

Séance du 15 février 2010

Et la lumière fut

par le Professeur Jean-Pierre FILLARD
conférencier invité

Dieu, dit-on, a créé la vie, mais pour qu'elle subsiste Il nous a donné la lumière; sans elle le monde vivant serait réduit aux formes moléculaires les plus élémentaires. Donc, "*Fiat lux et lux fuit*" ! Mais où trouve-t-on cette précieuse "matière" ? La réponse est: partout, autour de nous, nous baignons dedans, elle nous réchauffe et nous informe sur notre environnement; elle nous est indispensable et cependant elle reste impalpable. Il nous en faut suffisamment pour y voir clair... mais pas trop pour ne pas être éblouis.

Elle nous parvient parfois du fin fond de l'Univers, lumière fossile datant parfois de millions d'années, témoin de gigantesques cataclysmes stellaires, aussi vieux que la création du monde. Elle nous vient aussi et surtout, en permanence, du Soleil qui illumine si généreusement notre planète. On la trouve même parfois aussi au fond des océans dans l'obscurité profonde des abysses, au bout du nez luminescent de certains poissons impressionnants Depuis que l'Homme est sur terre, la lumière du jour guide sa vie et rythme son sommeil.

La nuit est le domaine du mystère, des frayeurs, des cauchemars, des fantasmagories, de l'irrationnel. Les ténèbres s'identifient au Mal, c'est le domaine du Démon; on lit dans l'Évangile que "celui qui agit mal hait la lumière !". On pourrait donc dire que, en partie tout au moins, l'irrépressible besoin religieux de l'Homme est né de l'obscurité et des angoisses qui l'accompagnent; ces croyances métaphysiques sont comme une façon de se rassurer, car, chez certains, la crainte était même que le soleil ne se lève plus, ou que le ciel ne leur tombe sur la tête lorsqu'il était trop noir ! Ce n'est qu'au chant du coq que la confiance revient et que la vie reprend son cours.

Le Soleil et sa lumière salvatrice ont été, de longue date, l'objet de cultes divers et nombreux, il n'est que de citer les Incas ou le dieu Ré des Égyptiens dont les Pharaons revendiquaient la filiation pour entraîner la vénération de leur peuple. On lit dans le Coran que les anges sont faits de lumière, mais comme on n'a jamais pu voir un ange ça ne nous avance guère. Les Cathares, eux, proclamaient que Dieu est source de lumière dans sa lutte contre Satan, le maître des ténèbres, qui, lui, règne sur la matière. Et puis, trêve de modestie, nous avons eu aussi notre Roi Soleil, ainsi que le Siècle des Lumières, c'est dire si le symbole lumineux est puissant ! La maîtrise du feu fut le premier pas de l'humanité vers la prise en main de son destin. Chaleur et lumière étaient maintenant devenues accessibles en l'absence du Soleil; quel progrès dans les cavernes ! On s'éclaire maintenant avec des torches qui effraient et écartent les bêtes sauvages. La peur ancestrale s'estompe. Cette nouveauté, si précieuse, a apporté un premier sentiment de sécurité au point de susciter parfois des convoitises et de déclencher des "guerres du feu" dans cette humanité en prise à ses tout premiers balbutiements. Puis on a lentement maîtrisé l'utilisation de la lumière avec les premiers "quinquets" à huile, d'abord, pendant des

siècles, petite lueur rassurante dans le noir. Puis ce furent les premières chandelles qui ont aussi apporté, plus tard, une commodité certaine à défaut d'une bien grande efficacité; elles aussi, pendant des siècles, ont accompagné le passant nocturne dans les rues obscures et dangereuses des villes.

Mais la grande découverte qui a mis vraiment la lumière à notre disposition, découverte capitale, contribution tellement importante à notre civilisation qu'on n'y prête plus, aujourd'hui, la moindre attention, découverte qui s'est intimement intégrée dans notre façon de vivre et qui nous a totalement libérés de nos frayeurs nocturnes, cette découverte, nous la pratiquons, machinalement, quotidiennement, d'un simple "clic"; c'est l'ampoule électrique ! Objet devenu si banal et omniprésent dans notre vie quotidienne. C'est Thomas Edison, génial inventeur et physicien autodidacte, qui eut, le premier, l'idée de chauffer un fil de coton imprégné de Carbone, dans une ampoule, sous vide, pour créer de la lumière (et, aussi, accessoirement, émettre des électrons, ce qui sera fort utile par la suite pour faire des lampes de radio, à l'époque heureuse de la TSF).

On appelait Edison: le "magicien de Menlo Park" parce qu'il avait équipé son laboratoire et sa bibliothèque de la première installation de lumière électrique; cette nouveauté fit grand bruit et fut le début d'une vraie révolution dans les mœurs. Révolution qui ne s'est pas faite sans grincements de dents, comme toutes les révolutions: la peur régnait alors de l'électricité comme elle règne aujourd'hui du nucléaire. Les populations préféraient à cette époque l'éclairage au gaz, jugé moins dangereux, bien que source, pourtant, d'accidents spectaculaires. Le bec de gaz régnait en maître sur la ville ! Tant et si bien que, pour familiariser le consommateur avec cette nouvelle technologie électrique, il a fallu inventer une unité particulière et imagée: ce fut la "bougie". Mais on n'arrête pas le progrès, l'éclairage électrique s'imposa inéluctablement.

Oui, ces âges ne sont pas si lointains que cela. Aujourd'hui un clic suffit à faire jaillir la lumière partout où le besoin s'en fait sentir, et, lorsque la nuit arrive, la terre entière s'illumine, même dans les déserts les plus reculés ! Magie de la lumière électrique qui compense les absences quotidiennes du Soleil. Ici, le satellite nous montre l'avancée majestueuse de la nuit et la traîne de lumière qui la suit tout autour du globe. Pourrait-on aller jusqu'à dire que la lumière électrique a fait reculer l'esprit religieux ? C'est là un tout autre débat que les philosophes, les psychiatres et les théologiens devraient bien, un jour, engager !

Mais que dit le physicien de la lumière ?

Mais, me direz-vous, où se cache le physicien, qui jusqu'ici ne dit mot ? Que peut-il nous expliquer à propos de cette "matière" magique si abondante et insaisissable ? Depuis des siècles qu'il réfléchit il a bien dû aboutir à des conclusions.

Il faut bien le dire, le physicien et ses tours de passe-passe n'ont pas toujours été pris au sérieux. On a longtemps pris le physicien pour un farceur, un illusionniste, capable de faire éclater des tonneaux, de produire des éclairs ou de faire dresser les cheveux sur la tête des gens. Cette tradition peu flatteuse se retrouve encore parfois, hélas, dans notre pédagogie actuelle. Mais oublions tout cela, soyons sérieux. On sait maintenant, depuis la bombe atomique, que la physique n'est plus une plaisanterie de salon. Voyons un peu mon carnet de notes. Nous ne parlerons pas du rôle essentiel

de la lumière dans le processus chimique de la vie, ni de sa contribution énergétique, aujourd'hui si avidement recherchée pour relayer notre pétrole défaillant. Nous ne parlerons que de sa nature physique et de la "domestication" de ses éléments de base que l'on appelle les photons.

Matière insaisissable, avons-nous dit, la lumière ne peut se mettre en bouteille pour être conservée, on la trouve partout et nulle part, elle fuit "à la vitesse de la lumière", souvent tout droit parfois en suivant des chemins inattendus, comme dans les mirages du désert, par exemple. On a longtemps prétendu que sa masse était nulle mais ce n'est, peut-être, que presque vrai. Einstein avait prédit que, puisque $E = mc^2$ réciproquement $m = E/c^2$, donc si le photon a une énergie il a forcément une masse ! Erreur ! Il s'agit là d'une masse "au repos" et le photon, lui, n'est jamais au repos; sa nature "relativiste" dérange les "jauges" de l'électrodynamique quantique. Si le photon avait une masse, relativement parlant, il ne pourrait aller à la vitesse de la lumière, dans aucun référentiel, Albert *dixit*. Alors on est allé chercher les "super balances" célestes, constituées par ces "trous noirs" de l'espace, infiniment massifs au point d'attirer et d'engloutir tout ce qui s'en approche trop. Si un photon passe dans les environs, il devrait forcément subir une déviation, même si sa masse est infiniment faible.

Avec ces "lentilles gravitationnelles" de l'espace sidéral lointain, on devrait bien pouvoir le peser, ce photon ! Le résultat prévisible serait évidemment infime; on a avancé une valeur de 10^{-47} kg, mais cela reste sujet à d'âpres discussions entre spécialistes. Le fait est qu'on a effectivement observé des "arcs gravitationnels" de lumière autour de ces monstrueux amas galactiques, mais certains chipoteurs disent "non ce n'est pas la masse du photon qui produit cela, c'est une courbure de l'espace due au trou noir lui même". Allez donc savoir ! De toutes façons, quel sens concret donner à une aussi faible valeur ?

La lumière, on l'a dit, va tout droit, traverse le vide intergalactique sans s'user (ou presque) ni se déformer (ou presque). Vous avez certainement remarqué combien le physicien adore utiliser le mot "presque". Toutes choses égales par ailleurs ! On a dit qu'elle pourrait être une vibration, mais une vibration de quoi, dans le vide ? Alors nos anciens ont inventé, pour les besoins de la cause, une matière mythique, insaisissable elle aussi, l'éther, dont aucune évidence physique n'a jamais pu être apportée. Cependant la lumière interagit parfois avec la matière dense: elle peut être réfléchie, détournée, diffusée, absorbée, parfois même elle passe tout bonnement à travers sans se troubler. Comble d'originalité, elle se transforme même parfois en chaleur, provoque les nuages et la pluie, fait pousser les plantes. C'est elle qui fait de la Terre la planète bleue vue de l'espace.

Galilée a bien essayé, vainement, de mesurer sa vitesse avec une lanterne, Röhmer a essayé aussi, avec un satellite de Jupiter, mais c'est finalement Fizeau, pour la première fois, qui, avec une roue dentée, en a donné une valeur approchée assez fidèle. Puis c'est Albert (Einstein, bien sûr) qui aura (en toute relativité) le mot de la fin: la lumière va à la même vitesse, partout et toujours, c'est la "célérité" de la lumière, une limite physique universelle. (dont les incorrigibles physiciens cherchent évidemment à s'affranchir, sans y être encore vraiment parvenus). On dira que $c = 299\ 792\ 458$ mètres par seconde en négligeant les décimales (pour les écoliers on arrondira à 300 000 km/s c'est plus facile à retenir).

Mais qu'est-ce donc que cette "matière", de quoi est-elle faite, va-t-on nous le dire ? Certains, suivant Huygens et Hooke, affirmaient, dur comme fer, avec expériences à l'appui, que ce n'était qu'une onde, comme une vague immatérielle. Une onde de quoi ? De l'éther bien sûr ! Quelle question ! On a pu sans difficulté montrer à des générations d'étudiants comment cette onde pouvait interférer avec elle-même ou diffracter sur un écran troué, comme une simple vaguelette. Incontestablement ce sont là les propriétés d'une onde.

Le grand Newton, lui, prétendait qu'il s'agissait de particules et se livrait à d'incroyables contorsions théoriques pour expliquer les couleurs et la diffraction de ces fameux "anneaux de Newton". Effectivement, des expériences, tout aussi incontestables, montraient que c'était peut-être des corpuscules très légers, lancés comme des boulets de canon. Le petit moulinet de Crookes, si simple et si dépouillé, a rendu rêveurs et perplexes bon nombre d'hommes de science, (Surtout, comble d'ironie, qu'il tournait dans le sens contraire de ce qui était attendu ! Il a fallu un moment pour comprendre ce comportement curieux mais parfaitement explicable). Là encore il a fallu qu'Albert intervienne, car sa thèse de doctorat (de même que le thème retenu pour son prix Nobel) ne traitait pas, comme on pourrait le croire, de la théorie de la relativité, mais bel et bien de l'explication de l'effet photoélectrique découvert par Planck quelque temps auparavant et relevant de la nature "granulaire" de la lumière. Incontestablement la lumière devait être composée de particules, les photons. Photons qui véhiculent des quantités bien précises d'énergie: les Quanta. Alors qui croire ? Onde immatérielle ou corpuscule massique ? Incontestablement, il y avait là un problème sérieux et, les Shadoks vous le diront, il fallait bien trouver une solution à cette vieille énigme.

Pour contenter tout le monde, il fallait bien admettre l'évidence de la dualité onde/matière: les photons étaient bien, à la fois des ondes et des particules et c'est Louis de Broglie qui en fit la synthèse après tous ces siècles de réflexion (et de disputes). Il montra même, aussi, que, réciproquement, des particules massiques comme les électrons étaient aussi des ondes, ce qui fut immédiatement confirmé par les expériences de Davisson et Germer ! La boucle était bouclée. Le photon, ce paquet d'énergie et de vibration électrique, sera caractérisé par sa fréquence de vibration, liée à son énergie par la fameuse formule de Planck $E = h\nu$. On donnera à la particule, non pas une masse, mais une "quantité de mouvement" équivalente $p = h\nu/c$, ce qui satisfait, provisoirement, tout le monde.

Là encore, la main de Dieu va guider le physicien qui observe la nature pour en déduire des explications. L'arc-en-ciel nous donne parfois des spectacles magnifiquement colorés, on les doit à la dispersion de la lumière dans les gouttelettes d'eau en suspension dans l'atmosphère et à un éclairage bien ajusté. Il n'y avait qu'un pas à faire pour domestiquer cette observation. C'est sa fréquence qui donne sa "couleur" au photon. Le prisme, (ou le réseau), va permettre d'étaler cet éventail de couleurs et de montrer ce qu'on appelle le "spectre du visible" entre le rouge à une extrémité et le bleu à l'autre bout. Avec cet outil très simple il devient possible d'analyser la composition de toutes les lumières que l'on peut trouver, ou créer, dans la nature. La lumière "blanche" produite par un corps très chaud a un spectre continu du rouge au bleu comme on le voit représenté sur cette diapo.

Mais il est facile, aussi, de constater qu'un peu de cuivre, par exemple, placé dans une flamme (tous les plombiers le savent) donne à celle-ci une belle couleur verte. Cette couleur émane, à n'en pas douter, des atomes de cuivre eux-mêmes, une

autre matière donnerait une couleur différente, comme on le voit ici pour quelques éléments chimiques différents. Le spectroscopie nous montre alors que le spectre de cette lumière est constitué d'un ensemble de raies bien spécifiques de l'atome concerné: c'est une véritable fiche d'identité que nous révèle cette "spectroscopie de flamme". Ceci permettra une analyse chimique précise de la composition des matériaux. Le détail de ces raies est fidèlement rapporté par le spectre d'émission, ces raies sont caractéristiques de transitions électroniques bien spécifiées et calculables en physique atomique. On peut ainsi identifier les éléments sans ambiguïté, il est même arrivé, en analysant la lumière solaire et en éliminant toutes les raies connues des éléments terrestres, que l'on trouve un reliquat inexplicable: un ensemble de raies inconnues qui correspondait à une espèce d'atome que l'on n'avait jamais pu trouver sur terre tellement il était léger: c'est l'Hélium, qui doit son nom, bien sûr, à cette découverte. En cherchant bien on a, d'ailleurs, fini par en trouver sur terre, il était bien caché dans des poches de gaz souterraines ! C'est pour cette raison qu'on évite de le gaspiller et qu'on le récupère soigneusement.

Mais il fallait tout de même en savoir plus sur la nature physique de cette vibration lumineuse et c'est Maxwell aidé de son complice Lorentz qui expliquera qu'il s'agit d'un champ électrique sinusoïdal, associé à un champ magnétique en quadrature, qui se propagent ensemble (en déformant l'espace ajoutera même l'incorrigible Albert qui n'en rate pas une). Ce modèle robuste, (presque exact), aidera à comprendre bien des choses dans le comportement de la lumière, en particulier dans son interaction avec la matière dense. On expliquera ainsi facilement les fantaisies de la lumière dite "polarisée", par exemple.

En fait, tout ceci n'est (encore) qu'une approximation. Cette vibration électrique, dite sinusoïdale, mathématiquement parlant, ne peut, cependant, être rigoureusement décrite par une vraie sinusoïde car celle-ci (toujours mathématiquement parlant) se doit d'être infinie, vers le passé tout autant que vers le futur, or le photon doit avoir, inéluctablement, un début et une fin. Ca ne colle pas. Alors les mathématiques donneront la vraie formulation pour ce photon qui est, presque, une sinusoïde: ce sera, en fait, un "paquet d'ondes" décrit par une sinusoïde "modulée" par une enveloppe en cloche. Mathématiciens et physiciens seront alors d'accord (toujours avec Albert et son acolyte Heisenberg) pour admettre une "incertitude" sur la fréquence du photon.

On parlera donc, alors, de "paquet d'ondes" que l'on rapprochera de son spectre qui, en fait, est toujours un peu étalé en forme de raies plus ou moins larges. Plus le "spectre de raie" de la lumière sera fin, plus précisément la fréquence des photons de ce troupeau turbulent sera bien définie. En fait le domaine de fréquences "visibles" est, lui-même, très étroit, il se situe au milieu du spectre général des vibrations électromagnétiques, entre, d'une part, l'infra-rouge et les grandes longueurs d'ondes et, d'autre part, les courtes longueurs d'onde de l'ultra violet, aux rayons X et jusqu'aux particules vraiment matérielles. En dehors de cette petite fenêtre de fréquence, évidemment, nos yeux ne perçoivent rien. Mais la continuité des explications étant ainsi harmonieusement construite, le physicien est satisfait.

Tout ceci se constate, d'ailleurs, facilement: Un radiateur électrique, par exemple, nous réchauffe mais il ne nous éclaire guère, c'est un émetteur d'infra-rouge, à la limite supérieure du visible. Le four à micro-ondes, lui, cuit les poulets dans le noir, bien que ses "micro-ondes" soient très grandes par rapport à celles de la lumière.

Quant à la lumière blanche, elle rassemble en vrac toutes les longueurs d'ondes visibles, c'est, dit-on, le "rayonnement du corps noir" qui la produit. Elle résulte de l'agitation désordonnée des atomes lorsqu'on chauffe un matériau solide quelle que soit sa nature, ce rayonnement ne dépend que de la température.

Et nous voilà donc revenus à la lampe à "incandescence" d'Edison, largement améliorée depuis, mais qui n'en continue pas moins à produire une chaleur fort inutile en cette période de chasse au "gaspi". Mais on n'arrête pas la créativité du physicien, voilà qu'arrivent maintenant les lampes "froides" et même les LEDs (en anglais Light Emitting Diodes) qui transforment directement l'électricité en lumière utile, sans chauffage (ou presque). Edison peut être mis au placard, d'ailleurs on ne nous laisse pas le choix, les bonnes vieilles lampes à incandescence ont disparu des rayons des magasins, place à l'éclairage dit économique... mais qui coûte plus cher ! Voilà donc la lumière dans ses utilisations courantes, on croit avoir fait le tour de la question.

Mais voilà qu'arrive, du diable vauvert, un outsider inattendu : le laser

Mais c'était se réjouir trop tôt, voilà qu'un outsider arrive, du diable vauvert, comme disait Zitronne, qui propose encore autre chose, c'est Maiman et son "effet laser". Je vous épargnerais l'explication de détail de cet acronyme anglais universellement accepté. Grâce à une astuce inattendue, voilà qu'on parvient, en quelque sorte, à mettre ces photons à la queue leu leu de telle sorte que, virtuellement, la sinusoïde de tout à l'heure se trouve considérablement prolongée, à la joie du mathématicien qui nous accorde alors la permission de réduire considérablement la largeur spectrale du paquet d'onde.

On dit qu'avec le laser, la lumière (les photons), la lumière est devenue "cohérente", ce qui n'existe pas dans la nature, car il faut bien le dire, Dieu s'est montré un peu désordonné avec la lumière. On a alors des photons "en phase" et (presque) à la même fréquence. Le spectre de raie est devenu beaucoup plus fin. Cette propriété extraordinaire va permettre de faire se propager la lumière de façon beaucoup plus disciplinée.

Par exemple, cette nouvelle lumière, purement artificielle, non naturelle, va se propager sous la forme d'un faisceau à faible divergence, c'est-à-dire (presque) cylindrique, ce qui permettra de l'envoyer très loin, tout droit, sans disperser son énergie. Ainsi que le démontre mon petit pointeur rouge ! Avec le laser, on va pouvoir éclairer la Lune et même, après avoir déposé un miroir sur la surface lunaire, on va mesurer sa distance à la terre en utilisant le laser comme un radar. Encore faudra-t-il bien viser pour faire mouche sur le miroir ! Dans les systèmes optiques évidemment, la propagation de la lumière cohérente sera beaucoup plus précise à utiliser et apportera un progrès certain. On pourra focaliser cette lumière sur des "spots" beaucoup plus serrés qu'auparavant. Même les "souris" de nos ordinateurs vont en bénéficier ! Car le laser volumineux des débuts a fait place, depuis quelques temps, à de minuscules émetteurs, des puces qui viennent s'insérer dans des Circuits Intégrés complexes comme cette matrice de lasers fabriquée par Intel. Le couplage avec l'électronique est direct et les vitesses de modulations obtenues sont très élevées. On va pouvoir utiliser la lumière comme un véhicule de communication à grand débit et sur de grandes distances, nous y reviendrons plus loin.

Avec cette lumière “cohérente” on peut aussi recréer artificiellement la vision du monde qui nous entoure, non je ne parle pas de photographie, mais d’une toute autre représentation : l’holographie, découverte par Denis Gabor. Sans lentilles ni appareil de photo, ni caméra ou autre magnétoscope on va enregistrer sur un film spécial l’hologramme, l’image de phase, l’image interférentielle, pour être précis, des ondes lumineuses renvoyées par les objets éclairés par un laser. L’animation montre comment ça marche. C’est plus que de l’imagerie en relief, c’est une véritable reconstitution de l’environnement lumineux. On trouve d’ailleurs ces hologrammes un peu partout maintenant : sur les cartes bancaires ou les cartes grises par exemple.

J’ai rapporté, un jour, de Californie un hologramme que je trouve assez fabuleux. Quand il n’est pas trop éclairé il apparaît, dans son cadre, comme un rectangle noir, une lucarne donnant sur un espace obscur. Mais, si on éclaire dans la lucarne, avec une forte lampe, on voit surgir de l’obscurité comme un fantôme irréel, un ectoplasme, le zombie d’un vieux microscope en laiton, avec sa platine et son oculaire (un peu flou à cause de l’éclairage en lumière naturelle). On a l’impression que l’objectif du microscope se trouve véritablement derrière la lucarne, prêt à surgir. Cet objet virtuel semble vraiment réel: si on se déplace vers la droite (ou vers le haut ou le bas) l’image fantomatique suit en même temps comme si un véritable microscope se trouvait derrière la lucarne. Aucune photographie ne peut permettre un tel exploit. Pire encore, en plaçant son œil à la bonne distance, dans l’axe du microscope, comme si on voulait vraiment regarder dedans, on arrive à voir, à travers ce microscope, qui n’a pas d’existence, on arrive à voir le petit moustique qui a été placé sur la platine d’observation. C’est de la magie pure de physicien farceur ! C’est de la réalité virtuelle ! J’ai même réussi, avec de la patience et beaucoup de chance, à photographier le fantôme de ce moustique à travers le microscope. L’image n’est pas très nette mais on distingue tout de même le corps, les pattes et surtout les deux ailes. Dans la réalité, l’image est remarquablement nette.

Mais que faire avec cette lumière

Mais qu’allons nous faire, donc, maintenant, avec cette lumière dont nous connaissons la nature et dont nous maîtrisons les propriétés ? Dieu ne crée pas les choses pour rien et il n’a pas attendu Albert pour se mettre à l’ouvrage. La lumière, en elle-même, ne suffirait pas pour coordonner la vie; encore faut-il la capter, cette lumière, et Dieu créa cette fantastique merveille qu’est l’œil. Merveille dont il équipa presque tous les animaux (dont l’homme), avec des performances adaptées aux besoins de chaque espèce : l’œil de l’aigle est adapté à la vision lointaine précise, celui de la taupe est plus rudimentaire. C’est là un chef d’œuvre incomparable pour l’anatomiste, mais aussi pour le physicien, car, faire une image et la capter relève d’un pur miracle !

Dans l’antiquité, Platon puis Claude Ptolémée ont imaginé que l’œil émettait un rayon continu qui était à l’origine de la vision. Cette idée persista longtemps et même Galien y souscrivit. Un “savant arabe”, a été le premier à mettre cette idée en doute, sans toutefois fournir la moindre justification. Alhazen, au Xe siècle, propose que ce soit l’œil qui reçoive des rayons venus de l’extérieur et qui réagisse à cette influence. Mais comme il a dit aussi, par ailleurs, pas mal de bêtises... l’Histoire l’a oublié. C’est Léonard de Vinci, au XVI^e siècle, qui donnera une explication détaillée

de la physiologie de l'œil et codifiera la vision binoculaire. Il expliquera aussi que, contrairement à ce que pensaient ses prédécesseurs, "l'œil du chat ne brille pas, la nuit, parce qu'il émet de la lumière, mais bien parce que la faible lumière extérieure se réfléchit sur sa rétine"

L'œil est en effet le plus ancien des appareils d'optique, il réalise l'exploit de transformer des rayons lumineux désordonnés et dispersés dans l'espace en une image (presque) plane et représentative du monde environnant. Après, il faudra au cerveau un fantastique travail de "reconnaissance de formes", comme on dit aujourd'hui, pour interpréter la sensation visuelle, c'est un autre problème, mais l'image est là, prête à être exploitée. L'homme, comme toujours, a cherché à imiter Dieu en inventant, par tâtonnements, des instruments d'optique qui imitent, corrigent ou prolongent la fonction de l'œil. Il a fallu chercher longtemps des solutions approximatives parce que la physique, fondamentalement, ne s'accorde pas du tout avec la fabrication d'une image, on peut même dire que tout s'y oppose; mais la physique est avant tout l'art du compromis et c'est peut-être là que cette remarque s'applique le mieux.

Onze approximations fondamentales, ni plus ni moins, je les ai comptées, devront être satisfaites par l'appareillage pour espérer obtenir une image acceptable à partir d'une lentille de verre; ceci bien sûr, en dehors des inévitables imperfections matérielles qui accompagnent la réalisation de tout instrument, en l'occurrence: pureté du verre, qualité du polissage de la surface de la lentille, perfection de la forme sphérique etc... Je vous fais grâce, bien sûr, du détail de toutes ces subtilités de physicien pourtant incontournables. Incontestablement, pourtant, malgré toutes ces réserves théoriques, ça marche. On peut même en tirer des règles de principe et des limites qui permettent de "prévoir" le résultat et les performances des appareils: c'est l'optique géométrique (et aussi ondulatoire), dont la lentille de verre est le cheval de bataille. La simple loupe empiriquement découverte depuis l'Antiquité a cédé la place à des systèmes plus élaborés, élargissant ainsi le domaine de la vision humaine à l'observation microscopique ou lointaine. Ce sera, par exemple, la lunette de Galilée et le microscope de Leeuwenhoek, largement améliorés depuis pour nous donner des instruments de grande précision, maintenant. Mais tout a une limite. En microscopie on s'est vite aperçu que le "grossissement" maximum du microscope ne permettait pas de voir des objets plus petits qu'une fraction de micromètre. Pas question, donc d'aller voir les atomes avec un microscope optique, même en utilisant des astuces raffinées ! Cette fois-ci la physique fondamentale, que nous avons contournée jusque là, s'y oppose formellement. Voilà qui est frustrant. Il va falloir changer complètement notre approche scientifique.

Alors, descendons dans l'univers sub-micronique

Si le microscope optique ne peut faire mieux, malgré toutes les astuces déployées, que de distinguer des objets de taille à peine sub-micronique, le microscope électronique, lui, va beaucoup plus loin, certes, mais il est, souvent, terriblement destructeur, polluant et mal commode d'usage. Alors, à quelles contorsions le physicien devra-t-il se livrer pour utiliser des photons à l'échelle nanométrique et pratiquer ainsi une "nanoscopie" à la place d'une microscopie ? Je m'étais promis de

ne pas évoquer le domaine quantique, nous allons tout juste l'effleurer. A l'échelle submicronique, on dit qu'on est dans le "champ proche optique": le photon devient "virtuel" les représentations mathématiques classiques (onde ou particule) ne peuvent plus servir directement, l'onde est dite "évanescence". En langage trivial on dirait que le photon est plus "gros" que l'objet qui se comporte, alors, un peu, plutôt comme une antenne de radio. Nous sommes dans l'univers quantique de l'incertitude. Les choses ne sont pas simples à exprimer.

Comment cette interaction "de champ proche" se manifeste-t-elle, comment peut-on observer des effets des phénomènes d'origine sub-microniques ? A grande distance, on peut constater facilement ses effets: par exemple c'est la diffusion de la lumière par les molécules d'air qui donne sa couleur bleue au ciel, ou qui fait briller les poussières dans un rai de lumière. A courte distance, tout près du "diffuseur", le photon, qui n'a pas encore atteint son régime de croisière, forme un régime intermédiaire, complexe, qu'on appelle donc "le champ proche optique".

Autre chose, on a pris l'habitude de dire "le" photon. Mais en fait cet animal ne vit, généralement, qu'en troupeau. Les physiciens disent que c'est un Boson pour le différentier d'autres "particules" qu'on appelle Fermions ! Quel langage ! Comment imaginer un photon, unique ? Est-ce concevable ? Si même on arrivait à l'isoler et à le mettre "en boîte", comment être sûr qu'il soit dans la boîte ? Si on veut l'attraper pour l'examiner de près, le "voir", en quelque sorte, eh bien, on le détruit par la même occasion On peut donc uniquement savoir qu'il a été là, mais il n'y est plus ! Avec lui c'est tout ou rien ! Drôle de bestiau ! Mais cela n'empêche pas, quand même, de jouer un peu avec les photons uniques, on sait même (depuis peu) faire des sources de lumière qui émettent des photons un par un, à la demande, et, là, se posent des questions auxquelles on cherche à répondre depuis des lustres: Sur deux trous faiblement écartés, on envoie un flux de photons individuels. Questions: par quel trou le photon unique passerait-il ? Comment choisit-il un trou plutôt que l'autre ? Ne cherchez pas, on ne le sait toujours pas ! Mais on commence, depuis peu, à avoir des idées et ce paradoxe n'est pas évident. On essaye pourtant, de s'en servir de ce photon unique, ça s'appelle la "cryptographie quantique". En effet, schématiquement, si un pirate capte un message fabriqué à partir de photons uniques, il les détruira, automatiquement, en essayant de les lire, le message ne pourra être exploité et le piratage se verra tout de suite. Voilà une belle garantie de sécurité ! Décidément, Dieu a fait les choses de façon bien compliquée, mais cela satisfait parfaitement la philosophie des Shadoks, à défaut d'aider le physicien.

Comment, alors, dompter ce photon rétif ? On a commencé par le canaliser dans une "fibre optique" très fine, en verre. Pour cela il a fallu atteindre une incroyable pureté de ce verre qui constitue la fibre. Pour donner une idée de cette transparence, si la mer avait la transparence de ce verre, on pourrait voir, sans difficultés, le fond des abysses les plus profonds depuis la surface. Le photon, une fois injecté dans la fibre, reste prisonnier de la matière, il ne peut s'échapper qu'en suivant son guide de verre. La fibre de verre est fine comme un cheveu mais seul son "cœur" guide la lumière, dans une zone qui atteint parfois à peine 1 micron de diamètre. Toutefois la moindre impureté sur son chemin va contrarier le photon et l'envoyer dans des directions où il se perdra et c'est bien pour cela qu'il faut un verre extrêmement pur. Cette pureté du verre est soigneusement vérifiée en utilisant précisément la lumière diffusée par les impuretés. C'est la Tomographie Laser à Balayage,

d'une sensibilité telle que la présence d'une particule de quelques nanomètres se détecte très bien, à défaut d'en faire véritablement une image. Maintenant qu'on a obtenu un canal pour la lumière comment l'utiliser ?

De longue date on a eu besoin de la lumière pour communiquer vite et à grande distance; les signaux lumineux se prêtent bien à cette tâche. On est passé des signaux de fumée très simplistes à une forme plus élaborée: le télégraphe optique de "Léon le mathématicien", savant byzantin célèbre. Constantinople pouvait ainsi être prévenue à temps des attaques incessantes des envahisseurs islamiques Turcs. Mais c'est le télégraphe de Chappe qui en fut la forme la plus aboutie puisqu'il permit à Bismarck de déclencher la guerre de 70, avec la fameuse dépêche d'Ems. Cependant, tout ceci reste très limité en volume, en vitesse et en disponibilité car le brouillard ou la nuit rendent les liaisons impossibles. Mais avec une fibre optique, bien à l'abri dans sa gaine, tout est possible. Avec ces minuscules filaments on va faire des câbles qui transporteront la lumière sur de grandes distances. La quantité d'information que l'on pourra y faire passer est considérable car plusieurs facteurs s'additionnent. D'abord la vitesse très élevée de propagation et de modulation, ensuite la multiplicité des brins que l'on peut stocker dans un câble, comme on le voit sur la diapo, enfin chaque fibre peut véhiculer simultanément et indépendamment plusieurs couleurs, voire plusieurs directions de polarisation, constituant ainsi autant de canaux de transmission parallèles. Voilà donc une invention qui arrive à point dans notre monde avide de communications !

Le Haut Débit est arrivé, tout de suite, pour pas cher et pour tout le monde ! Evidemment la fibre optique ne chauffe pas, ne se dégrade pas, ne bouge pas, ne s'use pas, sa durée de vie est donc très grande et elle est totalement insensible électriquement. Un seul inconvénient: elle est fragile. Il faudra donc la manipuler avec de grandes précautions lors de la pose. Les grandes distances lui conviennent bien, alors on posera délicatement le câble au fond des océans, et les photons ainsi guidés parcourront des milliers de kilomètres pour transporter nos messages. Les câbles océaniques, en configuration opérationnelle, à grand débit, ne nécessitent qu'un "répétiteur" tous les 200 km, à peu près, mais, en faible débit, le record de distance est de... 8000km. Le théorème de Shannon est là pour permettre tous les espoirs.

Mais, après ce détour fibreux, reprenons notre promenade vers le monde submicronique. Il y a une vingtaine d'années Binnig et Röhrer (tous deux Prix Nobel) ont inventé le microscope dit à "effet tunnel" et Calvin Quate (à Stanford) le microscope à force atomique. A noter que Quate fut parmi nous, dans notre laboratoire à Montpellier, lors d'une année sabbatique, dans les années 70. Sans entrer dans le détail, ces microscopes dits "de proximité", issus du développement des technologies des Circuits Intégrés, sont très simples dans leur principe, mais très sophistiqués dans leur mise en œuvre. Ils fonctionnent un peu comme le saphir des tourne-disques de notre jeunesse: une petite pointe tenue par un levier de Silicium extrêmement fin s'approche délicatement de la surface à étudier, en arrivant (presque) au contact le levier se courbe et le faisceau (laser), réfléchi sur son dos, dévie suffisamment pour indiquer le contact. L'électronique fait le reste, pendant que la pointe balaye la surface. On obtient ainsi de très belles images du relief des échantillons ou des objets qui y sont fixés ainsi que le montre cette image prise avec un microscope à force atomique; l'échelle de résolution est nettement nanométrique. Ces pointes extrêmement fines permettent d'atteindre carrément l'échelle atomique tout

en restant peu destructrices. En dehors de l'image du relief, on peut s'en servir aussi pour des tâches différentes, par exemple pour prélever un atome unique et aller le placer ailleurs. Cette nanotechnologie est extrêmement riche de possibilités.

Tout cela fonctionne très bien mais y a-t-il encore de la place pour les photons à cette échelle de dimensions ? On a, bien sûr, prolongé cette idée de pointes aux fibres optiques. Pour concentrer les photons le plus possible, on a commencé par "tailler en pointe" les fibres optiques, ce qui permet de guider le photon là où l'on veut avec une plus grande précision. La fibre sert alors dans les deux sens, soit "d'illuminateur" nanométrique, soit d'analyseur (de capteur) tout aussi nanométrique. Ainsi fonctionne ce qu'on peut appeler une "pipette" à photons dont l'extrémité peut être affinée jusqu'au nanomètre. Ainsi fonctionne ce qu'on peut appeler une "pipette" à photons dont l'extrémité peut être affinée jusqu'au nanomètre.

Avec ces instruments on peut à la fois faire des images mais aussi agir avec les photons, par exemple, sur des molécules ou des organismes pour les activer, les couper, les transporter, en modifier les liaisons. Le photon est devenu un outil; il ne sert plus seulement à voir mais aussi à exécuter des tâches dans le monde de l'infiniment petit. L'Électronique devient moléculaire. La Chimie aussi est en train de changer radicalement avec l'utilisation des lasers et en particulier avec ces sondes nanométriques: de collective, jusque là, elle devient maintenant individuelle, ouvrant ainsi d'immenses perspectives. La Biologie aussi devient sub-microscopique. C'est un univers nouveau et extraordinaire que l'on commence à explorer, de la même façon qu'on explore l'espace galactique avec des sondes-robotisées.

Conclusion

De même que l'espace inaccessible est exploré et exploité par des robots, de même cet univers nanométrique verra des robots se substituer à la main malhabile de l'homme. On sait déjà préparer de microscopiques outils pour pouvoir y travailler. Un jour viendra où on saura envoyer automatiquement ces micro-robots délivrer (ou recevoir) des photons sur (ou à partir d') une molécule cible, unique. La chirurgie moléculaire, assistée par la lumière, commence à être possible. Le photon est donc en voie de domestication.

Que de progrès accomplis dans la connaissance de la lumière depuis qu'Archimède expirait sur la plage de Syracuse, victime d'un soldat stupide de l'armée de Marcellus. Archimède était en train d'imaginer l'arme absolue: les miroirs ardents capables d'enflammer les navires des envahisseurs romains. On rêve toujours d'en faire autant dans l'espace avec des satellites et des lasers ! Rien, donc, de nouveau sous le soleil !