

*Projet de Physique P6-3*  
*STPI/P6-3/2011 – 13*

**LES ILLUSIONS D'OPTIQUE :  
EXPERIENCES ET ANALYSE**



**Etudiants :**

**Alexandre AIMOND**

**Adeline BAILLY**

**Mélissa DELEAU**

**Cindy ROULLET**

**Sophie ARZEL**

**Anne BAUD**

**Maxime PETE**

**Enseignant-responsable du projet :**

**David HONORE**



Date de remise du rapport : **18/06/11**

Référence du projet : **STPI/P6-3/2011 – 13**

Intitulé du projet : ***Les illusions d'optiques : expériences et analyse***

Type de projet : En continuité du projet : La physique des illusions d'optique.  
Travail expérimental principalement.

Objectifs du projet :

***Notre projet avait pour objectif de mettre en application ce que le groupe de l'année précédente avait expliqué physiquement. En effet, notre objectif était d'expliquer physiquement et mathématiquement ce que le groupe précédent avait développé d'une manière plus physique. Nous devons donc réaliser des expériences sur des sujets variés tels que l'effet mirage, le coucher de soleil, la strioscopie ou la construction d'objets virtuels. Nous devons aussi nous intéresser à des illusions papier autres que celles expliquées dans le précédent rapport. De plus, nous avons cherché à les classer par catégories pour mieux voir les différents types d'illusions possibles.***

Mots-clefs du projet : ***Illusion d'optique, Mirage, Strioscopie, Objet virtuel***

Si existant, n° cahier de laboratoire associé : **A30230**

## TABLE DES MATIERES

1	Introduction .....	7
2	Méthodologie / Organisation du travail .....	8
3	Le fonctionnement d'une illusion d'optique.....	9
3.1	Les illusions géométriques .....	9
3.2	Les stéréogrammes.....	10
3.3	Les illusions artistiques .....	11
4	Les mirages .....	13
4.1	Explication sur les changements de milieu .....	13
4.2	Résultats de l'expérience de l'eau salée.....	13
4.2.1	Les mesures .....	14
4.2.2	Les calculs .....	15
4.2.2.1	Explication mathématique .....	16
4.2.2.2	Application .....	17
5	La strioscopie.....	18
5.1	Expériences réalisées .....	18
5.2	Explication phénoménologique.....	19
5.2.1	En utilisant l'optique géométrique.....	19
5.2.2	En utilisant l'optique ondulatoire.....	20
6	La construction d'objets virtuels .....	21
6.1	Cas général.....	21
6.2	La réalité augmentée.....	21
6.2.1	Principe .....	21
6.2.2	Applications.....	22
6.2.3	Expérience .....	23
6.3	Etude d'un mirascope.....	24
6.3.1	Fonctionnement .....	24
6.3.2	Calcul et fonctionnement.....	24
6.3.3	Explication du schéma .....	25
6.3.4	Conclusion .....	25

7	Conclusions et perspectives.....	26
8	Bibliographie .....	27
9	Table des illustrations .....	29
10	Annexes .....	31
10.1	Gradient de température .....	31
10.1.1	Matériel .....	31
10.1.2	Protocole.....	31
10.1.3	Déroulement de l'expérience.....	32
10.1.4	Résultats de l'expérience .....	32
10.2	Première expérience sur les mirages (Gradient de sel).....	33
10.2.1	Matériel .....	33
10.2.2	Tableau de résultats.....	33
10.2.3	Mesure de la salinité .....	34
10.2.4	Mesures de conductivité.....	35
10.3	Le coucher de soleil .....	37
10.3.1	L'expérience avec le lait .....	37
10.3.2	Expérience avec le thiosulfate.....	38
10.3.2.1	Matériel nécessaire .....	38
10.3.2.2	Protocole.....	38
10.3.2.3	Explication physique .....	38
10.4	Expérience avec les bougies.....	40
10.4.1	Protocole.....	40
10.4.2	Déroulement de l'expérience.....	40
10.4.3	Explication.....	40
10.4.4	Conclusion .....	40
10.5	Expériences complémentaires de strioscopie.....	41
10.6	Mise en équation de la diffraction de Fraunhofer.....	43
10.7	Applications de la strioscopie .....	45
10.7.1	Aéronautique.....	45
10.7.2	Expériences scientifiques.....	46
10.7.3	Strioscopie et art .....	48
10.8	Mesures et calculs sur les miroirs d'un mirascope.....	49
10.8.1	Calculs des dimensions du miroir inférieur .....	49
10.8.2	Calculs des dimensions du miroir supérieur .....	50
10.8.3	Calculs des rayons de courbure .....	51

10.9	Calcul des grossissements .....	52
10.10	Etude des angles de vue du microscope .....	55
10.11	Propositions de sujets de projets .....	57

## 1 INTRODUCTION

Le sujet de notre projet de physique s'intitule « Illusions d'optique : expériences et analyse ». La perception visuelle repose sur deux organes : l'œil et le cerveau. Les illusions d'optique sont de parfaits exemples des limites de notre perception visuelle : ce sont des perceptions qui trompent le système visuel humain (de l'œil jusqu'au cerveau) et qui aboutissent à une vision erronée de la réalité. Les causes de ces illusions sont parfois physiques (mécanisme de l'œil), ou parfois psychologiques (interprétation d'une image, traitement des informations). Elles peuvent survenir naturellement ou être l'objet d'astuces visuelles. En se basant sur l'intitulé du sujet, nous avons décidé de concentrer notre travail essentiellement sur quelques analyses théoriques, et surtout sur des expériences d'illusions d'optique dans plusieurs de leurs applications (mirage, réalité augmentée). Comme l'a écrit Alexandre Dumas (fils), « Une illusion de moins, c'est une vérité en plus » [Alexandre Dumas, 1892], c'est pourquoi ce projet nous a demandé du temps, de l'implication et de nombreuses recherches.

Nous nous sommes d'abord intéressés aux illusions d'optique sur papier qui sont les plus simples à expliquer, puis notre étude a porté sur diverses applications : les mirages, la striaoscopie et la construction d'objets virtuels.

## 2 METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Lors de notre projet, nous avons différents thèmes à traiter. Étant donné qu'il s'agissait principalement d'un travail expérimental, nous nous sommes divisés en plusieurs groupes pour pouvoir nous occuper d'un maximum de parties du sujet. Adeline et Sophie étaient en charge de l'effet mirage et du coucher de soleil, Cindy, Maxime et Mélissa de la construction d'objets virtuels et Anne et Alexandre de la stioscopie. Mélissa s'est aussi occupée des illusions papier dans un second temps.

Une fois la répartition effectuée, chaque groupe a avancé sur son sujet indépendamment. Adeline et Sophie ont réalisé plusieurs expériences successives, principalement sur l'effet mirage. Maxime a essayé de reconstituer une expérience de la réalité augmentée pendant que Mélissa s'est occupée de l'explication générale de la construction d'objets virtuels. Cindy a mis en place une expérience utilisant un mirascope. Au cours du semestre, nous nous sommes régulièrement concertés pour mettre au point le plan de notre dossier et vérifier l'avancement de chacun.

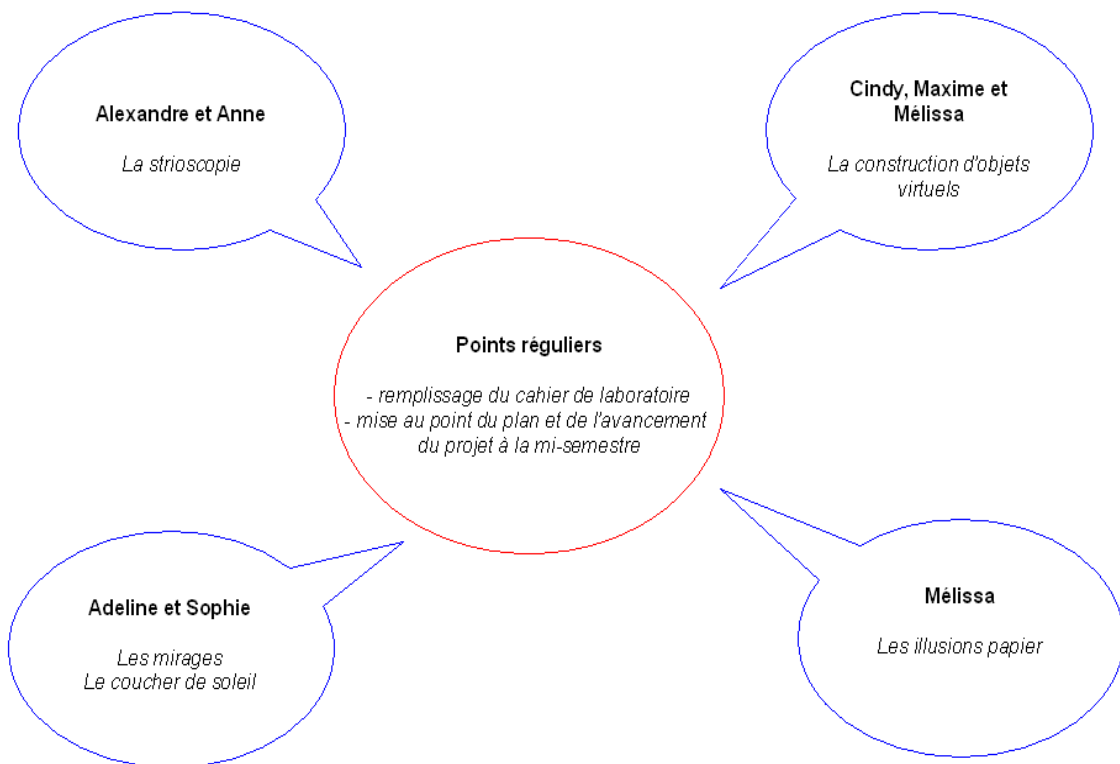


figure 1 : Organigramme des tâches



### 3 LE FONCTIONNEMENT D'UNE ILLUSION D'OPTIQUE

En principe, l'image physique formée au fond de l'œil, sur la rétine, est analysée et transmise au cerveau sous forme de messages codés. Ce sont ensuite les zones visuelles du cerveau qui analysent ces signaux et nous donnent une représentation de l'objet perçu. L'interprétation qu'en fait le cerveau peut parfois être ambiguë, c'est l'origine des illusions d'optique. Elles ne sont pas perçues de la même façon par tout le monde puisque nous n'avons pas tous les mêmes images en mémoire. Les illusions d'optique sont le résultat d'une stimulation des récepteurs photo-rétiniens qui peuvent subir des phénomènes de fatigue, et surtout d'une construction mentale, parfois erronée.

Nous allons, en prenant des exemples pour plusieurs catégories d'illusion, tenter d'expliquer comment le cerveau interprète l'image et pourquoi.

#### 3.1 Les illusions géométriques

Les illusions formées par des figures géométriques donnent lieu à des erreurs d'estimation, de dimension, d'interprétation ou de courbure. Trois points fondamentaux peuvent expliquer ce type d'illusion :

- Ces illusions n'ont rien à voir avec les pensées et le raisonnement, elles sont du domaine perceptif.
- Elles ne naissent pas dans la rétine mais dans le système visuel, au-delà de la partie du cerveau qui analyse 80% des informations visuelles, là où sont rassemblées les informations captées par chaque œil.
- Elles ne résultent pas du mouvement des yeux puisqu'on se rend compte qu'elles apparaissent aussi nettement lorsque la durée d'exposition est trop faible pour que l'œil ait le temps de balayer la figure. Elles sont, en revanche, dues à d'autres éléments trompeurs comme la mise en relation des grandeurs, la division de l'espace, la verticalité, les effets d'angles ou la perspective.

Un exemple typique d'illusion par la division de l'espace est celui d'Oppel-Kundt :



figure 2 : Illusions papier : illusion d'Oppel-Kundt

La distance entre A et B paraît plus grande que la distance entre B et C, alors que ces distances sont égales. Ceci est dû au fait qu'un espace divisé ou occupé de nombreux éléments apparaît généralement plus grand qu'un espace qui ne l'est pas.

Prenons un autre exemple avec la verticalité.

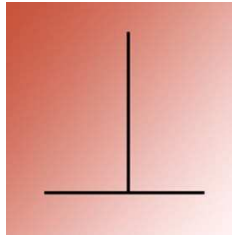


figure 3 : Illusions papier : illusion de la verticalité

Sur cette image, la ligne verticale nous paraît plus grande que celle horizontale. En réalité, elles ont la même longueur. Lorsqu'on a deux lignes de mêmes longueurs mais dans une position différente, nous avons l'impression que la ligne verticale est plus grande que l'horizontale. En fait, le mouvement des yeux lié aux lignes horizontales est plus facile à exécuter que le mouvement vertical. L'œil voit en premier la ligne horizontale, ce qui rend la ligne verticale plus grande car l'œil met plus de temps à l'interpréter.

### 3.2 Les stéréogrammes

Le premier stéréogramme a été inventé en 1971 par Bella Jules. Il s'agissait de la première illusion 3D créée à partir d'un ordinateur. Un stéréogramme est donc une image calculée par ordinateur. On part d'une image à nombreux motifs ou plusieurs teintes, et on déforme légèrement ce motif sur ordinateur selon le relief que l'on cherche à faire apparaître. On peut également fusionner l'image de départ avec une autre image de même résolution et même grandeur. L'effet 3D est alors créé.

Le phénomène nous permettant de voir des images en trois dimensions est le suivant. En temps normal, lorsqu'on regarde une image de près, nos deux yeux convergent sur un seul motif. Nos deux yeux ne sont pas placés au même endroit, ils ne perçoivent pas la même chose. Lorsque nos yeux regardent au loin, ils ont, en revanche, une vue parallèle. Pour regarder un stéréogramme, il faut cette fois que chaque œil soit dirigé vers un motif différent. Nos deux yeux sont, en réalité, focalisés sur un point qui se situe loin derrière l'image. Chaque œil reçoit une image différente, mais on a l'impression de voir le même objet puisque le cerveau reconstitue le relief caché et ses détails lorsqu'on se concentre dessus. Il est conseillé de placer son visage (très) près de l'image, jusqu'à ce que les yeux ne fassent plus la mise au point et qu'on ait le regard « dans le vide ». Il faut ensuite reculer doucement en gardant une vision parallèle. L'important est de ne pas regarder normalement, voir les images en 3D n'est pas facile et peut demander plusieurs essais.

A priori, rien de particulier sur cette image...



figure 4 : Illusions papier : stéréogramme

Voici maintenant ce que vous devriez voir en suivant la méthode précédente :

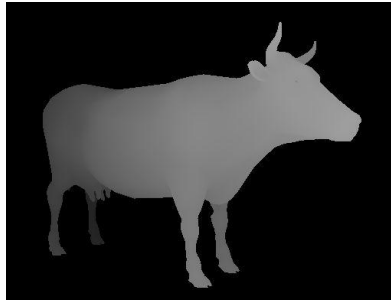


figure 5 : Illusions papier : résultat du stéréogramme

### 3.3 Les illusions artistiques

Ce type d'illusion d'optique ne résulte pas d'une faiblesse du cerveau ; il n'est pas dû à des erreurs d'interprétation du système visuel, mais plutôt à la conception de l'œuvre, choisie par son auteur, qui induit notre œil en erreur. Les illusions artistiques peuvent être divisées en deux groupes.

Tout d'abord, il y a les illusions portant sur l'ambiguïté : chaque dessin peut être interprété d'au moins deux façons différentes, qui s'excluent mutuellement. L'observateur verra, à première vue, une seule des interprétations, mais il pourra ensuite passer volontairement de l'une à l'autre une fois qu'il aura identifié les deux. Cependant, notre cerveau ne peut pas saisir les deux images en même temps, il faut se concentrer sur l'une, puis sur l'autre.

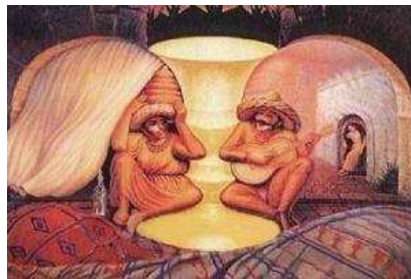


figure 6 : Illusions papier : deux visages, des sombreros jouant de la guitare et un vase



figure 7 : Illusions papier : une jeune femme de dos et une vieille femme de profil

Ensuite, il existe les illusions portant sur l'impossibilité : des parties différentes de chacun des dessins donnent lieu à des interprétations incompatibles entre elles. Tous les objets réunis ne pourraient pas exister dans la réalité. Ces illusions s'appuient sur les ombres, la profondeur, les différents points de vue et les angles pour créer l'illusion.

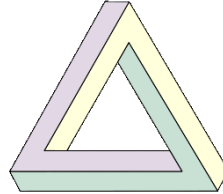


figure 8 : Illusions papier : le triangle de Penrose

Le triangle de Penrose est une illusion dépendant d'une mauvaise interprétation cognitive selon laquelle les arêtes adjacentes doivent se joindre.

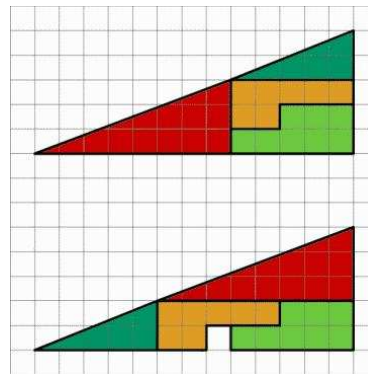


figure 9 : Illusions papier : énigme des triangles

L'énigme des triangles est une illusion très connue. Ces deux triangles nous apparaissent identiques (13 carreaux de largeur, 5 de hauteur), alors comment expliquer le trou formé en déplaçant simplement les pièces du triangle ? En réalité, le triangle supérieur n'en est pas un, c'est un quadrilatère : en regardant attentivement l'hypoténuse, on remarque qu'elle n'est pas tout à fait droite mais légèrement concave. Le triangle inférieur est lui aussi en fait un quadrilatère mais dont l'hypoténuse est convexe (position des triangles rouges et verts inversée). La surface vide supplémentaire induite par l'hypoténuse convexe dans le « triangle » inférieur est l'équivalent d'un carreau, ce qui explique la case vide.

En plus d'illusions papiers, qui semblent avoir été créées pour tromper l'esprit, il existe des illusions naturelles que l'on côtoie parfois. Les mirages sont un bon exemple.

## 4 LES MIRAGES

Le groupe de l'année dernière avait commencé l'explication physique des mirages, nous avons donc continué les recherches et mené quelques expériences pour pouvoir vérifier que la pratique et la théorie donnent les mêmes résultats.

### 4.1 Explication sur les changements de milieu

Lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu à un autre, ce rayon peut être dévié, ce phénomène est le phénomène de réfraction. Il est possible de calculer cette réfraction grâce à la loi de Snell-Descartes.

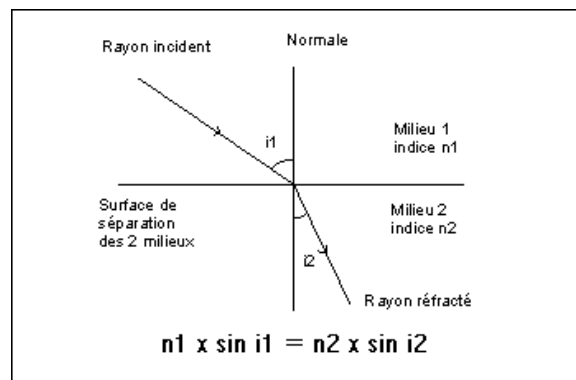


figure 10 : *Mirage : loi de Snell-Descartes*

L'explication de la réfraction est assez simple. Pour aller d'un point à un autre, les rayons lumineux suivent le chemin le plus court. Lors d'un changement de milieu, la vitesse d'un rayon change, ce n'est donc plus une ligne droite qui correspond au chemin le plus court mais un chemin dévié, qui correspond au rayon réfracté.

Ainsi, dans un domaine où plusieurs milieux d'indices différents se superposent, un gradient apparaît. On peut observer un phénomène de réfraction lorsqu'un rayon traverse ce domaine. Celui-ci peut être une addition de réfraction et peut parfois conduire à une réfraction totale. La déviation finale du rayon dépendra de l'évolution du gradient ainsi que de l'angle d'incidence initial du rayon. Ce phénomène est observable dans la nature lors d'un mirage. Il s'agit en fait des rayons d'un objet traversant une superposition de couche d'air de températures différentes.

En laboratoire, il est difficile de créer un gradient de température (voir 10.1 Gradient de température). Nous avons choisi de réaliser un gradient salin afin d'observer et de comprendre ce qu'il se produit lors de la formation d'un mirage. Nous avons donc fait une première expérience dans le but de s'assurer que l'expérience fonctionne. Puis une seconde, plus rigoureuse afin de mesurer précisément l'impact du gradient salin sur un rayon incident. (voir 10.2 Première expérience sur les mirages)

### 4.2 Résultats de l'expérience de l'eau salée

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats de notre deuxième expérience avec la salinité de l'eau. Celle-ci a été effectuée en mesurant de façon très précise la conductivité et l'inclinaison du laser. D'après les sources [<http://tpemirages.c.la/>, 15/03/2011], la saturation du sel dans l'eau se réalise à environ 360 g/L de sel.

On prend les dimensions du bassin :

- o longueur : 60cm
- o largeur : 30cm
- o hauteur : 20cm
- o volume (déduit) : 36dm<sup>3</sup>

On peut mettre au maximum 36 L d'eau, on a choisi d'utiliser un volume de 20 L, ce qui nous permet de pouvoir ajouter le sel nécessaire à l'expérience. Après calcul, la masse de sel nécessaire pour saturer l'eau est de :

**eq 1.**  $360g / L * 20L = 7,2kg$

Nous laissons reposer l'eau et le sel pendant 3 ou 4 semaines. Ce temps permettra au sel de se dissoudre dans l'eau. La hauteur d'eau dans l'aquarium, après dissolution du sel est de 14,1 cm.

**4.2.1 Les mesures**

Hauteur d'entrée et de sortie en fonction de l'angle

Deg	0°			10°	He : hauteur en entrée Hs : hauteur en sortie Deg : degré d'inclinaison L-10 : le laser touche le fond de l'aquarium 10 cm avant la paroi de sortie
He (cm)	Hs (cm)		He (cm)	Hs (cm)	
13,5	11		14	6	
10,5	6,8		11,5	L-19	
8,3	4				
6,5	2,3			20°	
4,5	L-14		14	L-6,5	



figure 11 : Mirage : photo du laser dévié dans l'expérience de la salinité

## Mesure de salinité selon la hauteur

Hauteur de l'aquarium (cm)	Conductivité (mS/cm)	Hauteur de l'aquarium (cm)	Conductivité (mS/cm)
14	178	9	207
13	183,9	8	212
12	186,6	7	217
11	193,4	6	220
10	199,6	5	222

On réalise une nouvelle courbe pour voir la conductivité. Il faut noter que, malgré un calcul pour connaître la quantité précise de sel à mettre dans l'eau, une fine couche de sel non dissoute est restée présente au fond de l'aquarium.

Conductivité dans l'aquarium selon la hauteur

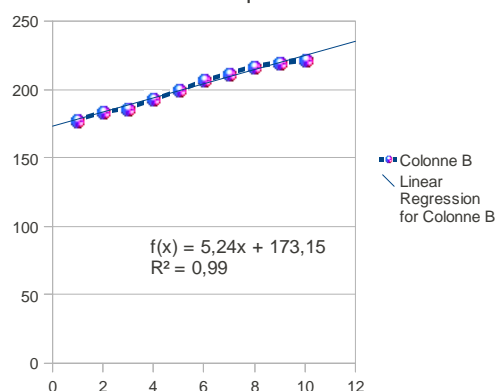


figure 12 : Mirage : courbe de la conductivité dans l'aquarium selon la hauteur

### 4.2.2 Les calculs

Nous avons besoin d'une autre donnée pour pouvoir expliquer le phénomène. Il s'agit de l'indice de réfraction du milieu en fonction de la salinité.

Pour le calculer, il nous faut étudier un à un chaque milieu, c'est-à-dire étudier l'impact de la salinité sur la déviation d'un rayon pour chaque milieu de salinité différent. Puis, nous devons déterminer l'indice de réfraction grâce à la loi de Snell-Descartes, vue précédemment (voir figure 10). Par manque de temps, nous n'avons pas pu réaliser cette étude. Cependant, en se documentant [[http://fred.elie.free.fr/refraction\\_et\\_densite.htm](http://fred.elie.free.fr/refraction_et_densite.htm), 25/04/2011], on trouve aisément des tableaux de valeurs représentant l'évolution de l'indice de réfraction en fonction de la salinité.

#### 4.2.2.1 Explication mathématique

Pour cette expérience, la masse volumique est évaluée de la façon suivante : le volume d'eau douce est  $V = 2 \text{ cL}$ , ce qui correspond à une masse d'eau  $m_{\text{eau}} = 20 \text{ g}$ . La mesure de la masse volumique du sel donne  $\rho_{\text{sel}} = 1100 \text{ kg/m}^3$  (masse volumique de l'eau  $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ).

On suppose la dissolution parfaite du sel dans l'eau. Ainsi, on peut considérer que le volume du mélange  $V$  reste le même lorsqu'on ajoute un volume de sel constant  $V_{\text{sel}}$  mais sa masse augmente. Soit :

$$\text{eq 2.} \quad m = \rho * V = m_{\text{se}} + m_{\text{eau}} = \rho_{\text{sel}} * V_{\text{sel}} + m_{\text{eau}}$$

D'où la masse volumique cherchée du mélange :

$$\text{eq 3.} \quad \rho = \rho_{\text{eau}} + \rho_{\text{sel}} * V_{\text{sel}} / V$$

C'est-à-dire si les volumes sont en mL :

$$\text{eq 4.} \quad \rho = 1000 + 1100 * V / 20$$

En ajoutant à chaque fois 0,5 mL de sel, on peut mesurer l'angle de réfraction  $r$  puis calculer l'indice correspondant  $n$  et calculer la masse volumique totale du mélange.

On obtient ainsi le tableau de résultats suivant :

$V_{\text{sel}}$ (mL)	Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Angle de réfraction $r$ (°)	Indice $n$ ( $\rho$ )
0	1000	25	1,32
1	1055	24,5	1,35
1,5	1082,5	24	1,37
2	1110	23,5	1,40
2,5	1137,5	21,5	1,53

Ainsi, grâce aux nombreuses séries de données obtenues tout au long de notre étude, nous obtenons finalement une formule permettant de déterminer l'évolution de l'indice de réfraction en fonction de la hauteur dans l'aquarium.

$$\text{eq 5.} \quad I = 0,44H + 1,49$$



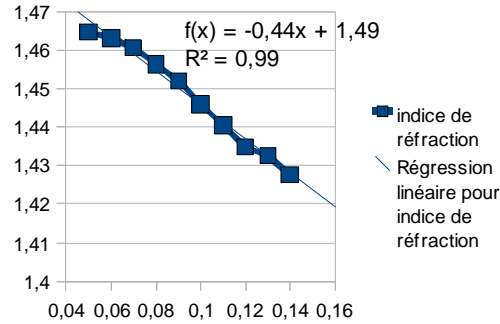


figure 13 : *Mirage : évolution de l'indice de réfraction en fonction de la hauteur*

#### 4.2.2.2 Application

Un faisceau entrant dans l'aquarium, à une hauteur de 14 cm et avec un angle de 80°, subit une variation continue de sa direction. En effet, l'indice de réfraction étant fonction de la hauteur, le faisceau subit de nombreuses réfractions infinitésimales tout au long de sa progression dans le bassin. On peut assimiler cette somme de réfractions infinitésimales à quatre réfractions successives plus visibles.

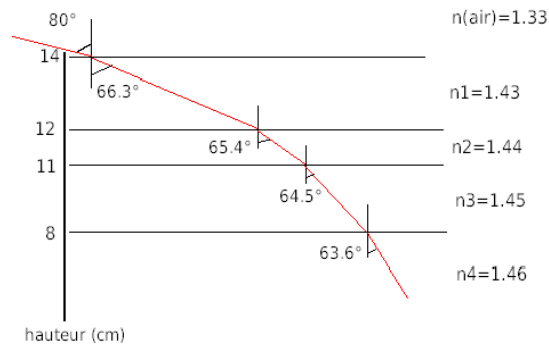


figure 14 : *Mirage : réfractions d'un faisceau incident avec un angle de 80°*

Ces petites expériences simples nous ont permis de vérifier que les variations d'indice sont bien à l'origine du phénomène observable appelé mirage. Nous pensions également étudier les causes du changement de couleurs lors d'un coucher de soleil. Mais, par manque de temps, nous avons seulement pu recréer le phénomène sans pouvoir l'expliquer d'avantage (voir 10.3 Coucher de soleil). Peut-être qu'une autre promotion se penchera plus en détail sur le sujet. De plus, nous avons réalisé une expérience complémentaire prouvant que ce que l'on voit n'est pas toujours représentatif de la réalité. (voir 10.4 Expérience avec les bougies)

Avec l'effet mirage, nous avons vu qu'une différence d'indice de réfraction entraîne une déviation des rayons lumineux. Dans ce qui suit, nous allons voir comment la strioscopie permet de détecter ces variations d'indice de réfraction.

## 5 LA STRIOSCOPIE

La strioscopie, aussi appelée la photographie de Schlieren, a été initialement découverte par Robert Hookes (contemporain de Newton, XVII<sup>ème</sup> siècle). C'est une méthode permettant de visualiser, sur une image ou dans un fluide, de faibles variations d'indice ou d'épaisseur, invisibles à l'œil nu. Par exemple, avec cette technique, il est possible de visualiser la dissolution d'une pierre de sucre dans une cuve d'eau car l'eau sucrée n'a pas le même indice de réfraction que l'eau « pure ».

En effet, l'œil humain est sensible aux variations d'amplitude de la lumière (appelées contrastes), alors que cette méthode utilise la diffraction qui induit une variation de phase. Il s'agit en fait d'une application du filtrage spatial en optique de Fourier.

Nous allons donc tout d'abord présenter notre travail expérimental. Puis, dans un second temps, nous proposerons une explication phénoménologique.

### 5.1 Expériences réalisées

Nous avons donc réalisé des expériences en utilisant la strioscopie. Le but était de comprendre le fonctionnement de cette méthode. Nous avons fait trois expériences en tout. Nous allons expliquer la strioscopie avec la première seulement (voir 10.5 Expériences complémentaires de strioscopie). Voici donc le montage et les résultats de notre première expérience.

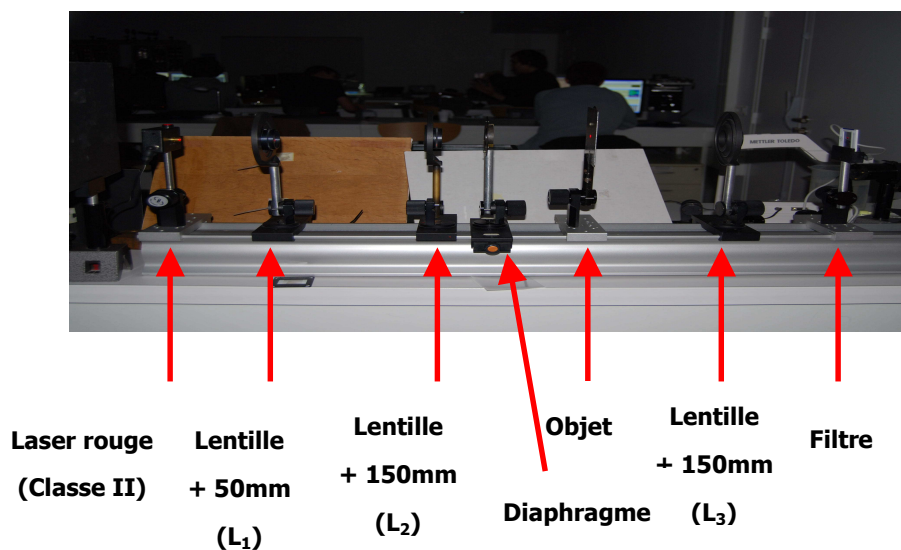


figure 15 : Strioscopie : détails de la première expérience

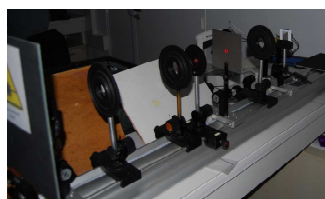


figure 16 : Strioscopie : photo de la première expérience

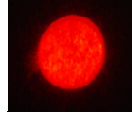


figure 17 : *Strioscopie : résultat de la première expérience sans le filtre*

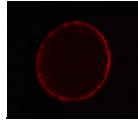


figure 18 : *Strioscopie : résultat de la première expérience avec le filtre*

## 5.2 Explication phénoménologique

### 5.2.1 En utilisant l'optique géométrique

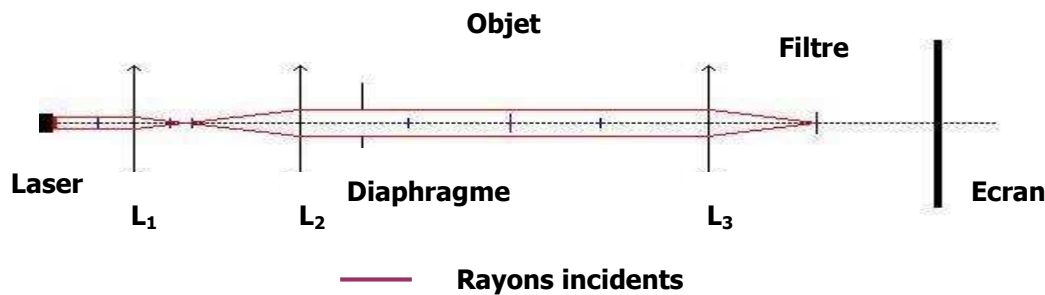


figure 19 : *Strioscopie : schéma du montage d'un point de vue de l'optique géométrique*

Étant donné que le faisceau émis par le laser était légèrement divergent, nous avons tout d'abord utilisé une lentille convergente  $L_1$  pour obtenir une source ponctuelle. Cette source ponctuelle est donc l'objet de la lentille convergente  $L_2$  qui sert à créer un faisceau de lumière à l'infini. Ainsi, la distance entre l'image virtuelle du laser par  $L_1$  et  $L_2$  correspond à la distance focale  $f_2$ . Ensuite, nous avons remarqué que notre faisceau, ainsi parallèle, était auréolé de nombreux parasites. Nous les avons donc éliminés avec un diaphragme pour qu'ils ne faussent pas le résultat final.

Puis, nous avons placé l'objet au milieu du faisceau. Sa taille devait être plus petite que la largeur du faisceau, donc nous avons choisi un petit trou. Ainsi, la lumière est stoppée là où l'objet est opaque et elle passe normalement dans le trou. Le faisceau obtenu traverse alors la lentille convergente  $L_3$ . L'image « finale » est donc obtenue au point de convergence, dans le plan focal de la lentille  $L_3$ .

A cet endroit-là, on place le filtre. Il s'agit d'un cache opaque, légèrement plus grand que le faisceau initial, sortant du laser. Il intercepte donc tous les rayons du faisceau. Ainsi, en théorie, l'écran devrait être noir. Mais on observe quand même une image. Donc, l'optique géométrique n'est pas suffisante pour expliquer la strioscopie. Nous allons donc utiliser l'optique ondulatoire par la suite.

### 5.2.2 En utilisant l'optique ondulatoire

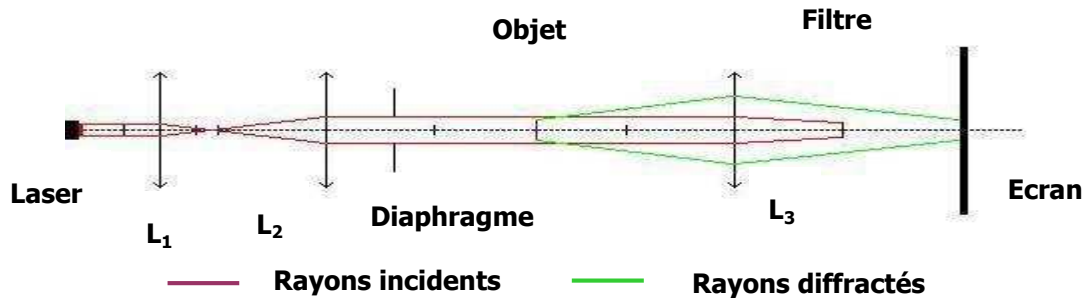


figure 20 : Strioscopie : schéma du montage d'un point de vue de l'optique ondulatoire

En effet, le phénomène de diffraction s'explique avec l'optique ondulatoire. Dans notre expérience, on va s'intéresser plus particulièrement à ce qui se passe sur les bords de notre objet, étant donné que l'image que l'on obtient représente les bords de l'objet.

Lorsque la lumière arrive sur l'objet, comme nous l'avons dit précédemment, elle est stoppée là où l'objet est opaque mais elle est diffractée sur l'ouverture et plus particulièrement sur les bords. Chaque point du contour de l'objet, quand il reçoit un rayon lumineux, agit comme une source lui-même. Ainsi, il diffuse des rayons dans toutes les directions. C'est le principe de Huygens-Fresnel. Ainsi, dans l'espace, ces rayons interfèrent les uns avec les autres. Dans notre cas, les rayons incidents du laser sont parallèles et donc des ondes planes monochromatiques. On peut donc considérer qu'il s'agit d'une diffraction de Fraunhofer. (voir 10.6 Mise en équation de la diffraction de Fraunhofer)

Avec la lentille convergente  $L_3$ , on fait converger tous ces rayons lumineux (qui comprennent aussi les rayons qui n'ont pas été diffractés). Étant donné que le faisceau incident était parallèle, l'image obtenue se situe dans le plan focale image de  $L_3$ . On obtient donc une figure de diffraction si on place un écran à cet endroit, nommé plan de Fourier. Pour rappel, une figure de diffraction est composée d'une tache centrale très lumineuse, suivie de nombreuses autres taches moins lumineuses qui correspondent aux interférences des rayons diffractés. Dans notre expérience, nous avons simplement mis un filtre qui cache la tache centrale. En effet, celle-ci contient principalement les rayons qui n'ont pas été diffractés. Toutefois, ce cache ne bloque que la tache centrale et pas les autres. Donc, les rayons diffractés, qui correspondaient aux taches secondaires, continuent leur chemin jusqu'à l'écran. Finalement, on conjugue l'écran avec notre objet, c'est à dire que l'image observée sur l'écran est celle de notre objet. Ainsi, on obtient une image composée de tous les rayons diffractés, c'est à dire les bords de notre objet.

Il existe de nombreuses applications de la strioscopie dans différents domaines (voir 10.7 Applications de la strioscopie).

Nous avons maintenant fait le tour de plusieurs illusions d'optique très différentes. Toutefois, il reste un domaine important à explorer : la construction d'objets virtuels.

## 6 LA CONSTRUCTION D'OBJETS VIRTUELS

### 6.1 Cas général

Le concept d'objet virtuel peut être interprété de la manière suivante : « On appelle objet virtuel une image réelle que l'on empêche de se former ».

C'est, en fait, un ensemble de points définis par la convergence du prolongement de rayons. Cet objet virtuel est situé après la face d'entrée du système optique, dans l'espace objet virtuel.

En réalité, la convergence des rayons qui définissent l'objet virtuel, n'existerait qu'en l'absence du système optique. Comme vu lors des cours d'optique, dans un système optique, une image réelle formée par la première partie du système peut être considérée comme un objet (virtuel) pour la seconde partie du système s'il est placé après la lentille.

Un exemple simple et concret est celui du rétroprojecteur. On place un transparent sur le plateau du rétroprojecteur et on règle la hauteur de l'appareil après avoir démonté le miroir.

On montre ensuite que lorsqu'on ajoute un miroir et qu'on règle son inclinaison, on supprime l'image qui est sur le plafond pour la faire apparaître sur le mur ou sur un écran placé à bonne distance.

Cette expérience montre que l'image réelle sur le plafond sert d'objet virtuel pour le miroir plan.



figure 21 : Objets virtuels : photo d'un rétroprojecteur sans miroir puis avec

Photos venant du site Internet : <http://www.lac.u-psud.fr/experiences-optique/images-objets/concept-objet-virtuel.htm> [valide à la date du 10/04/2011].

### 6.2 La réalité augmentée

#### 6.2.1 Principe

Au sens informatique, la réalité augmentée est un ensemble de systèmes qui permettent la superposition d'un modèle virtuel (en 2 ou 3 dimensions) à la perception que nous avons de l'environnement réel. Elle permet donc la visualisation d'images virtuelles. Cette technique s'inspire de la réalité virtuelle, mais au lieu de tout modéliser en 3

dimensions et d'avoir un environnement entièrement virtuel, la réalité augmentée garde les éléments du monde réel pour en ajouter des virtuels.

Ce système existe à la fois pour la perception visuelle (images) et la perception tactile ou auditive et permet de compléter notre perception du monde réel en y ajoutant des éléments fictifs, non perceptibles naturellement mais grâce à des méthodes d'insertion d'objets virtuels dans des séquences d'images.

Le principe est d'incruster des images de synthèse sur les images du monde réel. Il y a peu, un casque était nécessaire à la perception de ces images, mais aujourd'hui un simple Smartphone ou une webcam et bientôt des lunettes vidéo spéciales le permettront.

Les objets virtuels sont créés par ordinateur. Des caméras situées dans l'interface utilisée (lunettes, webcam) envoient des images vidéo qui seront, une fois reliées à un Smartphone ou à un ordinateur, exploitées en données informatiques et combinées avec ce qui est filmé en direct : les images de synthèse fusionnent avec celles du monde réel. Les difficultés majeures résident dans l'alignement des caméras réelle et virtuelle (correspondance des perspectives), la cohérence spatio-temporelle (déplacement de l'objet virtuel dans la scène réelle) et la cohérence photométrique (ombres, reflets...).

### 6.2.2 Applications

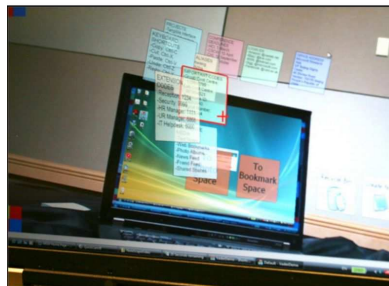


figure 22 : Objets virtuels : photo d'une application de la réalité augmentée avec un ordinateur

Les applications de la réalité augmentée sont variées et touchent de plus en plus de domaines. Ce principe est utilisé dans la presse pour rendre les journaux interactifs, en musique en tant que bonus d'un album par exemple, dans l'industrie pour tester des prototypes sur ordinateur dans le monde réel, dans le tourisme en proposant des contenus associés à l'environnement visité, et bien entendu pour les loisirs dans les jeux vidéos, pour plonger le joueur dans un monde à la fois réel et virtuel. Le spectateur devient acteur en interagissant avec les objets virtuels au moyen de capteurs. Une première application de ce domaine existe au Futuroscope depuis 2008 dans l'attraction « Les animaux du Futur ».

Cependant les domaines d'application les plus importants de la réalité augmentée sont la publicité et l'e-commerce. Par exemple, il est possible d'insérer des messages publicitaires visibles quel que soit l'angle de vue dans des images vidéo réelles.

La réalité augmentée est un facteur majeur de la prise de décision d'achat sur Internet. Par exemple, dans le secteur du mobilier, cela permet de visualiser un meuble dans sa propre maison à l'aide d'une photo. L'objet modélisé en 3D est inséré dans les proportions réelles.

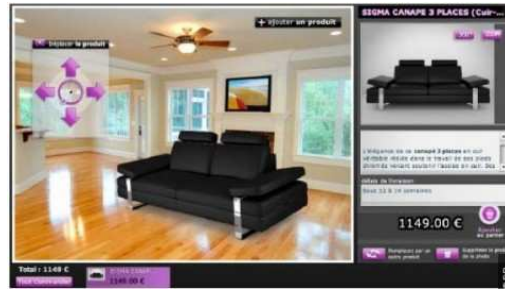


figure 23 : Objets virtuels : application de la réalité augmentée dans l'e-commerce

### 6.2.3 Expérience

Concrètement, il s'agit de traiter l'image acquise par une caméra afin de dessiner par dessus des objets virtuels. Le plus important dans cette technique, c'est de pouvoir connaître la position de la caméra par rapport à la scène filmée et ce, de préférence en temps réel. Il existe pour cela diverses techniques utilisant des capteurs extérieurs à la caméra mais elles sont coûteuses et demandent un équipement supplémentaire. La technique la plus répandue pour connaître la position de la caméra utilise directement le flux vidéo pour la calculer et c'est sur celle-ci que doit fonctionner notre application.

Pour réaliser l'application, nous avons utilisé une bibliothèque en langage C/C++ libre de droits et gratuite dénommée ARToolKit [<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>, 16/04/2011]. Tout d'abord, cette application ne peut fonctionner qu'à l'aide de petits cartons imprimés avec des motifs composés de petits carrés noirs. En étant capable de reconnaître ces motifs, le programme peut savoir quel objet tridimensionnel il doit créer et afficher selon ce qui a été défini dans le code source. C'est aussi grâce à la position du motif que le programme détermine la position de la caméra par rapport à celui-ci et peut donc changer la position de l'objet virtuel au fur et à mesure. Toutes ces opérations sont exécutées dans une boucle infinie jusqu'à l'arrêt du programme.

Concrètement, ARToolKit propose une librairie comprenant toutes les fonctions nécessaires à la création d'applications de réalité augmentée. En théorie, il est donc extrêmement simple de créer son propre programme en seulement quelques lignes de code. Malheureusement, ARToolKit nécessite des bibliothèques tierces (notamment pour la construction d'objets 3D tels que OpenGL et GLUT) pour fonctionner, ces dernières s'avèrent compliquées à installer et à configurer correctement, que ce soit sous Linux ou sous Windows, notamment avec un Netbook avec une petite carte graphique.

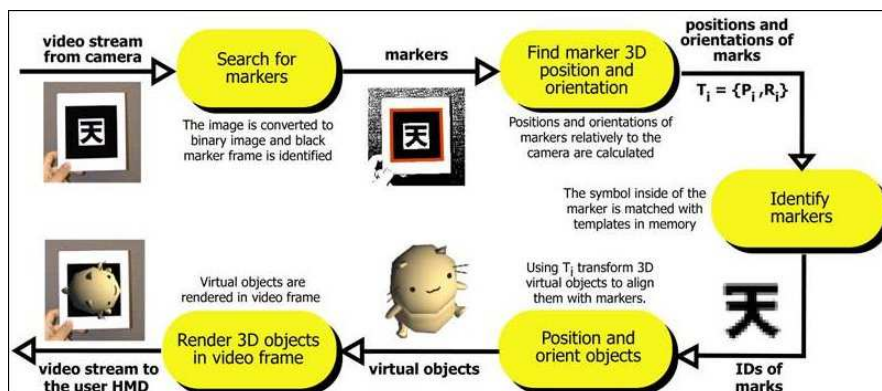


figure 24 : Objets virtuels : méthode pour fonctionnement de la réalité augmentée

## 6.3 Etude d'un mirascope

### 6.3.1 Fonctionnement



figure 25 : Objets virtuels : mirascope

Le mirascope est un assemblage de deux miroirs paraboliques. Le miroir supérieur est troué en son centre. Lorsque l'on place un objet au milieu du miroir inférieur, les rayons lumineux de l'objet sont réfléchis par les miroirs de sorte qu'ils se concentrent dans le trou du miroir supérieur, formant ainsi une image réelle, à l'endroit et tridimensionnelle.

Il a été inventé il y a environ trente ans aux Etats-Unis à l'Université de Californie à Santa Barbara. C'est un membre du personnel d'entretien qui a remarqué en nettoyant autour de projecteurs, qui sont des réflecteurs paraboliques, qu'il était en train d'essayer de nettoyer de la poussière qui n'était pas là. Il est donc allé chercher des professeurs de physique travaillant à l'université qui furent très intéressés par ce phénomène. Les deux professeurs ont alors créé un produit commercial à partir de cette découverte accidentelle. Ils ont en vendu dans le monde entier.

### 6.3.2 Calcul et fonctionnement

Nous avons la chance d'avoir en classe un mirascope. Nous avons donc réalisé des mesures et des observations sur celui-ci.

Tout d'abord, nous avons mesuré les dimensions des deux miroirs, puis calculé leurs équations paraboliques et leur rayon de courbure (voir 10.8 Mesures et calculs sur les miroirs d'un mirascope).

L'objectif est de déterminer les angles de vue limites de l'hologramme. Nous avons donc commencé par calculer le grandissement du mirascope (voir 10.9 Calcul des grandissements).

eq 6.  $\gamma_{\text{mirascope}} = -1,03$

Le résultat trouvé concorde avec nos observations. L'image est de la même taille que l'objet mais inversée.

Grâce à ce résultat, il nous a été possible d'étudier les angles de vue limites d'une boule de 1cm de diamètre. Pour les déterminer, il a fallu étudier le chemin des extrémités de l'objet. Pour une boule, seulement trois points caractérisent les extrémités. Pour tracer les rayons limites qui en émanent, il faut déterminer par le calcul la position de l'image de l'objet par le miroir du haut, qui est-elle même l'objet du miroir du bas. (voir 10.10 Etude des angles de vue du mirascope)



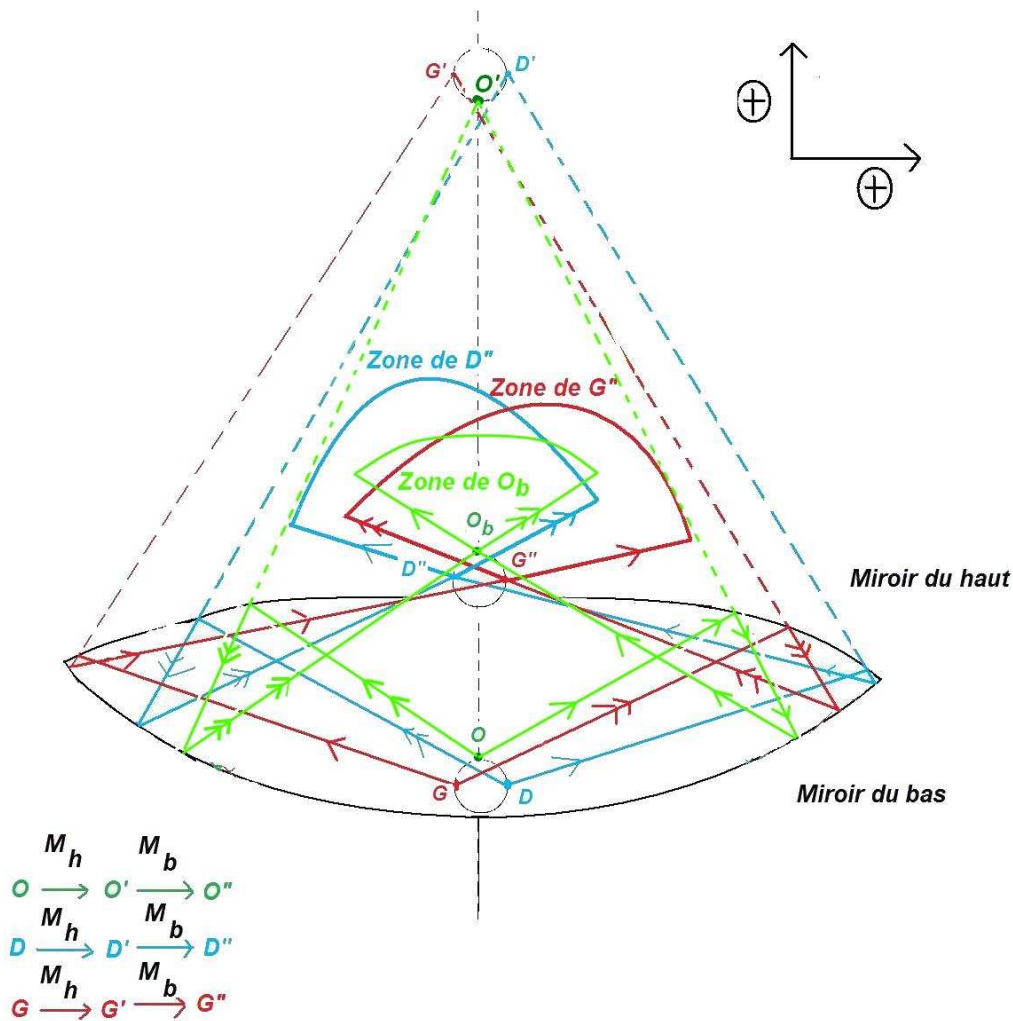


figure 26 : Objets virtuels : schéma des angles de vue

### 6.3.3 Explication du schéma

La zone verte correspond à la zone où l'on peut voir le point  $O_b$ . La zone bleu correspond à la zone où l'on peut voir le point  $D''$ . La zone rouge correspond à la zone où l'on peut voir le point  $G''$ .

Donc pour voir l'hologramme en entier, il est nécessaire de placer son œil dans la zone verte. En effet, elle contient une partie des parties rouge et bleu. Si l'on se place dans aucune zone, on ne voit pas d'image. Ces zones changent suivant les dimensions de l'objet.

### 6.3.4 Conclusion

Le mirascope est vendu dans le commerce pour le divertissement, mais aussi pour l'éducation. De plus en plus de professeurs utilisent le mirascope pour initialiser des élèves à la physique, ou même pour expliquer et mieux cerner les lois et principes de la physique optique.

## 7 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Des effets papiers à la réalité augmentée, en passant par la strioscopie, nous avons tenté de balayer tous les phénomènes qualifiés d'illusion d'optique (d'illusoires). Ainsi, nous avons pu classer les illusions papiers en trois grandes familles. Nous avons compris pourquoi certains navigateurs ont la sensation d'apercevoir des bateaux fantômes derrière un coucher de soleil rouge. De plus, nous connaissons aujourd'hui une méthode pour rendre « visible » les variations de phases les plus infimes, ceci grâce à la strioscopie. Enfin, nous avons réalisé une approche du phénomène de réalité augmentée qui fera certainement partie de notre quotidien dans quelques années.

Cependant, ce projet nous a surtout beaucoup appris concernant le travail d'équipe. Il n'est pas évident de se pencher sur un sujet aussi vaste. Une organisation rigoureuse est indispensable. Ainsi, nous nous sommes séparés en petit groupe d'étude, sans pour autant oublier de suivre l'évolution des autres expériences.

Expérimentalement, ce fut aussi très enrichissant. Nous étions autonomes, donc libres dans le choix des méthodes et des expériences. Ainsi, nous avons vite compris que ceci représente énormément de calculs préliminaires mais surtout de rigueur.

Nous ne sommes pas les précurseurs de ce dossier mais nous avons pu nous baser sur des connaissances déjà acquises pour aller plus loin. De plus, nous espérons qu'un autre groupe se penchera de nouveau sur les problèmes que nous n'avons pas eu le temps de résoudre.

## 8 BIBLIOGRAPHIE

Alexandre Dumas, « Un cas de rupture », Ancienne Maison Quantin, 1892.

### **Le fonctionnement d'une illusion d'optique**

<http://ophtasurf.free.fr/> (valide à la date du 27/04/2011).

[www.lecerveau.mcgill.ca](http://www.lecerveau.mcgill.ca) (valide à la date du 27/04/2011).

[www.illusions-optique.fr](http://www.illusions-optique.fr) (valide à la date du 27/04/2011).

[www.1001experiences.com](http://www.1001experiences.com) (valide à la date du 27/04/2011).

<http://tpe610.free.fr/introduction.htm> (valide à la date du 08/03/2011).

[http://aluttrin.free.fr/Lycees/Contenu%20lycee/1\\_L/Correction/4\\_Illusions/4\\_illusions\\_optiques\\_prof.htm](http://aluttrin.free.fr/Lycees/Contenu%20lycee/1_L/Correction/4_Illusions/4_illusions_optiques_prof.htm) (valide à la date du 12/05/2011).

<http://cpge.pissarro.free.fr/VideosPhysique/BougieMagique.html> (valide à la date du 09/06/2011).

### **Les mirages**

[http://fred.elie.free.fr/refraction\\_et\\_densite.htm](http://fred.elie.free.fr/refraction_et_densite.htm) (valide à la date du 25/04/2011).

<http://tpemirages.c.la/> (valide à la date du 15/03/2011).

[http://www-lpl.univ-paris13.fr:8088/lumen/Ressources\\_Diverses.htm](http://www-lpl.univ-paris13.fr:8088/lumen/Ressources_Diverses.htm) (valide à la date du 25/04/2011).

<http://www.isc.tamu.edu/~astro/research/sandiego.html> (valide à la date du 25/04/2011).

<http://lesmirages.bloguez.com/lesmirages/309925/II-Explication-de-la-formation-des-mirages> (valide à la date du 25/04/2011).

<http://ophtasurf.free.fr/mirages/mirages.htm> (valide à la date du 19/05/2011).

<http://physiqueludique.fr/category/optique/> (valide à la date du 19/05/2011).

<http://cpge.pissarro.free.fr/LeRille/Chap17.html> (valide à la date du 15/05/2011).

### **Le coucher de soleil**

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-coucher-soleil.xml> (valide à la date du 22/05/2011).

<http://forums.futura-sciences.com/physique/51373-coucher-de-soleil.html> (valide à la date du 15/03/2011).

<http://forums.futura-sciences.com/physique/151120-couleur-coucher-de-soleil.html> (valide à la date du 15/03/2011).

[http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/XML/db/csp/physique/metadata/LOM\\_CSP\\_QS\\_heure\\_coucher\\_soleil\\_Sol.xml](http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/XML/db/csp/physique/metadata/LOM_CSP_QS_heure_coucher_soleil_Sol.xml) (valide à la date du 16/04/2011).

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-coucher-soleil.xml#id2964197> (valide à la date du 16/04/2011).

<http://physiqueludique.fr/toutes-les-experiences/35-optique/76-pourquoi-le-coucher-du-soleil-est-il-orange-?94a762b89ee8110907270371801bd44c=06cdc3d4ac3052293169d20b07f8516b> (valide à la date du 16/04/2011).

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Rayon\\_vert](http://fr.wikipedia.org/wiki/Rayon_vert) (valide à la date du 22/05/2011).

<http://mintaka.sdsu.edu/GF/index.html> (valide à la date du 22/05/2011).

[http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/XML/db/csp physique/metadata/LOM\\_CSP\\_QSbleuducielSol.xml](http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/XML/db/csp physique/metadata/LOM_CSP_QSbleuducielSol.xml) (valide à la date du 22/05/2011).

### **La strioscopie**

David Honoré, cours « Physical optics » - STPI2 – INSA de Rouen, 2008.

[http://www.flurl.com/video/39056743\\_la\\_strioscopie\\_ou\\_quand\\_la\\_sciences\\_deviens\\_de\\_lart.htm](http://www.flurl.com/video/39056743_la_strioscopie_ou_quand_la_sciences_deviens_de_lart.htm) (valide à la date du 19/04/2011).

<http://www.onera.fr/conferences/mesures-aerodynamique/index.php> (valide à la date du 19/04/2011).

[http://www.mines-ales.fr/LGEI/Equipe\\_Risque/risk-iloa.html](http://www.mines-ales.fr/LGEI/Equipe_Risque/risk-iloa.html) (valide à la date du 19/04/2011).

[http://lmfa.ec-lyon.fr/index.php?p\\_id=instr.004.000.000&PHPSESSID=4629e45fdd39460d408bbd5da238c2dd](http://lmfa.ec-lyon.fr/index.php?p_id=instr.004.000.000&PHPSESSID=4629e45fdd39460d408bbd5da238c2dd) (valide à la date du 19/04/2011).

<http://physique-eea.ujf-grenoble.fr/intra/Organisation/CESIRE/OPT/fiches.php> (valide à la date du 13/02/2011).

[http://www.labophysique.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=61&Itemid=50](http://www.labophysique.com/index.php?option=com_content&task=view&id=61&Itemid=50) (valide à la date du 13/02/2011).

[http://pcolin.site.lycee-berthelot.fr/IMG/pdf/optique\\_physique.pdf](http://pcolin.site.lycee-berthelot.fr/IMG/pdf/optique_physique.pdf) (valide à la date du 10/03/2011).

### **La construction d'objets virtuels**

Philippe Fuchs – Guillaume Moreau – Jean-Marie Burkhardt - Sabine Coquillart, « Le traité de la réalité virtuelle » - Volume 2 : « L'interfaçage, l'immersion et l'interaction », Edition Transvalor, 2006.

Philippe Fuchs – Guillaume Moreau – Jean-Marie Burkhardt - Sabine Coquillart, « Le traité de la réalité virtuelle » - Volume 4 : « Les applications », Edition Transvalor, 2006.

[www.la-realite-augmentee.fr](http://www.la-realite-augmentee.fr) (valide à la date du 10/04/2011).

[www.loria.fr](http://www.loria.fr) (valide à la date du 10/04/2011).

[www.erasme.org](http://www.erasme.org) (valide à la date du 23/02/2011).

[www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr) (valide à la date du 23/02/2011).

<http://www.lac.u-psud.fr/experiences-optique/images-objets/concept-objet-virtuel.htm> (valide à la date du 10/04/2011).

[www.astrosurf.com](http://www.astrosurf.com) (valide à la date du 10/04/2011).

[http://www2.caes.hku.hk/schoolscience/files/2010/09/SSHK\\_Vol\\_3\\_03.pdf](http://www2.caes.hku.hk/schoolscience/files/2010/09/SSHK_Vol_3_03.pdf) (valide à la date du 17/05/2011).

<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/> (valide à la date du 16/04/2011).

## 9 TABLE DES ILLUSTRATIONS

figure 1 : Organigramme des tâches.....	8
figure 2 : Illusions papier : illusion d’Oppel-Kundt .....	9
figure 3 : Illusions papier : illusion de la verticalité .....	10
figure 4 : Illusions papier : stéréogramme.....	10
figure 5 : Illusions papier : résultat du stéréogramme.....	11
figure 6 : Illusions papier : deux visages, des sombreros jouant de la guitare et un vase...11	
figure 7 : Illusions papier : une jeune femme de dos et une vieille femme de profil .....	11
figure 8 : Illusions papier : le triangle de Penrose .....	12
figure 9 : Illusions papier : énigme des triangles .....	12
figure 10 : Mirage : loi de Snell-Descartes.....	13
figure 11 : Mirage : photo du laser dévié dans l’expérience de la salinité .....	14
figure 12 : Mirage : courbe de la conductivité dans l’aquarium selon la hauteur.....	15
figure 13 : Mirage : évolution de l’indice de réfraction en fonction de la hauteur.....	17
figure 14 : Mirage : réfractions d’un faisceau incident avec un angle de $80^\circ$ .....	17
figure 15 : Strioscopie : détails de la première expérience .....	18
figure 16 : Strioscopie : photo de la première expérience.....	18
figure 17 : Strioscopie : résultat de la première expérience sans le filtre .....	19
figure 18 : Strioscopie : résultat de la première expérience avec le filtre .....	19
figure 19 : Strioscopie : schéma du montage d’un point de vue de l’optique géométrique	19
figure 20 : Strioscopie : schéma du montage d’un point de vue de l’optique ondulatoire ..	20
figure 21 : Objets virtuels : photo d’un rétroprojecteur sans miroir puis avec.....	21
figure 22 : Objets virtuels : photo d’une application de la réalité augmentée avec un ordinateur.....	22
figure 23 : Objets virtuels : application de la réalité augmentée dans l’e-commerce.....	23
figure 24 : Objets virtuels : méthode pour fonctionnement de la réalité augmentée.....	23
figure 25 : Objets virtuels : mirascope .....	24
figure 26 : Objets virtuels : schéma des angles de vue .....	25
figure 27 : Annexes – Gradient de température : montage avec l’aquarium rempli d’eau, les plaques chauffantes et le laser .....	31
figure 28 : Annexes – Gradient de température : autre vue du montage de l’expérience avec les glaçons.....	31
figure 29 : Annexes – Gradient de température : réalisation de l’expérience - ajout des glaçons.....	32
figure 30 : Annexes – Gradient de température : photo du montage avec le laser .....	32

figure 31 :	Annexes – Gradient de sel : schéma de l'expérience .....	34
figure 32 :	Annexes – Gradient de sel : tableau donnant la salinité et la densité en fonction de la conductivité à 25°C.....	34
figure 33 :	Annexes – Gradient de sel : tableau liant la conductivité et la salinité .....	35
figure 34 :	Annexes - Gradient de sel : courbe de la salinité en fonction de la conductivité .....	35
figure 35 :	Annexes – Coucher de soleil : photo montrant le matériel nécessaire.....	37
figure 36 :	Annexes – Coucher de soleil : au début de l'expérience, la lumière blanche...37	
figure 37 :	Annexes – Coucher de soleil : sur la gauche, lumière sortante orangée .....	38
figure 38 :	Annexes – Coucher de soleil : schéma du montage pour l'expérience avec le thiosulfate.....	39
figure 39 :	Annexes – Bougies : montage de l'expérience .....	40
figure 40 :	Annexes - Bougies : photo d'une seule bougie allumée .....	40
figure 41 :	Annexes – Strioscopie : montage de la deuxième expérience de strioscopie ..41	
figure 42 :	Annexes – Strioscopie : photo de la deuxième expérience.....	41
figure 43 :	Annexes – Strioscopie : résultat de la deuxième expérience .....	42
figure 44 :	Annexes – Strioscopie : troisième montage.....	42
figure 45 :	Annexes – Strioscopie : résultat de la troisième expérience .....	42
figure 46 :	Annexes – Diffraction de Fraunhofer : schéma de la diffraction.....	43
figure 47 :	Annexes – Diffraction de Fraunhofer : courbe de l'éclairement en fonction de y .....	44
figure 48 :	Annexes – Applications de la strioscopie : mirage IV en soufflerie supersonique .....	45
figure 49 :	Annexes – Applications de la strioscopie : visualisation de champs .....	45
figure 50 :	Annexes – Applications de la strioscopie : montage 1 .....	46
figure 51 :	Annexes – Applications de la strioscopie : montage 2.....	47
figure 52 :	Annexes – Applications de la strioscopie : refroidissement d'un briquet .....	47
figure 53 :	Annexes – Applications de la strioscopie : évaporation de l'éthanol .....	47
figure 54 :	Annexes – Applications de la strioscopie : dissolution de sucre dans de l'eau .....	47
figure 55 :	Annexes – Miroirs du mirascope : schéma du miroir inférieur.....	49
figure 56 :	Annexes – Miroirs du mirascope : courbe représentative du miroir inférieur....	49
figure 57 :	Annexes – Miroirs du mirascope : schéma du miroir supérieur.....	50
figure 58 :	Annexes – Miroirs du mirascope : courbe représentative du miroir supérieur..	50
figure 59 :	Annexes – Miroirs du mirascope : schéma du montage pour calculer le rayon de courbure.....	51
figure 60 :	Annexes – Grandissement : schéma d'un mirascope.....	52
figure 61 :	Annexes – Angles de vue du mirascope : schéma des angles de vue.....	55

## 10 ANNEXES

### 10.1 Gradient de température

#### 10.1.1 Matériel

- ❖ 2 plaques chauffantes
- ❖ 1 aquarium
- ❖ Des planches de bois pour séparer l'aquarium des plaques
- ❖ 1 sonde pour mesurer la température
- ❖ 1 laser
- ❖ Des glaçons
- ❖ Fluorescéine

#### 10.1.2 Protocole

Aligner le laser avec l'aquarium et l'écran.

Positionner un deuxième écran derrière le laser pour empêcher la propagation de la réflexion qui s'effectue sur la paroi de l'aquarium.



figure 27 : Annexes – Gradient de température : montage avec l'aquarium rempli d'eau, les plaques chauffantes et le laser



figure 28 : Annexes – Gradient de température : autre vue du montage de l'expérience avec les glaçons

### **10.1.3 Déroulement de l'expérience**

On réalise une expérience témoin sans chauffe, une fois le montage réalisé. On remarque que le laser traverse l'eau sans être dévié. On chauffe l'aquarium préalablement rempli d'eau. On mesure la différence de température grâce à la sonde. Une fois que la différence est correcte, on ajoute des glaçons délicatement à la surface de l'eau afin d'accentuer le gradient de la température.



*figure 29 : Annexes – Gradient de température : réalisation de l'expérience - ajout des glaçons*

### **10.1.4 Résultats de l'expérience**

Nous avons réalisé l'expérience sans fluorescéine pour voir son déroulement et les difficultés que l'on pouvait rencontrer. Nous nous sommes aperçues que lorsque l'on rajoutait les glaçons, l'expérience en elle-même était très rapide, l'eau chaude a en effet tendance à aller vers le haut, et par conséquent faire fondre rapidement les glaçons. Le laser reprenait donc très vite son état initial.



*figure 30 : Annexes – Gradient de température : photo du montage avec le laser*



## 10.2 Première expérience sur les mirages (Gradient de sel)

### 10.2.1 Matériel

- ❖ Utilisation d'un récipient rectangulaire de longueur 60cm, la hauteur de l'eau mesurée en cm.
- ❖ Laser [663nm - Max Power < 10 mW].
- ❖ H1 représente la hauteur avec laquelle le faisceau du laser frappe la paroi droite du récipient (entrée du laser).
- ❖ H2 représente la hauteur avec laquelle le faisceau du laser frappe la paroi gauche du récipient (sortie du laser).
- ❖ A représente l'angle d'inclinaison du laser.

### 10.2.2 Tableau de résultats

A (°)	0	20	40
H1 (cm)	9	11	11
H2 (cm)	7.5	9.5	7
H1 (cm)	7	9	9
H2 (cm)	2.5	6	0
H1 (cm)	5	7	
H2 (cm)	0	0	

L'expérience a plutôt bien fonctionné, les résultats ont été prélevés après seulement une semaine de pose pour la formation du gradient. Cependant, nous n'avons pas réussi à observer le phénomène de réfraction totale. Ainsi, nous avons rempli un peu plus la cuve d'eau et de sel en espérant qu'alors les conditions permettront d'obtenir une réflexion totale du laser.

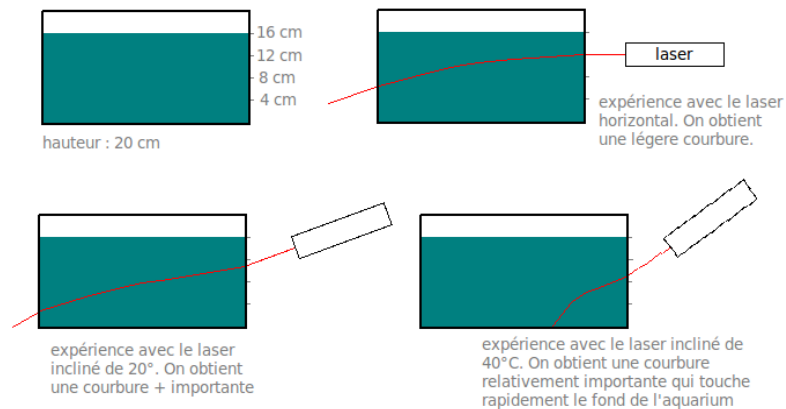


figure 31 : Annexes – Gradient de sel : schéma de l'expérience

### 10.2.3 Mesure de la salinité

Données :

- ❖ Densité
- ❖ Conductivité en mS/cm
- ❖ Température en °C
- ❖ Salinité en g/kg (rapport de masse).
- ❖ Eau à 25°C.

Cs,t,0	S	Densité
46,25	30,0	1019,6
47,62	31,0	1020,3
48,99	32,0	1021,1
50,36	33,0	1021,8
51,71	34,0	1022,6
53,07	35,0	1023,3
54,41	36,0	1024,1
55,75	37,0	1024,9
57,08	38,0	1025,6
58,41	39,0	1026,4
59,73	40,0	1027,1

figure 32 : Annexes – Gradient de sel : tableau donnant la salinité et la densité en fonction de la conductivité à 25°C

Conductivité (mS/cm) à 25°C	Salinité (ppm)
40	25,5
41	26,3
42	26,9
43	27,7
44	28,4
45	29,1
46	29,8
47	30,5
48	31,3
49	32,0
50	32,7
51	33,5
52	34,2
53	34,9
54	35,5
55	36,1

figure 33 : Annexes – Gradient de sel : tableau liant la conductivité et la salinité

Nous avons emprunté au laboratoire de chimie un conductimètre et un capteur de température pour prendre les mesures de salinité et de température dans l'aquarium.

#### 10.2.4 Mesures de conductivité

Distance du fond du bassin (cm)	Conductivité (mS/cm)	Température (°C)
15 - 16	130	19
11 - 12	155	19,1
3 - 4	259	19,4

On remarque que les valeurs sont différentes de celles du tableau de référence, on réalise donc une courbe avec un tableur.

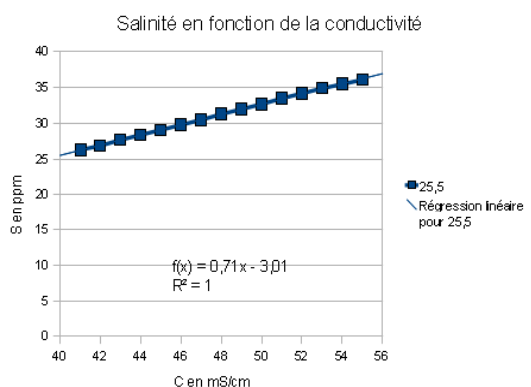


figure 34 : Annexes - Gradient de sel : courbe de la salinité en fonction de la conductivité

Cette courbe est linéaire. Donc, en demandant l'équation, on obtient :

**eq 7.**  $S = 0,71C - 3,01$

On calcule donc la salinité en négligeant la variation de température et on obtient les valeurs suivantes.

Distance du fond du bassin (cm)	Conductivité (mS/cm)	Salinité (g/L)
15 - 16	130	89,29
11 - 12	155	107,04
3 - 4	259	180,88

On remarque que la salinité augmente avec la profondeur : le sel est concentré au fond du bassin.

Ainsi on peut déterminer :

- ❖ la conductivité en fonction de la hauteur :

**eq 8.**  $C(h) = -10,75h + 291,25$

- ❖ la salinité en fonction de la hauteur :

**eq 9.**  $S(h) = -4,24h + 193,6$

On pourra, par conséquent, modéliser l'évolution du gradient salin et donc la densité ainsi que l'indice de réfraction.

### 10.3 Le coucher de soleil

Nous souhaitons trouver l'explication du changement de couleur lors d'un coucher de soleil. Cependant, nous n'en avons pas eu le temps. Cette annexe permettra à nos successeurs d'avoir un début de recherches sur le sujet.

Lors de nos quelques recherches sur ce phénomène, nous avons découvert deux expériences qui permettaient de reproduire le changement de couleur se produisant lors d'un coucher de soleil. Nous avons pu réaliser la plus simple d'entre elle. Par conséquent, nous allons détailler dans cette annexe cette expérience, c'est-à-dire le protocole, la réalisation de l'expérience et enfin les résultats. Pour la seconde expérience, seul le protocole sera détaillé, ainsi que le matériel nécessaire à la réalisation de l'expérience. Certains « ingrédients » ou machines nécessaires à l'expérience ne pourront pas être fournis par le professeur responsable, il faudra donc aller chercher une partie du matériel au département chimie, le prêt de matériel se fait assez facilement.

#### 10.3.1 L'expérience avec le lait

Sur Internet [[www.physiqueludique.fr](http://www.physiqueludique.fr), 16/04/2011], nous avons trouvé une expérience rapide et facile à faire. Le matériel nécessaire est trouvable partout : un verre, de l'eau, quelques gouttes de lait, une lampe torche.

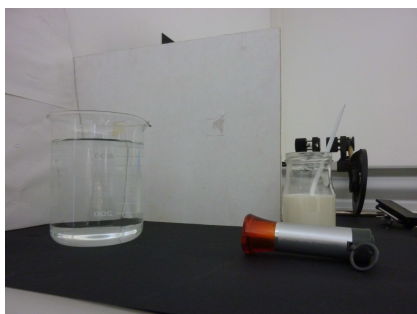


figure 35 : Annexes – Coucher de soleil : photo montrant le matériel nécessaire



figure 36 : Annexes – Coucher de soleil : au début de l'expérience, la lumière blanche



figure 37 : Annexes – Coucher de soleil : sur la gauche, lumière sortante orangée

Les différentes étapes sont :

- ❖ Au début, on éclaire l'eau sans lait, la lumière qui ressort est blanche, dans la réalité cela correspond au moment où le soleil est au zénith.
- ❖ Au fur et à mesure on ajoute du lait, quelques gouttes à la fois (avec une cuillère ou même une fourchette), la couleur de la lumière change, elle se colore.
- ❖ De blanche, la couleur jaunit puis prend une teinte orangée (voir figure 37).

Cette expérience, bien que très simpliste, montre bien le phénomène de coloration lors d'un coucher de soleil. Aucun des groupes ayant travaillé sur ce projet n'a encore expliqué physiquement ce phénomène. Notre expérience permettra peut-être au groupe suivant de débiter cette explication.

### **10.3.2 Expérience avec le thiosulfate**

#### **10.3.2.1 Matériel nécessaire**

- ❖ 100mL de solution de thiosulfate de concentration 20 g/L
- ❖ 1 petit flacon d'acide chlorhydrique de concentration 6 mol/L
- ❖ 1 lampe Quartz Iode
- ❖ 1 aquarium
- ❖ 1 écran blanc pour voir les changements

#### **10.3.2.2 Protocole**

On remplit l'aquarium avec de l'eau et la solution de thiosulfate et on ajoute quelques gouttes à la fois d'acide chlorhydrique. Celui-ci va réagir avec le thiosulfate pour former du soufre, la lumière projetée sur l'écran va changer de couleur petit à petit, jaune puis orangé et enfin rouge avant de devenir opaque suite à l'accumulation des particules de soufre. A noter que le phénomène du coucher de soleil se trouve projeté sur l'écran pour le rendre plus visible.

#### **10.3.2.3 Explication physique**

A l'aide de notre bibliographie, il vous sera possible de retrouver l'explication du changement de couleur lors d'un coucher de soleil. Nous ne détaillerons pas ici ce phénomène, car notre projet arrive à son terme.

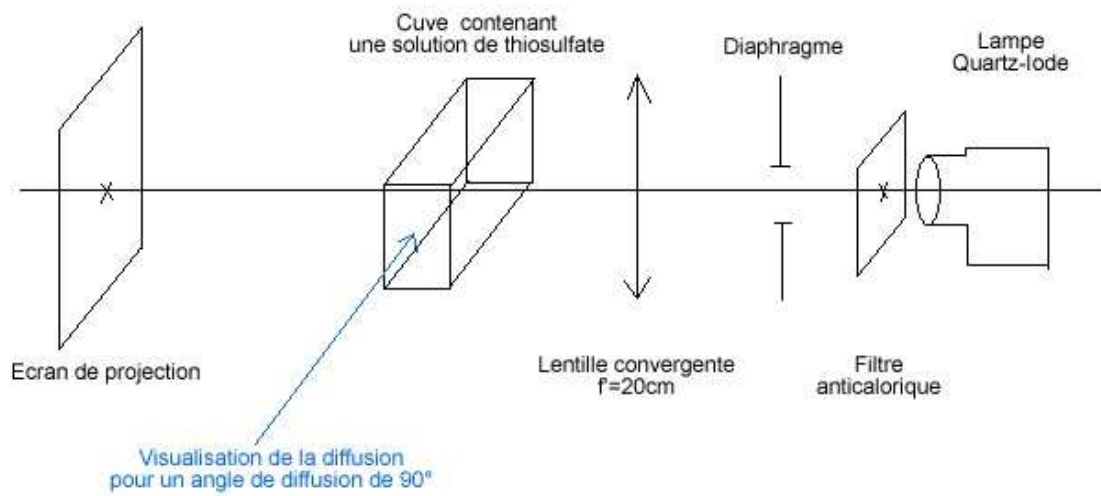


figure 38 : Annexes – Coucher de soleil : schéma du montage pour l'expérience avec le thiosulfate

## 10.4 Expérience avec les bougies

A l'aide d'une lame semi-réfléchissante et de deux bougies, nous avons réalisé une illusion d'optique.

### 10.4.1 Protocole

Placer les bougies de part et d'autre de la lame semi-réfléchissante. Allumer les bougies, se placer pour que la lame semi-réfléchissante soit entre les deux bougies, perpendiculaire à la vue.



figure 39 : Annexes – Bougies : montage de l'expérience

### 10.4.2 Déroulement de l'expérience

Au début les deux bougies sont allumées, on éteint la bougie qui est derrière la lame semi-réfléchissante. La logique veut qu'il ne reste donc plus qu'une bougie allumée. Cependant, en observant à travers la lame semi-réfléchissante, on s'aperçoit que les deux bougies semblent encore allumées.



figure 40 : Annexes - Bougies : photo d'une seule bougie allumée

### 10.4.3 Explication

Bien qu'il ne reste qu'une seule bougie d'allumée, la flamme de celle-ci est reflétée sur la lame par conséquent on a l'impression que les deux bougies sont encore allumées. Si on retire la lame semi-réfléchissante, on voit bien qu'il ne reste qu'une seule bougie allumée.

### 10.4.4 Conclusion

Cette expérience illustre bien le fait, que ce que l'on voit ne représente pas toujours la réalité.



## 10.5 Expériences complémentaires de strioscopie

Nous avons donc réalisé une expérience principale de strioscopie présentée dans le corps du dossier. Voyant que celle-ci fonctionnait, nous nous sommes dit que nous pourrions essayer d'agrandir le faisceau parallèle pour pouvoir mettre des objets plus gros. Pour cela, nous avons utilisé des lentilles divergentes.

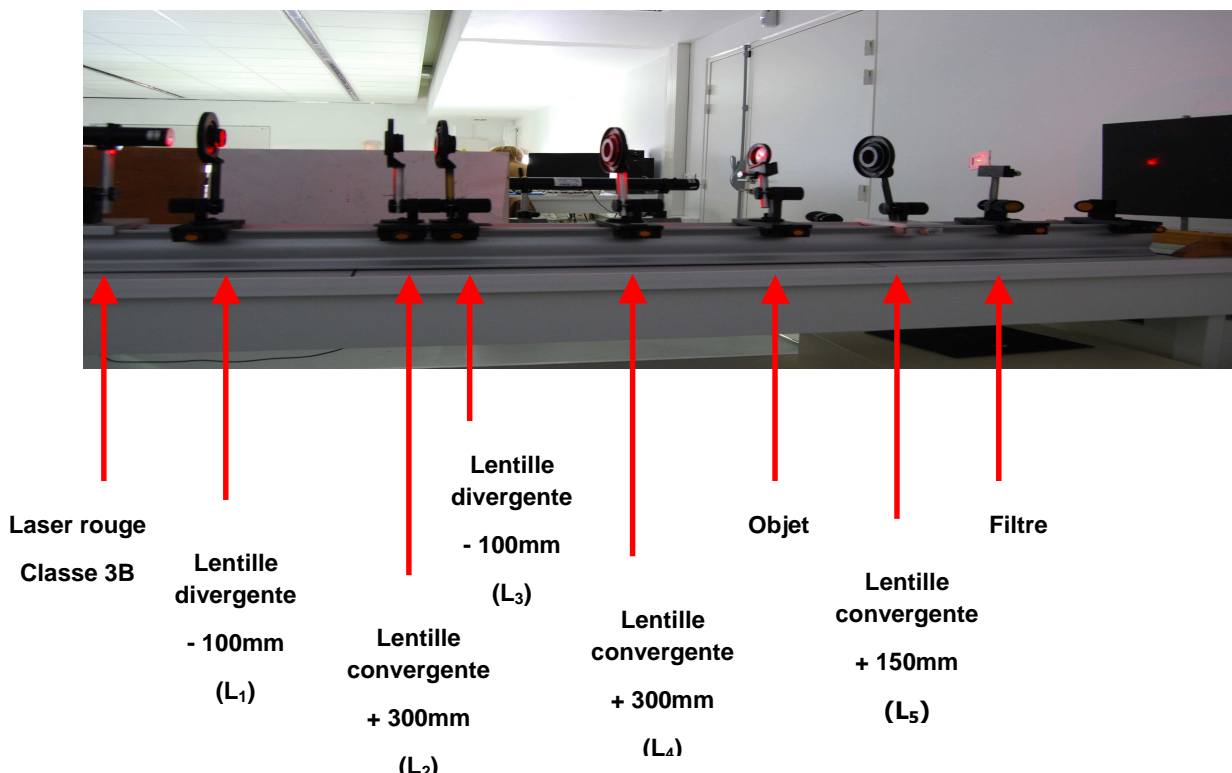


figure 41 : Annexes – Strioscopie : montage de la deuxième expérience de strioscopie



figure 42 : Annexes – Strioscopie : photo de la deuxième expérience

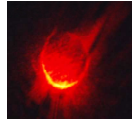


figure 43 : Annexes – Strioscopie : résultat de la deuxième expérience

Les lentilles  $L_1/L_2$  et  $L_3/L_4$  sont deux jeux de lentilles identiques. Elles ont pour but d'élargir le faisceau parallèle. La lentille divergente  $L_1$  crée une image virtuelle du faisceau du laser dans le plan focale image de  $L_1$ . Ce faisceau s'élargit jusqu'à ce qu'il rencontre la lentille  $L_2$ . On obtient donc un faisceau à l'infini plus gros qu'auparavant. Nous estimions que le faisceau n'était pas assez gros. Nous avons donc ajouté une deuxième fois ce jeu de lentilles. Finalement, nous obtenions un faisceau d'une taille convenable. Toutefois, après avoir placé le cache, nous n'avons pas réussi à obtenir le résultat attendu. Comme nous manquions de temps, nous n'avons pas pu finaliser cette expérience.

Avec le peu de temps qu'il nous restait, nous avons donc essayé de changer la couleur du laser pour voir ce que cela donnerait.

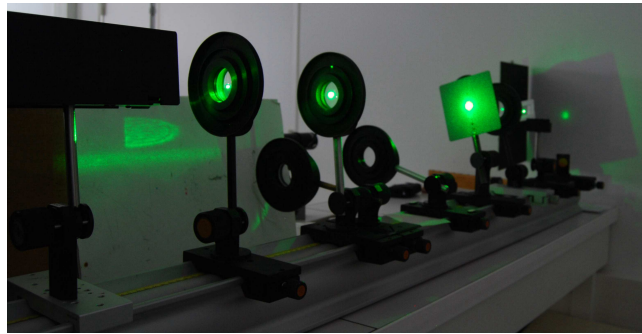


figure 44 : Annexes – Strioscopie : troisième montage

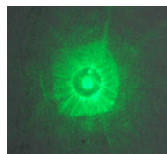


figure 45 : Annexes – Strioscopie : résultat de la troisième expérience

En utilisant le même montage que précédemment, nous avons mis un laser vert (Classe II). Etant donné que le faisceau incident du laser était plus important, nous avons enlevé les lentilles  $L_3$  et  $L_4$ . Le résultat obtenu contenait une tache centrale que nous n'avons réussi à expliquer. Nous n'avons donc pas terminé cette expérience.

## 10.6 Mise en équation de la diffraction de Fraunhofer

Dans le cas de la strioscopie, nous avons vu qu'il s'agissait d'une diffraction de Fraunhofer. Les rayons incidents sont donc tous parallèles. Ainsi, on peut les assimiler à une onde plane monochromatique. [David Honoré, cours « Physical optics » - STPI2 – INSA de Rouen, 2008]

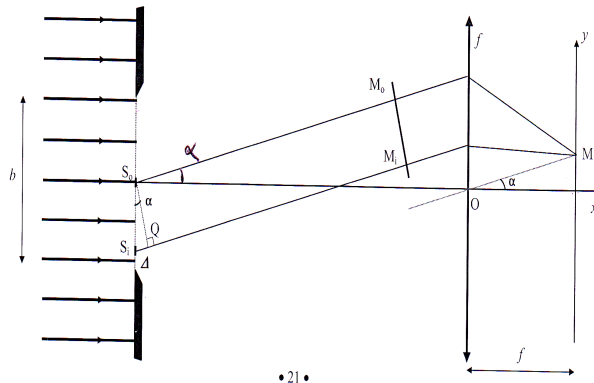


figure 46 : Annexes – Diffraction de Fraunhofer : schéma de la diffraction

Considérons ici une fente de longueur  $b$ . Chaque partie infinitésimale  $S_i$  de cette ouverture est porteuse d'une onde possédant un champ électrique élémentaire  $\underline{dE}_i$ .

Tout d'abord, considérons le centre de l'ouverture  $S_0$ . Son champ électrique est donc :

**eq 10.** 
$$\underline{dE}_0(S_0) = A_s \cdot ds \cdot \exp(j(\omega t - \varphi_0)) \cdot \vec{z}_0$$

avec  $A_s$  : amplitude par unité de longueur

$ds$  : la longueur infinitésimale

$\varphi_0$  : la phase initiale de l'onde incidente.

Donc, après une distance  $d$  ( $=S_0M_0$ ), on obtient le champ suivant :

**eq 11.** 
$$\underline{dE}_0(M_0) = A_s \cdot ds \cdot \exp(j(\omega t - \varphi_0 - 2\pi/\lambda d)) \cdot \vec{z}_0$$

Maintenant, considérons un point quelconque de l'ouverture  $S_i$ . On sait que  $QM_i=S_0M_0$  et  $\Delta=S_iQ$ . On obtient donc :

**eq 12.** 
$$\underline{dE}_i(M_i) = A_s \cdot ds \cdot \exp(j(\omega t - \varphi_0 - 2\pi/\lambda (d + \Delta))) \cdot \vec{z}_0$$

Avec la lentille convergente, on fait converger tous ces champs électriques infinitésimaux sur un même point. On peut donc calculer le champ électrique total au point M.

eq 13. 
$$\underline{\underline{\vec{E}}}(M) = \int d\underline{\underline{\vec{E}}}_i(M_i)$$

En intégrant entre  $-b/2$  et  $+b/2$  et en remplaçant  $\Delta$  par  $s \cdot \sin(\alpha)$ , on obtient finalement :

eq 14. 
$$\underline{\underline{\vec{E}}}(M) = A_s \cdot \exp(j(\omega t - \varphi_0 - 2\pi/\lambda d)) \cdot \frac{\sin(\pi b/\lambda \cdot \sin \alpha)}{\pi/\lambda \cdot \sin \alpha} \cdot \underline{\underline{\vec{z}}}_0$$

L'éclairement au point M est définie comme :

eq 15. 
$$I(M) = \frac{a_e}{2} \underline{\underline{\vec{E}}}(M) \cdot \underline{\underline{\vec{E}}}(M)^*$$

On obtient donc, après calcul avec l'approximation que  $\alpha$  est petit :

eq 16. 
$$I(M) = \frac{a_e}{2} \cdot A_s^2 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{\pi b y}{\lambda f}\right)}{\left(\frac{\pi y}{\lambda f}\right)^2}$$

Comme  $I_0 = \frac{a_e}{2} \cdot A_s^2 \cdot b^2$ , on obtient donc :

eq 17. 
$$I(M) = I_0 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{\pi b y}{\lambda f}\right)}{\left(\frac{\pi b y}{\lambda f}\right)^2}$$

La distance entre deux franges sombres est  $y_d = \frac{\lambda f}{b} \cdot m$ , avec m entier. Ainsi, quand on trace la courbe de I(M) en fonction de y, on obtient la courbe suivante.

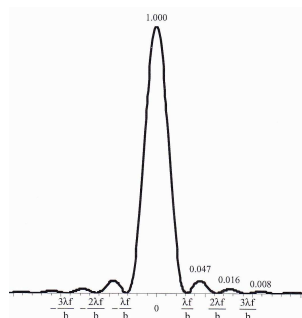


figure 47 : Annexes – Diffraction de Fraunhofer : courbe de l'éclairement en fonction de y

## 10.7 Applications de la strioscopie

La strioscopie comporte de nombreuses applications tant physiques que pratiques. En effet, cette méthode optique permet de visualiser des faibles variations de densité, des ondes de choc ou encore des parties isolées d'une image en enlevant tous les rayons superflus. C'est pourquoi, elle est très utilisée en aéronautique par exemple. Elle permet également d'expliquer et de visualiser de nombreux phénomènes physiques faisant intervenir des flux. Pour finir, certaines personnes assimilent la strioscopie à une rencontre entre l'art et la science. Nous allons maintenant détailler ces applications.

### 10.7.1 Aéronautique

En aéronautique, la strioscopie est une technique de visualisation optique qui permet d'étudier les variations d'indices de réfraction lors de la compression des fluides. Elle est particulièrement utile lors des essais en soufflerie.

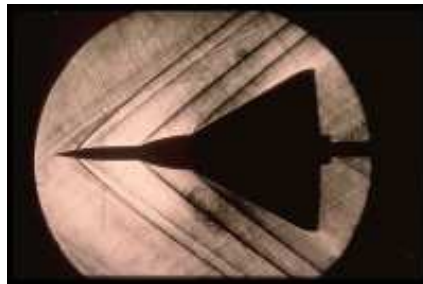


figure 48 : Annexes – Applications de la strioscopie : mirage IV en soufflerie supersonique

Plus précisément, la strioscopie permet d'analyser les écoulements de fluides compressibles à grande vitesse (du transsonique à l'hyperphonique) grâce au principe de l'effet mirage. Lors des expériences en soufflerie ou dans des tunnels de tir, une image est créée par la déviation des rayons lumineux produite par les fortes variations de masse volumique et donc du gradient de densité présent dans le champ observé. Ces variations sont aussi liées à celles de la température et de la pression. Un dispositif optique adapté (comme un appareil photo ou une caméra) permet de ne recueillir que les faisceaux déviés. Il en résulte une mise en évidence d'ondes de choc, de sillages, des zones limites et de la dérivée d'ordre 1 de l'indice de réfraction.

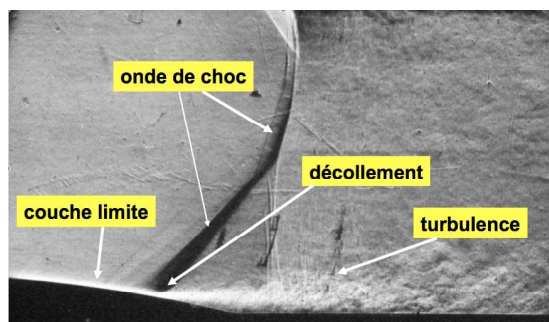


figure 49 : Annexes – Applications de la strioscopie : visualisation de champs

Plus concrètement, la strioscopie a par ailleurs permis de montrer les brusques variations de densité du fuselage d'un avion. Sur un avion de chasse, cette méthode optique a permis de mieux caractériser le mur du son à partir des conditions de vols (altitude, vitesse) et des conditions météo (vents, pression) et ainsi d'améliorer la forme du nez, des ailes et des empennages au passage de cette perturbation.

Cependant, il existe d'autres méthodes permettant d'étudier de telles variations. Par exemple, si au contraire on travaille sur le faisceau entier, on parle alors d'ombroscopie (on garde même les rayons non déviés par le gradient de densité de l'écoulement). L'interférométrie est également utilisée. Cependant, cette méthode est plus lourde à mettre en œuvre que la strioscopie.

Toutefois, bien que la strioscopie ait permis de grandes avancées en aéronautique au cours des décennies précédentes, elle est de moins en moins utilisée à cause des progrès de l'informatique. Il est également intéressant de remarquer que des applications en pollution marine et en médecine suivant les mêmes principes que ceux utilisés en aéronautique existent. Nous allons à présent étudier le rapport entre la strioscopie et les expériences scientifiques.

### 10.7.2 Expériences scientifiques

La strioscopie permet de visualiser et d'expliquer de nombreux phénomènes physiques, comme par exemple les mouvements de l'air autour d'une balle de tennis, les troubles d'air au dessus des radiateurs, la mise en valeur de la chaleur d'une flamme, les frontières dans un écoulement à densité variable ou la mise en relief d'empreintes dans du verre.

Pour réaliser ces expériences, deux montages sont assez souvent utilisés. Ils fonctionnent avec des lentilles et des miroirs comme moyen de conjugaison. Le montage le plus simple n'est formé que d'un miroir sphérique (voir le montage 1 plus bas), tandis que l'autre, également appelé montage en « Z », utilise deux miroirs (montage 2 ci-dessous).

Dans les deux cas, le principe repose sur le corrélateur optique (créé en conjuguant une source de lumière blanche et un filtre coupe-bande optique) et le filtrage de Fourier optique.

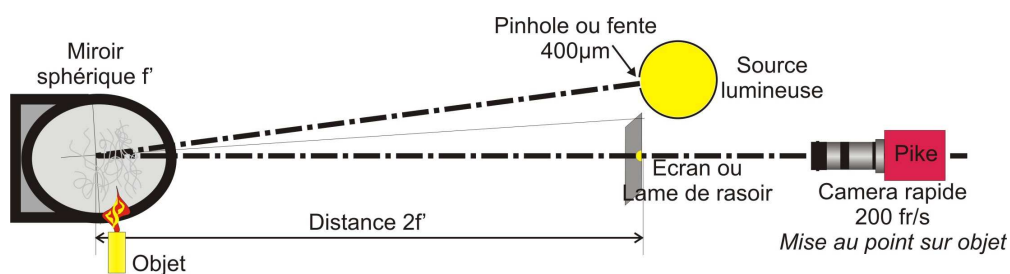


figure 50 : Annexes – Applications de la strioscopie : montage 1

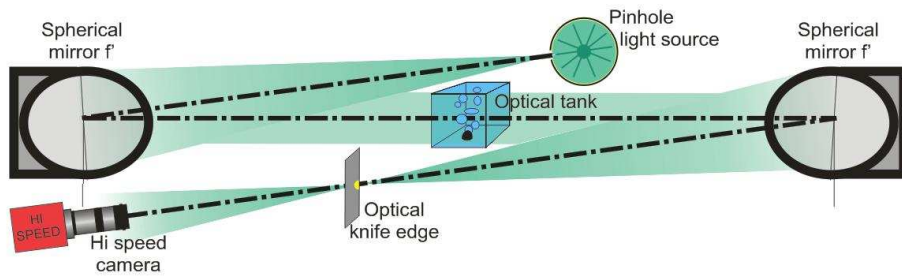


figure 51 : Annexes – Applications de la strioscopie : montage 2

Le montage 1 est utilisé pour différentes applications.

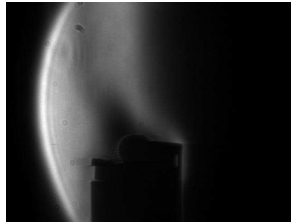


figure 52 : Annexes – Applications de la strioscopie : refroidissement d'un briquet

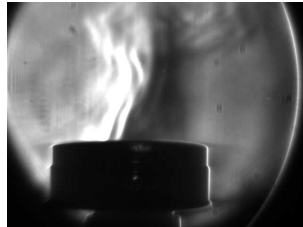


figure 53 : Annexes – Applications de la strioscopie : évaporation de l'éthanol

Le montage 2 est utilisé pour montrer la dissolution des grains de sucres dans de l'eau par exemple.



figure 54 : Annexes – Applications de la strioscopie : dissolution de sucre dans de l'eau

Sur ces photos, on observe que la strioscopie offre une grande dynamique des niveaux de gris lors de la capture de l'image. Nous allons à présent voir le rapport entre la strioscopie et l'art.

### **10.7.3 Strioscopie et art**

Le fait que la strioscopie rende visible ce qui nous est invisible comme la respiration d'un animal ou la chaleur d'une flamme, elle a permis à certaines personnes d'imaginer une rencontre entre l'art et la science.

De nombreuses photographies artistiques mettant en œuvre la strioscopie existent. Dans la même idée, le musicien Gerald Resch a essayé de mettre en musique ces clichés d'art. Sur le résultat final, bien que l'ensemble soit plutôt attrayant (grâce aux rythmes inégaux, à la fusion du violon dans la masse etc), il reste difficile d'identifier les variations mises en musique.

Cependant, de nombreux scientifiques comme le Dr Gary Settles considèrent ce principe comme une innovation strictement scientifique, qui permet encore, de nos jours, à la science de progresser : « Nous avons pu apprendre beaucoup de choses en suivant le flux : comment les ondes de choc se forment autour d'une balle, l'air chaud qui se dégage et s'élève lorsqu'on tousse, et ainsi de suite. »

Pour l'histoire, le Dr Gary Settles utilisa la strioscopie à la fin des années 1990 pour détecter la présence d'explosif aux portiques de sécurité des aéroports aux États Unis.

On a donc vu que la strioscopie, bien que de moins en moins utilisée, avait permis de réaliser de grandes avancées en aéronautique et en médecine. De plus, elle a permis d'expliquer de nombreux phénomènes physiques faisant intervenir des flux. Des expériences scientifiques didactiques assez spectaculaires, qui parfois peuvent même être assimilées à de l'art, ont également découlé de ce principe.



## 10.8 Mesures et calculs sur les miroirs d'un mirascope

### 10.8.1 Calculs des dimensions du miroir inférieur

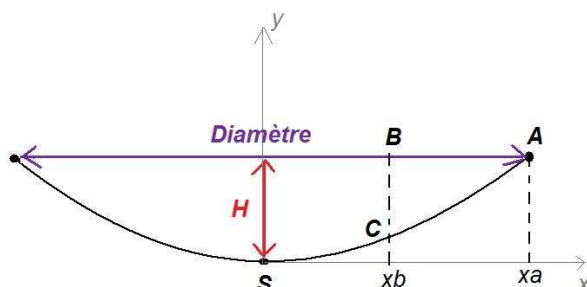


figure 55 : Annexes – Miroirs du mirascope : schéma du miroir inférieur

En mesurant manuellement, nous avons trouvé :

- ❖ Diamètre : 14 cm
- ❖ Hauteur :  $H = 2,8$  cm
- ❖  $[BC] = 2$  cm
- ❖ Sommet : S

Pour trouver l'équation du miroir, nous avons utilisé quelques points en plus (voir figure 56). Nous avons alors :

$$x_a = 7 \text{ cm} ; y_a = 2,8 \text{ cm} ; x_b = 3,5 \text{ cm} ; y_b = H - 2 = 0,8 \text{ cm}$$

L'équation est une parabole que nous savons de la forme  $y = ax^2$ . Pour avoir une valeur la plus exacte possible du coefficient  $a$  nous avons donc fait :

$$2,8 = a(7)^2 \rightarrow a = 0,0571$$

$$0,8 = a(3,5)^2 \rightarrow a = 0,0653$$

En faisant la moyenne, on obtient :  $a = 0,0612$

La fonction du miroir inférieur est donc  $y = 0,0612x^2$  et voici sa courbe :

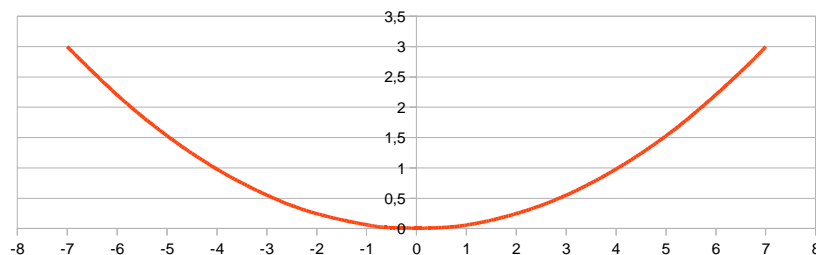


figure 56 : Annexes – Miroirs du mirascope : courbe représentative du miroir inférieur

## 10.8.2 Calculs des dimensions du miroir supérieur

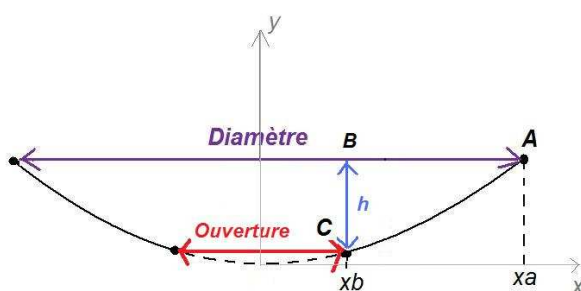


figure 57 : Annexes – Miroirs du mirascope : schéma du miroir supérieur

De la même façon, nous avons trouvé en mesurant manuellement :

- ❖ Diamètre : 14 cm
- ❖ Hauteur :  $h = 2,2$  cm
- ❖ Ouverture : 4,1 cm
- ❖ L'écart entre l'axe des abscisses et le point C :  $\delta = 1$  mm (calculé en prolongeant le miroir)

Pour trouver l'équation du miroir, nous avons utilisé quelques points en plus (voir figure 58). En prenant la même hypothèse que pour le miroir inférieur ( $y = ax^2$ ), les valeurs du coefficient  $a$ , en prenant deux points, étaient trop éloignées. Donc, on a décidé de changer l'hypothèse de façon à avoir quelque chose de plus précis :  $y = ax^2 + bx$ . Nous avons donc utilisé :

$$x_a = 7 \text{ cm} ; y_a = 2,3 \text{ cm} ; x_b = x_c = 2,05 \text{ cm} ; y_c = 0,1 \text{ cm}$$

On obtient donc :

$$\text{eq 18.} \quad \begin{cases} 2,3 = a(7)^2 + b(7) \\ 0,1 = a(2,05)^2 + \frac{2,3 + a(7)^2}{7} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = 0,0817 \\ b = -0,2433 \end{cases}$$

La fonction du miroir supérieur est donc  $y = 0,01817x^2 - 0,2433x$  et voici sa courbe :

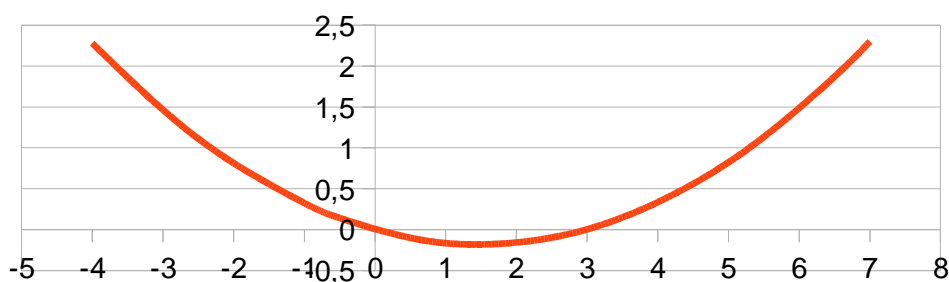


figure 58 : Annexes – Miroirs du mirascope : courbe représentative du miroir supérieur

### 10.8.3 Calculs des rayons de courbure

Nous avons utilisé un banc optique sur lequel nous avons placé le miroir que l'on veut mesurer, une mire à moitié cachée et une source lumineuse. De cette façon, lorsque l'image de la mire est au même endroit que la mire objet, nous obtenons la distance SC des miroirs.

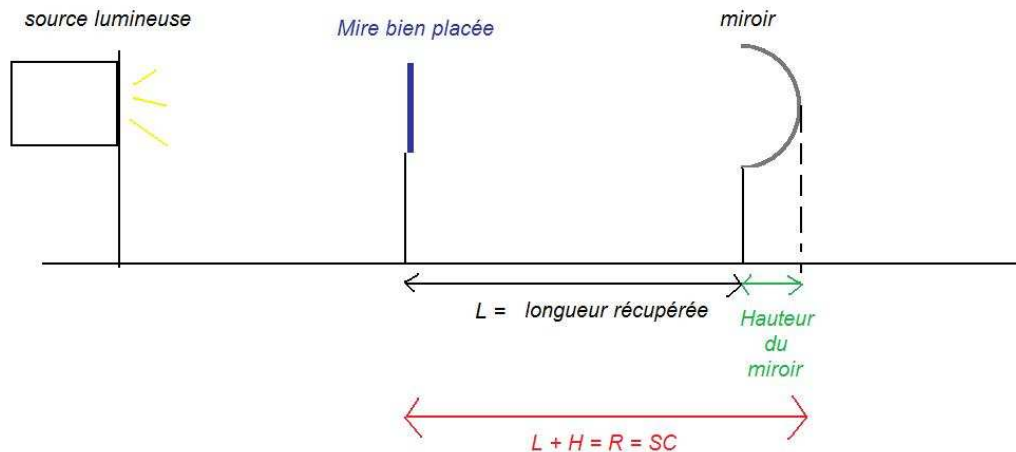


figure 59 : Annexes – Miroirs du mirascope : schéma du montage pour calculer le rayon de courbure

De cette façon, on trouve :

- ❖ pour le miroir du bas :  $L_b = 6\text{cm} \rightarrow R_b = 6 + 2,8 = 8,8\text{cm}$
- ❖ pour le miroir du haut :  $L_h = 8,2\text{cm} \rightarrow R_h = 8,2 + 2,3 = 10,5\text{cm}$

#### Remarque :

En effectuant les mesures pour le miroir supérieur, nous avons remarqué l'apparition d'une deuxième image nette de la mire au même endroit. Nous en avons donc déduit que le miroir n'avait pas partout le même rayon de courbure, mais que certaines portions du miroir étaient plus « inclinées » que le reste. En effet, lorsque nous avons recouvert la partie de droite et la partie de gauche du miroir, une des deux images disparaissait. Après l'avoir tourné de  $90^\circ$ , le même phénomène s'est produit lorsque nous avons caché les parties supérieures et inférieures. Nous en avons donc déduit qu'il s'agissait probablement d'une déformation d'usinage, par exemple lors du perçage du miroir. Pour la suite de notre étude, nous n'avons pas tenu compte de cette observation.

## 10.9 Calcul des grandissements

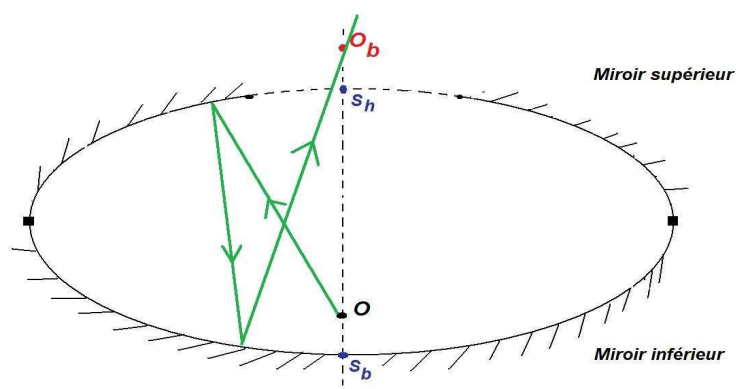


figure 60 : Annexes – Grandissement : schéma d'un mirascope

Avec :

- ❖  $S_h$  : le sommet du miroir du haut.
- ❖  $O$  : un point objet.
- ❖  $S_b$  : le sommet du miroir du bas.
- ❖  $O_b$  : le point image de  $O$  par l'assemblage des deux miroirs.
- ❖ En vert le chemin d'un rayon lumineux quelconque. ———

On sait que :

$$\text{eq 19.} \quad \gamma_{\text{mirascope}} = \gamma_{\text{haut}} * \gamma_{\text{bas}}$$

$$\text{eq 20.} \quad \gamma_{\text{bas}} = -\frac{\overline{S_b O_b}}{\overline{S_b O'}} \quad \text{et} \quad \gamma_{\text{haut}} = -\frac{\overline{S_h O'}}{\overline{S_h O}}$$

Il nous reste donc à déterminer  $\overline{S_b O_b}$ ,  $\overline{S_b O'}$  et  $\overline{S_h O'}$  en fonction de valeurs connues comme  $\overline{S_h S_b}$ ,  $\overline{S_b O}$  et  $\overline{S_h O}$ . Nous utilisons donc les relations de conjugaisons pour les miroirs sphériques.

Pour le miroir supérieur :

$$\text{eq 21.} \quad \frac{1}{\overline{S_h O'}} + \frac{1}{\overline{S_h O}} = \frac{2}{\overline{S_h C_h}} = \frac{2}{R_h} \rightarrow \boxed{\overline{S_h O'} = \frac{R_h \cdot \overline{S_h O}}{2 \cdot \overline{S_h O} - R_h}}$$

Pour le miroir inférieur :

$$\text{eq 22.} \quad \frac{1}{\overline{S_b O_b}} + \frac{1}{\overline{S_b O'}} = \frac{2}{\overline{S_b C_b}} = \frac{2}{R_b} \rightarrow \overline{S_b O_b} = \frac{R_b \cdot \overline{S_b O'}}{2 \cdot \overline{S_b O'} - R_b}$$

On cherche alors  $\overline{S_b O'}$  :

$$\text{eq 23.} \quad \overline{S_b O'} = \overline{S_b S_h} + \overline{S_h O'}$$

D'où,

$$\text{eq 24.} \quad \overline{S_b O'} = \overline{S_b S_h} + \frac{\overline{R_h \cdot S_h O}}{2 \cdot \overline{S_h O} - \overline{R_h}}$$

On peut alors déterminer  $\overline{S_b O_b}$  en remplaçant :

$$\text{eq 25.} \quad \overline{S_b O_b} = \frac{\overline{R_b} \cdot \left( \overline{S_b S_h} + \frac{\overline{R_h \cdot S_h O}}{2 \cdot \overline{S_h O} - \overline{R_h}} \right)}{2 \cdot \left( \overline{S_b S_h} + \frac{\overline{R_h \cdot S_h O}}{2 \cdot \overline{S_h O} - \overline{R_h}} \right) - \overline{R_b}}$$

On peut aussi l'exprimer en fonction de  $\overline{S_b O}$  parce que :  $\overline{S_h O} = \overline{S_h S_b} + \overline{S_b O}$

Cela donne :

$$\text{eq 26.} \quad \overline{S_b O_b} = \frac{\overline{R_b} \cdot \left( \overline{S_b S_h} + \frac{\overline{R_h \cdot (\overline{S_h S_b} + \overline{S_b O})}}{2 \cdot (\overline{S_h S_b} + \overline{S_b O}) - \overline{R_h}} \right)}{2 \cdot \left( \overline{S_b S_h} + \frac{\overline{R_h \cdot (\overline{S_h S_b} + \overline{S_b O})}}{2 \cdot (\overline{S_h S_b} + \overline{S_b O}) - \overline{R_h}} \right) - \overline{R_b}}$$

Grâce à ces résultats on trouve :

$$\text{eq 27.} \quad \gamma_{haut} = - \frac{\overline{R_h \cdot S_h O}}{\left( \frac{2 \cdot \overline{S_h O} - \overline{R_h}}{\overline{S_h O}} \right)}$$

**eq 28.**

$$\gamma_{bas} = - \frac{R_b \cdot \left( \overline{S_b S_h} + \frac{R_h \cdot (\overline{S_h S_b} + \overline{S_b O})}{2 \cdot (\overline{S_h S_b} + \overline{S_b O}) - R_h} \right)}{2 \cdot \left( \overline{S_b S_h} + \frac{R_h \cdot (\overline{S_h S_b} + \overline{S_b O})}{2 \cdot (\overline{S_h S_b} + \overline{S_b O}) - R_h} \right) - R_b}$$

$$\overline{S_b S_h} + \frac{R_h \cdot \overline{S_h O}}{2 \cdot \overline{S_h O} - R_h}$$

Il nous est maintenant possible de faire une application numérique afin de déterminer le grandissement du microscope. On a décidé de la faire en utilisant un objet d'une hauteur de 1 cm.

Nous avons alors :

- ❖  $\overline{S_b O} = +1cm$
- ❖  $\overline{S_h O} = H + h = 2,8 + 2,3 - 1 = -4,1cm$
- ❖  $\overline{S_b S_h} = +5,1cm$
- ❖  $\overline{S_h S_b} = -5,1cm$
- ❖  $R_b = 8,8cm$
- ❖  $R_h = -10,5cm$

On obtient donc :

**eq 29.**  $\gamma_{haut} = 4,565$  et  $\gamma_{bas} = -0,226$

**eq 30.**  $\gamma_{microscope} = 4,565 * (-0,226) = -1,03$

## 10.10 Etude des angles de vue du mirascope

Pour déterminer l'angle de vue limite de l'objet, il faut étudier le chemin des rayons limites pour voir l'image. Pour tracer les chemins de ces rayons, il faut partir des extrémités de l'image finale dont on connaît les dimensions grâce aux calculs. Pour expliquer, prenons appui sur l'exemple de la boule de 1 cm de diamètre. Pour tracer les rayons pour le point G'' :

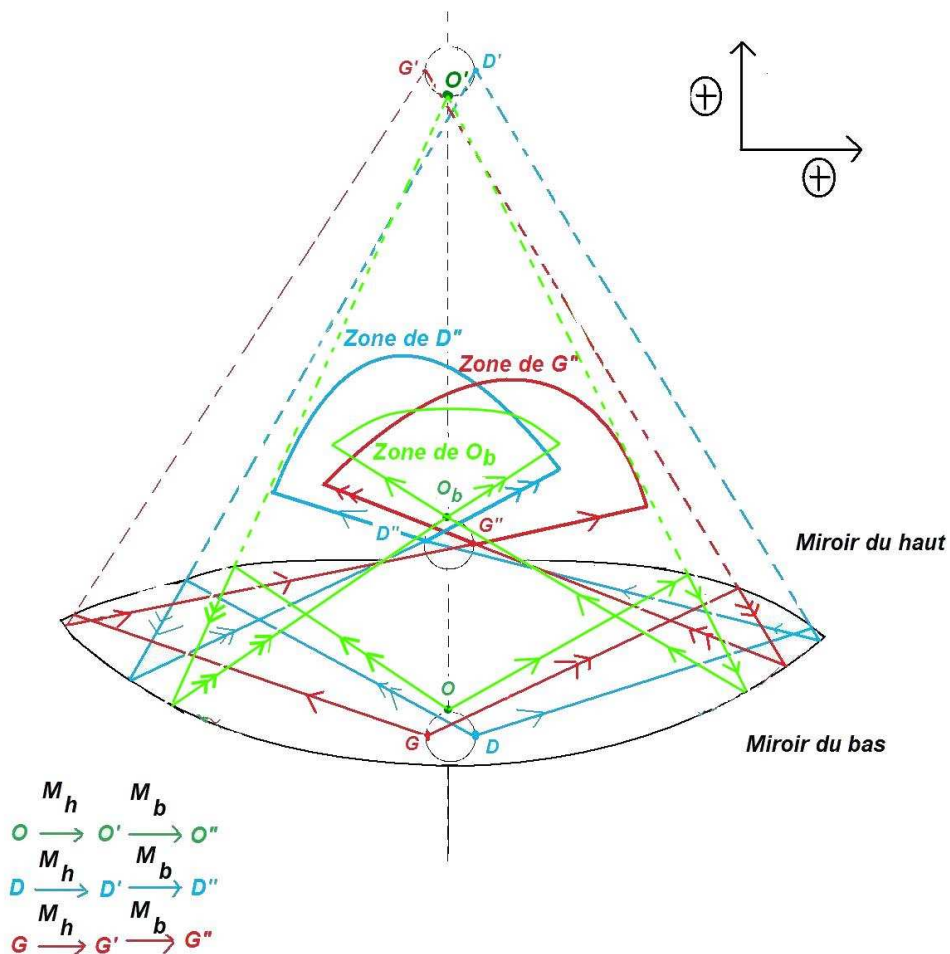


figure 61 : Annexes – Angles de vue du mirascope : schéma des angles de vue

- 1) On commence par tracer la droite partant de G'' et passant par une des deux extrémités de l'ouverture. On arrête la droite lorsqu'elle touche le miroir du bas.
- 2) Puis, pour savoir comment repart le rayon à partir de là, il faut réfléchir à l'envers. C'est-à-dire, il faut se demander G'' est l'image de quel objet et par quel miroir. Ici, G'' est l'image de G' par le miroir du bas. Donc on trace la droite passant par G' et l'intersection du rayon avec le miroir du bas, en prolongeant celle-ci, on obtient la suite du rayon.

- 3) En réfléchissant de la même manière. G' est l'image de G. On trace la droite passant l'intersection du rayon avec le miroir du haut et G, en s'arrêtant au point G car ce rayon provient de G. Le chemin du rayon est maintenant entièrement tracé.
- 4) On répète les étapes précédentes en prenant l'autre extrémité de l'ouverture dans l'étape 1.
- 5) Les rayons limites pour voir le point G'' sont tracés. L'écart entre les deux rayons sortant est la zone de visibilité du point.

On procède de la même façon pour trouver ceux des point O<sub>b</sub> et D''.

Pour réaliser tout ceci, il faut bien sûr avoir préalablement calculer la position de O', G', D' et O<sub>b</sub>, G'', D''. Ici : Les valeurs sont :

$$\text{eq 31.} \quad \overline{S_b O'} = 5,1 + \frac{-10,5 * (-4,1)}{2 * (-4,1) - (-10,5)} = 23,817 \text{cm} \quad \text{pour la position de O'}$$

$$\text{eq 32.} \quad \overline{S_b O_b} = \frac{8,8 * \left( 5,1 + \frac{-10,5 * (-4,1)}{2 * (-4,1) - (-10,5)} \right)}{2 * \left( 5,1 + \frac{-10,5 * (-4,1)}{2 * (-4,1) - (-10,5)} \right) - 8,8} = 5,3970 \text{cm} \quad \text{pour O}_b$$

Pour la position de G' et D', on trouve la position du centre de la boule C'.

$$\text{eq 33.} \quad \overline{O' C'} = \gamma_{\text{haut}} \cdot \overline{OC} = 4,565 * (-0,5) = -2,28 \text{cm}$$

$$\text{eq 34.} \quad \overline{C' G'} = \gamma_{\text{haut}} \cdot \overline{CG} = 4,565 * (-0,5) = -2,28 \text{cm}$$

Logiquement, nous avons aussi  $\overline{C' D'} = 2,28 \text{cm}$

Puis facilement, on retrouve les valeurs de G'' et D'' avec le grandissement total du mirascope (pratiquement identiques à celle de G et D).

Toutes ces valeurs suffisent pour dessiner l'image intermédiaire. Par la suite, on peut tracer les rayons.

#### Remarque :

La seule valeur qui paraisse anormale est la valeur de  $\overline{S_b O_b}$ , le reste semble concorder. En effet, la valeur obtenue pour  $\overline{S_b O_b}$  voudrait dire que l'image finale est vraiment enfoncée dans le système. Lorsqu'on observe le mirascope, on voit ce phénomène, mais pas aussi accentué. C'est une notion à vérifier.



## 10.11 Propositions de sujets de projets

Au cours de notre projet, nous avons effectué des expériences dans différents domaines. Toutefois, généralement, nous n'avons pas pu pousser jusqu'au bout la réflexion et les expériences nécessaires pour comprendre complètement le phénomène. Ainsi, un sujet que nous vous conseillons pour l'année prochaine serait la suite de celui-ci : Illusions d'optique : Expériences et analyse. Les domaines traités pourraient être :

- Les illusions papier : Il en existe encore certaines qui n'ont pas été traitées sur les deux années.
- Le coucher de soleil : Une expérience a été réalisée cette année, avec une brève explication mais le phénomène n'a pas été étudié plus que ça.
- La strioscopie : Une seule expérience a fonctionné correctement. Donc, avec les explications fournies, il pourrait être intéressant d'essayer d'en faire d'autres, y compris peut-être une visualisant les variations d'indice dans un fluide.
- La réalité augmentée : Cette année, l'expérience a échoué mais cela n'est pas infaisable. Il pourrait donc être instructif d'en réaliser une pour mieux comprendre ce phénomène.
- La biréfringence et la polarisation : C'est un sujet qui nous a été proposé mais que nous n'avons pas eu le temps de traiter.