

# La lumière

Primaire et collège

## Résumé

S'il est une réalité du monde physique qui s'impose dès la naissance et peut-être même avant, c'est bien l'existence de la lumière, lorsque le nouveau-né ouvre les yeux et jette son premier regard étonné sur le monde. La lumière ne le quittera plus, dans le chatoiement des couleurs et la palette du peintre, dans l'éclat du Soleil et la scintillation des étoiles, sous la lampe pour lire, dans les miracles de l'appareil photo ou des lunettes du grand âge.

# la lumière

Pierre Léna

Avec, par ordre d'entrée :

Acte I – *Le Chemin*

Platon

Alhazen

Fermat

Einstein

Acte II – *La Vitesse*

Römer

Fizeau

Einstein

Acte III – *Les Voyageurs*

Kepler

Niepce

Mayer

Acte IV – *La Nature des choses*

Newton

Young

Einstein

## Acte I - Le chemin

*Une terrasse inondée de soleil dans le crissement des cigales. Les ombres dessinent l'arête d'un mur polygonal, éclatant de blancheur. La dentelle des pins se dessine sur l'azur profond. Au loin scintille la Méditerranée, et, vers l'ouest, la montagne Sainte-Victoire tremble dans l'air chaud.*

SOPHIE. – Regarde ! tu baignes dans la lumière et son histoire. À la proue du vaisseau, lorsqu'il croisait ces caps, Ulysse l'avisé célébra par son chant l'Aurore aux doigts de rose, Pythéas fit voile vers les nuits du Grand Nord. Dans la montagne de Digne, là-bas à l'est, Fabri de Peiresc fut le premier à nommer la nébuleuse d'Orion qui nous émut tant, ce matin avant l'aube. Et distingues-tu vers Marseille ce sommet où Stéphan et Fizeau osèrent les premiers tenter la mesure du DIAMÈTRE APPARENT d'une étoile ? (*Silence.*) Hélas ! tu ne m'entends pas, je vois que le seul Cézanne et sa montagne aimée touchent ton cœur !

JEAN. – Certes, car je n'entends rien à la lumière des physiciens. Je lui préfère l'infinie palette du peintre ou l'iridescence d'un vitrail. Pourtant, je t'écouterai et ne te ferai pas grâce de mes questions car, je le reconnais, la lumière est bien étrange : un grain de sable, c'est de la matière, je le touche

et veux bien admettre qu'en le fractionnant je finisse par trouver la MOLÉCULE, l'ATOME. Je conçois encore que de petits ÉLECTRONS se ruent dans les fils métalliques en y transportant le courant, comme l'eau dans la rivière. Mais la lumière ? Elle paraît naître du feu, rebondir sur les choses, s'éparpiller en mille couleurs ? Elle est toute fluidité, immatérialité insaisissable. Aveugle, je sentirais encore la chaleur du Soleil sur ma peau, sans pourtant en saisir la source.

SOPHIE. – Il est vrai, nos sens peuvent nous tromper : ainsi beaucoup, comme le grand Platon, crurent-ils que la lumière sortait de l'œil. Notre langue en porte encore la trace : « jeter un coup d'œil, caresser du regard »...

JEAN. – Allons, ma vue embrasse cette Provence, mais c'est le Soleil qui la baigne de lumière, c'est évident !

SOPHIE. – Mon cher, l'évidence est ce qu'il y a de moins partagé au monde : tu viens après deux mille cinq cents ans de philosophie, d'école primaire et de physique. Souvenons-nous aussi de Démocrite et de Lucrèce, ces « atomistes » qui voulaient décrire la nature autant que possible indépendamment de l'homme et de ses sensations (nous dirions « objectivement ») : pour eux, les corps émettent des « idoles » ou « simulacres », sortes de fines écorces qui « [...] se détachent de la surface même des corps [...] s'élancent dans l'air en conservant leurs formes, [...] entrent en nous [...] en reproduisant les objets extérieurs ».

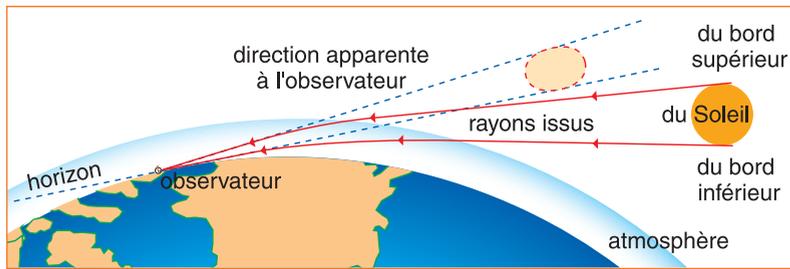
JEAN. – J'admets donc que la lumière, c'est « quelque chose » qui se déplace d'un point à un autre. Mais quel chemin suit-elle ?

Il me semble que le rayon de lumière trace une ligne droite : ainsi lorsque je regarde des ombres ou ces pinceaux de lumière issus du Soleil qui, découpés par les nuages, forment une gloire ou bien, encore, le faisceau rouge de ce petit LASER avec lequel tu désignes le tableau.

SOPHIE. – Bien observé.

JEAN. – Pourtant, j'ai remarqué que parfois le rayon de lumière se casse ou se courbe. Pourquoi donc ?

SOPHIE. – Bien vu encore. Là-bas vers la Sicile, cela n'avait pas échappé à Archimède qui décrivait ainsi la RÉFRACTION : « Si tu poses un objet au fond d'un vase, et si tu éloignes le vase jusqu'à ce que l'objet ne se voie plus, tu le verras réapparaître à cette distance dès que tu rempliras d'eau le vase. » Il faudra une longue réflexion depuis l'opticien arabe al-Haytham (Alhazen), mort au Caire en 1039, jusqu'à Pierre de Fermat (1601-1665), pour en proposer une explication (voir l'encart ci-contre). Tu connais ces mirages, autres effets de courbure des rayons lumineux, que l'on croit volontiers réservés aux voyageurs du désert. Nous en observons pourtant un presque chaque jour, au lever ou au coucher du Soleil : à l'instant où tu vois l'astre comme posé sur l'horizon, il est déjà (en GÉOMÉTRIE EUCLIDIENNE) couché sous cet horizon, car la trajectoire des rayons lumineux, qui n'est plus une droite, mais que courbe la réfraction dans l'atmosphère inhomogène de la Terre, atteint l'œil et lui permet de former l'image du Soleil (cf. le dessin ci-contre, en haut). Un cas extrême de réfraction atmosphérique anormale fut même rapporté par le navigateur Barents (découvreur de la mer Arctique portant son nom, en 1597) qui vit, à son extrême surprise ainsi qu'à



Le Soleil couchant apparaît posé sur l'horizon, alors que la ligne droite qui le relie à l'observateur passe sous l'horizon. L'aplatissement est de l'ordre de 20 % et dépend de l'état local de l'atmosphère terrestre.

## La lumière se propage en ligne droite, vrai ou faux ?

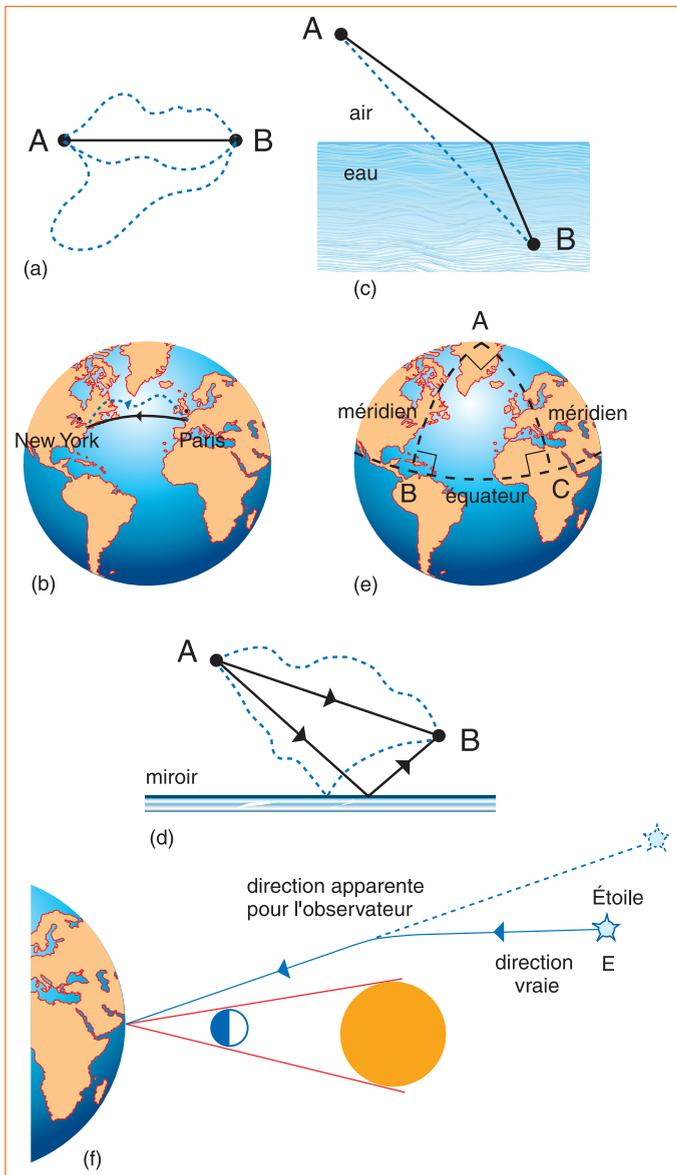
La ligne droite est un objet de la géométrie (donc mathématique) et non de la physique : dans l'espace familier qui nous entoure, c'est, parmi tous les chemins possibles, celui de longueur minimale entre deux points A et B (a, sur le dessin de la page 272). On peut vérifier avec toute la précision possible que la lumière suit en général un tel chemin (par exemple, le bord d'une règle parfaite). Pourtant, la réfraction, qui se produit lorsque le rayon change de milieu (air, puis eau) ou bien parcourt un milieu variable de point en point (l'atmosphère dont la température change, de l'eau inégalement salée), montre qu'alors le trajet n'est plus une ligne droite.

Fermat énonce en 1661 son célèbre principe (un énoncé vérifié par ses conséquences, mais qu'on ne démontre pas) : « Le rayon de lumière suit entre A et B le parcours de temps minimum. » À partir de cet énoncé, et en supposant que la vitesse de la lumière peut varier selon le milieu où elle se propage, ce qui à l'époque est encore une hypothèse sans preuve, il retrouve sans difficulté le trajet exact des rayons réfractés allant de A à B. Il écrit alors : « [...] le fruit de mon travail a été le plus extraordinaire, le plus imprévu et le plus heureux qui fut jamais. » (c et d)

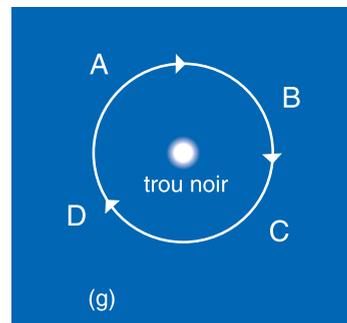
Il existe des espaces où la définition du plus court chemin ne conduit pas à la droite de la géométrie familière (appelée encore euclidienne) : par exemple, la surface d'une sphère. Pour aller de Paris à New York, le chemin (euclidien) de longueur minimale est de traverser la croûte terrestre ; en revanche, si la contrainte est de demeurer à la surface, comme c'est le cas pour un avion, le chemin de longueur minimale est un ARC DE GRAND CERCLE de la sphère terrestre (on appelle « grand cercle d'une sphère » le cercle de plus grand rayon que l'on puisse tracer à la surface de cette sphère : sur Terre, l'équateur et les méridiens sont des grands cercles, mais non les parallèles) ; enfin, si la contrainte, pour un pilote d'avion, est d'obtenir la durée minimale de parcours, sachant que la vitesse-sol de l'avion dépend du vent, lequel est variable de point en point, la trajectoire sera plus sinueuse (b). À la surface d'une sphère, il est possible de dessiner un « triangle », dont les côtés sont des arcs de grand cercle (les « droites » de cet espace), mais dont la somme des angles n'est plus égale à  $180^\circ$  (e).

Considérons trois étoiles A, B, C, formant triangle et les rayons de lumière qui les joignent. Que vaut la somme S des angles ? Depuis Einstein, nous savons que la géométrie de l'espace est sensible aux masses qu'il contient : un espace totalement vide serait euclidien ( $S = 180^\circ$ ), mais, dès qu'il contient de la matière (ou de l'énergie), sa géométrie change (et alors  $S \neq 180^\circ$ ) sous l'effet de la gravitation. En l'occurrence, on pourrait dire qu'il était euclidien et qu'il devient plus ou moins courbe, comme on passe d'un plan (euclidien) à la surface d'une sphère (qui ne l'est plus). Dans le voisinage du Soleil, l'effet est tout petit (la somme S des angles s'écarte de  $180^\circ$  d'environ un millionième) et a pu être vérifié lors de l'éclipse totale de Soleil de 1919 (f). On est donc conduit à admettre que le principe de Fermat (durée minimale) s'applique toujours, mais que les rayons lumineux peuvent ne plus être des droites au sens familier : le cas extrême est fourni par le comportement de la lumière dans le voisinage d'un TROU NOIR (g, p. 185).

Conclusion : le plus souvent, la lumière ne se propage pas en ligne exactement droite (au sens euclidien), mais toujours elle suit le parcours de durée minimale. Néanmoins, dans la vie courante, il est raisonnable d'utiliser les alignements « à vue » pour l'arpentage ou l'architecture.



Variations sur « le plus court chemin d'un point à un autre » selon que l'on considère : (a) la droite euclidienne ; (b) la contrainte de rester sur la surface d'une sphère, avec la longueur minimale (trait plein) ou la durée minimale (tirets). En (c), le parcours de la lumière entre A et B, le trait plein donnant la durée minimale, le trait en tirets la longueur minimale. En (d), deux parcours possibles (trait plein) pour la lumière, l'un par réflexion sur le miroir, l'autre direct, chacun étant minimum par rapport à des parcours voisins. En (e), curieuse géométrie à la surface d'une sphère, où trois segments de « droites » (arcs de grand cercle) forment un triangle dont la somme des angles vaut  $270^\circ$  ( $3 \times 90^\circ$ ). En (f), le parcours de la lumière issue d'une étoile et atteignant la Terre pendant une éclipse totale de Soleil : la Lune cache entièrement le Soleil pour l'observateur terrestre ; le ciel est alors très sombre, les étoiles deviennent visibles durant quelques minutes. L'observateur voit l'étoile E dans la direction apparente (tirets) et non dans sa direction vraie (trait plein), à cause de la courbure du rayon lumineux, due au Soleil. En (g), l'espace est si courbé autour d'un trou noir (extrême concentration de matière, par exemple la masse du Soleil rassemblée dans une sphère d'un mètre de rayon) que la lumière suit alors des cercles autour de cette masse (par exemple, le cercle ABCDA...) : elle ne peut s'échapper.



celle de son équipage, le disque du soleil réapparaître sur l'horizon pendant la nuit polaire, alors même que l'astre était déjà couché depuis plusieurs jours ! Il est aisé d'interpréter cette observation par un effet semblable, et rare, de réfraction atmosphérique anormale.

JEAN. – Mais c'est étrange, la lumière ne réfléchit pourtant pas..., si je puis m'exprimer ainsi. Pourquoi préfère-t-elle donc le temps minimal ?

SOPHIE. – Ta question est extrêmement profonde : Pierre de Maupertuis, en 1744, a généralisé le principe de Fermat aux corps en mouvement (billes, balles...) et contribué, par son « principe de moindre action », à fonder la mécanique moderne. Hélas ! je ne puis te dire pourquoi le RÉEL adopte un tel principe d'économie : il est ainsi fait. Étonnant-en, c'est le secret de la découverte.

## Acte II - La vitesse

*La nuit est maintenant tombée, les cigales se sont tues. La Voie lactée trace son sillon d'argent, sur lequel se découpent les pins noirs ; le pinceau d'un phare balaie l'horizon.*

JEAN. – La nuit provençale est belle : regarde cette étoile, droit au sud, comme elle est rouge ?

SOPHIE. – Tu veux dire sans doute : comme Antarès était rouge autrefois, car tu la vois telle qu'elle était il y a trois cent soixante ans, et la Voie lactée auprès d'elle il y a plus de quarante mille ans ! La lumière te fait voir la profondeur du temps. Imagine la source de lumière comme placée au cœur d'un oignon. Chaque pelure qui l'entoure est une tranche de temps qui s'éloigne de la source à la vitesse  $c$  et qui, successivement, atteindra un observateur lointain. Qui sait comment Antarès est en ce moment même ? Qui sait si elle est encore présente ?

JEAN. – Ce beau ciel étoilé que je regarde est donc comme un musée mal rangé, où voisineraient des objets anciens de tous âges, juxtaposés dans le désordre. Quelle étrange vision « transchronique » tu me proposes là ! Mais revenons à la lumière. Ce « quelque chose » qui se propage posséderait-il une vitesse ? Dans l'orage, je perçois bien l'intervalle de temps entre le tonnerre et l'éclair – je sais que la vitesse du SON est d'environ 300 mètres/seconde –, mais l'éclair, lui, paraît instantanément me parvenir.

SOPHIE. – Instantanément ? Que la lumière aille vite, c'est certain : Galilée avait d'ailleurs, en vain, essayé d'en mesurer la vitesse. Mais revenons au son : comment en mesures-tu la vitesse ?

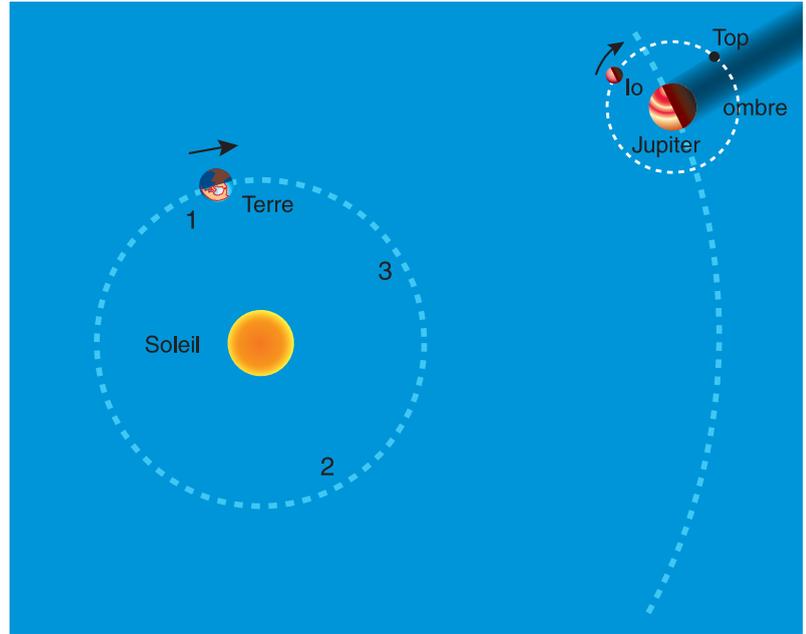
JEAN. – Bien aisément ! Je me place à quelque distance d'une falaise et je frappe lentement en cadence dans mes mains. L'écho me revient, puis j'augmente la cadence jusqu'à ce que je ne le perçoive plus, lorsque l'écho qui revient coïncide précisément avec le battement suivant : je sais alors que la durée d'aller-retour est égale exactement à la durée qui sépare deux battements de mains, durée que je puis mesurer. Il me suffit alors d'arpenter la distance jusqu'à la falaise et le tour est joué. Si ma distance à la falaise est de 75 m, la cadence de coïncidence est d'un battement par demi-seconde, et la vitesse du son est donc de  $2 \times 75 / 0,5 = 300$  m/s.

SOPHIE. – Parfait. Cherchons à appliquer à la lumière une méthode quelque peu similaire : il nous faut donc disposer d'une assez grande distance et d'une source capable de donner un éclat régulier de lumière – un « top » en quelque sorte (*cf.* le dessin page suivante). Regarde là-bas à l'est, cet astre à l'éclat intense : c'est JUPITER, tu le reconnais, car il ne scintille pas. Avec nos jumelles, tu discernes sans peine son disque et quatre satellites, qui en font le tour en quelques dizaines d'heures : à chaque révolution, très exactement, ils passent derrière le disque de Jupiter. Voilà le « top » régulier. Quant à la distance, elle varie entre 600 et 900 millions de kilomètres, selon la position de la Terre : les « tops », réguliers à l'émission, vont nous apparaître tantôt plus resserrés lorsque la Terre se dirige vers Jupiter, tantôt plus écartés lorsqu'elle s'en éloigne. C'est ainsi que l'astronome Olaus Rømer, à Paris en 1676, prouva, grâce à une bonne horloge et à des observations s'étendant sur plusieurs mois, que la lumière a bien une vitesse finie. Un peu plus tard, cette valeur fut établie : presque exactement 300 000 km/s (on l'appelle  $c$ , pour célérité), soit 2 000



## La vitesse de la lumière selon Olaus Rømer (1676)

Les « tops » sont définis par la disparition régulière (toutes les 152 000 secondes) d'un des satellites de Jupiter (ici Io) dans l'ombre de la planète où il cesse d'être éclairé par le Soleil. Ces « tops » lumineux cheminent jusqu'à la Terre, elle-même en mouvement (à 30 km/s) sur son orbite autour du Soleil. Lorsque ce mouvement la rapproche de Jupiter (en 1), l'intervalle entre les « tops », observés depuis la Terre, se resserre, le chemin que doit parcourir la lumière ne cessant de décroître. La situation est inversée quand la Terre est en 2 et s'éloigne de Jupiter : la durée entre les tops augmente. En 3, la distance Jupiter-Terre est approximativement constante et les « tops » retrouvent leur période de 152 000 secondes. La variation de la période des « tops » au fil d'une année est la démonstration de la valeur finie de la vitesse de la lumière.



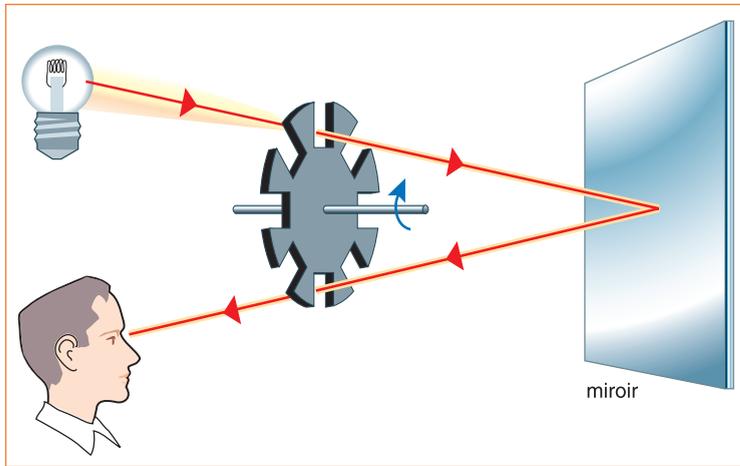
Entre deux tops, la Terre parcourt  $30 \times 152\,000 = 4,56$  millions de kilomètres, distance que la lumière parcourt en 15,2 s. En 1, les « tops » sont séparés de  $(152\,000 - 15,2)$  secondes, en 2 de  $(152\,000 + 15,2)$  secondes et en 3 de 152 000 secondes. La variation est petite (environ un dix millième), mais mesurable par effet cumulé pendant plusieurs mois.

secondes pour venir de Jupiter lorsque l'astre est au plus près de la Terre. Plus tard encore, d'autres scientifiques (Hippolyte Fizeau, Léon Foucault) mesureront la vitesse de la lumière dans l'air, puis dans l'eau, et enfin vérifieront l'hypothèse d'Alhazen et de Fermat : la valeur de cette vitesse dépend du milieu dans lequel se propage le rayon (ci-contre, en haut).

JEAN. – Mais ne peut-on faire plus simple, plus accessible, une expérience que je pourrais même répéter chez moi ?

SOPHIE. – Soit : nous n'avons parlé jusqu'ici que de la lumière que perçoit notre œil, et je t'ai mis en garde contre les illusions de nos sens. Regarde cet avion

qui passe et dont tu vois les feux. Il émet bien d'autres lumières, par exemple de l'INFRAROUGE dû à la température élevée de ses réacteurs. Les PHOTORÉCEPTEURS de la RÉTINE y sont insensibles, mais une caméra infrarouge réagirait. L'avion émet aussi des RADIOFRÉQUENCES, par lesquelles le pilote communique avec le contrôle au sol. Ces ondes radio sont aussi de la lumière, qui transporte l'information sonore : dans la cabine de pilotage, le micro module les ondes radio en fonction du son qu'il capte, et dans la tour de contrôle au sol le processus inverse se produit, l'ONDE radio est transformée en son dans un haut-parleur. Revenons donc à ta question : as-tu remarqué, lors d'une communication téléphonique avec un pays



Mesure de la vitesse de la lumière dans l'air par Fizeau. La vitesse de rotation de la roue dentée augmente progressivement, et l'observateur voit disparaître puis réapparaître la lumière de la source après réflexion dans le miroir.

un trajet bien plus court. Mais dans les deux cas, c'est bien une lumière qui est utilisée pour transmettre le message. Voyons : quatre fois 36 000 km pour l'aller-retour, à la vitesse  $c$ , cela fait presque une demi-

lointain, elle aussi transportée par des ondes radio, donc de la lumière, ce petit intervalle de temps, inhabituel, qui parfois sépare questions et réponses ?

JEAN. – Oui, c'est gênant, mais j'ai aussi noté que cela ne se produit pas toujours. Je suppose que les communications passent tantôt par un satellite géostationnaire, à 36 000 km au-dessus de la Terre, tantôt par des FIBRES OPTIQUES au fond des océans, sur

seconde, durée tout à fait perceptible pour l'oreille (cf. le dessin du haut, p. 276). Mais une question demeure : quand, à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, je communiquerai avec mon arrière-petite-fille explorant la planète Mars, comment ferai-je ?

SOPHIE. – Tu mets le doigt sur une autre étonnante structure du réel, dont nous devons la découverte, encore, à Albert Einstein : aucun message ne peut



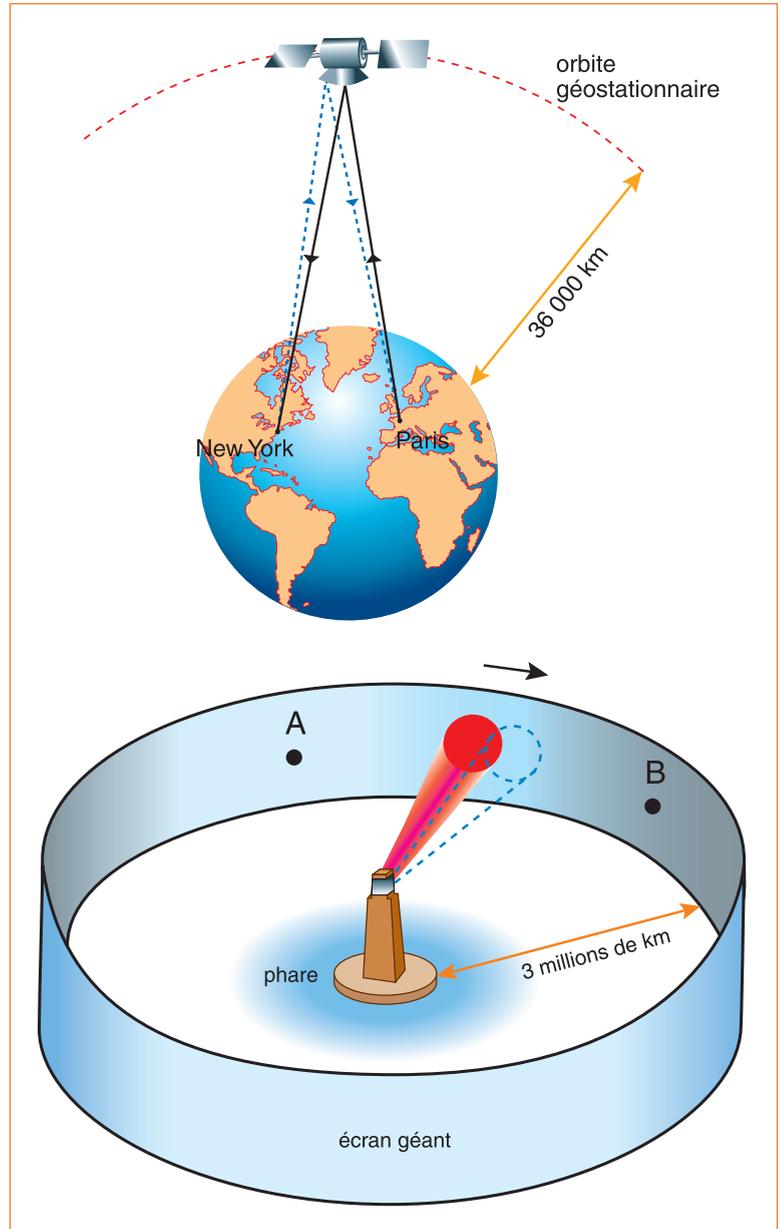
Ce télescope est utilisé pour mettre en forme et orienter le faisceau de lumière bleue produite par un puissant laser (source de lumière). Ce faisceau est réfléchi par des miroirs placés sur la surface de la Lune (lors d'une mission Apollo) ou sur un satellite artificiel, et le télescope recueille l'écho retour. Le temps d'aller-retour donne la distance à l'objet réfléchissant, à une précision de l'ordre du centimètre.  
© CERGA/CNRS

se déplacer dans l'espace à une vitesse supérieure à  $c$ . Si ton arrière-petite-fille veut te rejoindre le 31 décembre à minuit précisément, elle devra t'appeler entre 4 et 20 minutes avant (selon la position relative de la Terre et de Mars ce jour-là), le temps que la lumière te parvienne. Tu vois, la SIMULTANÉITÉ de deux événements se produisant en des endroits distincts ne peut être définie par une expérience physique... Cela te laisse songeur et c'est normal, car c'est bien difficile à accepter, tellement cela va à l'encontre de l'évidence. Mais le jour où tout le système solaire sera peuplé d'astronautes munis de téléphones portables, sois tranquille, cela apparaîtra comme une évidence de la vie quotidienne.

JEAN. – Pourtant, je reste troublé : regarde ce puissant phare à l'horizon, qui fait un tour en dix secondes (cf. le dessin du bas, ci-contre). Imaginons un écran circulaire situé à 3 millions de kilomètres de lui : la circonférence de cet écran mesure  $2\pi \times 3$  millions  $\approx 19$  millions de kilomètres et la tache lumineuse en fait bien le tour en dix secondes, donc à une vitesse supérieure à  $c$  ?

SOPHIE. – Bien raisonné : je n'ai pas dit que « rien » ne peut dépasser la vitesse de la

lumière, mais seulement qu'il est impossible de transmettre entre deux lieux un message plus rapidement qu'à la vitesse  $c$ . La tache lumineuse ne transmet aucun message entre les deux points A et B de l'écran.



En haut : transmissions téléphoniques à la vitesse  $c$  En bas : la lumière émise par un puissant phare (un tour en dix secondes) frappe un écran circulaire lointain : la tache lumineuse se déplace alors sur l'écran beaucoup plus rapidement que  $c$  ! Néanmoins, elle ne permet pas à un émetteur situé en A de transmettre un message à B.

## Acte III - Les voyageurs

*Sur la terrasse, sous les pins, devant un champ d'oliviers qui dansent dans la chaleur intense de l'après-midi. Crissement des cigales. Une table de ping-pong est disposée au bord d'une piscine. De temps à autre, Sophie et Jean échangent des balles.*

JEAN. – Aujourd'hui, je voudrais savoir quel est ce « quelque chose » qui se déplace à la vitesse  $c$  ? Finalement, qu'est-ce que la lumière ? Ressemble-t-elle à de minuscules balles de ping-pong ?

SOPHIE. – Ne sois pas trop pressé, nous n'y sommes pas encore et nous allons faire un détour : interrogeons-nous d'abord sur ce qui est transporté à la vitesse  $c$ .

JEAN. – Élémentaire, ma chère ! La lumière transporte de la chaleur.

SOPHIE. – Doucement : la chaleur est la sensation qu'éprouve ta peau ou ce qui produit l'élévation du thermomètre. D'ailleurs, tu sais bien que la chaleur, c'est l'agitation désordonnée des atomes d'un corps.

JEAN. – Oui, j'aurais dû dire que la lumière transporte de l'ÉNERGIE, quoique je ne sache pas très bien comment. Je sais que l'ÉNERGIE peut prendre bien des formes, mais qu'elle se conserve exactement – par exemple, si j'en mesure la quantité en joules, ou en CALORIES – lors de ses transformations. Donc si la lumière paraît apporter de l'énergie à un corps, par exemple en l'échauffant, c'est bien qu'elle a transporté cette énergie.

SOPHIE. – Oui : de fait, lorsque la lumière interagit avec de la matière, cette énergie transportée peut se transformer

de bien des manières. Elle peut échauffer un corps en étant absorbée plus ou moins complètement par ses atomes, ou bien produire des réactions chimiques : ainsi, dans le feuillage des oliviers qui sont devant nous, la PHOTOSYNTHESE découverte en 1845 par le physicien allemand Julius Robert von Mayer ; ce processus transfère l'énergie de la lumière solaire à des molécules appelées ATP – l'adénosine-triphosphate cellulaire – tout en libérant des molécules de dioxygène  $O_2$  à partir de l'OXYGÈNE contenu dans l'eau  $H_2O$ . Ainsi du jaunissement du papier journal, de la transformation des ions argent dans la pellicule photographique, comme l'a mis le premier en évidence Nicéphore Niépce en 1816, ou, encore, des transformations chimiques de la molécule appelée « rhodopsine », qui est présente dans les photorécepteurs de la rétine de l'œil et se trouve au début de la chaîne qui conduit la sensation lumineuse jusqu'au CORTEX cérébral.

JEAN. – Que d'actions étonnantes provoquées par l'énergie que transporte la lumière !

SOPHIE. – Mais il s'en trouve bien d'autres encore : ainsi l'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE se produit chaque fois que cette énergie lumineuse arrache à un atome un électron, qui devient disponible pour fournir un courant ou une tension électriques. C'est le principe des panneaux solaires, faits de silicium, mais aussi celui des minuscules cellules qui forment la rétine artificielle de nos appareils photographiques numériques. La lumière peut aussi mettre en mouvement les électrons du métal qui constitue une antenne radio, et produire un courant : c'est ainsi que fonctionne un poste à modulation de fréquence ou un radiotélescope détectant

l'onde lumineuse émise par une lointaine GALAXIE.

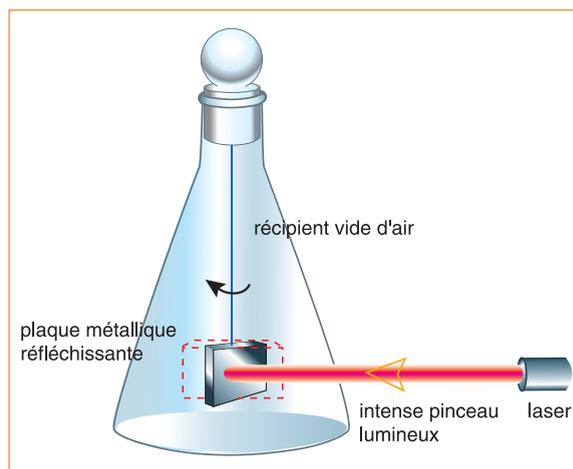
JEAN. – Je crois avoir compris : ce « quelque chose » qui voyage avec la lumière, ce n'est que de l'énergie qui se déplace, y compris dans l'espace vide de matière qui sépare les galaxies. Pourrais-je, par analogie, comparer ce transport d'énergie par la lumière à un autre transport d'énergie, celui qu'assure le son ? Écoute comment cette cigale sur le pin, là-haut, émet de l'énergie sonore par le mouvement de ses élytres : l'onde sonore dans l'air transporte alors cette énergie qui parvient finalement à mon oreille et met en branle mon tympan.

SOPHIE. – Oui, et je retiens au passage ta remarque : tu as bien conçu que le VIDE – celui que nous obtenons lorsque, à l'aide d'une pompe, nous éliminons parfaitement tous les atomes d'un certain volume – n'est pas vraiment vide de tout contenu physique, puisqu'il peut contenir de l'énergie. Mais cela nous entraînerait trop loin... Avant de quitter cette question, conviens toutefois que l'énergie est une quantité qui n'a pas de direction particulière (ce n'est pas une force, ce n'est pas un VECTEUR, disent les plus savants). Or le transport de cette énergie se fait, lui, dans une direction bien précise, celle du rayon lumineux : la lumière transporterait-elle en outre une autre quantité, quelque chose qui possède une direction ? Tu vas être surpris au récit d'une ou deux expériences. Imagine un récipient en verre vidé de tout atome, dans lequel est suspendu par un fil fin une légère plaque métallique réfléchissante (cf. le dessin ci-

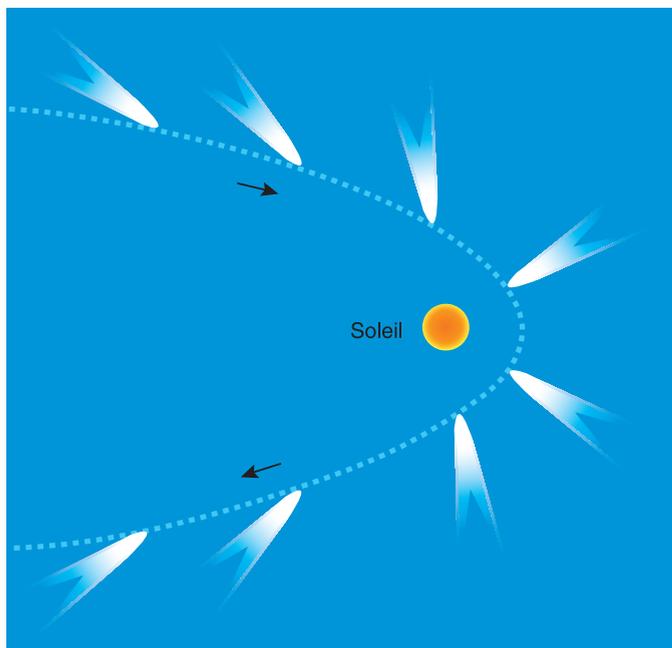
dessous). Éclairons la plaque avec le faisceau de mon laser ou de la lumière solaire : nous la voyons se déplacer, comme poussée par le rayon de lumière. Un mouvement apparaît donc dans une direction précise, et nous dirons que la plaque, non seulement reçoit de l'énergie, mais encore « du mouvement » (qu'on appelle QUANTITÉ DE MOUVEMENT, car un corps en mouvement peut en contenir plus ou moins, selon sa masse et sa vitesse). Comme l'énergie, la quantité de mouvement peut se manifester de diverses façons, mais elle se conserve dans ses transformations ; songe au choc de deux boules sur ce billard : si la blanche s'arrête, la rouge part, emportant la quantité de mouvement de la blanche. Il n'est donc pas sot de faire l'hypothèse que la lumière transporte aussi une certaine quantité de mouvement, une IMPULSION qu'elle peut communiquer et qui produit alors un mouvement dans une direction bien déterminée.

JEAN. – Mais si la lumière est capable de pousser ainsi la matière, on pourrait l'utiliser pour une propulsion, réaliser une voile solaire...

SOPHIE. – Tu ne crois pas si bien dire :



L'impulsion transportée par la lumière du laser pousse la plaque métallique, suspendue dans le vide à un fin fil.



La queue d'une comète est toujours dirigée à l'opposé du Soleil qui l'éclaire.

« à partir de rien », il nous faut bien conclure que la lumière les transporte : l'interaction de la lumière avec la matière les rend alors perceptibles et même mesurables.

## Acte IV- La nature des choses

*Vaste bibliothèque, au mur un tableau de Vermeer, un portrait de Nicéphore Niépce, une photographie d'Albert Einstein jeune, en compagnie de sa femme Mileva. La pièce jouxte un billard qu'occupent des joueurs*

*invisibles : bruits du choc des boules. Par la porte ouverte, on distingue la piscine.*

certain y songent pour naviguer dans l'espace, pour les voyages interstellaires. Le grand Johannes Kepler avait remarqué que la queue des COMÈTES, formée – nous le savons aujourd'hui – de minuscules grains de poussière, est toujours dirigée à l'opposé du Soleil (cf. le dessin ci-dessus). Il en avait déduit que le Soleil devait agir à distance sur cette queue, mais n'avait su proposer une explication. Aujourd'hui, nous savons que c'est la **PRESSION DE RADIATION** de la lumière qui en est responsable, cette pression qui, avec une voile adaptée, fournira peut-être demain un moyen de propulsion permettant d'atteindre les étoiles les plus proches du Soleil en un siècle environ...

Nous pouvons donc raisonnablement conclure : nous ne savons toujours pas ce qu'est la lumière, mais lorsque, après son parcours, nous observons son interaction avec de la matière (végétaux, plaque métallique...), nous constatons que se manifestent alors de l'énergie et du mouvement. Si nous sommes convaincus qu'énergie et quantité de mouvement ne peuvent pas apparaître

JEAN. – Tu me fais languir, vais-je enfin comprendre ce qu'est la lumière ? Elle est impalpable, il semble que je ne puisse en saisir que les effets...

SOPHIE. – Oui, pas question de regarder de la lumière au microscope ! Quand la lumière se propage, elle nous est inaccessible aussi longtemps qu'elle n'a pas interagi avec de la matière : ces grains de fumée, ta peau, la chlorophylle d'une feuille, ma rétine... Pourtant, nous voulons absolument nous faire une idée de ce « quelque chose » : une idée, un modèle, une représentation, une théorie, utilise le terme que tu veux. Nous cherchons une façon de décrire avec nos mots cette mystérieuse réalité. Veux-tu te livrer à cet exercice ?

JEAN. – J'imaginerais bien la lumière faite de particules très fines, impalpables, émises par les lampes ou le Soleil et se

propageant à la vitesse  $c$ . Nos balles de ping-pong d'hier, une boule de billard transportent bien de l'énergie et aussi de l'impulsion : cela ressemble à ce que nous voulons.

SOPHIE. – Tu rejoins le grand Newton qui, en 1730, conjecturait dans le troisième volume de son ouvrage *l'Optique* : « Les rayons de lumière ne sont-ils pas de tout petits corps émis par les objets qui brillent ? » Mais si ce modèle est bon, que devrait-il se produire lorsque deux pincesaux de lumière se croisent (*cf.* ci-contre, à gauche) ?

JEAN. – De temps à autre, ces « petits corps » devraient en heurter d'autres, rebon-

dir et s'éparpiller. Il me semble que je n'ai jamais observé cela.

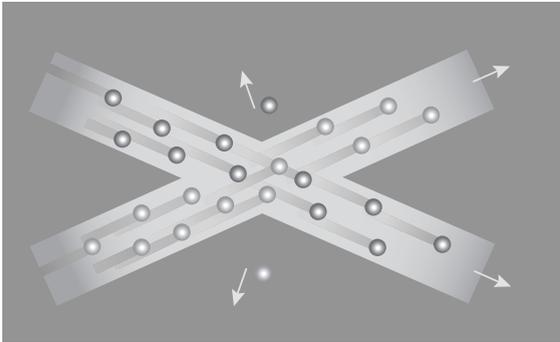
SOPHIE. – Ni toi ni personne, car aucune expérience n'a jamais réussi à en manifester les collisions. Voilà de curieux « petits corps » qui pourraient s'interpénétrer sans s'affecter mutuellement ? À coup sûr, ils seraient bien différents de la matière que nous connaissons. Mais quelle autre possibilité imaginer ?

JEAN. – Ne pourrait-on concevoir la lumière à la manière de ces ONDES que le vent crée à la surface de la piscine ? Il y a « quelque chose » qui se propage, c'est clair. Ces ondes ont une vitesse, elles transportent

de l'énergie et de l'impulsion : il suffit de voir comme la houle arrivant sur une côte est capable de briser une digue. En outre, il me semble bien que des ondes peuvent se croiser sans problème. Lorsque je suis arrivé en avion à Nice, j'ai regardé les sillages des bateaux dans la baie des Anges (*cf.* page suivante, à droite) : ils se croisaient, puis continuaient leur chemin comme si rien ne s'était passé. Tu peux d'ailleurs refaire l'expérience en jetant deux cailloux dans cette piscine : regarde bien, les « ronds dans l'eau » qu'ils vont créer se croiseront sans se modifier. Tout cela ressemble à ce que font deux faisceaux de



Dans *L'Atelier du peintre*, Vermeer démontre sa science de la lumière, dont la propagation en ligne droite est à la base de la perspective et dont l'interaction avec les matières, puis l'œil, donne un jeu infini de couleurs. Kunsthistorisches Museum, Vienne, Autriche. © The Bridgeman Library, New York

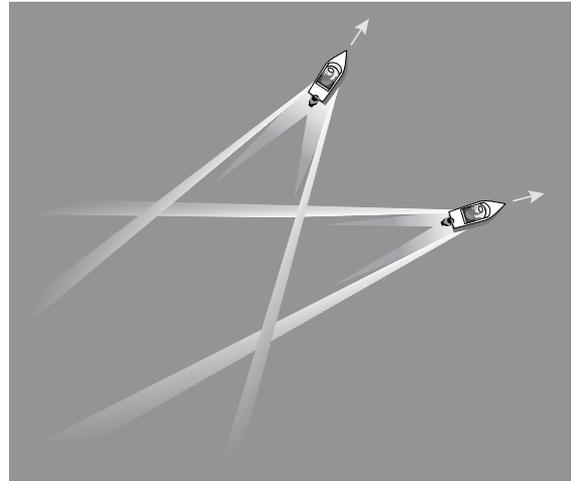


Deux jets de particules se croisent : de temps à autre, une collision éjecte une particule dans une direction quelconque. Ci-contre : deux sillages de bateaux se croisent : après la rencontre, les sillages continuent sans avoir été modifiés par celle-ci.

lumière, se croisant dans le vide sans se perturber mutuellement.

SOPHIE. – Voici donc un autre modèle : Newton y avait aussi pensé. Mais il avait élevé une objection : « [...] [si la lumière était faite de vibrations], ne devrait-elle pas suivre des chemins tordus, détruire ainsi les ombres et se faufiler dans toutes les anfractuosités comme le fait le son ? » (Lettre à Oldenburg, janvier 1675). Il avait d'ailleurs fait une expérience, dans laquelle l'addition de deux lumières produisait de l'obscurité (comme celle décrite page 282) ! Cela l'étonnait beaucoup, car il ne parvenait pas à se l'expliquer avec ses « très petits corps ». Je te proposerai tout à l'heure d'y revenir.

Mais essayons de poursuivre cet autre modèle, cette idée de vibrations. À peine un siècle plus tard, en 1801, un autre Anglais, Thomas Young, médecin et physiologiste, déchiffreur de hiéroglyphes comme Champollion, fera une expérience aussi



extraordinaire par ses conséquences que simple par son principe. Avant d'en discuter, exécutons-la nous-mêmes et apprécions-la, car, depuis deux siècles, elle n'a cessé d'inspirer les scientifiques et reste actuelle.

JEAN. – Voici qui me surprend : tout à l'heure, nous disions que des corpuscules de lumière, s'ils existaient, n'agissaient jamais l'un sur l'autre. Et voici qu'ajoutant de la lumière à de la lumière, nous faisons tantôt de l'obscurité, tantôt de la lumière, obtenant ces lignes alternativement lumineuses et noires. Ces corpuscules-là, s'ils existent vraiment, ne ressemblent guère à ce que nous appelons « corpuscules ».

SOPHIE. – On appelle les lignes que tu vois des franges d'INTERFÉRENCE, et on dit que la lumière passée par le trou  $T_2$  interfère, sur ta rétine, avec la lumière passée par le trou  $T_1$ . Pour des corpuscules, ce comportement serait effectivement surprenant, mais, pour des ondes, il ne l'est guère.

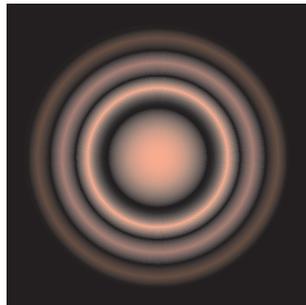
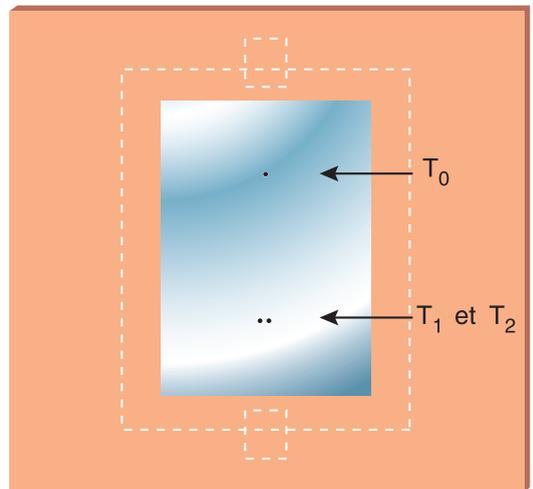


Un cadre de carton léger, environ de 6 x 6 cm (extérieur) et 4 x 4 (intérieur) sur lequel est scotchée une feuille de papier aluminium. Le tout est placé contre une surface assez dure (plastique) et, avec la pointe d'une aiguille fine, on fait dans le papier aluminium trois trous aussi égaux que possible (pression égale

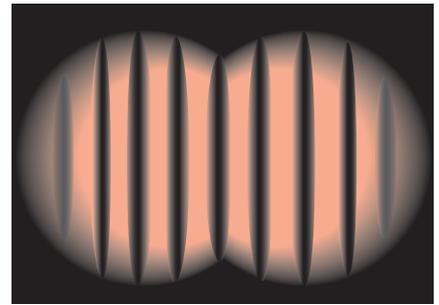


de l'aiguille) : l'un isolé ( $T_0$ ), les deux autres ( $T_1$  et  $T_2$ ) adjacents et proches (moins d'un millimètre si possible : faire plusieurs essais et garder le meilleur). La source de lumière est très commodément une de ces petites lampes de poche dites Maglite<sup>®</sup>, dont on a ôté le réflecteur, pour obtenir une source blanche, intense et de très petite taille. On regarde d'un seul œil, en mettant la plaque tout près de l'œil, la source étant placée à quelques mètres de distance : tantôt au travers du trou  $T_0$ , tantôt au travers des deux autres trous à la fois (c'est-à-dire au travers de la paire  $T_1$ - $T_2$ , placée horizontalement).

L'aspect observé est le suivant : au travers de  $T_0$ , la source apparaît circulaire, plus ou moins entourée d'anneaux. Au travers de la paire, la source est semblable, mais traversée de fines lignes verticales, alternativement noires et claires, dont le contraste diminue lorsqu'on s'éloigne du centre. Ce sont les franges de Young, qui disparaissent si l'on bouche l'un des trous  $T_1$  ou  $T_2$ . Elles tournent si l'on fait tourner la paire, devenant horizontales si celle-ci est verticale. On en améliore le contraste en utilisant un filtre coloré.



$T_0$



$T_1$  et  $T_2$



Sophie et Jean se rendent au bord de la piscine, chacun à une extrémité de celle-ci. Chacun tient une planchette parallèle à la surface de l'eau et frappe celle-ci de façon périodique, ce qui met l'eau en mouvement (cf. le dessin ci-contre, à gauche). Deux ondes, d'égale amplitude, se propagent alors en sens opposé (a). Un bouchon, au milieu de la piscine, manifeste le passage de ces ondes par son mouvement vertical. Les ondes A et B atteignent les extrémités de la piscine, s'y réfléchissent et reviennent en sens inverse : on observe qu'alors la surface de l'eau présente des bandes parallèles et fixes, selon lesquelles, alternativement, l'eau demeure au repos, ou bien ne cesse d'être en mouvement.

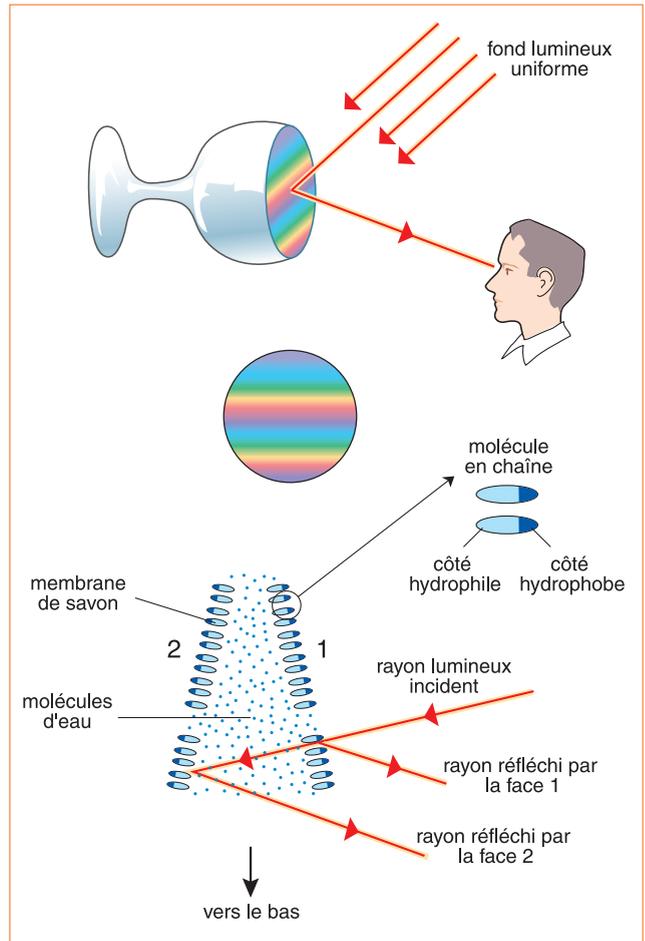
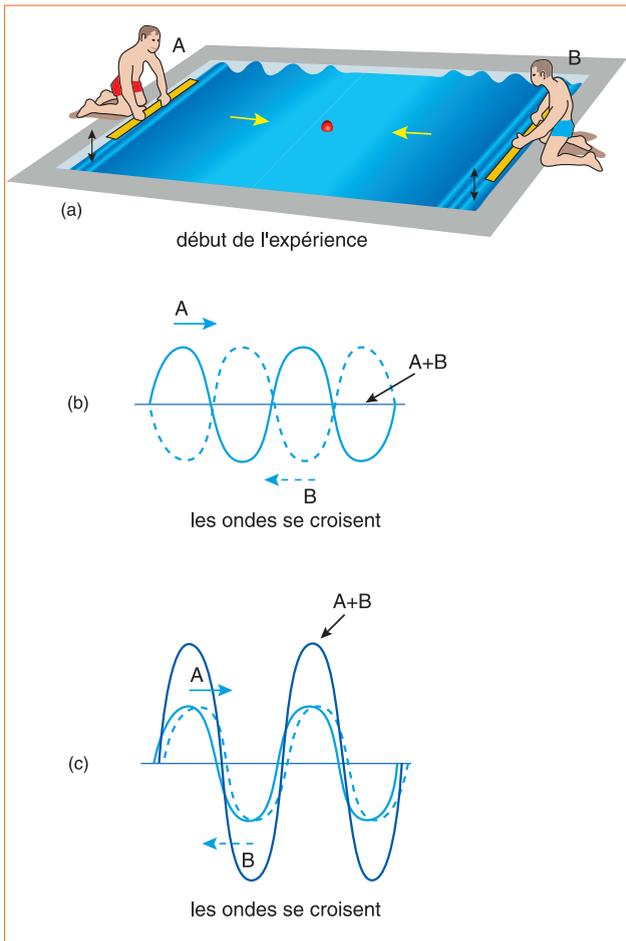
Si l'onde A possède une crête, au point où l'onde B qui la croise possède un creux, le bouchon ne s'élève ni ne s'abaisse : les deux ondes se neutralisent (b). En revanche, lorsqu'une crête de A croise une crête de B, le bouchon s'élève davantage, les crêtes s'ajoutant, et, de même, lorsqu'un creux de A croise un creux de B, le bouchon s'enfoncé davantage, les creux s'ajoutant (en négatif) (c).

Deux ondes, chacune provoquant le mouvement de l'eau, parviennent donc à se neutraliser pour rendre l'eau immobile.

SOPHIE. – Je vais te proposer une autre expérience, tout aussi intéressante.



Mélanger dans une bouteille deux cuillères à soupe de liquide lave-vaisselle, une cuiller à café de glycérine (vendue en pharmacie) et deux cuillers à soupe d'eau, puis verser un peu de ce liquide dans une soucoupe. Retourner un verre à pied sur le liquide : une membrane de savon se forme sur l'ouverture du verre (cf. le dessin ci-dessous, à droite). Mettre verticale cette membrane, en lui faisant réfléchir vers l'œil une lumière diffuse (écran blanc, rideau, fond du ciel) et la regarder soigneusement jusqu'à ce qu'elle claque... et recommencer autant de fois que nécessaire. Des lignes horizontales, alternativement sombres et lumineuses, colorées, apparaissent et se déplacent jusqu'à ce que la membrane claque. Si l'on regarde les bandes au travers d'un filtre coloré (filtre photo, par exemple), on ne voit plus que des bandes alternativement noires et brillantes, qui sont naturellement de la couleur transmise par le filtre. La solidité de la membrane vient de l'organisation des molécules de détergent : comme dans la membrane d'une cellule vivante, ces très longues molécules sont des chaînes dont une extrémité est attirée par l'eau et l'autre la fuit. Entre les deux membranes, l'eau coule sous son propre poids, si bien que la lame de savon est plus épaisse vers sa base, présentant ainsi un aspect prismatique. La lumière se réfléchit en partie sur une des faces, en partie sur l'autre, et ces deux lumières interfèrent. Lorsque l'épaisseur de la membrane est telle qu'à un sommet de l'une correspond toujours un creux de l'autre, nous voyons une ligne noire, et, alternativement, l'opposé.



Couleurs d'une membrane de savon..

Au bord de la piscine.

SOPHIE. – Comment décrire ce que tu viens de voir, quelles hypothèses proposerais-tu pour en donner une explication ?

JEAN. – C'est très joli, et cela me rappelle toutes sortes de couleurs qui ressemblent à ce phénomène : bulles de savon, mais aussi taches d'huile sur l'eau ou encore les brillantes couleurs des ailes de scarabées. Ces couleurs, comme celles de l'arc-en-ciel, paraissent bien plus pures que celles de la palette du peintre, et surtout elles sont changeantes, elles sont produites avec des corps incolores, transparents, auxquels ne semble pas attachée une couleur particulière, tel le liquide dans cette soucoupe. Seraient-elles produites par la lumière elle-même ?

SOPHIE. – Tu dis juste, mais souvenons-nous que la lumière blanche est en fait un mélange, comme nous l'apprennent l'arc-en-ciel ou la réflexion d'une lumière blanche à la surface d'un DVD ou d'un cédérom : le blanc n'est qu'une sensation fabriquée par notre rétine et notre cerveau. Il vaut mieux regarder la lame réfléchissant une lumière simple, formée d'une seule couleur, et les lignes sombres et claires sont alors tout à fait évidentes.

JEAN. – Je comprends : il semble cette fois que nous tenions le bon modèle ! Mais si la lumière est une onde, comme les vagues elle possède une LONGUEUR D'ONDE, c'est-à-dire la distance qui sépare deux crêtes successives. Je n'ai aucune idée de la valeur de cette quantité, disons pour cette lumière rouge que nous venons d'utiliser : peut-on la mesurer en centimètres, en millimètres ?

SOPHIE. – Bravo : c'est là que Young a vraiment été brillant. Il montre que les

franges faites en lumière rouge sont moins serrées que celles faites en lumière bleue (comme tu peux le vérifier toi-même), et a déduit, par un peu de géométrie élémentaire (cf. le dessin p. 285) que : longueur d'onde de la lumière bleue  $\approx 0,4 \mu\text{m}$  ; longueur d'onde de la lumière rouge  $\approx 0,7 \mu\text{m}$ . (Un micromètre vaut un millième de millimètre : c'est petit, mais pas tant que cela...) Par là même, Young comprend, et nous avec lui, que ce qui distingue les différentes couleurs de la lumière est simplement leur longueur d'onde. À chaque couleur correspond une longueur d'onde, et même les lumières auxquelles nos yeux sont insensibles sont parfaitement caractérisées par une longueur d'onde particulière : l'infrarouge, par exemple, c'est de la lumière dont les longueurs d'onde sont un peu plus grandes que celles du rouge, puisqu'elles valent quelques micromètres.

JEAN. – Donc, tout va bien : la lumière n'est pas faite de corpuscules, mais d'ondes. Nous avons trouvé. Mais il me reste une question : les ondes requièrent un milieu matériel pour se propager, l'air pour les sons, la surface de l'eau pour les vagues. Quel est le milieu qui propage la lumière, puisque nous avons vu que, contrairement au son, elle se déplace même dans le vide... qui, par définition, est vide de toute matière ?

SOPHIE. – Cela non plus n'avait pas échappé à Newton : il avait même dénommé ce milieu, en l'appelant « éther ». Il usait d'un terme qui n'avait rien à voir avec l'éther de pharmacie, produit chimique, mais qui se rapportait plutôt, dans son étymologie grecque, à l'air le plus pur possible, aux espaces célestes, à quelque chose de parfaitement subtil et insaisissable. Inutile



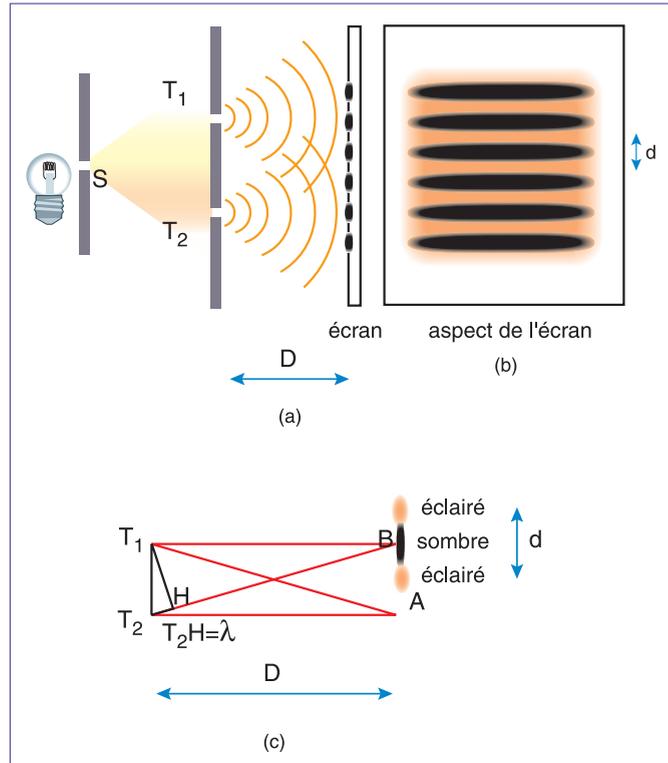
Disposons  $T_1$  et  $T_2$  à même distance de la source  $S$ , de façon à ce que la lumière issue de  $S$  les atteigne au même instant. Chacun des trous éparille la lumière (parce qu'elle se comporte comme une onde), formant ainsi deux cônes de lumière qui vont se recouvrir partiellement sur l'écran (a). Un point quelconque

de l'écran est donc éclairé simultanément par  $T_1$  et  $T_2$ , mais ses distances à  $T_1$  et  $T_2$  sont différentes, la lumière ne met donc pas le même temps à l'atteindre : selon sa position, une crête peut toujours s'y superposer à une crête, et l'écran y sera toujours éclairé, ou bien une crête toujours s'y superposer à un creux, et l'écran y sera toujours sombre. Voici pourquoi l'écran présente des lignes alternativement claires et sombres (b), comme dans les observations précédentes. La figure géométrique (c) montre la relation de proportionnalité très simple qui existe alors entre trois grandeurs faciles à mesurer : la distance ( $T_1 T_2$ ), la distance  $D$  des trous à l'écran, l'intervalle  $d$  entre deux franges brillantes et la grandeur inconnue qui nous intéresse, la longueur d'onde de la lumière utilisée (traditionnellement appelée  $\lambda$ , lettre grecque lambda).

$$\lambda / T_1 T_2 = d / D$$

$$AT_1 = AT_2$$

$$BT_2 = BT_1 + \lambda$$



de te dire que les physiciens ont cherché à mettre en évidence cet éther. Ils n'y sont jamais parvenus et, vers la fin du siècle dernier, il a bien fallu admettre qu'il était si insaisissable qu'il n'existait pas...

JEAN. – Mais alors, qu'est-ce qui vibre ? Devons-nous renoncer à nos ondes ?

SOPHIE. – Oui, en partie au moins, mais pas seulement pour la raison que tu crois. Faisons encore un détour : je vais te décrire ce qui se passe lorsque de la lumière tombe sur une cellule photoélectrique ; tu vois de quoi il s'agit, de ce petit morceau de silicium qui équipe ton appareil photo et produit un courant électrique lorsqu'il est éclairé. Ce

courant est d'autant plus important que la lumière est intense : il suffit donc de mesurer le courant avec un ampèremètre et le calculateur de l'appareil photographique en déduit quelle exposition choisir.

JEAN. – Je suis perdu. La lumière serait-elle comme la chauve-souris de la fable de La Fontaine, tantôt oiseau, tantôt mammifère : « Je suis une onde, voyez mes franges ; je suis une particule, voyez mes quanta d'énergie » ?

SOPHIE. – Hé bien ! oui, il va falloir t'y résigner. Car réfléchis : nous cherchions à nous représenter la lumière d'une façon concrète, parlante, de manière à élaborer un modèle

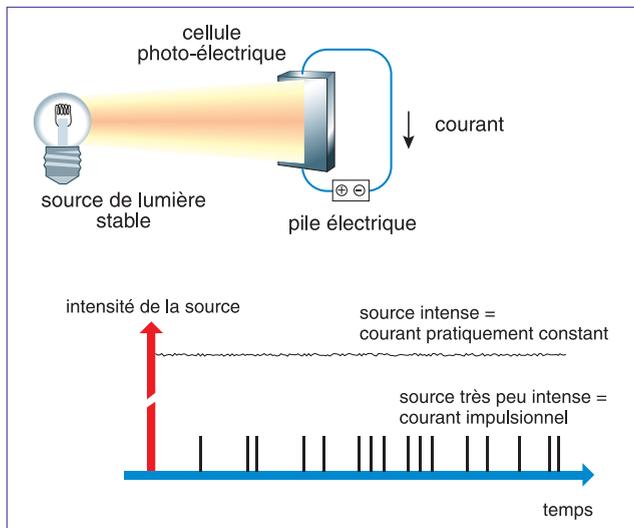


J'éclaire avec une source de lumière d'intensité réglable une cellule photoélectrique et observe un courant électrique. Je diminue l'intensité de la lumière et le courant, logiquement, diminue. Si je diminue encore, le courant se met à prendre une étrange apparence. Au lieu de poursuivre sa décroissance, il devient très irrégulier, formé de brèves pointes de courant à certains instants. Ces instants sont répartis tout à fait au hasard, tantôt espacés, tantôt proches, et ces pointes de courant sont séparées par un courant nul. Si je diminue encore l'intensité, les pointes de courant subsistent, identiques, mais deviennent de plus en plus rares. Toutefois, aussi longtemps que la source n'est pas totalement éteinte, il y aura, à des intervalles de temps longs, des pointes isolées et réparties parfaitement au hasard au cours du temps.

On ne peut mieux résumer la réaction d'Einstein à ce résultat qu'en le citant : « C'est sur ce point, à notre avis, que la théorie ondulatoire [de la lumière] n'est pas juste. Il semble que, de ce point de vue, la théorie de l'émission de Newton [c'est-à-dire des particules] recèle plus de vérité que la théorie ondulatoire puisque, d'après elle, l'énergie qui est conférée à une particule de lumière lors de son émission n'est pas dispersée dans l'espace infini, mais reste disponible pour un processus élémentaire d'absorption. » Ce processus élémentaire, c'est la pointe de courant produite par l'absorption de la lumière. Einstein obtint, en 1921, le prix Nobel de physique – ce fut le seul qui lui fut décerné – pour cette explication de l'effet photoélectrique : lorsque la lumière interagit avec de la matière ordinaire (les atomes de silicium de la cellule photoélectrique, les molécules de rhodopsine de notre rétine, etc.), elle le fait de façon aléatoire et discontinue, en transférant par paquets l'énergie qu'elle transporte – on appelle ces paquets des QUANTA ou, encore, des « photons » (ce dernier nom ne fut donné qu'en 1926).

Cela rappelle un autre phénomène, celui de la désintégration d'une substance radioactive (qui n'a rien à voir avec la lumière). Si nous observons le comportement d'un certain nombre (disons un million) d'atomes d'uranium (isotope 238) absolument identiques et indiscernables, placés dans un récipient, nous constatons que, de temps à autre, un de ces atomes disparaît en se transformant en un autre atome. Les instants auxquels ces événements ont lieu, de même que le choix des atomes qu'ils concernent, sont entièrement répartis au hasard.

Voilà deux phénomènes qu'on appelle « quantiques », et qui se produisent à l'échelle microscopique de la structure de la matière, mettant en jeu des comportements bien différents de ceux que nous observons à notre échelle.



Les curieuses propriétés du courant photoélectrique : en haut, le montage comprenant une source de lumière et une cellule photoélectrique, dont on mesure le courant ; en bas, le courant en fonction du temps, dans le cas d'une source intense et dans celui d'une source très faible.

qui leverait une partie du voile de mystère qui entourait sa nature. Pour construire ce modèle, nous avons pris ce que nous avons sous les yeux : des boules de billard ou des

balles de ping-pong comme particules, des vagues sur l'eau comme ondes. C'est nous qui avons voulu forcer la lumière à rentrer dans ces habits-là : de fait, elle l'a accepté

d'assez bonne grâce, nous n'avons pas été entièrement déçus. Si, en revanche, nous avons cherché à la représenter autrement, par exemple comme un petit animal, gagnons que cela nous aurait conduits à un échec complet !

JEAN. – Je crois que je vois mieux maintenant ce qu'est un modèle adéquat pour les scientifiques.

SOPHIE. – Néanmoins, ces habits, construits sur notre expérience du monde et à notre échelle, n'étaient pas vraiment les bons. Après Einstein, il a fallu travailler encore beaucoup pour en tailler de meilleurs, faits sur mesure. Malheureusement, ces habits de bonne confection n'appartiennent pas à notre expérience courante : je ne

saurais t'en parler avec des mots simples. Nous allons nous quitter sur une frustration, et tu devras retenir ce côté chauve-souris de la lumière. Rassure-toi : avec quelques règles simples, énonçant quand il faut retenir l'aspect « onde » ou l'aspect « corpuscule », on parvient très convenablement à apprivoiser la lumière.

JEAN. – Je suis ébloui...

*Le jour est maintenant tout à fait tombé dans la bibliothèque. Par la fenêtre, on aperçoit quelques étoiles, un ver luisant dans l'herbe, les feux clignotants d'un avion.*

Rideau

## Et pour aller plus loin, quelques questions d'enseignants

La lumière est un sujet trop vaste pour que ce texte permette d'en analyser tous les aspects passionnants. Voici quelques compléments en réponse à des questions qui subsistent.

**Comment la lumière est-elle produite, celle qu'émet un éclair ou, encore, celle d'un corps chauffé ? Quelle différence existe-t-il entre une lumière « naturelle », celle par exemple qu'émet le Soleil, et une lumière « artificielle » ? Peut-on produire de la lumière possédant n'importe quelle longueur d'onde ?**

Dans tout corps matériel se trouvent des charges électriques minuscules et très mobiles, les électrons. Selon la nature et l'arrangement des atomes composant le corps, ces électrons demeurent plus ou moins liés à un atome (le corps est alors un plus ou moins bon isolant), ou bien se meuvent plus ou moins librement entre atomes (le corps est alors un plus ou moins bon conducteur de l'électricité, tels les métaux) ; parfois, le mouvement est encore possible mais moins libre (dans les semi-conducteurs comme le silicium). Il est bien des façons d'agir sur le mouvement de ces électrons : en chauffant le corps, qu'il soit conducteur ou isolant, on multiplie les collisions entre atomes et on communique ainsi par des chocs de l'énergie à leurs électrons ; ou bien en soumettant le corps, conducteur, à une tension électrique.

Or des électrons en mouvement accéléré produisent de la lumière : l'analogie (à ne développer qu'avec quelques précautions) serait celle du son émis par une membrane de tambour frappée, qui produit une onde sonore dans l'air qui l'entoure. La longueur d'onde de la lumière produite est fonction de l'importance de l'accélération des électrons : plus cette dernière est importante, plus la longueur d'onde est courte. C'est pourquoi un corps peu chauffé émet du rayonnement infrarouge (longueur d'onde d'un millième de millimètre ou micromètre), puis, quand sa

température augmente, émet une lumière d'abord rougeâtre, puis orangée, puis s'enrichissant en jaune, bleu, et, finalement, ce mélange de couleurs donne dans l'œil la sensation d'un blanc intense. C'est ainsi qu'est émise la lumière du Soleil, dont l'atmosphère que nous voyons est chauffée de l'intérieur par l'énergie que libère le réacteur nucléaire présent dans le cœur solaire. C'est encore ainsi que l'air, chauffé lors d'un orage par la décharge électrique entre deux nuages, émet la lumière de l'éclair.

Dans un conducteur soumis à une tension électrique alternative périodique, les électrons mis en mouvement accéléré oscillant vont également produire de la lumière : c'est ce qui se produit dans l'antenne d'un émetteur radio, puisque les ondes radio sont aussi de la lumière, à laquelle, cette fois-ci, l'œil est insensible. La fréquence des ondes de la FM est de l'ordre de 100 MHz (100 millions d'oscillations par seconde), ce qui correspond à une longueur d'onde de 3 mètres. Les diodes laser à semi-conducteurs, qui servent aux affichages lumineux (rouge, vert, jaune) dans la plupart des appareils tels que les magnétoscopes, appareils photo, etc., sont également des sources de lumière accordées. L'analogie est ici la corde de guitare accordée et pincée, qui vibre à une fréquence bien précise et met en mouvement l'air avoisinant où se propage une onde sonore ayant cette fréquence.

Les mécanismes de production de lumière, qu'elle soit artificielle ou naturelle, relèvent donc de la même physique, la différence résidant dans l'intentionnalité qui produit la seconde et adapte le dispositif au but recherché (lampe à filament, antenne de radio).

### **Comment comprendre que l'éclat de deux étoiles identiques mais situées à des distances différentes de la Terre nous apparaisse inégal ?**

La lumière émise à chaque instant par une étoile se propage dans l'espace qui l'entoure en s'en éloignant, à la manière de rides circulaires s'éloignant de leur source à la surface de l'eau. L'énergie que transporte cette lumière est répartie sur toute la surface de la « ride » (l'onde de lumière, qui forme une sphère autour de la source), laquelle va s'agrandissant lorsque augmente la distance à la source : il revient au même de dire que plus on est loin de la source de lumière, plus l'énergie disponible par unité de surface est petite. L'œil, qui capte la lumière par la surface de son iris (quelques dizaines de millimètres carrés), en captera d'autant moins (ce qui produira une sensation lumineuse d'autant moins intense) qu'il sera éloigné de la source de lumière.

### **Pourquoi certains corps sont-ils transparents et d'autres opaques à la lumière ? Pourquoi en frappant certains corps la lumière se réfléchit-elle et peut-elle changer de direction ?**

Pour produire de la lumière, il faut agiter les électrons présents dans la matière. Symétriquement, lorsque de la lumière rencontre de la matière, elle rend généreusement à celle-ci une partie de son énergie, en y mettant en mouvement les électrons. Ceux-ci vont plus ou moins bien supporter cette agitation, selon la liaison qui existe entre eux et les atomes du corps. Tantôt ces derniers vont absorber rapidement l'énergie des électrons, et la lumière va « s'user » en parcourant le corps, qui l'absorbe donc et apparaît opaque. Tantôt, au contraire, les électrons mis en mouvement vont produire à leur tour de la lumière, si bien que la lumière traverse le corps sans peine : il est transparent. Notons, au passage, que le traitement n'est en général pas indifférent à la longueur d'onde de la lumière : ainsi un beau saphir (cristal d'oxyde d'aluminium ou alumine, contenant un peu de cobalt) absorbe la lumière rouge mais laisse passer le bleu ; éclairé par une lumière blanche, il apparaît par transparence d'un beau bleu. D'autres corps sont transparents à l'infrarouge, ou aux rayons X, mais opaques à la lumière visible. Il existe une infinité de combinaisons possibles, qui expliquent la diversité des impressions lumineuses obtenues lorsque la lumière traverse (ou est DIFFUSÉE par) les pigments des peintures, les textures des tableaux ou des objets.

La réflexion de la lumière sur une surface polie (verre ou métal) résulte du mouvement des électrons de la surface, mouvement que produit la lumière incidente (celle qui arrive sur la surface) : ce mouvement produit à son tour une lumière dont une partie éventuellement poursuit son chemin au-delà de la surface (dans le verre, puisqu'il est transparent), mais dont une autre partie (de loin la plus importante dans le cas du métal) repart, donnant ce qu'on appelle la « réflexion ».

Ce changement de direction nous est plus évident avec l'usage du modèle particulaire de la lumière, puisque, alors, il est aisé de se représenter les corpuscules de lumière rebondissant sur la surface du corps et changeant ainsi de direction, comme lorsqu'une balle frappe un mur. Quoi qu'il en soit, comme l'écrivait joliment Jean Cocteau, « les miroirs feraient bien de réfléchir à deux fois avant de nous renvoyer notre image ».

## **Bibliographie**

*Le Trésor. Dictionnaire des sciences*, sous la direction de Michel SERRES et Nayla FAROUKI, Flammarion, 1997.

*La Lumière*, Bernard MAITTE, Seuil-Poche, 1981.

*Lumière et matière*, Richard FEYNMAN, Seuil-Poche, 1992.

*Traité des couleurs*, Johann GOETHE, Triades, 1983.

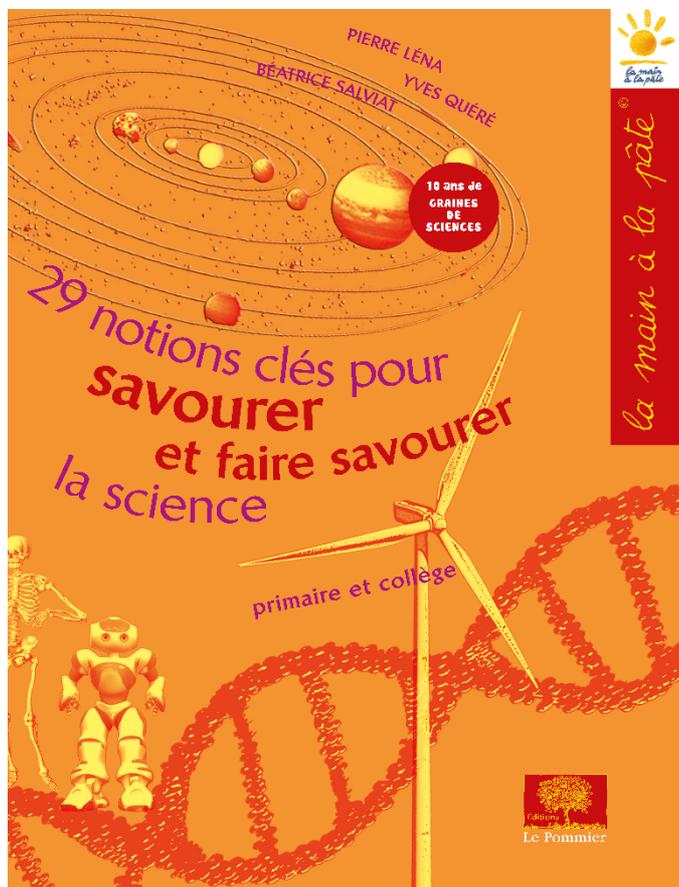
*Lumières*, Pierre LÉNA et Alain BLANCHARD, InterÉditions, 1990.

*Voyages dans le futur*, Nicolas PRANTZOS, Seuil, 1999, nouvelle édition, Le Pommier, 2009.

*D'où vient la lumière laser ?*, Evelyne GIL, « Les Petites Pommes du savoir », n°77, Le Pommier, 2006.

*La lumière à la loupe*, Roland LEHOUCQ, « Les minipommes », n°7, Le Pommier, 2005.

Cette ressource est issue de l'ouvrage *29 notions clés pour savourer et faire savourer la science*, paru aux Éditions Le Pommier.



## Le meilleur des Graines de sciences

Vous êtes enseignant, parent, éducateur... et vous manquez parfois de « munitions » pour répondre aux questions des enfants...

Or, en classe, à la maison, au centre de loisirs, celles-ci fusent : « Le Soleil va-t-il s'éteindre ? » « Est-ce qu'il y a des tremblements de terre sous la mer ? » « Où va l'eau qui tombe du ciel ? » « Pourquoi le ciel est-il bleu le jour ? » « Qu'est-ce que l'effet de serre ? » « Pourquoi les animaux migrent-ils ? » « C'est quoi le clonage ? »

Cet ouvrage de référence va vous aider à répondre à ce bombardement de curiosité... en toute connaissance de cause !

Fruit d'une rencontre entre des scientifiques et des enseignants, désireux de partager savoir et expérience, il est précisément conçu pour vous permettre d'acquiescer ou d'approfondir une culture scientifique, si précieuse pour appréhender le monde qui nous entoure... et pour l'expliquer !

Du Soleil à la cellule, du cycle de l'eau aux énergies renouvelables, de l'origine de l'homme au nanomonde, les 29 notions réunies dans ce volume constituent le bagage indispensable pour pérégriner, avec les enfants, en sciences, et ce, de la maternelle au collège. On les retrouve d'ailleurs dans le Socle commun de connaissances et de compétences, qui définit ce que l'école puis le collège doivent, en France, s'imposer de transmettre à tous les enfants.



### Fondation *La main à la pâte*

43 rue de Rennes  
75006 Paris  
01 85 08 71 79  
contact@fondation-lamap.org

Site : [www.fondation-lamap.org](http://www.fondation-lamap.org)

 FONDATION  
**La main à la pâte**  
POUR L'ÉDUCATION À LA SCIENCE