# Mais où est donc le petit côté ?

**Un film de Xavier Caruso et Jos Leys**

## Scène 1 : La description des phénomènes

• Il est dit, dans le commentaire, que les trois phénomènes sont « très classiques », mais il n'est en fait pas si facile de trouver des références pour ce qui concerne la piscine... ni d'ailleurs de l'observer : les piscines que l'on côtoie habituellement ont souvent des dénivelés. On me fait savoir que l'effet d'optique se voit aussi très bien avec un aquarium si on consent à placer son œil très près du bord. Cela fonctionne bien sûr d'autant mieux avec des grands aquariums comme celui de Talmont en Vendée : la déformation se voit alors de très loin et est, me dit-on, vraiment spectaculaire.

• Notez que la paille ne fait pas que se casser : lorsque le verre est plein, on voit nettement qu'elle apparaît un peu incurvée en bas. Ce phénomène est à rapprocher de celui que l'on observe avec la piscine (voir image ci-contre).

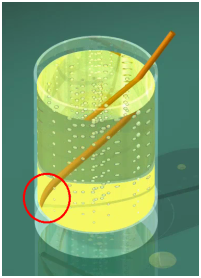


Fig. 1 — Déformation de la paille

• Pouvez-vous estimer le volume de la piscine, et la vitesse à laquelle elle se vide ? D'après vous, combien de temps faut-il en vrai pour remplir et vider une piscine de cette taille ?

• Lorsque la piscine est vide, la ligne rouge paraît effectivement bien droite mais, si l'on mesure les distances sur l'image, la distance paraît encore plus grande à droite qu'à gauche. Comprenez bien que ceci est juste un effet de perspective (les objets plus loin sont vus plus petits) qui n'a pas de rapport avec la réfraction de la lumière (et pour cause, il n'y a plus d'eau !).

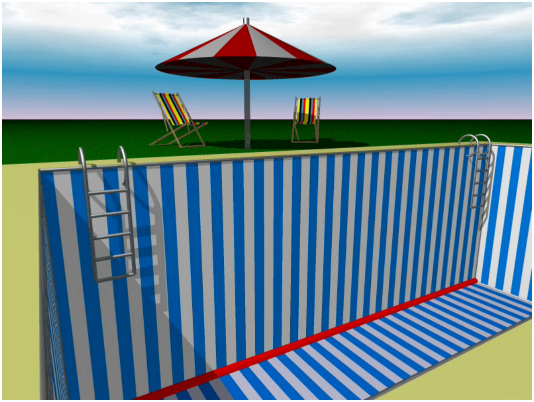


Fig. 2 — La piscine vide

## Scène 2 : Le fonctionnement de l'œil

• « *Très sommairement, voici comment cela fonctionne. [...]* » Effectivement, l'explication est très sommaire ! En réalité, la lumière blanche n'existe pas en temps que tel, mais est une superposition de plein de lumières de toutes les couleurs[1]. Outre la couleur, ces lumières se distinguent par une grandeur physique appelée la longueur d'onde. Le graphe ci-après donne

[1]On peut voir ces couleurs par exemple dans un arc-en-ciel où encore le phénomène de réfraction fait que la lumière est déviée lorsqu'elle traverse une gouttelette d'eau, l'amplitude de cette déviation dépendant de surcroît de la couleur du rayon.

le spectre de la lumière du Soleil, c'est-à-dire la puissance par unité de surface (la quantité si l'on veut) de chaque longueur d'onde. Les couleurs correspondant aux longueurs d'onde sont représentées sur la figure. Les zones non colorées correspondent à des rayons qui ne sont pas visibles par l'œil.

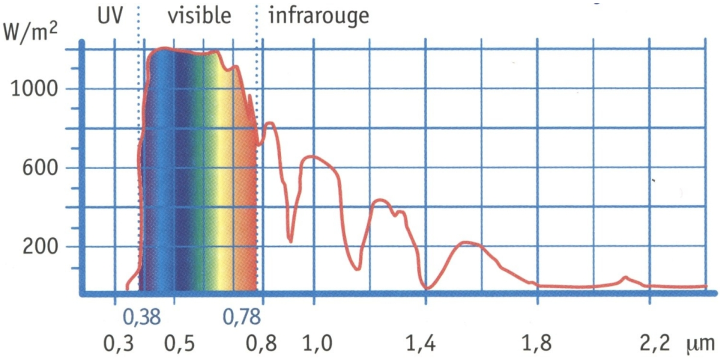



Fig. 3 — Spectre de la lumière du Soleil

Lorsqu'un rayon de lumière frappe un objet coloré, ce dernier absorbe certaines longueurs d'onde (et pas d'autres !). Le spectre de la lumière renvoyée — et donc sa couleur — est ainsi modifié.
À noter également que la lumière noire n'existe pas en tant que telle. Lorsque l'on voit noir, c'est justement qu'il n'y a aucune lumière ! Le film montre à un moment un rayon réfléchi noir, ce qui ne correspond pas à

la réalité. En fait, si un rayon émis par la lampe frappe un point noir du tableau, il est complètement absorbé et aucune lumière n'est réémise. Au final, on va donc bien un point noir.

Un exercice intéressant consiste à expliquer ce qui se passe (dans les grandes lignes) lorsqu'un objet est éclairé par une lumière qui n'est pas blanche. En particulier, on pourra se demander s'il peut-être vu d'une couleur qui a priori n'est pas la sienne. Par exemple, que voit-on si on éclaire un papier blanc avec une lumière rouge ?

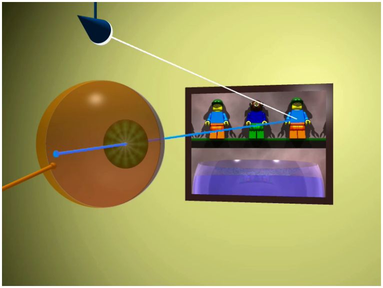


Fig. 4 — En combien de temps la lumière parcourt-elle le trajet représenté sur l'image ?

• Bien entendu, les rayons de lumière se déplacent dans la réalité beaucoup plus vite que ce que l'on voit dans le film puisqu'ils vont à la vitesse vertigineuse de 300 000 km/s (c'est-à-dire qu'ils parcourent l'équivalent de 8 fois le tour de la Terre en à peine une seconde). Cette vitesse est la vitesse limite de déplacement de tout objet (toute information) dans l'espace. À titre d'exercice, on pourra estimer les distances dans la figure ci-dessous et en déduire le temps mis par le rayon de lumière pour aller de la lampe jusqu'à l'œil en passant par le tableau.

• La pupille n'est pas assez fine pour laisser passer un unique rayon de lumière, mais laisse passer tout un cône de lumière. Ainsi, un point du tableau devrait marquer une tâche étendue sur la rétine et l'image devrait être vue floue (voir figure 5). Pour corriger ce problème, il y a un dispositif supplémentaire dans l'œil, appelé cristallin, qui redévie les rayons de lumière pour réaffiner le cône (voir figure 6).

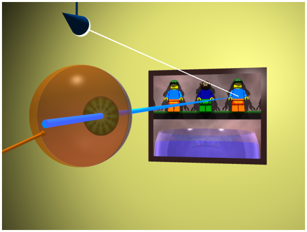


Fig. 5 — Sans le cristallin

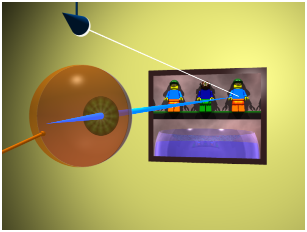


Fig. 6 — Avec le cristallin

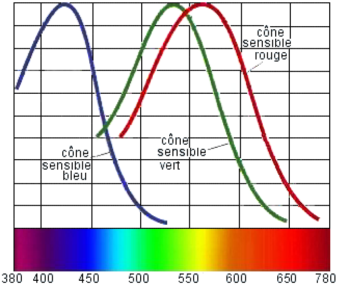



Fig. 7 — Sensibilité des cônes

La nuit, afin de laisser passer plus de lumière et ainsi de mieux voir les objets, la pupille se dilate. Il arrive alors que l'on voie flou pendant un moment le temps que le cristallin se déforme pour s'adapter à la nouvelle ouverture de la pupille.

• La reconnaissance des couleurs au niveau de la rétine est un phénomène autrement plus complexe que ce que ne laisse entendre le commentaire. En fait, on distingue

plusieurs types de récepteurs. Tout d'abord, les cônes ; ils sont de trois types qui ont des sensibilités différentes (voir figure 7). On voit sur le graphique que les cônes « verts » et « rouges » ont en fait des sensibilités très proches. Un autre type de récepteur sont les bâtonnets : ils sont très sensibles (mais pas à une couleur en particulier) et sont essentiellement utilisés pour la vision de nuit. Ces quatre types de récepteur ne nous permettent pas de distinguer toutes les couleurs présentes dans la nature, c'est-à-dire tous les rayonnements lumineux possibles.
Les appareils de capture et de restitution d'images (appareil photo, caméra, écran, imprimante, etc.) utilisent les propriétés de l'anatomie de l'œil humain pour ne pas avoir à capter ou restituer toute l'information de la couleur, mais seulement celle que l'œil humain est capable de reconnaître. Ainsi, lorsqu'on consulte une image dans un livre ou sur un écran, les couleurs ne sont jamais (ou disons pratiquement jamais) les véritables couleurs mais d'autres qui sont perçues de la même manière par nos yeux.

• Le film pourrait laisser croire que les rayons de lumière balayent toutes les directions de l'espace dans le sens où ceux-ci seraient émis successivement dans une direction, puis dans une autre... et ce jusqu'à avoir épuisé toutes les directions. Bien sûr, il n'en est rien : les rayons de lumière sont émis en continu dans toutes les directions de l'espace en même temps. L'image sur la rétine ne se forme donc pas « petit à petit » mais tout d'un coup.
De même, la rétine n'agit pas comme un seul homme qui attend que l'image soit complète pour la transmettre au cerveau, mais chaque cellule transmet en continu la couleur qu'elle observe à l'endroit où elle est placée. C'est ensuite le cerveau qui rassemble toutes ces informations éparses et les analyse.

## Scène 3 : La loi de la réfraction de la lumière

• « *Les sabres lasers.* » Bien sûr, ça n'existe pas. Mais on peut faire la même experience avec un objet qui existe bel et bien : un pointeur laser. La différence principale est que l'on ne voit alors pas le rayon lumineux en entier, ce qui rend la déviation plus difficile à visualiser. Par contre, il n'est pas plus difficile de mesurer les angles comme dans le film en plaçant un écran à la sortie du rayon. On peut ainsi vérifier expérimentalement la loi de Snell-Descartes.

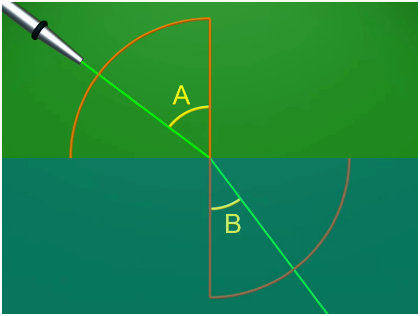
• « *Remarquez également que lorsque l'angle émergé, c'est-à-dire l'angle A, est grand, une partie du rayon est réfléchi à la surface de l'eau comme sur un miroir.* » Les reflets que l'on peut observer à la surface d'un lac ou d'une rivière sont une illustration simple de ce phénomène.
Stricto sensu, même si l'angle émergé $A$ est petit, le rayon de lumière est en partie réfléchi à la surface de l'eau ; seulement dans ce cas, la proportion réfléchie est faible. Pour donner une idée, elle est de l'ordre de 2% lorsque l'angle $A$ est proche de 0.

• Remarquez également que, dans l'expérience que nous faisons, l'angle $B$ ne dépasse pas un certain angle limite qui vaut ici environ 49°. Cela découle directement de la loi de Snell-Descartes puisque le sinus[2] de l'angle $A$ ne saurait dépasser 1, et donc celui de l'angle $B$ ne peut dépasser 0,75.

---

[2] Si vous n'êtes pas à l'aise avec les sinus, on peut aussi dire que la longueur du segment horizontal rouge ne peut dépasser le rayon du cercle, c'est-à-dire 1 cm, et donc que la longueur du segment vert ne peut dépasser $7,5$ mm (c'est la longueur correspondant à un segment rouge de 1 cm), ce qui induit une limitation sur l'angle $B$.

Un rayon émis dans l'eau avec une inclinaison dépassant l'angle limite est entièrement réfléchi : c'est le phénomène dit de réflexion totale. Il intervient de façon essentielle par exemple dans le fonctionnement des fibres optiques.




• « *[La courbe] précise pour tous les angles émergés* $A$ *possibles, l'angle immergé* $B$ *qui lui correspond.* » Et réciproquement ! elle donne aussi pour tous les angles $B$ possibles, les angles $A$ correspondants. Cette précision est, en un sens, importante car, dans les explications à suivre, les rayons lumineux commenceront dans l'eau et se termineront dans l'air.

• Un exercice pour les élèves pourrait être de décrire précisément avec des mots la construction de l'image ci-dessus.

• Pourquoi a-t-on mesuré 8 mm pour la longueur du segment rouge, mais reporte-t-on 0,8 (et pas 8) sur le graphique ? Que se serait-il passé si on avait reporté les longueurs de millimètres (au lieu des sinus) ?

• Le film pourrait laisser croire qu'il n'y a réfraction qu'avec l'eau, ce qui n'est pas le cas. Il y a réfraction avec tous les matériaux transparents. Tout fonctionne de la même manière, sauf que la constante ne vaut plus nécessairement 1,33. Cette constante est appelée l'indice de réfraction du

matériau ; elle est égale à environ 1,46 pour le plastique, 1,5 pour le plexiglas et 2,42 pour le diamant.
L'indice de réfraction a également une interprétation en termes de vitesse de la lumière. Précisément, dire que l'eau a un indice de réfraction égal à 1,33 signifie que la lumière se déplace dans l'eau 1,33 fois moins vite qu'elle ne se déplace dans le vide (ou dans l'air, c'est à peu près la même chose). Pierre de Fermat[3] a réussi à comprendre la loi de Snell-Descartes comme la conséquence d'un principe général plus intrinsèque qui porte désormais son nom : la lumière suit toujours le chemin le plus rapide (et non pas le plus court qui serait la ligne droite). C'est à nouveau un exercice intéressant que de retrouver — ou disons d'appréhender — la loi de Snell-Descartes à partir du principe de Fermat.
D'autres interprétations de la loi de Snell-Descartes ont été également proposées par les physiciens. Je pense notamment au modèle d'ondelettes de Huyghens et Fresnel. Pour plus d'informations, on pourra consulter `http://fr.wikipedia.org/wiki/Principe_de_Huygens-Fresnel`.

## Scène 4 : L'explication du scanphandrier

• Avez-vous remarqué que dans l'explication, il n'y a plus qu'un bloc d'eau et que le bocal (la partie en verre, j'entends) n'est plus là ? Cela n'est a priori pas anodin car, comme nous venons de le dire, le phénomène de réfraction se produit aussi avec le verre. Toutefois, ici, l'épaisseur de verre est tellement mince par rapport à la largeur de la bande d'eau traversée par la lumière que cet effet peut être négligé en première approximation.

[3] Savant français contemporain de Snell et de Descartes.

Comme exercice, nous vous invitons à faire le calcul pour vous en assurer.

• Un autre effet intéressant à observer et à décrire — qui n'apparaît pas du tout dans le film — est la variation du facteur de grossissement $x$ en fonction de la position du scanphandrier à l'intérieur du bocal et plus exactement de sa distance $\ell$ au bord (voir figure 8). Voici ci-dessous les courbes que l'on obtient pour deux valeurs de la distance $d$ qui sépare l'observateur de l'aquarium.

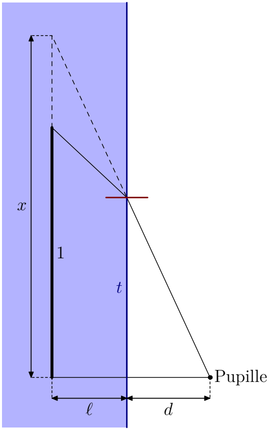



Fig. 8 — Schéma de l'expérience

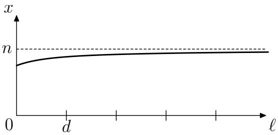



Fig. 9 — Pour $d = 1$

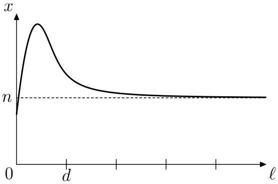



Fig. 10 — Pour $d = 0{,}1$

Observez le maximum dans la deuxième courbe. Une activité intéressante à faire en classe pourrait être de chercher une équation paramétrée de la courbe (on cherchera à paramétrer la courbe en fonction de la distance $t$ définie sur le schéma ci-dessus) puis de la tracer pour diverses valeurs de $d$. Sur la figure 14, en quatrième de couverture, est représenté en trois dimensions le graphe de la fonction $(d, \ell) \mapsto x$.

• « ***Mais si l'on zoome suffisamment sur la déviation, le bord du bocal ressemble de plus en plus à une droite. On comprend alors ce qu'est la perpendiculaire au bord, et c'est cette perpendiculaire qui doit être choisie comme droite rouge.*** » Bien sûr, en termes savants, il faut comprendre que la ligne droite est la perpendiculaire à la tangente — c'est-à-dire la normale — au bord du bocal. Une discussion peut être entamée à ce sujet avec les élèves d'une classe de première ou de terminale qui connaissent déjà la dérivation pour les amener à préciser le sens de la phrase du commentaire.

• L'image par laquelle la scène se termine, reproduite sur la couverture de ce livret, est très intéressante, d'un point de vue artistique certes mais aussi d'un point de vue scientifique. Notamment, on y voit le scanphandrier en double, l'une des versions étant plus petite que l'autre. Un bon exercice, qui pourra être posé plutôt peut-être après avoir visionné la scène suivante sur la paille, serait d'en expliquer la raison.

## Scène 5 : L'explication de la paille

• Tiens, tiens, le verre dans le commentaire n'est plus rond, mais carré. Que cela change-t-il ?

• « *Découpons artificiellement le verre en deux [...]* » À ce moment, regardez bien : le verre qui entoure l'eau est retiré. L'analyse est analogue à celle fait pour l'exemple du scanphandrier : apparemment retirer le verre peut porter à conséquences puisque celui-ci dévie aussi la lumière, mais en fait son épaisseur est telle que son influence n'est pas significative.

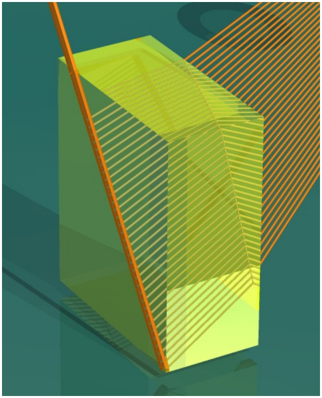


Fig. 11 — Les rayons de lumière vus à travers le liquide

• « *Mais, avant tout, afin que ces rayons ne soient pas déformés par la présence du liquide, rendons artificiellement, par un coup de baguette magique, les caméras qui filment la scène insensibles à l'effet d'optique.* » Cette remarque n'est pas facile à comprendre, mais c'est exactement le même problème qui nous oblige dans la scène suivante à vider la piscine à l'exception d'une colonne d'eau : si on ne le fait pas, les rayons lumineux que l'on va tracer vont, exactement comme la paille, être déformés à cause du liquide. À titre d'exemple, regardez sur la figure 11 ce que l'on aurait vu sans cette manipulation.

• Dans le commentaire, on parle toujours des segments sur la rétine. Mais, d'après vous, s'agit-il réellement de segments (bien droits) ou sont-ils légèrement courbés ?

• « *Ils sont vus en double* » Donc, si on fait un petit dessin sur la paille au bon endroit, il est possible que celui-ci soit vue en double lorsque la paille est plongée dans l'eau... et même sans avoir bu avant ! Expérience à faire chez vous ou en classe.

## Scène 6 : L'explication de la piscine

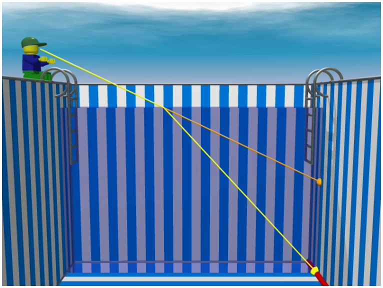


Fig. 12 — Est-ce la bonne construction du point orange ?

• « *L'observateur ne voit donc pas le point jaune où il est réellement mais plutôt à la position du point orange, intersection de la droite orange avec le mur de la piscine.* » S'il est bien vrai que l'œil a l'impression que le point vient de la droite orange, cela ne suffit pas à en déduire que l'observateur croit voir le point orange à la position précise indiquée dans le commentaire. En effet, le raisonnement qui est fait suppose implicitement que le plan du mur de la piscine n'est pas du tout déformé par l'eau — ce qui mériterait certainement une justification.

En fait, il s'agit d'une question très difficile car la réponse dépend principalement de la façon dont le cerveau interprète les images envoyées par l'œil... ce qui est encore très loin d'être compris aujourd'hui ! Néanmoins, on peut avancer certains arguments montrant que la construction présentée dans le film n'est pas « trop fausse ». Le premier est de nature expérimentale ; il consiste à dire que, lorsque l'on regarde une piscine remplie, on n'a pas l'impression que le mur en face — ou disons que les verticales — soit déformé. Cela vaut non seulement avec les images de synthèses que l'on peut voir dans le film[4] mais aussi dans la réalité[6].

Traditionnellement, la méthode pour déterminer la position apparente dans l'espace du point jaune est de prendre en compte les deux yeux : chaque œil voit le point sur sa droite orange, et la position dans l'espace se définit comme l'intersection de ces deux droites. Malheureusement, pour que cette méthode ait un sens, il faut au moins que les deux droites se coupent[7], ce qui n'est pas le cas dans notre situation où intervient la réfraction de la lumière. Il est évidemment possible de coller encore une rustine un peu fragile par dessus : au lieu de considérer l'intersection des deux droites, on peut chercher le point qui minimise la somme des distances (ou la somme des carrés des distances ?) à ces deux droites... mais dans tous les cas, cela commence à ne plus être entièrement satisfaisant.

Malgré tout, si l'on fait le calcul, on s'aperçoit qu'au moins dans le cas où l'observateur regarde devant lui et ne s'amuse pas trop à tourner les yeux (sans bouger la tête) pour voir sur le côté, les résultats que donne la

[4]Mais on pourrait alors objecter[5] que l'on a affaire à une projection bidimentionnelle, alors que le problème semble être étroitement lié à la 3D.

[5]Objection qui d'ailleurs n'est pas forcément pertinente puisque le film — étant animé — montre plusieurs points de vue sur la piscine, à partir desquels notre cerveau est possiblement capable de reformer une image tridimensionnelle.

[6]Il faut alors prendre la peine de se déplacer jusqu'à une piscine pour faire l'expérience.

[7]On parle dans ce cas de *stigmatisme*.

méthode précédente sont très proches de ceux que l'on obtient plus simplement en considérant l'intersection avec le mur de la piscine. S'encombrer avec des théories fumeuses ne paraît donc pas apporter grand chose de plus. Finalement, entre deux approches toutes les deux approximatives qui donnent des résultats analogues, autant choisir la plus simple !
Il est malgré tout un cas où les deux approches donnent des résultats sensiblement différents. C'est celui où l'observateur s'allonge sur un plongeoir et regarde une ligne installée dans le fond de la piscine exactement à la verticale de sa position. Voici un schéma qui montre les résultats que donnent les deux méthodes précédentes.

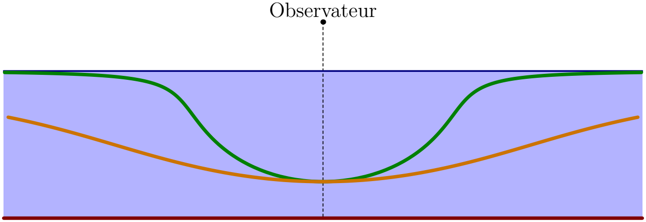



Fig. 13 — La courbe de la piscine calculée
par deux méthodes différentes

La courbe orange correspond à la première méthode (celle de la projection[8]) tandis que la courbe verte correspond à la seconde méthode (celle

[8]Dans la situation que nous venons de décrire, il n'est pas possible de projeter sur un plan vertical puisque les rayons se déplacent dans un plan parallèle à celui-

des deux yeux). On voit qu'elles coïncident à la verticale de l'observateur, et qu'elles s'éloignent rapidement lorsque l'on s'écarte un peu de cette position. Ceci correspond donc à une situation où l'observateur, sans bouger la tête, observe un point sur le côté ; le point est donc vu plus ou moins dans le coin de l'œil.

## Scène 7 : Conclusion

• La loi de la réfraction de la lumière permet d'expliquer bien d'autres phénomènes naturels : les arcs-en-ciel que nous avons déjà évoqués, mais aussi par exemple les mirages. Notez que les mirages s'observent bien sûr dans le désert mais aussi, de façon plus accessibles à nous autres occidentaux, sur les grandes routes (en particulier les autoroutes) lorsque le temps est chaud. Si vous n'avez jamais prêté attention au phénomène, je vous conseille de le faire la prochaine fois que vous prendrez la route en été.

• On dit dans le commentaire que la formule est tout à fait essentielle dès que l'on veut connaître la trajectoire exacte des rayons de lumière et ainsi la déformation exacte. C'est certes vrai, mais il ne faut pas non plus croire que la loi de la réfraction se résume à cette formule. Il est encore plus essentiel de bien comprendre que la lumière est déviée lorsqu'elle change de milieu (par exemple lorsqu'elle entre ou sort de l'eau) : si l'on n'a pas compris cela, il ne fait aucun sens de chercher à mesurer la déviation !

---

ci. Pour contourner ce problème, on peut supposer que la ligne tracée dans le fond n'est pas exactement à la verticale, mais légèrement décalée puis passer à la limite lorsque l'amplitude de ce décalage tend vers 0.

N’allez donc pas retenir que $\frac{\sin A}{\sin B} = 1{,}33$ sans savoir ce qu’est $A$, $B$ ou qu’il est question d’eau et de lumière.
La remarque précédente prend en fait tout son sens lorsque l’on se place du point de vue du découvreur — ici, donc, de Snell ou de Descartes. Ces gens-là ne savaient pas a priori que la lumière était déviée en entrant dans l’eau, et ils ont donc d’abord dû imaginer que cela pouvait être le cas avant de chercher à mesurer la déviation et finalement établir la formule qui porte désormais leurs noms. C’est là une difficulté que l’on estime pas forcément comme il faut lorsque l’on sait déjà, mais qui est pourtant bel et bien présente.

Willebrord Snell


René Decartes

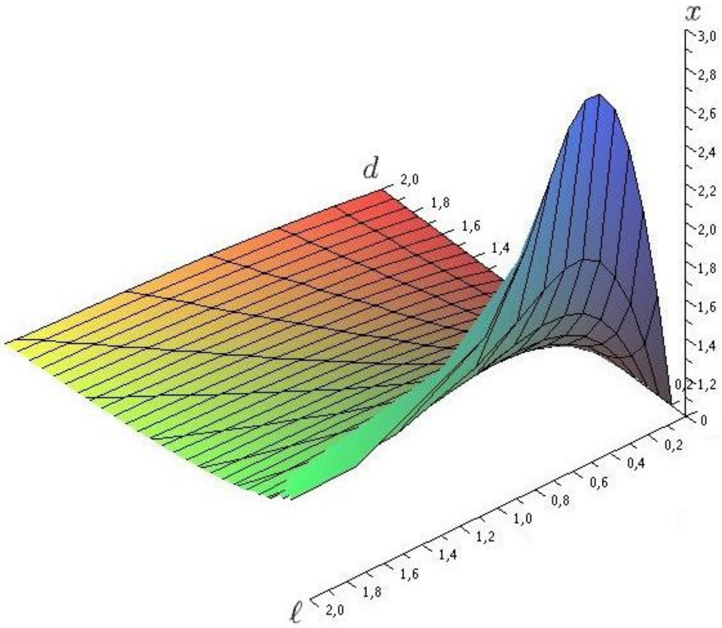



Fig. 14 — Courbe 3D du grossissement
dans l'exemple du scaphandrier