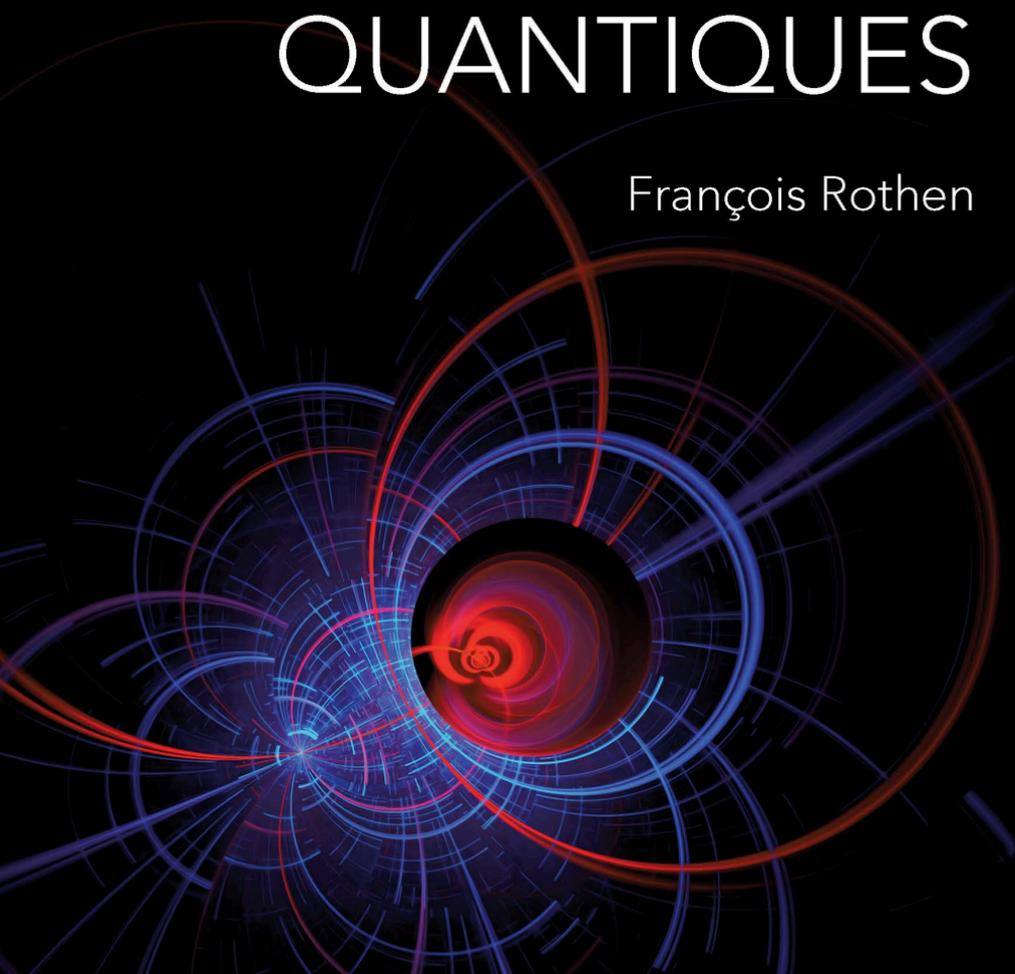


AUX LIMITES  
DE LA PHYSIQUE:  
LES PARADOXES  
QUANTIQUES

François Rothen





AUX LIMITES DE LA PHYSIQUE:  
LES PARADOXES QUANTIQUES



AUX LIMITES  
DE LA PHYSIQUE:  
LES PARADOXES  
QUANTIQUES

François Rothen

Egalement disponible dans la Collection «focus science»

**Le huitième jour de la création**

Jacques Neiryck

**300 questions à un astronome**

Anton Vos

**Science est conscience**

Jacques Neiryck

**Sacrée foudre**

*ou La scandaleuse invention de Benjamin F.*

Pierre Zweacker

**Vivre dans les champs électromagnétiques**

Pierre Zweacker

**Morts pour la science**

Pierre Zweacker

**Surprenante gravité**

François Rothen

**Et pourtant, elle tourne!**

François Rothen

**Technocivilisation**

*Pour une philosophie du numérique*

René Berger, Solange Ghernaoui-Hélie

**La fracture cryptographique**

Serge Vaudenay

**L'art de la sécurité**

*Ce que l'histoire de la criminologie nous enseigne*

Maurice Cusson

**Mille milliards de pattes (et au moins autant de plumes)**

*190 espèces surprenantes, envahissantes, menacées ou oubliées*

Daniel Cherix, dessins de Michel Krafft

Mise en page et dessins: Marlyse Audergon

Illustration de couverture: *Abstract techno background*, © DrHitch, [www.fotolia.com](http://www.fotolia.com)

Les Presses polytechniques et universitaires romandes sont une fondation scientifique dont le but est la diffusion des travaux de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne ainsi que d'autres universités et écoles d'ingénieurs francophones.

Le catalogue de leurs publications peut être obtenu par courrier aux

Presses polytechniques et universitaires romandes, EPFL – Rolex Learning Center,

CH-1015 Lausanne, par e-mail à [ppur@epfl.ch](mailto:ppur@epfl.ch),

par téléphone au (0)21 693 41 40, ou par fax au (0)21 693 40 27.

[www.ppur.org](http://www.ppur.org)

ISBN 978-2-88074-967-5

© Presses polytechniques et universitaires romandes, 2012

CH – 1015 Lausanne

Imprimé en Italie

Tous droits réservés.

Reproduction, même partielle, sous quelque forme ou sur quelque support que ce soit, interdite sans l'accord écrit de l'éditeur.

*A des amis de longue date,  
Daniel Monthoux et Robert Huguenin.*



## REMERCIEMENTS

Si cet ouvrage a vu le jour, c'est à Philippe Eberhard que je le dois. Il m'a guidé sur une voie dans laquelle je n'avais pas pensé à m'engager. Passionné par la physique quantique et tous les problèmes d'interprétation qu'elle pose, il s'est contenté de répondre à mes questions pour éviter de m'influencer, ce qui était la meilleure manière possible de se tenir à mes côtés. Une partie de cet ouvrage relate le rôle qu'a joué l'Université de Genève dans l'étude des problèmes liés aux corrélations quantiques. C'est notamment le cas du Groupe de physique appliquée (GAP) et de son directeur, Nicolas Gisin, avec lequel j'ai eu de nombreuses discussions. Cet ouvrage souligne l'intérêt que présente le développement de la cryptographie quantique, une activité initiée au GAP et qui a conduit à la création d'une entreprise consacrée aux technologies de l'information, ID Quantique. Son directeur, Grégoire Ribordy, m'a accueilli chaleureusement et a bien voulu répondre à mes questions. J'ai également eu la chance de pouvoir compter sur la compétence de nombre de mes collègues, soit au cours de discussions, soit qu'ils aient relu certains chapitres de mon texte. Par ordre alphabétique, j'ai le plaisir de nommer Wolfgang Bestgen, Christian Gruber, Robert Huguenin, Jean-Pierre Perroud et Valerio Scarani. Robert Huguenin et Philippe Martin ont relu mon manuscrit et m'ont fait des remarques et des suggestions judicieuses que je me suis empressé de suivre. Berna Rothen l'a également relu afin de faire la chasse aux coquilles ou aux éventuelles fautes d'orthographe. Je garde pour

la bonne bouche mon ami Jean-Willy Rossel. Bien que sa formation ne l'ait pas préparé aux problèmes de la physique, il n'a pas seulement relu certains des chapitres de cet ouvrage, mais il m'a patiemment écouté lorsque je lui en exposais le contenu, tout en faisant preuve d'une incessante curiosité. Ses réactions à la lecture de certains fragments du manuscrit m'ont été très utiles. Japhet Bagilishya et Patrick Stutz m'ont dépanné à chaque fois que j'étais victime des caprices de mon ordinateur ou de mon incompetence en matière informatique. Comme à l'accoutumée, Josiane Moll s'est efforcée de me procurer tous les documents dont j'avais besoin. Je n'aurais garde d'oublier les PPUR et leur directeur, Olivier Babel, qui ont bien voulu accepter mon ouvrage et qui se sont efforcés de m'aider dans cette entreprise. Je pense notamment à Sylvain Collette, à Christophe Borlat et à leurs collaborateurs.

A tous ces amis, j'exprime ma gratitude la plus vive.

# TABLE DES MATIÈRES

Remerciements .....	VII
Prologue .....	XI

## Partie 1 La genèse de la physique quantique

Chap. 1 Des ondes côté cour, des particules côté jardin .....	3
Chap. 2 La lumière nous en fait voir de toutes les couleurs ..	17
Chap. 3 Le noir est-il une couleur? .....	31
Chap. 4 Un gaz de quanta .....	45
Chap. 5 Quand l'atome devient quantique .....	55
Chap. 6 Ondes et particules, une coexistence pacifiée. ....	67

## Partie 2 Le hasard et l'incompatibilité

Chap. 7 Les protégés de Galilée .....	83
Chap. 8 Le courage de Max Born .....	99
Chap. 9 La nature fait mieux que le prestidigitateur .....	111
Chap. 10 Incertitude ou imprécision? .....	125

## Partie 3 Dieu pratique-t-il la télépathie?

Chap. 11 La théorie quantique est-elle lacunaire? .....	145
Chap. 12 La démonstration d'Orsay .....	155
Chap. 13 Les photons polarisés .....	169
Chap. 14 L'intrication .....	181
Chap. 15 Les photons sont-ils des adeptes de la transmission de pensée? .....	191

**Partie 4 Une retombée de la physique  
des quanta : la cryptographie quantique**

Chap. 16 Codage et piratage .....	207
Chap. 17 Cryptographie quantique .....	223
Chap. 18 Frères humains qui après nous vivez .....	241
Annexes .....	245
Glossaire .....	267
Bibliographie.....	283

## PROLOGUE

Quand il écrivit *Les voyages de Gulliver*, Jonathan Swift pouvait-il imaginer ce qu'il adviendrait de son chef-d'œuvre? De sa peinture au vitriol de la société anglaise et de la condition humaine, les générations futures firent un roman à l'eau de rose réservé à la littérature enfantine.

A Lilliput, Gulliver découvre des êtres semblables à lui en tout point, sauf en ce qui concerne la stature. Ces modèles réduits vivent dans un monde où la taille des végétaux, des animaux et des êtres humains sont réduits d'un facteur douze. A part quelques singularités socio-politiques, qui constituent le point central de l'ouvrage, la similitude entre Européens et Lilliputiens est complète :

Les mathématiciens de Sa Majesté [Lilliputienne] ayant établi que [ma taille] était par rapport à la leur ce que douze est à un, ils avaient calculé, d'après la similitude de nos corps, que ma contenance était au moins 1728 fois supérieure à la leur [ $1728 = 12^3$ ] et que, par conséquent, il me fallait la ration [alimentaire] d'un nombre égal de Lilliputiens. Par quoi le lecteur pourra juger de l'intelligence de ce peuple.

Le message de Gulliver est clair : le monde lilliputien est semblable au nôtre au changement d'échelle près. Swift est convaincu que les Lilliputiens marchent, courent et sautent

comme nous; qu'ils nagent et plongent comme nous le faisons. Gulliver ne le dit pas, mais nous comprenons que la distance parcourue en une heure de marche par ces minuscules créatures est encore dans un facteur douze en comparaison de la lieue que nous couvrons dans le même temps. Que les archers de Lilliput visent des cibles douze fois moins éloignées que les nôtres dans lesquels ils s'efforcent de planter des flèches douze fois plus courtes et douze fois moins rapides que les nôtres. Il donne une précision intéressante. Constatant que le volume moyen des Lilliputiens est nécessairement  $12 \times 12 \times 12 (= 12^3)$  fois inférieur au nôtre, il en conclut que nous devons manger  $12^3$  fois plus qu'eux. Or, contrairement à ce que pense Jonathan Swift, les conséquences d'une modification importante de la taille ne vont pas de soi: son message a beau être clair, il est incorrect.

La taille d'une espèce animale ou végétale n'est nullement arbitraire. Comme le dit J. B. S. Haldane,

[...] un lièvre ne pourrait être aussi grand qu'un hippopotame, une baleine ne saurait être aussi petite qu'un hareng. Pour chaque type d'animal, il existe une taille optimale; un important changement d'échelle entraîne nécessairement une modification de forme.

Quand Swift imagine une population humaine semblable à la nôtre mais ne mesurant que quinze centimètres, il néglige les innombrables conséquences qu'aurait un tel changement d'échelle. Pour éviter de mourir de froid, les Lilliputiens n'auraient que le choix entre l'augmentation de l'épaisseur de leurs vêtements et l'absorption d'un nombre bien plus considérable de calories que le rapport de 1728 à 1 ne le suggère. Pour s'en convaincre, il suffit d'observer les animaux qui nous entourent: un être de la taille d'une souris doit se nourrir constamment pour compenser une perte importante de chaleur par la peau et le pelage. Un éléphant, en revanche, a besoin de se baigner fréquemment pour évacuer la chaleur. On peut multiplier à l'envi

les exemples de ce type. La taille réduite des Lilliputiens les forcerait peut-être à porter des lunettes. Écoutons encore Haldane :

L'œil reste un organe peu efficace tant qu'il n'atteint pas une taille suffisante. [La rétine humaine] est composée d'une mosaïque de cônes et de bâtonnets [les récepteurs de la lumière] [...] dont la dimension ne pourrait être diminuée sans dommage pour la vision. Car il est impossible de former une image précise dont la taille serait inférieure à la longueur d'onde de la lumière.

Il n'est pas nécessaire d'entrer plus avant dans les détails : en biologie, un changement d'échelle n'est jamais innocent, et il en est de même en physique. Déposée sur un plateau de bois, une minuscule goutte de mercure adopte une forme sphérique sous l'effet des forces de capillarité. Si son volume augmente, en revanche, elle tend à s'aplatir : son poids devient prépondérant.

Qu'en est-il des lois de la nature ? Sont-elles également sensibles aux changements d'échelle ?

De l'atome aux amas de galaxies, on pense généralement que ce sont les mêmes lois qui dirigent l'évolution de l'univers, mais leurs manifestations sont bien différentes quand on change d'échelle. Alors qu'elle règle le ballet des planètes du système solaire, la gravitation ne joue qu'un rôle négligeable au niveau des atomes. A l'échelle microscopique, de nouveaux phénomènes font leur apparition tandis que, à notre échelle, leur action est complètement masquée. A mesure que l'on retire le voile qui recouvrait le monde microscopique, on observe des comportements que l'on ne connaissait pas dans le monde qui est à notre taille et à notre portée. Parce qu'ils étaient inconnus, ces phénomènes intriguent et vont même jusqu'à choquer.

Ces comportements déroutants, c'est la physique quantique qui les a mis en lumière. En veut-on des exemples ? Ils abondent. C'est la prise de pouvoir de la probabilité au niveau microscopique, c'est l'établissement instantané de corrélations entre particules distantes de plusieurs kilomètres. Ces manifestations sont

longuement discutées dans cet ouvrage tant elles surprennent, tant elles suscitent la perplexité ou même l'incrédulité. Et pourtant les lois du monde quantique s'intègrent parfaitement dans notre univers dans la mesure où elles partagent avec les lois de la physique classique un mystère encore plus grand: comment peut-on comprendre « la déraisonnable efficacité des mathématiques dans les lois de la nature » dont parle le physicien Eugene Wigner ?

La physique se partage entre la réalisation d'expériences, grâce auxquelles elle a accès aux faits, et les mathématiques, qui lui permettent d'édifier des théories. Mais on ne saurait séparer ces deux activités. C'est à partir des faits que s'élaborent les théories qui, en retour, permettent de prévoir de nouveaux phénomènes que l'expérience se charge de mettre en évidence. On peut cependant guider le lecteur dans le monde quantique sans l'obliger à passer par un formalisme mathématique auquel il n'est pas nécessairement préparé. C'est ce que l'on a tenté de faire dans cet ouvrage. D'autres l'ont fait, il valait la peine de tenter l'aventure une nouvelle fois. Parce que certains de ces processus ont des applications dans la vie de tous les jours, et parce qu'ils jettent une lumière nouvelle sur l'univers dans lequel nous vivons, un sentiment très présent chez de nombreux physiciens. Écoutons Schrödinger :

Quelle est donc [...] la valeur des sciences de la nature ? Je réponds : leur objet, leur but et leur valeur sont les mêmes que ceux de n'importe quelle autre branche du savoir humain. Bien plus, [...] aucune d'elle, prise seule, n'a d'objet ou de valeur ; seule l'union de toutes les sciences a un but et une valeur.

# **LA GENÈSE DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE**



# 1 DES ONDES CÔTÉ COUR, DES PARTICULES CÔTÉ JARDIN

## De la physique quantique en hors-d'œuvre

Quel rapport y a-t-il entre le naufrage du Titanic, les langages de programmation et la nature de la lumière? Le rapport se nomme G. I. Taylor, G pour Geoffrey et I pour Ingram.

Si vous demandez au premier physicien venu s'il a entendu parler de G. I. Taylor, il se raccrochera aux initiales pour tenter de l'identifier (comme les Thompson, les Thomson et les Wilson, les Taylor peuplent densément la physique). Si votre interlocuteur est familier avec la dynamique des fluides, il saura sans doute le reconnaître. C'est que G. I. Taylor est connu comme spécialiste des écoulements turbulents et de la météorologie. Et c'est là qu'intervient le naufrage du Titanic: à la suite de la catastrophe, on envoya des patrouilles contrôler les icebergs en Atlantique nord, et Taylor prit place comme météorologue sur le premier navire chargé de cette mission. Quant aux langages de programmation, ils font usage de ce que l'on nomme l'algèbre de Boole, du nom du mathématicien George Boole, grand-père maternel de Taylor.

En revanche, si vous posez à votre interlocuteur une nouvelle question: «Quelle contribution importante G. I. Taylor a-t-il apporté à la physique quantique?», il est probable que vous provoquerez chez votre vis-à-vis un haussement de sourcils incrédule. Les spécialistes de la dynamique des fluides et ceux de la physique quantique ne se fréquentent guère, si bien que votre

seconde question risque de passer pour un canular. Et pourtant, à l'instigation de J. J. Thomson, l'auteur de la découverte de l'*électron*, il a probablement réalisé une expérience significative sur la nature de la lumière. A ce sujet, au moment où G. I. Taylor se lance dans l'aventure, Albert Einstein vient de faire une hypothèse importante ; il soupçonne que la lumière pourrait être « granulaire ». Si le physicien le plus connu du 20<sup>e</sup> siècle a raison, cela signifie que l'on ne peut indéfiniment diviser un faisceau lumineux. Il existe une *quantité indivisible de lumière*, de même que l'atome est une quantité indivisible de matière. On y reviendra au chapitre 4. Est-ce cette affirmation que Taylor tente de vérifier ? Paradoxalement, on peut en douter car, dans l'article qui annonce son expérience, il ne cite nullement Einstein<sup>1</sup>. Avant de décrire l'expérience de Taylor, un bref retour en arrière est indispensable.

## Onde ou corpuscule ?

On ne peut s'étonner que la lumière ait éveillé de tout temps la curiosité de l'être humain. Le tout jeune enfant ne s'interroge guère sur son environnement immédiat, mais il vient un jour où il pose un regard inquisiteur sur tout ce qui l'entoure. C'est sans doute ce qui s'est passé chez nos ancêtres lointains. Sans remonter si loin, on note que Galilée a tenté de mesurer la vitesse de propagation de la lumière. Est-elle finie ou infinie ? « Cette obscure clarté qui tombe des étoiles » nous parvient-elle instantanément ou exige-t-elle un certain délai pour frapper notre rétine ? L'astronome danois Ole Rømer apporta la réponse : la vitesse de la lumière est finie et il est possible de l'évaluer.

---

<sup>1</sup> Dans l'article que Taylor consacre aux résultats de l'expérience, il parle bien d'« unités invisibles de lumière », mais il ne fait aucune allusion à Einstein. Cela ne change rien au principe de son expérience ou à la portée de ses résultats qui ne dépendent nullement de la conception que l'on se fait des fameuses unités.

En 1675, il constata certaines anomalies dans le mouvement des satellites de Jupiter et il comprit qu'elles s'expliquaient si *le mouvement de la lumière était progressif*, comme on disait alors, plutôt qu'instantané. Pour rallier la Terre, il fallait à la lumière un intervalle de temps d'autant plus grand que la distance satellite-Terre était plus considérable.

Par la suite, la question qui se posa tout naturellement concernait la nature de la lumière. Était-elle formée de *corpuscules* indivisibles? Dans ce cas, on aurait affaire à de véritables atomes de lumière<sup>2</sup>. Devait-on au contraire l'assimiler à une *onde*<sup>3</sup>? Onde, ondulation : les deux termes décrivent une agitation qui se propage. Quand le pêcheur tire sur sa ligne et agite le bouchon rouge et blanc qui s'y accroche, l'eau se balance au passage des vaguelettes circulaires qui proviennent du petit flotteur coloré. Ce sont des ondes. La chronologie de l'effet se calque sur celle de la cause : la surface de l'eau oscille à la même *fréquence* que le bouchon.

La musique y est pour beaucoup : les Anciens connaissaient déjà la relation entre vibration et son. Mais entre l'oscillation de l'instrument à corde et le son, impression auditive, il y a un phénomène physique important, l'onde acoustique ou sonore, une oscillation qui se propage dans l'air, l'eau ou les solides. Son origine est longtemps restée mystérieuse. Au 17<sup>e</sup> siècle, Otto von Guericke montra que, contrairement à la lumière, le son ne se propage pas dans le vide, mais la relation exacte entre l'air et le son lui échappa. Du point de vue pédagogique, les ondes sonores présentent un handicap face aux vaguelettes : elles sont invisibles.

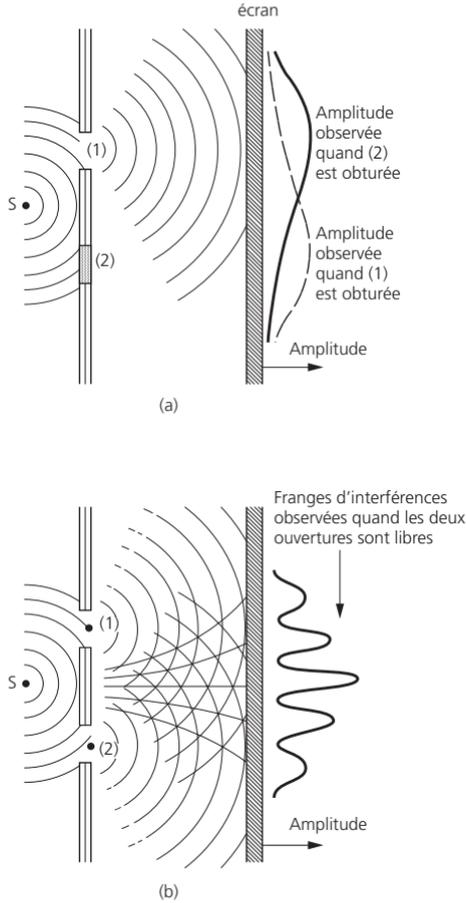
Les ondes se reconnaissent à une propriété universelle : les *interférences* qu'elles produisent.

Des ondes circulaires sont produites par une « source » S, en réalité un vibreur qui fait osciller verticalement la surface de l'eau contenue dans un récipient (fig. 1.1). Quand ces ondes

---

<sup>2</sup> Pour les Grecs, « atome » signifiait « insécable ».

<sup>3</sup> Lorsqu'un nom ou une expression sont en italique gras, ce qui se produit souvent à leur première apparition, le lecteur peut se reporter au glossaire qui en donne une définition.



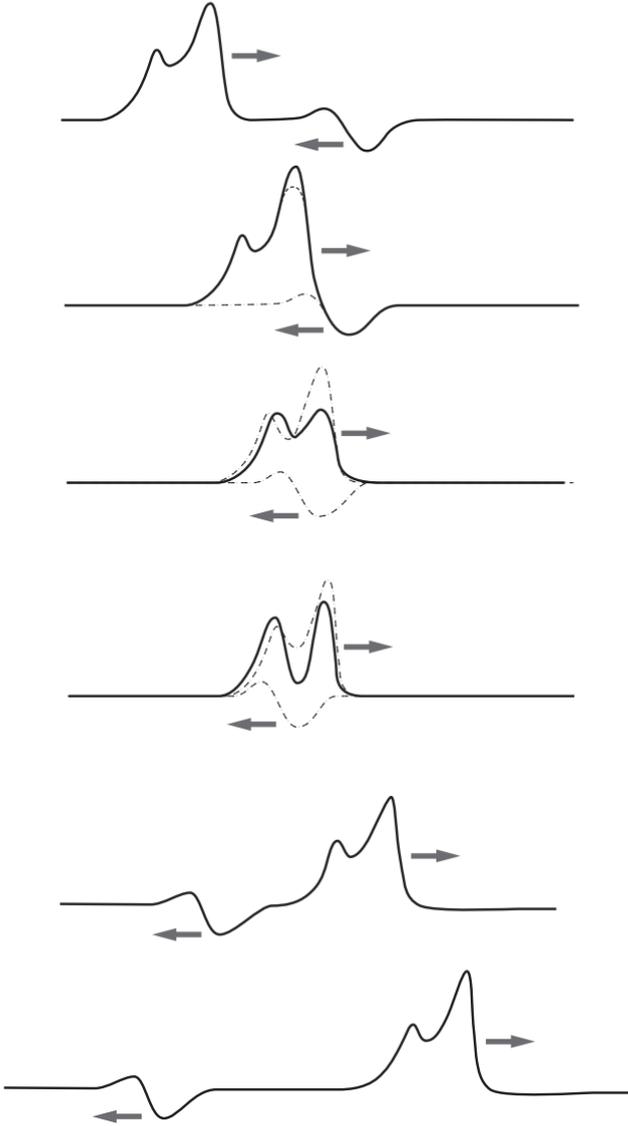
**Fig. 1.1 Interférences à la surface d'un bassin contenant de l'eau.** Entre une source  $S$  et une paroi transversale qui fait office d'écran, on interpose une paroi percée de deux ouvertures. En réalité, la source est constituée d'une tige fine animée d'un mouvement vertical oscillatoire qui produit des ondes concentriques à la surface de l'eau. Dans un premier temps, l'une des ouvertures est obturée. Les ondes passent par l'autre ouverture et progressent vers la paroi. On a reporté l'amplitude des ondes (leur dénivellation maximale) telle qu'elle pourrait être mesurée à proximité de l'écran. (a) Quand les deux ouvertures sont libres, elles se comportent comme deux sources secondaires. Le long de l'écran, on note la présence d'une série de pics caractéristiques d'un phénomène d'interférences. (b) **Interférences lumineuses.** La même expérience peut se refaire avec une source de lumière monochromatique à la place de la tige vibrante. Sur la plaque photographique située au-delà des deux fentes se dessinent alors des franges d'interférences alternativement brillantes et sombres. L'échelle est très différente.

rencontrent un obstacle, elles sont réfléchies (la figure ne le montre pas), sauf au voisinage d'une ouverture qui se comporte comme une source secondaire vis-à-vis de la région située au-delà de l'obstacle (fig. 1.1a). Lorsque celui-ci est percé de deux ouvertures (fig. 1.1b), *chacune d'elles fait office de source d'ondes circulaires qui se rejoignent pour donner lieu à des interférences*. La dénivellation du niveau de l'eau est alors la somme algébrique, positive ou négative, des dénivellations associées à chacun des trains individuels. Cependant, alors que les ondes se propagent à la surface de l'eau, l'eau elle-même décrit un mouvement oscillatoire dans la seule direction verticale. La figure 1.2 explicite ce comportement dans le cas simple de deux trains de déformations se déplaçant en sens opposés le long d'une corde tendue.

Entre les rides qu'un zéphyr crée à la surface d'un étang et le tonnerre provoqué par un éclair zébrant la nuit, l'analogie ne saute pas aux yeux. C'est que la parenté entre différents types d'ondes ne provient ni de l'origine du phénomène ni du milieu dans lequel il se déroule. *La similitude est de nature purement formelle*. Elle concerne exclusivement *l'extension spatiale et le mode de propagation*. C'est dire que le monde des ondes est d'une grande richesse; tous les milieux ou presque sont susceptibles de servir de support à leur propagation, de la croûte terrestre que dévastent les séismes aux stades de football où se déclenchent les « olas »<sup>4</sup>.

Onde ou corpuscule? A laquelle de ces deux catégories appartient la lumière? Pour Newton, elle était formée de corpuscules alors que Christian Huygens y voyait une onde. Au 17<sup>e</sup> siècle, ces réponses sont spéculatives. Elles ne s'appuient pas sur des faits, aucune expérience décisive n'ayant permis de trancher. Il faudra

<sup>4</sup> La « ola », le terme espagnol pour « vague », est un mouvement de foule que l'on observe essentiellement dans les arènes sportives. Il est déclenché lorsqu'un groupe de spectateurs se dresse en levant le bras et reprend sa position assise quand leurs voisins immédiats en font de même. En quelques secondes, une ola fait le tour du stade. Les Anglais parlent dans ce cas de « mexican wave » et les Québécois, de « vague ». D'après certains spécialistes, une ola se déplacerait en général dans le sens des aiguilles d'une montre et à la vitesse d'environ 12 m par seconde.



**Fig. 1.2 Superposition linéaire des déformations.** Le long d'une corde tendue, deux trains de déformations se propagent en sens opposés. Quand ils se rejoignent, ils se superposent: la déformation résultante (trait plein) résulte de la somme algébrique des déformations individuelles (pointillé). Au-delà de la région de contact, les déformations individuelles conservent leur identité.

attendre le 19<sup>e</sup> siècle pour que la situation évolue ; de nombreuses expériences permettront l'édification d'une théorie classique de la lumière parfaitement cohérente et d'une grande richesse. Deux conclusions essentielles se dégagent. La première est lapidaire : bien que se déplaçant dans le vide, la lumière est une onde. La seconde est inattendue : *la lumière* n'est pas un phénomène isolé ; elle ne constitue qu'un exemple parmi d'autres ondes de même nature mais que notre œil ne perçoit pas, si bien qu'il a fallu beaucoup de temps pour que l'on prenne conscience de leur existence. Aujourd'hui, ces « lumières invisibles » font partie de notre quotidien, tant leurs applications sont nombreuses.

A la fin du 18<sup>e</sup> siècle, on n'en est pas encore là.

## La réponse de Young

De la lumière, en dehors des plages qu'elle éclaire, nous ne percevons ou ne croyons percevoir que les rayons rectilignes qui relient la source au récepteur, notre œil. Lorsque le soleil trouve une ouverture entre les nuages, il trace un pan lumineux : la lumière signale sa trajectoire rectiligne en éclairant des gouttes de pluie que notre œil ne distingue pas. La précision du contour des ombres portées par les obstacles placés sur le passage de la lumière renforce encore notre conviction que la lumière se déplace en ligne droite. Est-ce pour cette raison que les enfants ne manquent jamais d'auréoler le soleil d'un réseau de rayons rectilignes ? Face à ces observations, le modèle le plus simple que l'on puisse se faire de la lumière est celui d'un flux de corpuscules imperceptibles frappant directement notre œil ou rebondissant sur un obstacle illuminé. Les partisans de la théorie ondulatoire ne sont pas en reste. Huygens a montré qu'une théorie ondulatoire de la lumière permet d'expliquer toutes les observations et notamment la rectitude des rayons de lumière. Pour que l'une des deux théories concurrentes l'emporte, ses adeptes se doivent de présenter des arguments plus convaincants.

Pour se représenter un phénomène, il est très utile d'avoir un modèle réduit à disposition. On le trouve dans les ondes qui se propagent à la surface de l'eau. Dans une telle situation, très familière, chaque point du plan d'eau se met à osciller. La lumière est autrement plus mystérieuse mais, si elle se propage comme une onde, c'est que « quelque chose » oscille. La fréquence hypothétique de la lumière s'identifierait alors au nombre d'oscillations par seconde. Mais comment la mesurer? On pourrait y parvenir en déterminant le chemin parcouru au cours d'une oscillation, la *longueur d'onde*. La distance entre deux pics voisins de la figure 1.1b permet en effet de calculer la longueur d'onde et la fréquence des ondes de surface. Si la lumière donne lieu à des interférences, on pourrait donc avoir accès à ces deux grandeurs.

C'est au début du 19<sup>e</sup> siècle que l'Anglais Thomas Young se lance dans l'aventure. Il remplace le vibreur S de la figure 1.1 par une source lumineuse et l'obstacle par une paroi percée de deux fentes. Pourvu que la longueur d'onde de la lumière ne soit ni gigantesque ni minuscule, sans quoi elle serait difficilement accessible à l'expérience, il peut espérer mettre des interférences en évidence et mesurer la fréquence de la lumière. A condition, bien sûr, que celle-ci soit réellement de nature ondulatoire. L'expérience a lieu entre 1801 et 1802. C'est un succès et l'on parlera désormais de l'expérience des *fentes de Young*, du nom de son auteur.

Thomas Young est un personnage à part. Il est le rejeton d'une famille de quakers ou, comme ils se nomment eux-mêmes, de membres de la Société religieuse des Amis. A toutes les époques, leurs représentants ont été largement respectés pour leur intégrité. Ils se distinguent notamment par leur habillement, particulièrement simple, et par leur refus de servir dans l'armée ou de prêter serment. De nombreux scientifiques britanniques appartiennent à ce mouvement. En ce qui concerne Young, l'expérience des deux fentes aurait suffi à lui assurer une place définitive au Panthéon des sciences, mais il a d'autres titres à la célébrité. A treize ans, non content d'apprendre l'anglais, sa langue maternelle, puis le latin, le grec, le français et l'italien, il se met à

l'étude de l'hébreu, dans ses versions biblique et samaritaine, du syriaque, du chaldéen, de l'arabe, du persan, du turc et de l'éthiopien. Il n'y a guère que Champollion qui ait fait preuve d'une précocité et d'une fringale linguistique pareilles, et il ne s'agit pas là d'une simple coïncidence. Au printemps de 1814, connaissant sa propension à se détendre en restaurant des manuscrits anciens endommagés, un ami confie à Young un papyrus égyptien rédigé en écriture démotique<sup>5</sup>. Chez un personnage à la curiosité universelle comme Young, cela suffit pour stimuler l'intérêt pour le déchiffrement de l'écriture de l'Égypte antique. Il se procure une copie de la pierre de Rosette, le fameux édit de Ptolémée V Epiphane rédigé en grec, sur laquelle figure une double traduction en caractères hiéroglyphiques et démotiques. Young ignore le copte, la langue dont on soupçonne déjà qu'elle fut celle de l'Égypte ancienne, ce qui constitue un handicap pour le déchiffrement. Il ne lui reste qu'à repérer dans le texte grec des mots qui sont répétés et de tenter d'en trouver l'écho dans les traductions hiéroglyphiques et démotiques. Il recherche notamment des mots grecs « égyptisés », car ils seraient susceptibles de révéler la valeur alphabétique de certains signes du texte égyptien. C'est certainement le cas des noms propres ! Ce qui simplifie la tâche du déchiffreur amateur, c'est que, dans le texte hiéroglyphique, les noms de rois sont tracés à l'intérieur d'un cartouche<sup>6</sup>. C'est notamment le cas de celui de Ptolémée. Même s'il n'est que partiel, le succès de Young ouvre le chemin pour Champollion.

Young se passionne pour mille sujets : il abandonne très tôt son étude. « Il ne fera jamais le pas nécessaire pour franchir le seuil dont il a lui-même poussé la porte » écrit Doblhofer. Ainsi, parce qu'il n'a pas mené jusqu'à son terme sa tentative de déchiffrement et qu'il a souvent préféré les publications anonymes, Young n'a pas récolté toute la gloire qu'il aurait méritée dans ce domaine. C'est sans doute un aspect de sa personnalité et

<sup>5</sup> Les caractères démotiques résultent d'une schématisation des caractères hiératiques, eux-mêmes simplification des hiéroglyphes.

<sup>6</sup> En écriture hiéroglyphique, encadrement elliptique du nom d'un dieu ou d'un roi.

notamment de sa difficulté de communiquer le résultat de ses travaux. Ses biographes font les mêmes remarques à propos de ses recherches en optique et dans d'autres domaines des sciences de la nature. Pourtant, ce dilettante était si doué qu'il a laissé son nom en élasticité, dans le domaine de la perception des couleurs et en optique, notamment lors de la réalisation de l'expérience des deux fentes, un exploit remarquable compte tenu des moyens de l'époque et grâce auquel il démontre le caractère ondulatoire de la *lumière visible*. Au cours du 19<sup>e</sup> siècle, la longueur d'onde de la lumière sera mesurée avec toute la précision nécessaire. Du violet extrême au rouge extrême, elle passe de 0,4 à 0,75  $\mu\text{m}$ <sup>7</sup>. Toute la lumière visible est comprise entre ces deux limites. Quant à la fréquence, qui se mesure en *hertz*, elle varie de  $7,5 \cdot 10^{14}$  hertz et  $4 \cdot 10^{14}$  hertz à l'intérieur de cette même bande<sup>8</sup>.

Young a donné une première réponse à la question posée: *la lumière est une onde*. Au 19<sup>e</sup> siècle, ses successeurs vont enfoncer le clou. Au tournant du 20<sup>e</sup> siècle, chacun est convaincu du caractère ondulatoire de la lumière. En 1905, cependant, une voix discordante se fait entendre. C'est celle d'Einstein. A partir d'une analyse de Planck et de résultats expérimentaux surprenants, il admet que *la lumière, comme la matière, est formée d'« unités indivisibles »* ou de « *grains de lumière* » (chap. 4). Einstein ne remet pas en cause la nature ondulatoire de la lumière. Il suggère seulement que, *dans certaines circonstances, elle présente un caractère corpusculaire*.

## Les auteurs de science-fiction manquent d'imagination

Du point de vue historique, l'expérience de Taylor constitue la première tentative de mise en évidence des hypothétiques unités

<sup>7</sup> Un micron ou micromètre ( $\mu\text{m}$ ) équivaut à un millième de millimètre.

<sup>8</sup> Attribuer à une lumière une fréquence de  $4 \cdot 10^{14}$  hertz revient à affirmer que le nombre d'oscillations par seconde est de  $4 \cdot 10^{14}$ .

indivisibles de lumière qu'Einstein avait évoquées quatre ans plus tôt. Quelle que soit la nature de ces « grains de lumière », qu'ils aient ou non un rapport direct avec ceux qu'Einstein avait en tête, ne change rien au fait que l'idée directrice de Taylor est très belle. Il veut réaliser *en lumière extraordinairement faible l'expérience des fentes de Young*<sup>9</sup>. Si faible qu'il espère que, durant l'expérience, les fameux grains de lumière ne se présenteront pas en masse dans l'appareil de mesure – c'est ce qui se produit avec une lumière intense – mais un par un. C'est une plaque photographique qui enregistre les interférences produites et qui révélera, espère-t-il, leur caractère granulaire. Cette expérience est simple, mais seulement dans son principe.

Deux conditions doivent assurer le succès de l'entreprise. La première, c'est la présence d'un dispositif propre à produire des franges d'interférences, la signature du caractère ondulatoire. Quant à la seconde, elle concerne l'intensité de la lumière. Elle est essentielle. Taylor procède à une série de tests similaires. A chaque fois qu'il a obtenu des franges d'interférences sur sa plaque, Taylor met en route une nouvelle prise de vue en réduisant l'intensité et en augmentant le temps de pause pour que l'énergie lumineuse en jeu reste constante. Lors de la première épreuve, l'illumination est importante et le temps de pause est bref. Finalement, lorsque le temps de pause atteint 3 mois, l'intensité de la lumière est si faible que Thomson et Taylor s'attendent à ce que le nombre des grains de lumière traversant simultanément le dispositif soit extrêmement réduit et que, d'une manière ou d'une autre, le dessin des franges d'interférences en soit affecté.

---

<sup>9</sup> En affirmant cela, on fait une légère entorse à l'histoire. L'expérience réalisée par Taylor consistait à recueillir sur une plaque photographique l'ombre d'une aiguille illuminée par une fente placée devant la flamme d'un bec de gaz. Dans une telle géométrie, l'ombre de l'aiguille dessine une figure de *diffraction* présentant des minima et des maxima d'intensité dont l'origine physique est la même que celle qui produit des interférences dans l'expérience des fentes de Young. Elle est due au caractère ondulatoire de la lumière. Dans ce qui suit, pour simplifier la discussion, on raisonnera comme si Taylor avait utilisé le même dispositif que Young. L'argumentation utilisée est identique.

Dans un cas extrême, si les unités hypothétiques de lumière arrivaient l'une après l'autre, comment pourraient-elles produire des interférences ?

Cette question est parfaitement logique. Les interférences sont la signature d'un processus ondulatoire et l'onde elle-même est un phénomène global et non individuel. Contrairement au corpuscule, indivisible, une onde présente nécessairement une extension spatiale, ubiquitaire, seule garante de la présence d'interférences : les vagues océanes et les rides qu'une brise dessine à la surface d'un étang perdent toute signification au niveau de la molécule d'eau<sup>10</sup>. Taylor s'attend donc à voir disparaître les franges d'interférence à mesure que le caractère granulaire de lumière incidente se fera plus manifeste. Si Taylor avait pu aller jusqu'au bout de son projet, sans doute aurait-il réduit l'intensité au point que les unités de lumière auraient traversé l'une après l'autre le dispositif expérimental, *chacune le franchissant isolément*. Aujourd'hui, cette opération appartient presque à la routine – une routine difficile – mais, au début du 20<sup>e</sup> siècle, elle ne pouvait être réalisée.

Ce que Taylor et Thomson espéraient de leur expérience, à quelle modification des franges ils s'attendaient à assister, l'histoire ne le dit pas. Probablement ne le savaient-ils pas eux-mêmes et étaient-ils impatients de le découvrir. Or, au vu des résultats de l'expérience, Taylor et son mentor J. J. Thomson durent être partagés entre déception et incrédulité : quelle que soit la durée de l'opération, *les interférences enregistrées sur la plaque restent inchangées*. Déception, parce que le résultat se résume en une phrase : circulez, il n'y a rien à voir. Incrédulité, parce que, quand les grains lumineux traversent en foule le dispositif, il est raisonnable qu'on assimile le flux lumineux à une onde. Mais comment admettre que les propriétés ondulatoires puissent être sauvegar-

---

<sup>10</sup> O paradoxe de la science : une fois que l'existence des « unités de lumière » aura été abondamment confirmée, on devra reconnaître que des « unités de son » existent aussi... Mais elles n'ont rien de commun avec les molécules d'eau ou de toute autre matière dans laquelle se propage le son.