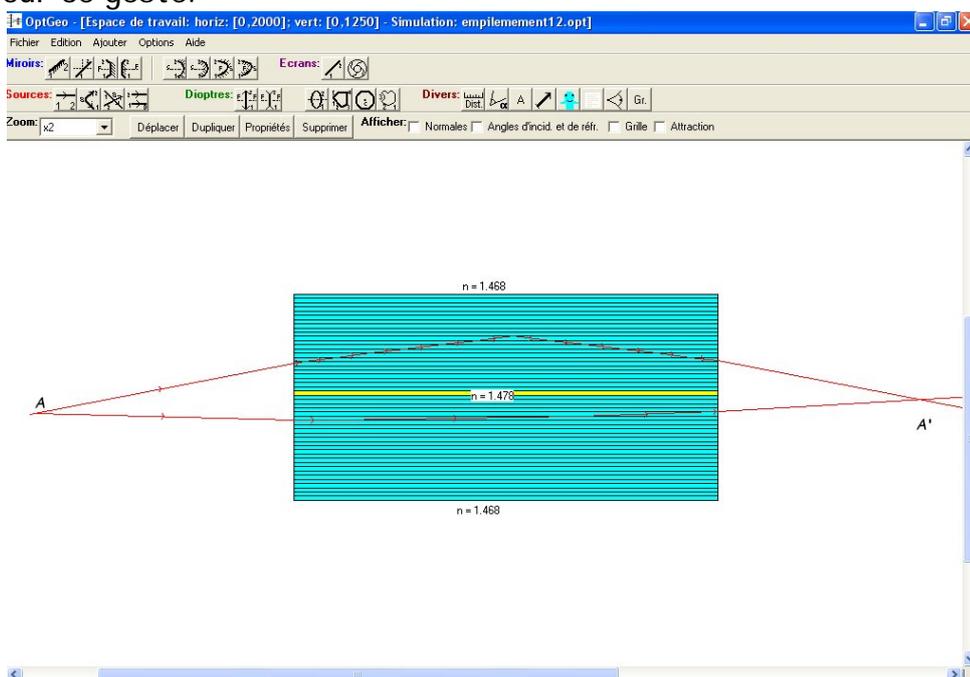
Donc, en combinant un mirage inférieur et un mirage supérieur, un objet réel donne une image réelle ! Du moins d'après nos premiers schémas de principe. C'est pour cette combinaison de deux mirages que nous avons demandé l'avis de M. BURI DANT, qui après un instant d'hésitation (30 s) nous a invité à nous inscrire aux Olympiades de Physique.

### C) La simulation par le logiciel Optgé

Il s'agit d'un logiciel de simulation en optique géométrique à deux dimensions, gratuit et libre, développé par Monsieur Jean-Marie Biansan

(Il est téléchargeable sur : <http://jeanmarie.biansan.free.fr/optgeo.html> )

Grâce à ce logiciel, on peut simuler le comportement d'un empilement de 50 polyèdres rectangulaires (c'est le nombre maximal) de 5 mm d'épaisseur (c'est la taille minimale d'une couche). Dans son infinie gentillesse il a essayé de permettre à son logiciel de pouvoir passer à 1000 polyèdres malheureusement cela n'a pas fonctionné. Néanmoins, nous le remercions pour ce geste.



Sur cette copie d'écran, nous pouvons visualiser le trajet de deux rayons issus d'un point A, dans un milieu stratifié.

Il s'agit d'un empilement de 50 couches, où l'indice de réfraction évolue de manière linéaire de 1,468 à 1,478, puis de 1,478 à 1,468 (ces valeurs ne sont pas arbitraires mais correspondent aux valeurs que nous obtiendrons plus loin)

On peut s'apercevoir que les deux rayons émergents issus de A convergent en un point A', en clair un point objet donne un point image. En simulation ça marche donc.

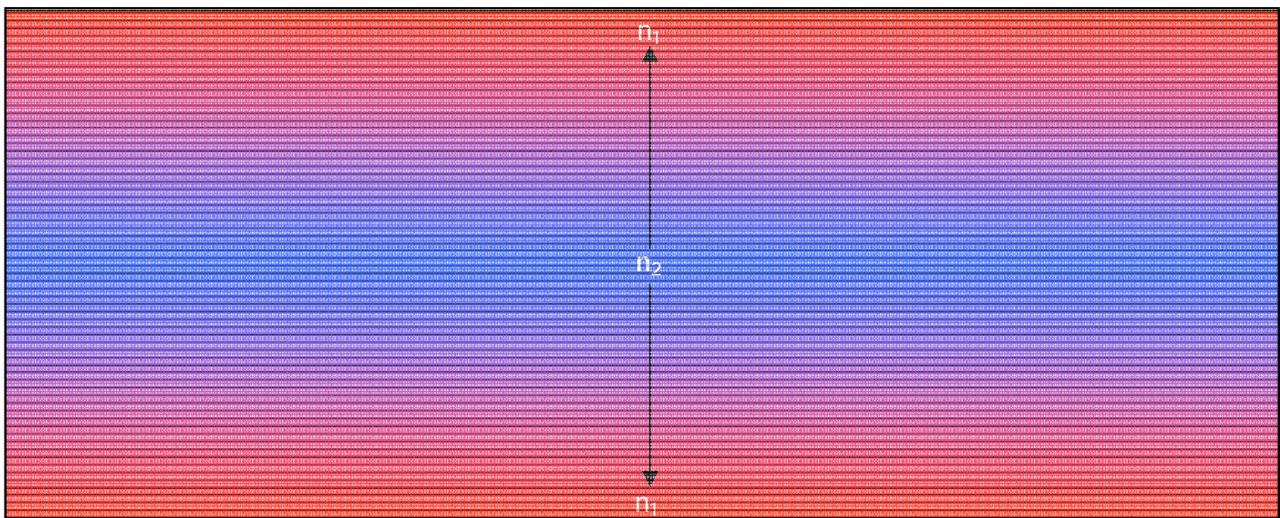
Nous avons soumis cette idée à un grand nombre de personnes, très peu ont pris la peine de nous répondre, parmi eux un petit message d'encouragement :

*« Votre projet de lentille cylindrique à gradient d'indice sera sûrement un exercice très instructif. »*

Pierre Chavel, Directeur du Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique

#### D) Notre première idée : les polymères.

Ayant participé aux Olympiades de Chimie en première S avec comme sujet les polymères, nous avons imaginé créer un gradient d'indice en utilisant différents polymères, ou un mélange de polymères pour obtenir une plaque de ce type.



En mélangeant différents polymères, nous pourrions avoir,  $n_1 < n_2$  une périphérie d'indice faible et un cœur d'indice plus élevé. Nous nous sommes tournées donc très naturellement vers les chimistes de notre région, puis nous avons élargi le cercle et enfin UNE réponse.

Monsieur Hervé ARRI BART, CNRS/St-Gobain :

*« Ça doit marcher (le principe est à rapprocher de celui d'une lentille de Fresnel, sauf que c'est le trajet optique et non l'épaisseur d'un matériau homogène qui varie), mais pour que la qualité de l'image soit bonne, il faudra*

*que l'épaisseur de chaque couche soit faible : pas beaucoup plus grande que la longueur d'onde de la lumière (d'ailleurs, dans les mirages, le gradient d'indice est continu). Donc, pour une lentille qui ferait 1 millimètre d'épaisseur, il faudrait déposer de l'ordre de 1000 couches. Disons 100 si on veut seulement montrer la faisabilité. Chaque couche ferait alors environ 10 microns d'épaisseur. C'est faisable, en plongeant un film du polymère d'indice  $n_1$  dans des solutions de mélanges des polymères d'indice  $n_1$  et  $n_2$ . L'avantage, c'est que les deux demi-lentilles se fabriqueront en même temps. (ceci dit, emporter par dip-coating 10 microns d'épaisseur, ce n'est pas gagné d'avance).*

*Une alternative serait de limiter l'application à celle de la lentille de Fresnel : concentration de lumière, plutôt que imageur.*

*Pour la réalisation, si ça marche comme j'espère, c'est pratiquement une manip de TP quand on a identifié les deux polymères et leur solvant »*

Le dip-coating consiste à tremper puis à retirer une feuille de polymère dans une solution, il se dépose de chaque côté une fine épaisseur de solution.

Nous étions rassurées, il était théoriquement possible, d'obtenir une lentille à gradient d'indice en utilisant des polymères. Le problème est que nous n'avions pas identifié les polymères à utiliser. De plus les solvants à utiliser étant particulièrement toxiques, nous n'avons pas eu l'autorisation de le réaliser. D'autre part 100 couches pour obtenir 1 mm, alors pour obtenir une lentille de 20 mm cela faisait tout de même 2000 couches, 2000 solutions à réaliser, en espérant ne pas nous tromper !

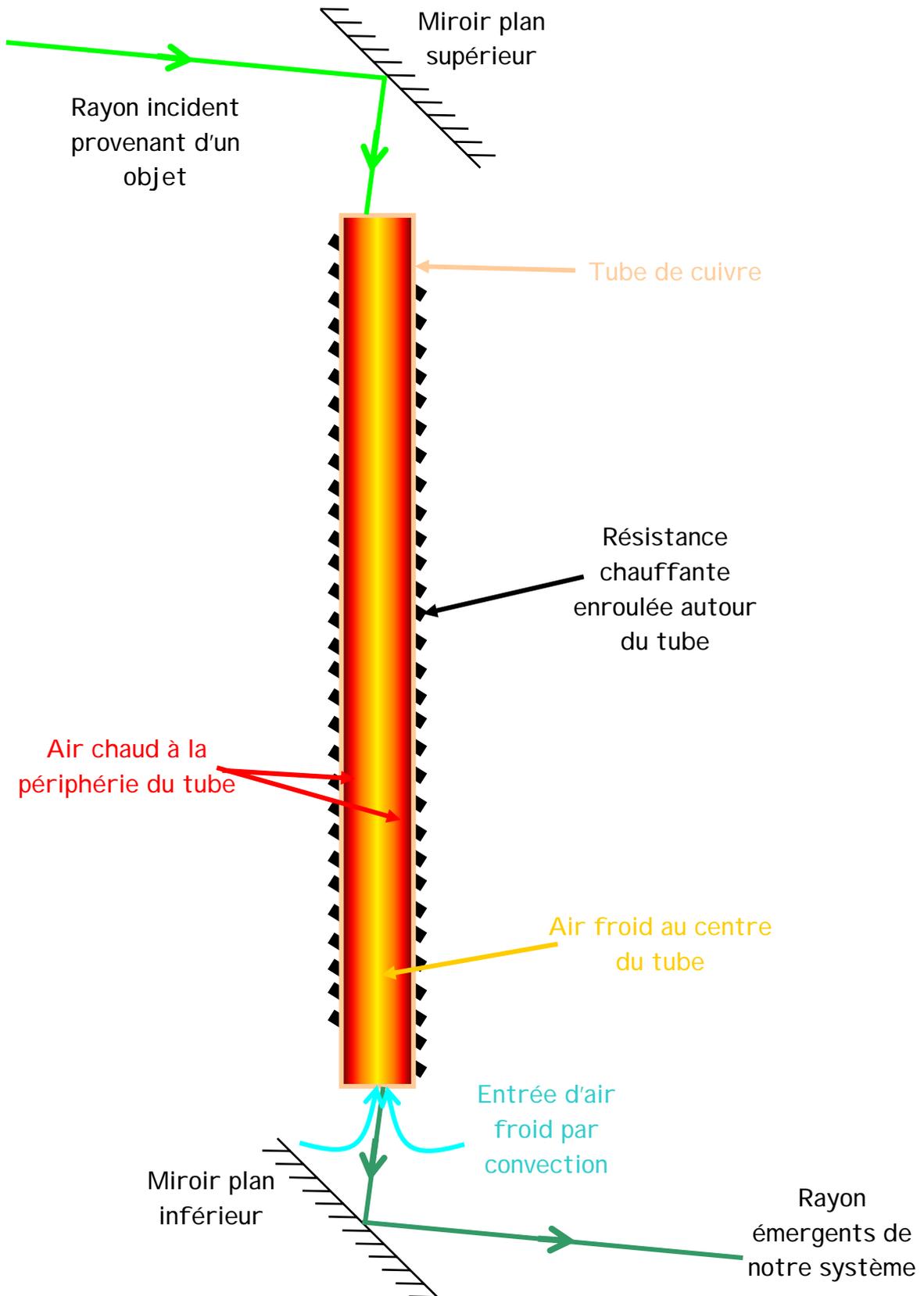
De plus, nous avons remarqué l'an dernier que lorsque nous avons synthétisé des polymères (polystyrène, nylon, bakélite, PMMA (poly méthacrylate de méthyle)) ils n'étaient jamais transparents, mais toujours blancs, opaques.

Nous avons donc choisi d'abandonner avec regret cette voie.

## E) « La lentille à air chaud »

Pour combiner les deux mirages, nous avons eu l'idée de chauffer de l'air dans un tube. Le problème c'est que l'air chaud étant moins dense que l'air froid, il monte. Un tube horizontal ne pouvait alors pas convenir, nous avons donc décidé d'utiliser un tube vertical. Tant pis, nous aurons un mirage droit et un mirage gauche au lieu de supérieur et inférieur. Pour cela nous avons utilisé un tube cuivre de 28 mm de diamètre chauffé par une résistance chauffante.

Coupe schématique du système utilisé :



NB : les rayons incidents et émergents sont construits de manière quelconque.

Les miroirs plans, que nous avons utilisés, sont en fait des disques durs d'ordinateur, car nous voulions nous affranchir de tout problème de réfraction en dehors de notre système

optique. Le laboratoire de sciences physique de notre lycée étant aussi le lieu de réparation des ordinateurs de notre lycée, nous n'avions que l'embaras du choix.

Nous avons vérifié l'entrée d'air froid et son aspiration au centre à l'aide de fumée d'encens.

Voici quelques photos de notre lentille à air chaud.



La mise en place de la résistance



l'ensemble de la version bêta 0.1

En absence de chauffage, en observant le miroir inférieur, nous apercevons les immeubles lointains, sans déformation.

Après avoir vérifié la verticalité du système, on procède à sa mise en chauffe. L'image vue se déforme puis devient floue puis enfin se comporte comme une lentille convergente qu'on utilise comme une loupe. Quand on est proche du système, on voit « quelque chose », en s'éloignant on traverse une zone floue (le foyer ???) puis à nouveau on voit « quelque chose ». A l'heure actuelle nous n'avons toujours pas réussi à obtenir une image avec ce système.

## F) Le retour aux polymères

Nous étions toujours à la recherche de contacts pour nous aider dans notre démarche. Quand complètement par hasard, nous sommes entrées en contact avec Madame Gabrielle BONNET de l'ENS Lyon et le Professeur Bernard CASTAING (de l'Académie des Sciences, section physique).

*« C'est excellent ! La lentille est effectivement convergente, car l'air est chaud le long du tube et froid au centre. D'après nos calculs de l'autre jour, la focale ne devrait pas être si longue que ça, mais il atteint sans doute vite un régime turbulent. ... »*

Puis ils nous ont transmis un article, montrant que le Plexiglas (PMMA) avait une variation intéressante d'indice de réfraction. Nous voici donc reparties avec nos polymères et nos mirages thermiques.

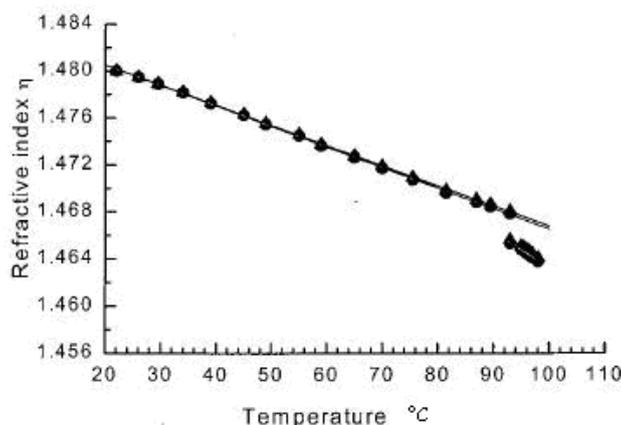
Il restait donc à trouver un barreau de Plexiglas avec des faces rigoureusement parallèles, de bonne qualité optique, c'est-à-dire sans la moindre rayure.

Là encore, nous avons envoyé beaucoup de mails pour n'avoir qu'une seule et unique réponse.

Monsieur Patrick CASSAGNE, président de la PME FIVA (spécialisée dans la confection de trophées en polymères [www.fiva.com](http://www.fiva.com) à Maubourguet dans les Hautes Pyrénées), a accepté de nous aider en nous fournissant à titre gracieux, ce précieux objet.

Nous tenons encore une fois à le remercier aussi pour le temps que lui et son entreprise nous ont consacré.

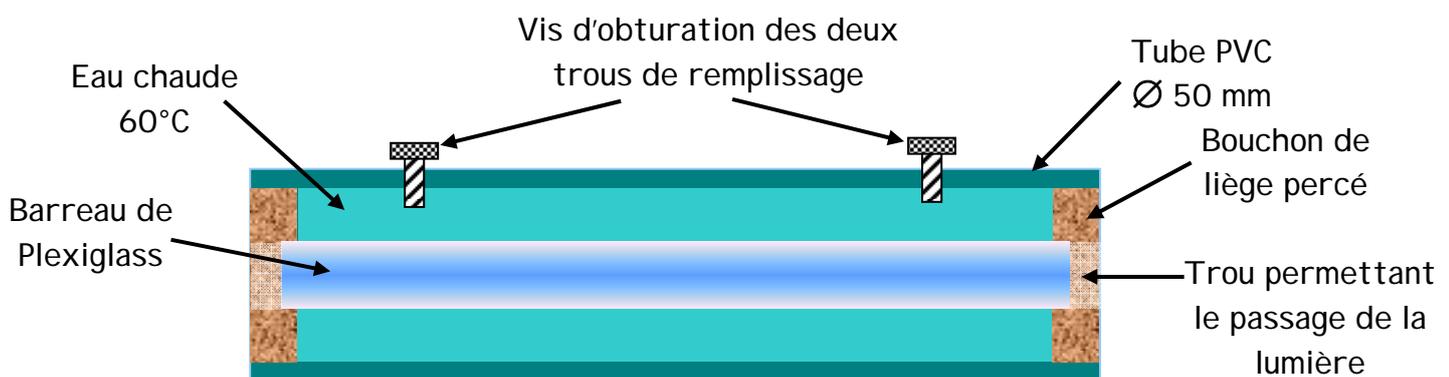
Maintenant les choses deviennent alors plus simples, puisqu'on a un matériau dont l'indice de réfraction varie de manière significative avec la température, sans que celle-ci ne soit trop élevée.



D'après **Xiao-lei Zhu and Dennis Lo**

A partir de ce moment, nous avons choisi de chauffer simplement le barreau de Plexiglas, à une température initiale de 20°C, par de l'eau chaude. Celle du robinet est à 60-70°C dans le laboratoire de notre lycée. Pour faire simple nous avons décidé de le monter à l'intérieur du morceau de tube PVC (nous avons hérité des 60 m de Maud et Clara qui avaient étudié la couleur de Maurice en fonction de la profondeur d'eau traversée, l'an dernier).

Voici une coupe schématique de notre lentille à mirage en Plexiglas.



Et c'est tout !

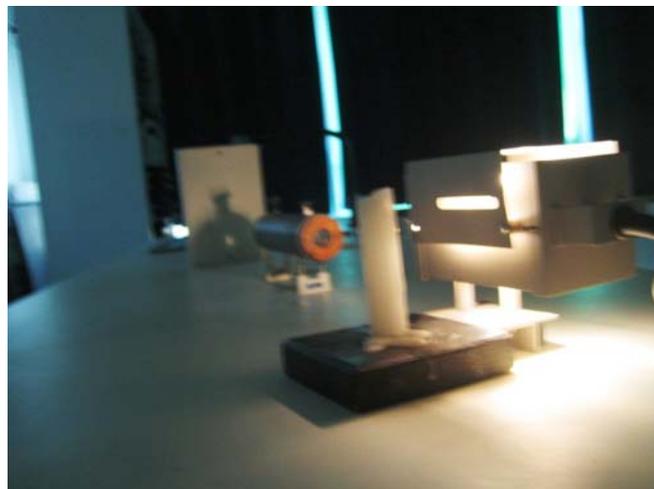
Restait à tester notre lentille à mirage, ce fut fait le mardi 22 novembre 2005 à 15h15, très exactement.

L'objet choisit est :



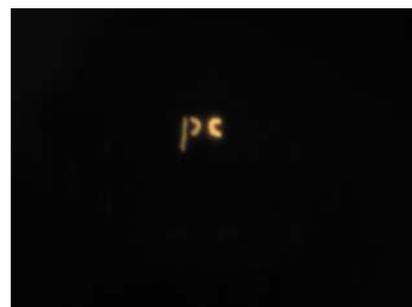
Les lettres  
« bc »,  
sur une lanterne

Vue de notre expérience.



Et sur l'écran on obtient bien :

Voici l'image réelle sur l'écran « pc »



Et oui, si on dit que « **bc** » sont les initiales de **bernardy Clémence**, l'image est « **pc** » comme **perrine Cagneaux**, et réciproquement (l'une est l'image de l'autre, un peu comme des molécules chirales en chimie, ... et qui râlent beaucoup comme dirait Monsieur Buridant ... ). Pour mettre tout le monde d'accord, disons que « **bc** » sont les initiales de **bernardy Cagneaux** et **pc** celles de **physique Chimie**.

En tous cas, on obtient bien une image réelle d'un objet réel !

Le phénomène est transitoire, puisqu'au bout d'un certain temps (1,5 à 2 min) tout le barreau atteint la même température. Il devient homogène, isotrope, et par conséquent aucun mirage n'est plus alors possible. On se retrouve avec une banale lame à faces parallèles.

Nous avons cependant eu le temps de noter quelques valeurs de distances objet-lentille et lentille-image (les mesures sont faites à partir du bord de la lentille)

Elles sont consignées ci-dessous.

distances objet-lentille	distances lentille-image
0,160 m	0,540 m
0,280 m	0,580 m
0,350 m	0,900 m
0,400 m	1,100 m

Ces mesures ne respectent pas la formule de conjugaisons de Descartes, ni en prenant le bord de la lentille à mirage, ni en prenant son centre.

Nous avons aussi noté « l'évolution » de la distance lentille image en fonction du temps (l'instant  $t_0$  correspond à l'apparition de l'image).

Temps en seconde	distances lentille-image
0	0,580 m
30	0,630 m
60	0,685 m
90	0,900 m

G) la « lentille à mirages permanents »

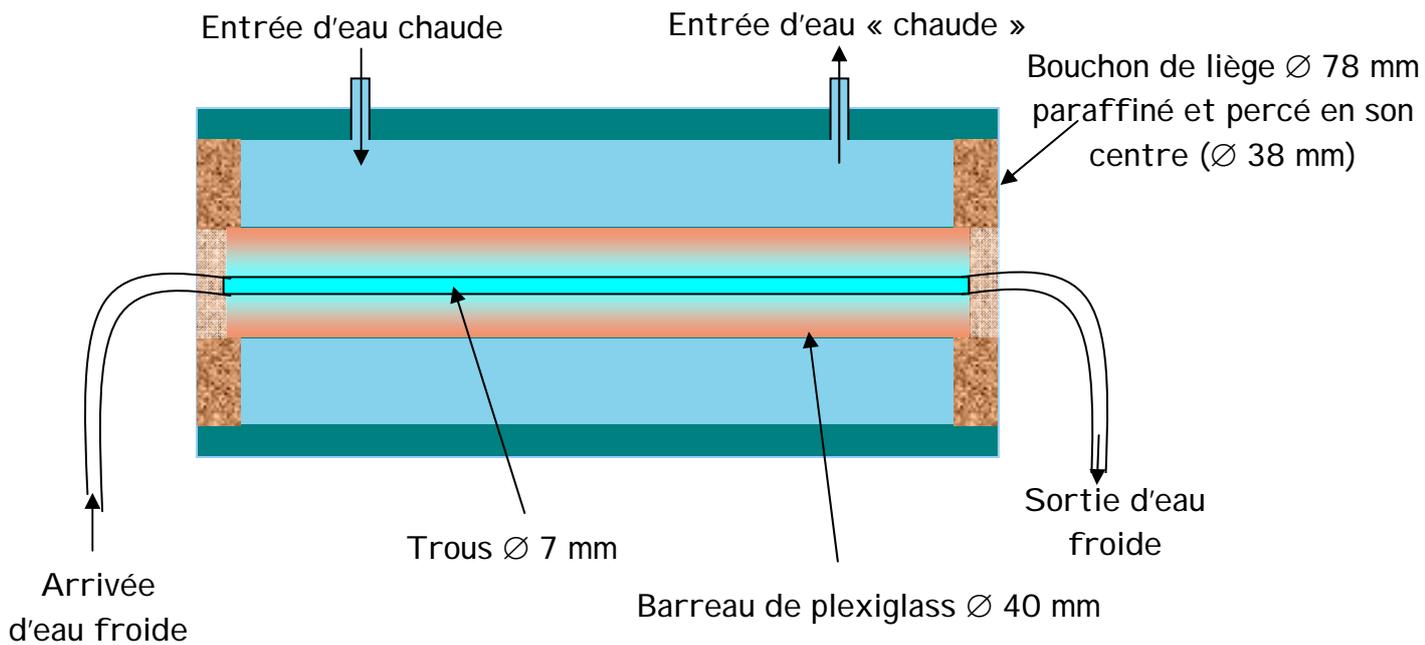
1) la fabrication

Nous avons ensuite eu l'idée de ne plus permettre au milieu de devenir isotrope en refroidissant le centre du barreau. Pour cela nous avons eu la chance de trouver dans l'atelier de notre lycée une barre de plexiglass de diamètre 40 mm. Nous en avons fait couper une longueur de 20 cm, c'est le maximum qu'on a accepté de nous donner. Nous sommes ensuite allées voir M. Heugue, professeur de génie mécanique, qui a accepté de nous dresser au tour les faces. Nous avons alors un barreau à face parallèle mais malheureusement les surfaces étaient trop rayées pour une utilisation en optique. Après avoir pris des renseignements auprès de différents professeurs de l'atelier, nous avons obtenu la solution. Pour obtenir une surface avec un poli miroir, il faut utiliser du Miror<sup>®</sup>, oui le produit utilisé par nos grand-mères pour faire briller leur casserole en cuivre, c'est le produit idéal pour avoir des surfaces de qualité optique ! Ajoutons qu'il faut aussi quand même une bonne dose de patience, environ 45 minutes par faces de 10 cm<sup>2</sup> !

Il ne restait qu'à percer le barreau en son centre, vu la longueur et le matériau, il n'était possible de percer qu'à 7 mm diamètre et encore par retournement (on perce sur la moitié de la longueur puis on perce de l'autre côté, pour éviter le flambage du foret).

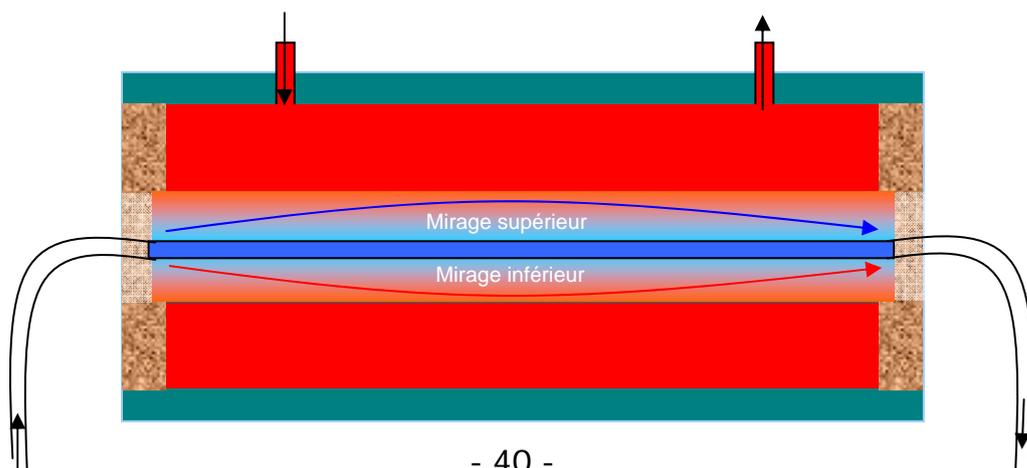
Pour les bouchons nous avons eu aussi quelques problèmes techniques : les bouchons en liège de grand diamètre sont très poreux, nous avons choisi d'utiliser de la paraffine utilisée pour recouvrir les confitures de nos grand-mères. Nous détaillons tout cela pour expliquer qu'il faut en gros plus de 4h pour fabriquer un exemplaire du dispositif détaillé ci-dessous, et nous en avons fabriqué quatre exemplaires avec à chaque fois de petites améliorations.

## 2) Schéma de fonctionnement



La circulation de l'eau est assurée par des pompes d'aquariophilie (débit :  $400\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ ), l'eau est chauffée à l'aide d'un bain-marie thermostaté.

Une fois le régime de température établi, il se produit un gradient de température négatif du centre vers la périphérie, et donc un gradient d'indice de réfraction négatif du centre vers la périphérie. Il peut alors s'établir un mirage supérieur et un mirage inférieur.



En fait il y a des mirages tout au tour de l'axe central.

Il s'agit bien de mirages et non d'une déformation thermique qui explique la formation des images, nous avons essayé de mesurer à l'aide de comparateur une éventuelle déformation des faces du barreau à cause la chaleur. En fait nous n'avons pas observé la moindre variation, du moins avec la précision des appareils que nous avons empruntés à la section génie civil de notre établissement.

### 3) Les résultats

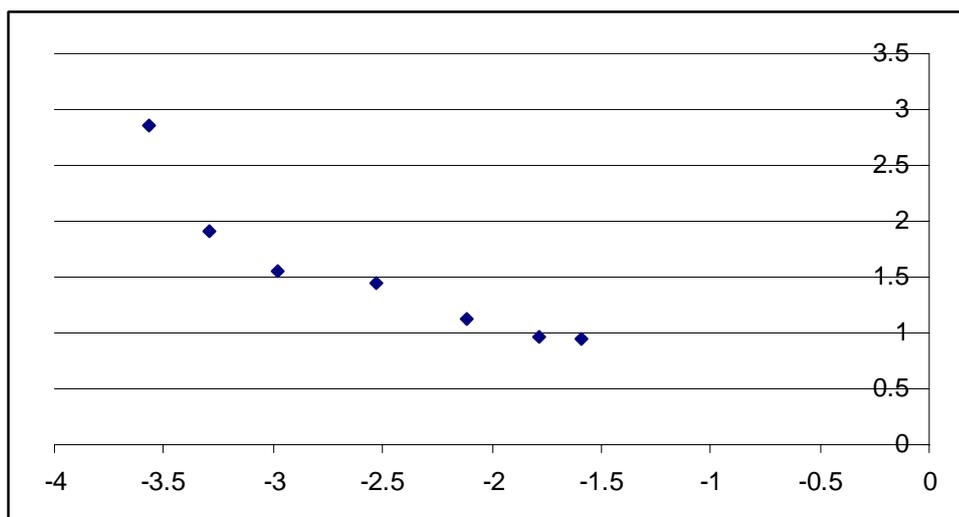
Le premier résultat (celui que nous espérons tant), c'est que l'image est stable dans le temps, lors de notre premier essai l'image est restée au même endroit pendant plus d'une heure.

Nous avons effectuée une série de mesure pour des températures de 69.1°C pour l'eau chaude et 19.5°C pour l'eau froide

Distance objet - « lentille » en m	Distance « lentille » - image en m
0,473	0,887
0,562	1,044
0,627	1,062
0,395	0,695
0,336	0,646
0,304	0,524
0,280	0,349

Si on reporte sur un graphique classique  $\frac{1}{OA'}$  en fonction de  $\frac{1}{OA}$  on obtient le graphique

suivant très surprenant !



On obtient quelque chose que nous n'avons jamais vu en optique ! Du moins à notre niveau !

Nous avons bien entendu essayé, à différentes températures, mais les résultats sont peu concluants. Pour tout avouer, notre seconde série de mesure a été faite à une température de 78,4°C. Ce qui a eu pour conséquence de faire fondre notre paraffine et d'augmenter très sérieusement les fuites de notre installation. Nous espérons cependant avoir le temps de faire une série de mesure avant la finale au palais de la découverte, sachant qu'entre temps nous avons la finale académique des olympiades de chimie.

Nous n'avons pas pu mettre en évidence ni foyer objet, ni foyer image. Pour ce dernier nous nous y attendions un peu, puisque lorsqu'on éclaire la lentille avec un faisceau de lumière parallèle à l'axe de la lentille tous les rayons se propagent dans un milieu isotrope, ils ne sont pas déviés.

Nous aurions pu également étudier l'influence de la longueur et du diamètre mais pour ce travail commencé en septembre nous avons manqué cruellement de temps.

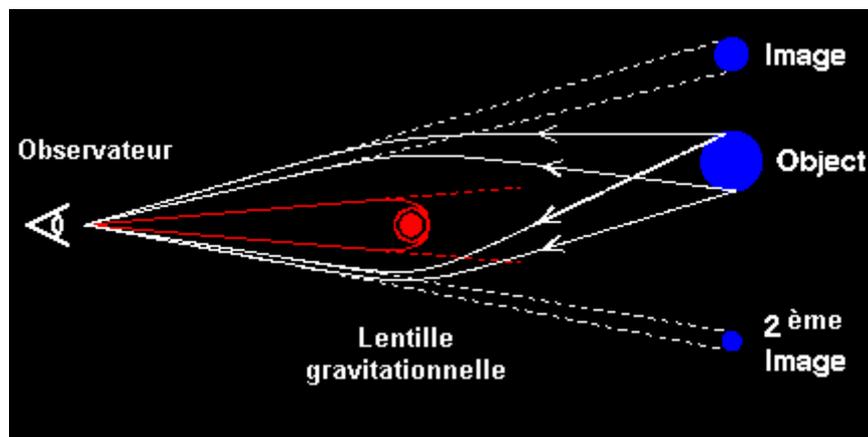
# Conclusion

Après avoir étudié des mirages inférieurs et supérieurs, nous avons montré que par un système optique cylindrique présentant un gradient d'indice négatif du centre vers la périphérie, il est possible d'obtenir d'un objet une image réelle.

Nous avons donc vérifié la relation suivante :

**Un mirage + un mirage = une belle image (de la physique)**

Nous aurions pu, également nous intéresser aux lentilles gravitationnelles prédites par Einstein dès 1936, où la lumière est déviée par des astres massifs, comme sur le schéma ci-dessous.



Mais il s'agit là d'une autre physique, où nos connaissances sont plutôt relativement restreintes que générales.

## Bibliographie (papier)

1. Aurores, mirages, éclipses... Comprendre les phénomènes optiques de la nature ; *D. K. LYNCH ; W. LIVINGSTON* ; Edition Dunod, 2002
2. Handbook of Chemistry and Physics 85th edition, CRC Press, 2004
3. Le cours de Physique de Feynman, Mécanique 2 ; *FEYNMAN, LEIGHTON, SANDS*, InterÉdition 1994 (réédition traduite de « *The Feynman Lectures on Physics 1* » © 1963 California Institute Of Technology)
4. Le mirage, source d'illusions et révélateur de terres inconnues, *S. LAMY-AU-ROUSSEAU*, Revue du palais de la découverte, octobre 2001, **291** : 12-25
5. Optical determination of atmospheric temperature profiles, *DAN BRUTON*, Texas A&M University, August 1996
6. Scientific study of Unidentified Flying Objects, Conducted by the University of Colorado, Under Research Contract Number 44620-67-C-0035, With the United States Air Force, *DR. EDWARD U. CONDON*, Scientific Director (1968) 987-1058.
7. Temperature tuning of output wavelength for solid-state dye lasers, *XIAO-LEI ZHU & DENNIS LO*, J. Opt. A: Pure Appl. Opt. **3** (2001) 225-228
8. The Origin of Gravitational Lensing : A Postscript to Einstein's 1936 Science Paper *J. RENN ; T. SAUER, J. STACHEL*, *Science* 10, January (1997); **275**: 184-186
9. Travaux pratiques de physique chimie, de la seconde à la terminale ; *O. BURIDANT, F. DUCROCO, G. GOMEZ, M. MARGARIT, A. MARGARIT ; J.L. MAURIN, G. NAGLIK, F. PLET, P. RYVES* ; Edition Bordas, 2003

# Webographie.

[http://olym-phy.in2p3.fr/anterieurs/edition\\_2004/pdf-2004/lille\\_Dossier\\_olympiades.pdf](http://olym-phy.in2p3.fr/anterieurs/edition_2004/pdf-2004/lille_Dossier_olympiades.pdf)

« Analogie entre mirages atmosphériques et mirages gravitationnels » mémoire présenté dans le cadre des XI<sup>ème</sup> Olympiades de Physique par le lycée Faidherbe de Lille

[http://www.lamap.fr/?Page\\_Id=33&Action=%3D3&Element\\_Id=808&DomainScienceType\\_Id=14&ThemeType\\_Id=30](http://www.lamap.fr/?Page_Id=33&Action=%3D3&Element_Id=808&DomainScienceType_Id=14&ThemeType_Id=30)

[http://www.lamap.fr/print.php?Page\\_Id=10&Action=2&Element\\_Id=506&DomainScienceType\\_Id=14](http://www.lamap.fr/print.php?Page_Id=10&Action=2&Element_Id=506&DomainScienceType_Id=14)

Les mirages présentés par « La main à la pâte »

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/mirages.html> et

<http://yves.cortial.free.fr/>

Les mirages illustrés sous cabri par M. Yves CORTIAL

<http://emtoolbox.nist.gov/Wavelength/Edlen.asp>

Un site qui permet de calculer les indices de réfraction de l'air en fonction des conditions.

<http://www.alpix.com/nice/htmlfr/pictcors.htm>

La Corse vue depuis le continent.

<http://www-math.unice.fr/~irem/ciiim/tableur/index.php>

I REM Nice, une analyse des mirages corse

[http://www.essi.fr/epe\\_si/](http://www.essi.fr/epe_si/)

Le département Sciences Informatiques de l'EPU de Nice Sophia-Antipolis, qui a modélisé les mirages corse.

[http://www.geocities.com/r\\_pradel/mirage.html](http://www.geocities.com/r_pradel/mirage.html)

Une approche des mirages.

<http://www.du.edu/~jcalvert/astro/mirage.htm>

Une explication des différents mirages.

<http://ncas.sawco.com/condon/text/s6chap04.htm>

Dr. Edward U. Condon, université du Colorado rapport sur les OVNI (UFO) pour l'armée américaine, il s'intéresse aussi aux mirages

<http://mintaka.sdsu.edu/GF/mirages/mirintro.html>

Les explications les plus complètes que nous avons trouvées sur le WEB.

<http://www.ispa.asso.fr/Pages/CadreFR.html>

Institut Supérieur de Plasturgie d'Alençon, un portail d'accès aux polymères.

<http://www.eleves.ens.fr/home/huard/mirages/index.html>

Le site de M. Benjamin HUARD.

# Remerciements

- ✚ M. Olivier BURIDANT, professeur de physique chimie, lycée Branly, Boulogne sur mer..
- ✚ Mme Anne-Charlotte ALLOUCHERIE, professeure de physique chimie, lycée Branly, Boulogne sur mer.
- ✚ M. Frédéric DUCROCO, professeur de physique chimie, lycée Branly, Boulogne sur mer.
- ✚ M. Patrick RYVES, professeur de physique chimie, lycée Branly, Boulogne sur mer.
- ✚ M. Patrick GALIOT, prof SPH, CPGE, lycée Mariette, Boulogne sur mer.
- ✚ M. Hervé HEUGUE, professeur de productique, lycée Branly, Boulogne sur mer .
- ✚ M. Emmanuel CINIGLIA, Ulice-optronique.
- ✚ M. Benjamin HUARD, Doctorant au CEA Saclay.
- ✚ M. Yves SACQUIN, professeur CEA Saclay.
- ✚ M. Pierre CHAVEL, Directeur du Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique.
- ✚ M Christiane CARRE, ENST Bretagne.
- ✚ Mme Isabelle DEBAISIEUX, Saint-Gobain.
- ✚ M. Hervé ARRIBART, Saint-Gobain.
- ✚ M. François BRAS, étudiant en licence de Sciences, OdP 2004.
- ✚ M. Guillaume Gaigneur, étudiant en licence de Sciences Physiques, OdP 2004.
- ✚ M. Guillaume SERRET, étudiant en licence Sciences Physiques, OdP 2005.
- ✚ M. François RÉGNIER, étudiant en CPGE PTSI , OdP 2005.
- ✚ Mme Gabrielle BONNET, ENS Lyon.
- ✚ M. Bernard CASTAING, ENS Lyon, membre de l'Académie des Sciences section physique.
- ✚ M. Jean Marie BIANSAN, Professeur de sciences physiques, CPGE, Lycée La Pérouse, Albi.
- ✚ M. Yves CORTIAL, Professeur de sciences physiques, CPGE, Lycée Clemenceau, Nantes.
- ✚ M. Jean Martial DEBILLY, Professeur de sciences physiques, Lycée Louis Massignon, Abu-Dhabi Emirats Arabes Unis.
- ✚ Mme Marilyn FACQ-LOPEZ Professeure de Sciences Physiques. Lycée franco-argentin de Buenos Aires Argentine.
- ✚ Mme Valérie SAVRE, Professeure de Sciences Physiques, Lycée français La Pérouse, San Francisco, USA.
- ✚ M. Nicolas MOUGET, Professeur de Sciences Physiques, Lycée La Fontaine, Niamey, Niger.
- ✚ Mme Anna DA COSTA, CNRS.
- ✚ M. Serge BOTTON, Responsable du Département Positionnement Terrestre et Spatial Ecole Nationale des Sciences Géographiques.
- ✚ M. Alain HARMEL, Institut Géographique National, Service de Géodésie et Nivellement.
- ✚ MM Philippe PENEL, Bruno HERMAND, Olivier BLOQUET et Mmes Betty HENGUELLE, Véronique PRUVOT, et Sylvie DELETOILLE, personnels de laboratoire (pour leur patience).
- ✚ MM. René BRACHET, Eric BRÉVIER, et Jean-Luc DAVID, personnels de l'atelier du lycée, spécialiste du machin pour faire un truc, pour leur précieux conseil.
- ✚ A tous les personnels du lycée qui ont fait ce qu'ils pouvaient pour nous aider dans notre travail,
- ✚ La section BTS productique qui nous a usiné des pièces sur mesures.
- ✚ Nos camarades de la terminale S<sub>2</sub> pour leur soutien,
- ✚ A nos parents pour le travail de relecture et leur patience.

Merci aussi à tous ceux qui nous ont aidés et que nous avons oublié de citer.

Merci à tous ceux qui ont eu la patience de nous écouter.

## Ce que nous ont apporté les Olympiades de Physique 1

J'ai connu les Olympiades de Physique et de Chimie en classe de Première. Nous avons choisi l'an dernier, en participant aux Olympiades de Chimie, de travailler sur les polymères. C'est à ce titre que nous avons assisté à la sélection inter-académique des Olympiades de Physique, qui a eu lieu dans notre lycée le 15 décembre 2004. Nous étions « hôtesse » et, en plus de guider les membres du jury, professeurs et élèves qui ne connaissaient pas l'établissement, nous avons pu assister aux prestations des 2 groupes de notre lycée (la couleur des poissons et la physique du karaté). Cette opportunité nous a permis de découvrir les Olympiades de Physique, et cela nous a beaucoup intéressées. C'est sans grande hésitation que déjà nous projetions d'y participer en classe de Terminale.

Mais à l'époque nous nous concentrions davantage sur les Olympiades de Chimie. Plus tard dans l'année, alors que nous travaillions sur nos TPE, qui portaient sur la radioactivité, nous avons appris que le groupe de notre lycée, lauréat des Olympiades de Physique, avait visité le CEA de Saclay. Cela nous a intéressées. En nous renseignant nous avons su qu'il possédait un télescope à rayons X et  $\gamma$ . Ce type de télescope fonctionne par réflexion, ce qui a pour particularité de présenter « un phénomène analogue aux mirages ». A cette époque nous n'avions pas réellement réfléchi à notre sujet d'étude. Puis peu à peu, nous avons commencé à nous pencher sur un phénomène se produisant près de Boulogne sur Mer : nous avons la chance, lorsqu'il fait beau, de pouvoir observer les côtes anglaises, et ceci de façon nette. C'est un phénomène ancré dans les mentalités dans notre région, et je ne sais pas si beaucoup de gens se sont un jour posé cette question : les côtes que l'on voit si bien, sont-elles réellement si proches ? Nous nous sommes posé cette question. C'est alors, en repensant au télescope du CEA, que nous avons réfléchi au fait qu'il s'agissait peut-être d'un mirage. C'est justement auprès du CEA que nous avons demandé confirmation, afin de savoir si notre intuition était la bonne. En effet la vision des côtes anglaises depuis Boulogne sur mer n'est qu'un mirage ! C'est là qu'a débuté notre travail de recherche, nous avons tenté de comprendre les mirages, et même d'en recréer.

Nous avons donc débuté notre aventure en début d'année scolaire, et y avons consacré beaucoup de temps, en plus de celui consacré aux Olympiades de la Chimie que nous préparons chaque mercredi après-midi... Ainsi nous avons fait des recherches théoriques tout d'abord, suivies peu de temps après par les premières manipulations. Tout ce travail nous a peu à peu conduites à l'épreuve académique à Lille, le 14 décembre 2005. Malgré le stress, qui était d'ailleurs double car nous étions en pleine semaine de Baccalauréat blanc, tout était terminé à temps. Ce stress ne nous a cependant pas empêchées de prendre un vrai plaisir à présenter notre travail devant les professionnels du jury mais aussi devant un public. C'était en effet un premier aboutissement des longues heures passées à travailler sur notre sujet, et cela nous a fait réaliser que ce temps était loin d'être un temps perdu. Présenter nos recherches, nos réflexions et nos expériences nous a rappelé que les Olympiades servent également à partager ce que nous avons appris. Nous avons pu observer d'autres groupes, tout aussi motivés que nous, présenter leurs recherches, qui étaient intéressantes, avec enthousiasme. Voir des gens s'intéresser à notre travail fut vraiment valorisant et nous a donné envie de faire mieux.

Et la cerise sur le gâteau arriva à la fin de la journée avec l'annonce des résultats : nous étions sélectionnées. Cela nous a vraiment fait plaisir car nous n'avions pas été retenues pour les Olympiades de la Chimie en classe de Première. A présent, la prochaine étape est nationale, et nous consacrons toujours autant de temps à nous préparer pour faire le mieux possible. Il est certain que la tension monte, mais nous savons tout ce que cela va nous apporter et nous apprendre...

Les Olympiades m'ont apporté beaucoup, que ce soit sur le plan des connaissances personnelles qu'au niveau de l'esprit d'équipe, de la collaboration avec nos professeurs, avec le personnel du laboratoire... Sur le plan humain c'est une expérience que je pourrais conseiller à tous. On développe une relation très particulière avec nos professeurs, c'est très plaisant. De plus, c'est une toute autre approche des la Physique, une approche ludique, agréable, amusante, et vraiment marquante. C'est une expérience inoubliable !



Clémence BERNARDY  
Terminale S2  
Spécialité Physique-Chimie

## Ce que nous ont apporté les Olympiades de Physique 2

J'ai désiré faire les Olympiades de Physique car je savais que travailler tout en s'amusant restait un avantage pour s'instruire plus facilement. En effet je n'ai pu bénéficier que de biens pour ma culture personnelle. Travailler en binôme avec ma camarade était une fois de plus un défi à relever. Il nous fallut du temps pour choisir notre sujet, mais pas assez pour en faire le tour en moins d'une année. En effet l'an dernier, avec ma camarade Clémence nous faisons les olympiades de Chimie. Mais sans hésitation nous avons trouvé un sujet d'exposé ... il était sûr que l'optique nous intéressait. C'est pourquoi nous avons choisi de faire notre exposé sur les mirages. Même si le temps est assez court, car cette année nous faisons une fois de plus les Olympiades de Chimie, nous avons énormément travaillé lors de nos temps libres à l'école ou encore par le biais d'une messagerie instantanée avec notre professeur.

Lorsque j'étais plus jeune, mon grand père me répétait sans cesse que lorsque l'on voyait les côtes d'Angleterre, le ciel nous remerciait et qu'il allait nous laisser du soleil. Comme toute ma famille, je me disais que c'était une phrase aussi bizarre qu'un remède mystérieux de grand'mères. Et pourtant, à chaque fois que je voyais les côtes, je me remémorais sa phrase et essayais de découvrir s'il avait raison. Après plusieurs recherches avec mon professeur M. Buridant nous avons compris que les côtes étaient par chance un mirage.

J'ai ensuite eu l'impression de devenir « « experte » » en mirages, j'ai alors cherché dans tous les coins les mirages apparents : après les côtes d'Angleterre, il existait aussi la Corse. Je suis alors partie en stage à Monaco en espérant voir un jour la Corse. J'ai travaillé dans un laboratoire de recherche chez Coty, Lancaster. Après une semaine de stage, le dimanche 10 juillet, j'ai été soudainement réveillée par un orage très bruyant, des coups de tonnerre grondaient, il pleuvait et il faisait assez froid pour un jour d'été sur la côte d'Azur. Le lendemain, alors que je repartais à 7h30 pour travailler, j'aperçus du haut de Roquebrune Cap-Martin, des côtes au large, un magnifique mirage de la Corse. Malheureusement, je n'avais pas pris mon appareil photo et mon bus n'aurait pu en aucun cas faire demi-tour !!! Alors j'attendis avec impatience la soirée, je finissais à 19h : heure à laquelle les côtes n'étaient plus aussi belles... Comme le lendemain je ne travaillais pas, suite à l'Avènement de Son Altesse Sérénissime le Prince Albert II le 12 juillet, j'essayais de retourner en haut de Roquebrune Cap-Martin mais la Corse n'était plus là. Contrairement à tous les touristes de Monaco j'espérais qu'il pleuve de nouveau juste une petite journée au cours du mois de juillet. Hélas, le soleil fut toujours au rendez-vous. Il n'était alors pas question de perdre courage. Avec ou sans photo de la Corse, j'avais vu le mirage et en étais fière. Alors, si je ne pouvais pas émerveiller les gens avec une photo comme moi je l'avais été. Je pensais alors créer mes propres mirages à sensations. J'ai alors commencé à imaginer des expériences en demandant à M. Buridant si elles étaient faisables. J'étais contente : mes idées étaient prises au sérieux par mon professeur qui me laissait toujours m'exprimer librement. Alors avec imagination et créativité, je cherchais des expériences à produire. Je mettais tout en œuvre pour réaliser MES expériences avec les échecs et les réussites.

Après « l'amusement », il fallait réellement savoir pourquoi et comment les mirages se révélaient. Avec ma camarade, nous avons donc fait de nombreuses recherches sur Internet, avons écrit à plusieurs sites scientifiques (le CEA, le CNRS, l'IGN,... ) et avons appris les méthodes de la recherche pour expliquer des choses assez compliquées.

L'expérience du concours des Olympiades de Physique m'a apporté encore une fois, un plus dans ma vie car il y eût certes, certains échecs à certaines questions, mais ce fut une motivation pour essayer de persévérer dans mes recherches ... j'aime beaucoup me poser des questions de « mirages » à chaque moment où je peux remarquer un phénomène physique étrange.

J'aime vraiment les olympiades c'est pourquoi je fais également le concours des olympiades de chimie ... et même si l'emploi du temps est assez difficile à gérer entre ces deux concours, mon vélo le fait très bien pour moi ! Le mercredi c'est 8h-12h cours au lycée, à 13h début des olympiades de chimie dans un autre établissement de la ville jusqu'à 16h, puis retour au lycée jusque 18h - 18h30. Bref c'est assez sportif, dans tous les sens du terme. Physique, chimie, sport que demander de plus.

J'ai l'ambition de passer plusieurs oraux en exposant notre sujet d'olympiades, de recommencer plusieurs concours. J'ai découvert une nouvelle passion dans la Physique et je veux la faire partager à tous. Monter par exemple par les médias (journaux ou télévision locale), aux boulonnais inconscients de ce magnifique phénomène naturel qu'est le mirage supérieur des côtes anglaises qui les entourent certains jours de l'année. Mais avant d'envisager ce projet ... j'espère honorer mon lycée tous ceux qui mon soutenu dans ce projet en le défendant dignement en finale.

Enfin, même si les mirages sont pour tous les physiciens un phénomène naturel et normal. Ils resteront toujours pour certains des « miracles » de la nature, tel que mon grand père me le disait.



Perrine CAGNEAUX,  
Terminale S2  
Spécialité Physique-Chimie