

Texte de Ian Hacking extrait de :
Philosophie des sciences - Tome 2 :
Naturalismes et réalismes
Dirigé par Sandra Laugier , Pierre Wagner
Ed. Vrin, Paris

EST-CE QU'ON VOIT À TRAVERS UN MICROSCOPE ? *

Il y a quelques années de cela, je discutais du réalisme scientifique avec un biologiste de l'université de Western Washington, le Dr. Jal Parakh. Nous avons parlé de beaucoup de ces choses que les philosophes trouvent importantes. Un peu hésitant, il ajouta qu'à son avis l'une des raisons principales de croire à l'existence d'entités postulées par la théorie est que nous avons développé des moyens de plus en plus efficaces qui permettent vraiment de les voir. J'allais protester contre cet instinct naïf qui faisait peu de cas des problèmes philosophiques, mais je dus couper court. N'avait-il pas raison ?

L'automne dernier, lors d'une conférence à l'université de Stanford, dans un cours de « microscopie pour biologistes », le professeur, le Dr. Paul Green, déclara incidemment que « la microscopie par diffraction de rayons X est aujourd'hui la principale interface entre la structure atomique et l'esprit humain ». Le Dr. Green a les pieds sur terre, c'est un homme de bon sens peu enclin aux spéculations philosophiques.

* Ian Hacking, «Do we see through a microscope?», *Pacific Philosophical Quarterly* 62, oct. 1981, p. 305-322. La présente traduction, établie par Marc Kirsch, est publiée avec l'aimable autorisation de l'auteur et de Blackwell Publishing.

Les philosophes des sciences qui traitent du réalisme et de l'antiréalisme auraient intérêt à connaître un peu mieux les instruments qui inspirent une telle éloquence. Le présent article est un point de départ, qui se limite à la biologie et ne s'aventure guère au-delà du microscope optique – mais c'est déjà la merveille des merveilles, que peu de philosophes comprennent bien, à mon avis. Les microscopes ne fonctionnent pas comme le suppose généralement le profane. Mais pourquoi le philosophe devrait-il se soucier de la manière dont ils fonctionnent ? Parce qu'il est nécessaire de le comprendre correctement pour élucider les problèmes du réalisme scientifique, ainsi que pour répondre à la question posée par mon titre. Dans la littérature philosophique, on trouve une foison d'explications compliquées des théories causales de la perception, mais elles sont curieusement éloignées de la vie réelle. Nous avons des descriptions fantastiques de chaînes causales aberrantes qui, à la manière de Gettier, remettent en question telle ou telle analyse conceptuelle. Mais le microscopiste moderne connaît des tours bien plus étonnants que le plus imaginatif des spécialistes de philosophie de la perception. Ce qui nous manque en philosophie, c'est d'être plus conscients de ces vérités qui sont plus étranges que des fictions. Il serait bon que nous ayons quelques lumières sur ces extraordinaires systèmes physiques « dont le pouvoir grossissant nous permet aujourd'hui de voir plus que tout ce que l'on a jamais pu voir auparavant dans le monde »¹.

1. Extrait d'*Éloge du microscope*, (*In Commendation of the Microscope*), poème écrit en 1664 par Henry Powers, cité par Saville Bradbury in *The Microscope, Past and Present*, Oxford, Pergamon, 1968.

LA GRANDE CHAÎNE DES ÊTRES

Le télescope a beaucoup inspiré les philosophes. Galilée lui-même, affirmant qu'on voyait les lunes de Jupiter, invitait à la philosophie en considérant que les lois de la vision sont les mêmes, dans la sphère céleste comme sur terre. Paul Feyerabend s'est servi précisément de cet exemple pour soutenir que la grande science recourt autant à la propagande qu'à la raison : Galilée était un champion de l'arnaque, non de la raison expérimentale. Pierre Duhem a utilisé le télescope pour présenter sa thèse célèbre selon laquelle il n'est jamais nécessaire de rejeter une théorie car les phénomènes qui ne s'accordent pas avec elle peuvent toujours être intégrés en modifiant des hypothèses auxiliaires (si les étoiles ne se trouvent pas là où le prédit la théorie, il faut s'en prendre au télescope et non aux cieux). En comparaison, le microscope n'a joué qu'un rôle bien humble et fut rarement employé pour produire un paradoxe philosophique. Peut-être est-ce parce que tout le monde s'attendait à ce que l'on trouve, ici, sur terre, des mondes à l'intérieur d'autres mondes. Shakespeare se fait ainsi le poète de la grande chaîne des êtres quand il évoque la reine Mab et son carrosse minuscule « traîné par un attelage de petits atomes... Le cocher est un moucheron à cape grise, à moitié gros comme un petit ver rond qu'on sort, avec l'aiguille, du doigt paresseux d'une fille »¹. On croyait à l'existence de petites créatures en deçà du seuil de la vision humaine. Lorsqu'on put disposer de verres dioptriques, on ne remit pas en question pour autant les lois de la vision directe et de la

1. « Drawn with a team of little atomies... her wagoner, a small grey coated gnat not half so big as a round little worm prick'd from the lazy finger of a maid ». Shakespeare, *Roméo et Juliette*, I, 4. 58, p. 66-67. Trad. fr. in W. Shakespeare, *Œuvres complètes, Tragédies I*, édition bilingue, Paris, R. Laffont, 1995, p. 554-555.

réfraction. C'était une erreur. Avant Ernst Abbe (1840-1905), personne, je pense, n'avait compris comment fonctionne un microscope. La réaction immédiate d'un président de la Royal Microscopical Society – qui allait être cité pendant des années dans de nombreuses rééditions du manuel de référence de la microscopie américaine – fut d'affirmer qu'en fin de compte, on ne voyait pas à travers un microscope. La limite théorique de la résolution

[A] devient explicable grâce aux recherches de Abbe. Il est démontré que la vision microscopique est *sui generis*. Il n'y a et il ne peut y avoir aucune comparaison entre la vision microscopique et la vision macroscopique. Les images d'objets minuscules produites au microscope ne sont pas le produit des lois ordinaires de la réfraction. Ce ne sont pas des effets de la dioptrique : elles reposent entièrement sur les lois de la *diffraction*¹.

Il me semble que cela signifie que l'on ne voit pas, en aucun des sens ordinaires du mot, avec un microscope.

LES PHILOSOPHES DU MICROSCOPE

Tous les vingt ans environ, on trouve un philosophe qui parle des microscopes. Lorsque l'esprit du positivisme logique atteignit l'Amérique, on put lire sous la plume de Gustav Bergmann, que, selon son usage de la terminologie philosophique,

...les objets microscopiques ne sont pas des objets physiques au sens littéral, ils ne le sont que par la grâce du langage et de

1. W.B. Carpenter, *The Microscope and Its Revelations*, 8^e éd., W.H. Dallinger, 1899. Cité in S.H. Gage, *The Microscope*, 9^e éd., Ithaca, Comstock, p. 21. Gage oppose à cette idée la théorie rivale selon laquelle la vision microscopique « est à mettre sur le même plan que celle obtenue par l'œil sans assistance, le télescope et l'appareil photographique. Telle est la conception originale, et celle que beaucoup privilégient actuellement ».

l'imagination... Quand je regarde à travers un microscope, tout ce que je vois, c'est une tache de couleur qui glisse dans le champ de vision comme une ombre sur un mur¹.

Quand son tour arriva, Grover Maxwell, niant toute différence fondamentale entre les entités d'observation et les entités théoriques, soutint l'idée d'un continuum de vision : « regarder à travers une vitre, regarder à travers des lunettes, regarder à travers des jumelles, regarder à travers un microscope à faible grossissement, regarder à travers un microscope à fort grossissement, etc. »². Certaines entités peuvent être invisibles à un moment donné, et ensuite, grâce à une nouvelle astuce technologique, elles deviennent observables. La distinction entre ce qui est observable et ce qui est purement théorique n'a pas d'intérêt pour l'ontologie.

Grover Maxwell était partisan d'une certaine forme de réalisme scientifique. Il rejetait l'anti-réalisme qui appelle à ne croire à l'existence que des seules entités observables impliquées par nos théories. Bas Van Fraassen s'oppose vigoureusement à ces idées dans son livre anti-réaliste *The Scientific Image*. Il qualifie sa philosophie d'empirisme constructif et soutient que « la science vise à nous donner des théories empiriquement adéquates; accepter une théorie n'impliquant pas d'autre croyance que celle de son adéquation empirique »³. Six pages plus loin, il propose le commentaire suivant : « Accepter une théorie consiste (pour nous) à croire qu'elle est empiriquement adéquate – que ce que dit la théorie à propos de

1. G. Bergmann, « Outline of an Empiricist Philosophy of Physics », *American Journal of Physics*, 11 (1943), p. 248-258, p. 335-342. Repris in *Readings in the Philosophy of Science*, H. Feigl et M. Brodbeck (eds.), New York, Appleton-Century-Crofts, 1953.

2. G. Maxwell, « The Ontological Status of Theoretical Entities », in *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, vol. 3, H. Feigl et G. Maxwell (eds.), Minneapolis, University of Minnesota Press, 1962, p. 3-27.

3. B. Van Fraassen, *The Scientific Image*, Oxford, Clarendon Press, 1980, p. 12.

ce qui est observable (par nous) est vrai ». À l'évidence, il est essentiel pour Van Fraassen de rétablir la distinction entre observable et inobservable. En revanche, l'endroit exact où l'on devrait tracer la limite lui importe moins. Il accorde que le terme « observable » est vague et que son extension elle-même peut être déterminée par nos théories. En même temps, il voudrait que la limite soit tracée à l'endroit qui est pour lui le plus facile à défendre. Ainsi, même s'il devait se trouver contraint à céder un peu de terrain au cours du débat, il lui en resterait beaucoup du côté « inobservable » de la barrière. Il se méfie du continuum de Grover Maxwell et s'efforce d'entrer aussitôt que possible le glissement par lequel on passe des entités que l'on voit à celles que l'on infère. Il rejette complètement l'idée d'un continuum.

Selon Van Fraassen, la liste de Grover Maxwell donne lieu à deux types de cas entièrement différents. On peut ouvrir la fenêtre et voir le sapin directement. Quant aux objets que l'on voit à travers des jumelles, au moins pour certains d'entre eux, on peut s'en approcher et les examiner en détail à l'œil nu (manifestement, Van Fraassen ne s'est jamais passionné pour l'observation des oiseaux). Mais il n'y a aucun moyen de voir une plaquette sanguine à l'œil nu. Passer du verre grossissant au microscope, fût-il de faible puissance, c'est passer de ce qu'il est possible d'observer à l'œil nu à ce qu'il est impossible d'observer autrement qu'avec des instruments. Van Fraassen conclut qu'on ne voit pas à travers un microscope. Et pourtant on voit à travers certains télescopes. Autant il serait possible d'aller sur Jupiter et de regarder ses lunes, autant il nous est impossible de nous réduire à la taille d'une paramécie pour la regarder. Il compare également la traînée de vapeur laissée par un avion à réaction et la trace d'ionisation produite par un électron dans une chambre à brouillard. Les processus physiques sont similaires, mais alors qu'on peut fixer des yeux l'avant de la traînée blanche et repérer l'avion, ou à défaut attendre qu'il se pose, en revanche, aussi longtemps qu'on

attende, il n'arrivera jamais qu'un électron atterrisse et qu'on puisse le voir.

En poussant à l'extrême la position de Van Fraassen, on pourrait dire que lorsqu'on se sert d'un instrument optique, on n'a observé ou vu quelque chose que dans le cas où des êtres humains doués d'une vision à peu près normale auraient pu voir cette même chose à l'œil nu. Il serait facile d'ironiser : « Qu'y a-t-il donc de si remarquable à avoir 10 sur 10 à chaque œil ? ». Bien sûr, on peut trouver un intérêt à connaître les limites de la vision à l'œil nu, tout comme on peut se mettre au défi d'escalader une falaise sans pitons, ou de faire l'ascension de l'Everest sans oxygène. Mais si l'on se soucie avant tout d'atteindre le sommet, on emploiera tous les moyens qui se présentent. Selon mon livre de science, observer n'est pas voir passivement. Observer est un art, et l'artisan habile est toujours à la recherche de nouveaux outils. En une autre occasion, j'ai cité Caroline Herschel comme exemple d'un talent d'observateur exceptionnel¹. Elle a découvert plus de comètes que quiconque en utilisant un instrument assez rudimentaire, qui permettait de balayer méthodiquement la surface du ciel à l'œil nu, et les télescopes de son frère, William Herschel, ont confirmé ses découvertes. Si nous sommes persuadés qu'elle a bien vu des comètes, cela n'a rien à voir, n'en déplaise à Van Fraassen, avec l'idée fictive que l'on pourrait s'en approcher et constater *de visu* que ce sont bien des comètes – c'est toujours aussi impossible. Pour comprendre si elle a vraiment vu ces objets, ou si l'on voit à travers le microscope, il faut en savoir assez long sur les instruments.

1. Ian Hacking, « Spekulation, Berechnung und die Erschaffung von Phänomenen », in *Versuchungen : Aufsätze zur Philosophie Paul Feyerabend's*, P. Duerr (éd.), Francfort, Suhrkamp, 1981, vol. 2, p. 126-158, surtout p. 134.

NE PAS SE CONTENTER D'EXAMINER : INTERFÉRER

Les philosophes ont tendance à considérer les microscopes comme des boîtes noires ayant d'un côté une source lumineuse et de l'autre un trou permettant de regarder à travers. Si l'on en croit Grover Maxwell, il y a des microscopes de faible puissance et d'autres de forte puissance, et toute une variété d'objets de la même espèce. C'est inexact, comme il est inexact que les microscopes seraient là uniquement pour qu'on regarde à travers. En fait, un philosophe ne parviendra certainement pas à voir à travers un microscope tant qu'il n'aura pas appris à en utiliser plusieurs. Si on lui demande de décrire ce qu'il voit, il pourra, à l'instar de James Thurber, dessiner le reflet de son œil, ou comme Gustav Bergmann, ne voir qu'« une tache de couleur qui glisse dans le champ de vision comme une ombre sur un mur ». À coup sûr, il sera incapable de faire la différence entre un grain de poussière et la glande salivaire d'une drosophile tant qu'il n'aura pas entrepris de disséquer une drosophile sous un microscope à faible grossissement.

Voilà la première leçon : pour apprendre à voir à travers un microscope, il ne suffit pas de regarder, il faut faire. On peut rapprocher ces idées de celles de Berkeley : dans son *Essai sur une nouvelle théorie de la vision*, il dit que nous n'acquérons la vision tridimensionnelle qu'après avoir appris ce qu'est se mouvoir dans le monde et y intervenir. Le sens du toucher est en corrélation avec l'image rétinienne réputée bidimensionnelle, et cette complémentarité qui résulte d'un apprentissage produit la perception tridimensionnelle. De même, ce n'est qu'en nageant sous l'eau que le plongeur apprend à voir dans ce milieu nouveau qu'est l'océan. Que Berkeley ait eu raison ou tort en ce qui concerne la vision primaire, il reste que lorsqu'on acquiert, après l'enfance, de nouvelles manières de voir, on ne peut se contenter de regarder passivement : pour apprendre, on est obligé de faire. La conviction qu'une certaine partie de la cellule existe bien comme on se la représente se

trouve pour le moins renforcée quand, usant de moyens purement physiques, on procède à la micro-injection d'un fluide dans cette partie précise de la cellule. On voit la minuscule aiguille de verre – un outil que l'on a soi-même fabriqué de ses mains sous le microscope – perforer la paroi de la cellule. On voit le liquide s'écouler de la pointe de l'aiguille lorsqu'on tourne doucement la molette micrométrique du piston de la seringue qui lui, est tout à fait macroscopique. Aïe! Maladroit que je suis, je viens de crever la paroi de la cellule. Me voilà condamné à recommencer sur une autre cellule. Les sarcasmes de John Dewey à l'encontre des « théoriciens-spectateurs de la connaissance » valent aussi pour les théoriciens-spectateurs de la microscopie.

Mais ceux qui pratiquent la microscopie ne sont pas pour autant délivrés des perplexités philosophiques. Citons le plus complet des manuels actuels destinés aux biologistes :

[B] En observant un objet familier avec un microscope de faible puissance, le microscopiste peut voir une image légèrement agrandie qui est « identique » à l'objet. Augmenter le grossissement permet de révéler dans l'objet des détails invisibles à l'œil nu, et il est naturel de supposer qu'ils sont, eux aussi, « identiques » à l'objet. (À ce stade, il est nécessaire de s'assurer que ces détails ne sont pas dus au fait qu'on aurait endommagé l'échantillon en le préparant pour l'observation microscopique). Mais que veut-on dire au juste quand on affirme que « l'image est identique à l'objet » ?

À l'évidence, l'image est un pur effet d'optique... L'« identité » entre l'objet et l'image signifie en réalité que les interactions physiques avec le faisceau lumineux qui rendent l'objet visible à l'œil (ou qui le rendraient visible s'il était assez gros) sont identiques à celles qui conduisent la formation d'une image dans le microscope...

Supposons cependant que le rayonnement utilisé pour former l'image soit un faisceau d'ultraviolets, de rayons X ou d'électrons, ou que le microscope soit équipé d'un dispositif convertissant des différences de phase en variations d'intensité. Dans

ce cas, il est impossible que l'image soit « identique » à l'objet, même dans le sens limité qu'on vient de définir! L'œil n'a pas la capacité de percevoir les ultraviolets, les rayons X ou les rayonnements électroniques, ni de détecter les déphasages entre des faisceaux lumineux...

Ce raisonnement révèle que l'image doit être une carte d'interactions entre l'échantillon et le rayonnement produisant l'image¹.

L'auteur poursuit en disant que toutes les méthodes qu'elle a mentionnées, et d'autres encore, « peuvent produire de « vraies » images qui sont, en un certain sens, « comme » l'échantillon ». Elle fait également remarquer que dans le cas d'une technique telle que l'autoradiographie, « on produit une "image" de l'échantillon... obtenue exclusivement du point de vue de la localisation des atomes radioactifs. Cette "image" est d'un genre si spécialisé qu'elle ne peut généralement être interprétée sans le recours à une image supplémentaire, la microphotographie, à laquelle on la superpose ».

Voilà donc un microscopiste tout disposé à soutenir qu'on ne voit à travers un microscope que lorsque les interactions physiques entre l'échantillon et le faisceau lumineux dont procède la formation de l'image sont « identiques » dans le microscope et dans l'œil. C'est un point de vue opposé à celui de la génération précédente, énoncé dans la citation [A], qui soutient que le microscope optique ordinaire, dans la mesure où il fonctionne par diffraction, est un dispositif *sui generis* et ne saurait être assimilé à la vision ordinaire. Les microscopistes [A] et [B], qui sont en désaccord au sujet du plus simple microscope optique, pourraient-ils être sur la bonne voie philosophique au sujet de l'acte de « voir » ? Les guillemets prudents qui encadrent les mots « image » et « vrai » suggèrent une plus grande ambivalence dans les propos de [B].

1. E. M. Slayter, *Optical Methods in Biology*, New York, Wiley, 1970, p. 261-263.

Il faut se méfier particulièrement du mot « image » en microscopie. Il désigne parfois quelque chose que l'on peut montrer du doigt, une forme projetée sur un écran, une microphotographie, ou autre chose. Mais en d'autres occasions, il désigne pour ainsi dire l'*input* de l'œil lui-même. L'origine de ce rapprochement de sens se trouve dans l'optique géométrique, où le dispositif est représenté sous la forme d'un diagramme avec un échantillon placé dans le plan focal (*in focus*) et une « image » située dans l'autre plan focal, cette « image » désignant ce que l'on verra si l'on place l'œil à cet endroit. Je récusé cependant une inférence que l'on pourrait tirer même de la citation [B]. On pourrait avoir l'impression que tout énoncé concernant ce que l'on voit au microscope contient une charge théorique : il est chargé de théorie optique ou de théories concernant d'autres rayonnements. Je ne suis pas de cet avis. On a besoin de théorie pour faire un microscope, on n'en a pas besoin pour l'utiliser. La théorie peut aider à comprendre la présence de franges asymétriques autour des objets observés au microscope à contraste d'interférence, mais on peut apprendre de façon tout à fait empirique à ne pas en tenir compte. Il n'y a guère de biologiste dont les connaissances en optique seraient jugées satisfaisantes par un physicien. C'est en pratiquant – je veux dire de manière générale en faisant, et non en regardant – que l'on apprend à faire la différence entre ce qui est visiblement un artefact dû à la préparation ou à l'instrument, et la structure réelle qui est vue au microscope. C'est de cette compétence pratique que naît la conviction. Elle exige sans doute que l'on sache un peu de biologie, mais on peut très bien trouver des techniciens de premier ordre qui ne connaissent rien à la biologie. En tout cas, la physique ne joue tout simplement aucun rôle dans la perception de la réalité microscopique propre au biologiste. Il est rare que ses observations et ses manipulations portent la moindre charge théorique provenant de la physique.

MAUVAIS MICROSCOPES

Selon une opinion courante, Leeuwenhoek a inventé le microscope et depuis, on a poursuivi son œuvre, réalisant des versions sans cesse améliorées d'objets du même type. Je voudrais rectifier cette idée.

S'il ne fut pas le premier microscopiste, loin s'en faut, Leeuwenhoek était en revanche un technicien de génie. Ses microscopes ne comportaient qu'une seule lentille, et il en fabriquait une nouvelle pour chaque échantillon observé. L'objet était monté sur une aiguille, juste à la bonne distance. Nous ne savons pas vraiment comment il a pu réaliser des dessins aussi merveilleusement précis de ses échantillons. La collection la plus représentative de ces ensembles de lentilles et d'échantillons fut offerte à la Royal Society de Londres, qui la perdit en totalité environ un siècle plus tard, dans ce qu'il est convenu d'appeler des circonstances suspectes. Mais dès cette époque, la colle qui fixait les échantillons s'était altérée et les objets commençaient à tomber de leur support. Il est presque certain que Leeuwenhoek devait ses merveilleux résultats à un secret d'éclairage plutôt qu'au procédé de fabrication de ses lentilles, mais il n'a, semble-t-il, jamais divulgué sa technique. Ce que Leeuwenhoek a inventé, c'est peut-être moins le microscope que l'éclairage en fond noir (*dark field illumination*)¹. Cette idée pourrait être la première d'une longue liste rappelant que beaucoup des principaux progrès de la microscopie n'ont rien à voir avec l'optique. En revanche, il nous a fallu des microtomes pour faire des coupes plus fines dans les échantillons, des colorants à l'aniline pour les teinter, des sources de lumière pure et, à un niveau plus modeste, la vis

1. [N.d.T.] La microscopie en fond noir (ou encore à champ sombre ou en lumière rasante) permet notamment de détecter des structures de surface non visibles en fond clair.

micrométrique pour la mise au point, ainsi que des fixateurs et des centrifugeuses.

Même si les premiers microscopes ont suscité un extraordinaire engouement populaire en révélant des mondes à l'intérieur d'autres mondes, il convient de remarquer qu'après le microscope composé de Hooke, la technologie n'a plus fait de progrès notables : une fois retombé l'enthousiasme des premières observations, il n'en découla guère de connaissances nouvelles. Le microscope devint un jouet pour les dames et les gentlemen de l'establishment britannique. Un jouet qui comprenait le microscope ainsi qu'une boîte d'échantillons tout préparés, végétaux et animaux. Il se pouvait fort bien, d'ailleurs, qu'une boîte de lamelles préparées coûtât plus cher que le microscope lui-même. Il ne s'agissait pas simplement de déposer une goutte d'eau croupie sur un bout de verre et d'observer. À l'exception des spécialistes chevronnés, si l'on voulait simplement voir *quelque chose*, il fallait disposer d'une lamelle déjà préparée. De fait, il est assez incroyable, étant donné les aberrations optiques, que l'on ait jamais pu voir quoi que ce soit à travers un microscope composé, même si, en fait, un technicien vraiment habile peut faire des miracles avec du très mauvais matériel, comme toujours dans les sciences expérimentales.

En microscopie optique de base, on compte environ huit aberrations principales. Les aberrations de sphéricité et les aberrations chromatiques en sont deux exemples importants. Les premières sont dues au polissage des lentilles, que l'on obtient par des frottements aléatoires. Ceux-ci – on peut le démontrer – produisent une surface sphérique. Un rayon lumineux qui s'écarte un peu de l'axe ne convergera pas au même endroit qu'un rayon plus proche de l'axe. Pour les angles i où $\sin i$ est très éloigné de i , il n'y a pas de point de convergence des rayons lumineux : ainsi, un point sur l'échantillon n'apparaîtra au microscope que comme une tache. Huygens avait bien compris cela, et il savait aussi comment y remédier en

théorie, mais il fallut longtemps, en pratique, pour éviter les aberrations de sphéricité par des combinaisons de lentilles concaves et convexes.

Les aberrations chromatiques sont dues aux différences de longueurs d'onde entre des lumières de différentes couleurs. De ce fait, un rayonnement rouge et un rayonnement bleu émanant du même point sur l'échantillon auront chacun un point focal différent. Une image rouge bien au point se superposera à une tache bleue ou vice-versa. Dans ces conditions, même si les gens riches adoraient avoir un microscope chez eux pour se divertir, il n'est pas étonnant que la science sérieuse ait dédaigné cet instrument. On considère souvent Bichat comme le fondateur de l'histologie, l'étude des tissus vivants. En 1800, il n'aurait pas toléré un microscope dans son laboratoire.

Quand on regarde dans l'obscurité, chacun voit à sa manière et suivant la manière dont il est affecté. C'est donc l'observation des propriétés vitales qui doit surtout nous guider et non les images troubles offertes par le meilleur microscope¹.

Il n'y a pas eu de tentative vraiment sérieuse pour mettre au point des microscopes achromatiques, Newton ayant écrit que c'était physiquement impossible. Grâce à la découverte du flint glass², qui présente des indices de réfraction différents de ceux du verre ordinaire, il est devenu possible d'en fabriquer. Un doublet de deux lentilles présentant des indices de réfraction différents peut être agencé de manière à éliminer totalement l'aberration pour une paire déterminée de longueurs d'ondes de rouge et de bleu, et bien que le résultat soit imparfait sur l'ensemble du spectre, l'imperfection est pratiquement négligeable et peut encore être amoindrie avec un triplet de

1. X. Bichat, *Traité des membranes en général et de diverses membranes en particulier*, Paris, Richard, Caille et Ravier, année VIII-1799, p. 32.

2. [N.d.T.] Verre cristallin à forte teneur en plomb, à grand pouvoir dispersif et réfringent.

lentilles. Le premier qui eut l'idée de cette solution tenait tellement à la garder secrète qu'il s'adressa à deux fabricants distincts pour commander des lentilles taillées dans des verres différents. Mais tous deux sous-traitèrent avec le même artisan, qui fut assez astucieux pour soupçonner que les verres étaient destinés au même appareil. Finalement, en 1758, l'idée fut piratée. À l'issue du procès pour les droits d'exploitation de l'invention, la décision fut favorable à l'auteur du piratage, John Doland. Le juge de la Haute cour décréta que ce n'était pas celui qui a enfermé l'invention dans son secrétoire qui devait bénéficier d'un brevet pour une telle invention, mais celui qui lui a donné corps et en a fait profiter le public¹. Le public n'en profita pas tellement. Jusque dans les années 1860, on débattait sérieusement pour savoir si certains corpuscules que l'on voyait au microscope étaient des artefacts produits par l'instrument ou d'authentiques éléments de matière vivante (en l'occurrence, il s'agissait d'artefacts). Puis les microscopes devinrent vraiment meilleurs et la microscopie progressa plus rapidement. Si l'on trace une courbe de développement, on obtient un premier sommet vers 1660, puis un plateau légèrement ascendant qui se poursuit jusqu'à un grand bond aux alentours de 1870. Vers 1945 débute une nouvelle période faste, qui se poursuit encore aujourd'hui. Cette courbe a été tracée avec une grande précision par un historien qui a pris pour échelle la résolution maximale des instruments employés à chaque époque². Une évaluation subjective des grandes applications du microscope produirait une courbe assez semblable, si ce n'est que le contraste entre les années 1870 et 1660 ressortirait plus nettement. Avant 1860, le microscope n'a produit que fort peu de découvertes vraiment mémorables. L'éclosion de la nouvelle microscopie est due en partie à

1. Cité in Bradbury, *The Microscope, Past and Present*, p. 130.

2. S. Bradbury and G.L.E. Turner (eds.), *Historical Aspects of Microscopy*, Cambridge, Heffer, 1967.

Abbe, mais la raison la plus immédiate de ce progrès fut l'utilisation de colorants à base d'aniline. La matière vivante est généralement transparente. Les nouveaux colorants à l'aniline permirent de voir les microbes et bien d'autres choses.

ABBE ET LA DIFFRACTION

Comment voit-on « normalement » ? Le plus souvent, on voit de la lumière réfléchiée. Mais si l'on utilise un verre grossissant pour examiner un objet éclairé par derrière, ce que l'on « voit » alors, c'est la lumière transmise ou absorbée. Nous aboutissons donc à l'idée suivante : voir quelque chose à travers un microscope optique, c'est voir des zones d'ombre et de lumière correspondant à la proportion de lumière absorbée ou transmise. Nous voyons le changement d'amplitude des rayons lumineux. Il y a quelque chose qui ne va pas dans cette conception, et je pense que même Huygens le savait. Pourtant, ce n'est qu'en 1873 que l'on trouve un texte expliquant comment fonctionne un microscope¹.

L'histoire d'Ernest Abbe est un modèle d'ascension sociale spectaculaire. Fils d'un ouvrier des filatures, il parvint à apprendre les mathématiques et obtint des bourses pour poursuivre ses études au lycée. Il fut chargé de cours en mathématiques, en physique et en astronomie. Ses travaux sur l'optique lui ouvrirent des portes. Il fut embauché dans la petite entreprise de Carl Zeiss à Iéna. À la mort de Zeiss, l'entreprise lui revint. À sa retraite, il se consacra à des activités philanthropiques. La société Carl Zeiss devint la plus importante des entreprises d'optique grâce aux innombrables innovations mathématiques et pratiques introduites par Abbe. Je n'en évoquerai qu'une seule.

1. E. Abbe, « Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung ».

Abbe s'intéressait à la résolution. Le grossissement n'apporte rien s'il « agrandi » deux points distincts pour en faire une grosse tache floue. Ce qu'il faut, c'est résoudre les points en deux images distinctes. G. B. Airy, l'astronome royal d'Angleterre, avait bien saisi le problème lorsqu'il déclarait que le télescope devait permettre de distinguer des étoiles jumelles. C'est une question de diffraction. Le plus familier des phénomènes de diffraction est le fait que des objets aux contours nets ont une ombre floue. C'est un effet du caractère ondulatoire de la lumière. Quand la lumière se déplace entre deux fentes étroites, une partie du rayonnement va traverser les fentes en ligne droite, une autre partie va dévier du rayon principal selon un certain angle, une autre encore déviara d'un angle plus important : ce sont les rayons diffractés de premier ordre, de second ordre, etc.

Abbe se saisit du problème suivant : comment résoudre (c'est-à-dire distinguer de façon visible) des lignes parallèles sur une diatomée. Ces lignes sont très rapprochées, leur largeur et l'intervalle qui les sépare est à peu près uniforme. Très vite, il eut la possibilité de travailler sur des réseaux de diffraction artificiels encore plus réguliers. Son analyse est un exemple de la manière dont la science pure peut être appliquée, dans la mesure où il avait créé la théorie pour un cas pur : celui où l'on observe un réseau de diffraction, et il inféra que ce cas représente toute l'infinie complexité des phénomènes physiques qui sont en jeu lorsqu'on observe au microscope un objet hétérogène.

La plus grande partie de la lumière qui frappe un réseau de diffraction n'est pas transmise mais diffractée. Elle est renvoyée par le réseau selon des angles de diffraction du premier, du deuxième ou du troisième ordre, ces angles étant définis pour partie en fonction des distances entre les lignes sur le réseau. Abbe s'aperçut que pour voir les rainures du réseau, il fallait capter non seulement la lumière transmise, mais également les rayons diffractés, au moins du premier ordre. En fait,

la meilleure représentation de ce qu'on voit est une synthèse de Fourier des rayons transmis et diffractés. Selon Abbe, l'image de l'objet est donc produite par l'interférence des ondes lumineuses émises par l'image principale et des images secondaires de la source lumineuse produites par la diffraction.

Les applications pratiques sont nombreuses. Bien sûr, on captera davantage de rayons diffractés avec une plus grande ouverture de l'objectif, mais dans ce cas, on a aussi beaucoup plus d'aberrations de sphéricité. On peut également modifier le milieu qui sépare l'échantillon de la lentille. Avec un matériau plus dense que l'air, comme l'huile des microscopes à immersion, on parvient, à ouverture égale, à capter davantage de rayons diffractés et on augmente ainsi la résolution du microscope.

En dépit de la qualité des premiers microscopes Abbe-Zeiss, la théorie rencontra des résistances pendant de nombreuses années, particulièrement en Angleterre et en Amérique, pays qui avaient dominé le marché depuis un siècle. Jusque vers 1910, les meilleurs microscopes anglais, conçus sur des bases purement empiriques – sans compter quelques idées volées à Abbe – avaient une résolution équivalente voire supérieure à celle des appareils de Zeiss. Néanmoins, l'habileté coûteuse des artisans procédant par essais et erreurs était condamnée. Pourtant, les rivalités commerciales ou nationales ne suffirent pas à expliquer pourquoi on hésitait à croire aux théories d'Ernest Abbe. Dans un manuel américain de 1916, on signale que, pour expliquer la vision ordinaire, une théorie rivale (et plus proche du « sens commun ») est en passe de s'imposer une fois de plus et d'avoir raison des idées d'Ernest Abbe!! Les résistances étaient dues en partie à

1. S. H. Gage (note 3), 11^e éd., 1916. La citation de Carpenter et Dallinger disparaît dans la 12^e éd. de 1917, qui en conserve néanmoins l'esprit, y compris le « *sui generis* ». Gage reconnaît que « l'on a conçu certaines expériences très frappantes pour prouver la justesse des hypothèses de Abbe, mais comme beaucoup l'ont fait remarquer, l'usage ordinaire du microscope n'implique

l'étonnement que suscitait la thèse de Abbe, qui conduisait apparemment à l'idée que, comme l'énonce la citation [A], « il n'y a et il ne peut y avoir aucune comparaison entre la vision microscopique et la vision macroscopique ».

Si vous soutenez (comme cela semble encore être le cas dans la citation [B], pourtant plus moderne) que ce qu'on voit dépend essentiellement de certains processus physiques dans l'œil, alors tout le reste doit relever plutôt du domaine des illusions d'optique ou, au mieux, de la cartographie. Dans cette perspective, les systèmes de Leeuwenhoek et de Hooke permettent bel et bien de voir. Après Abbe, même le microscope optique conventionnel devient essentiellement un dispositif réalisant des synthèses de Fourier de diffractions du premier ou même du deuxième ordre. Vous devez donc soit modifier votre conception de la vision, soit admettre qu'on ne voit pas à travers un microscope digne de ce nom. Avant d'en arriver à des conclusions sur ce point, nous ferions mieux d'examiner quelques instruments plus récents.

UNE PLÉTHORE DE MICROSCOPES

Transportons-nous après la seconde Guerre mondiale. La plupart des idées de l'époque avaient déjà circulé dans l'entre-deux-guerres, mais à l'époque, on n'avait pas dépassé le stade du prototype. Une de ces inventions est nettement plus ancienne, mais pendant assez longtemps, elle n'avait pas été convenablement exploitée.

Le premier problème pratique rencontré par le biologiste cellulaire provient de ce que, la plupart du temps, le matériau

jamais les conditions que l'on réalise dans ces expériences», p. 301. Imre Lakatos se serait délecté de ce programme de recherche en dégénérescence visant à préserver la conception naïve de la vision, complété par la mise hors-jeu des expériences frappantes, données pour monstrueuses. Pour l'essentiel, ce passage est resté inchangé même dans la 17^e édition de 1941.

vivant n'est pas observable avec un microscope optique ordinaire parce qu'il est transparent. Pour y voir quelque chose, il faut colorer l'échantillon. Or, les colorants à l'aniline figurent parmi les pires poisons qui existent : on ne verra donc qu'une cellule tout à fait morte, c'est-à-dire aussi, très probablement, une cellule structurellement endommagée, présentant des structures qui ne sont que des artefacts de préparation. Il se trouve cependant que les propriétés biréfringentes (polarisantes) du matériau vivant sont variables. Ajoutons alors à notre microscope un polariseur et un analyseur. Le polariseur permet de ne transmettre à l'échantillon qu'une lumière polarisée ayant certaines propriétés. Dans le cas le plus simple, l'analyseur est placé perpendiculairement au polariseur, de manière à ce que la seule lumière transmise soit de polarisation opposée à celle du polariseur : on obtient une obscurité totale. Supposons maintenant que l'échantillon lui-même soit biréfringent : il pourrait alors modifier le plan de polarisation de la lumière incidente, et on obtiendrait une image visible grâce à l'analyseur. De cette manière, on peut observer sans colorant les fibres « transparentes » d'un muscle strié, en se servant uniquement de certaines propriétés de la lumière que normalement on ne peut pas « voir ».

La théorie de la diffraction de Ernest Abbe, avec le renfort du microscope polarisant, conduit à ce qui ressemble à une révolution conceptuelle. Il n'est pas nécessaire de voir par les moyens de la physique « normale » de la vision pour percevoir des structures dans le matériau vivant : en réalité, cela ne se produit jamais. Même dans le cas standard, on voit l'échantillon en réalisant la synthèse de rayons diffractés plutôt que par les moyens de la physique « normale » de la vision. Et le microscope polarisant vient nous rappeler que la lumière ne se limite pas aux seuls phénomènes de réfraction, d'absorption et de diffraction. *Pour étudier la structure d'un échantillon, on pourrait utiliser n'importe quelle propriété de la lumière qui*

entre en interaction avec lui. En fait, on pourrait utiliser n'importe quelle propriété de *n'importe quel type d'onde*.

Mais même si on s'en tient à la lumière, il y a fort à faire. La microscopie à ultraviolet double la résolution, mais son intérêt principal est de mettre en évidence les caractéristiques d'absorption des ultraviolets qui sont spécifiques à certaines substances importantes en biologie. En microscopie à fluorescence, on supprime l'éclairage incident : on observe uniquement la lumière réémise, à différentes longueurs d'onde, par des effets – naturels ou induits – de phosphorescence ou de fluorescence. C'est une technique précieuse en histologie, pour étudier certaines sortes de matière vivante. Plus intéressant encore que de se servir de modalités de transmission ou d'émission inhabituelles, on peut jouer directement avec la lumière elle-même, comme le font le microscope à contraste de phase de Zernike et le microscope à interférence de Nomarski.

Un échantillon transparent absorbe la lumière de façon uniforme. Néanmoins, il se peut que sa structure présente, en différents endroits, d'invisibles variations de l'indice de réfraction. Le microscope à contraste de phase les convertit en variations d'intensité visibles dans l'image de l'échantillon. Avec un microscope ordinaire, l'image est la synthèse des ondes diffractées D et des ondes directement transmises U . Le microscope à contraste de phase permet de séparer physiquement les ondes U et D par un moyen ingénieux, quoique simple du point de vue physique. L'un ou l'autre type d'ondes présente alors un retard de phase standard qui a pour effet de produire dans le plan focal un contraste de phase correspondant aux différences d'indice de réfraction dans l'échantillon.

Le microscope à contraste d'interférence est peut-être plus facile à comprendre. La source lumineuse est simplement divisée au moyen d'un miroir semi-réfléchissant : la moitié de la lumière traverse l'échantillon tandis que l'autre moitié est conservée comme une simple onde de référence qui sera

recombinée à la première moitié pour produire l'image définitive. Les modifications de chemin optique provoquées par les variations de l'indice de réfraction dans l'échantillon engendrent des effets d'interférence avec le faisceau de référence.

Le microscope à interférence a l'inconvénient de produire des franges illusoires, mais il a le grand avantage de permettre de déterminer quantitativement les indices de réfraction dans l'échantillon. Naturellement, une fois que l'on est parvenu à construire de tels appareils, on peut fabriquer des variantes à l'infini : microscopes polarisants à interférence, à interférence de faisceaux multiples, à interférence de phase modulée, et ainsi de suite.

LA VÉRITÉ EN MICROSCOPIE

Les caractéristiques distinctives de la technique de contraste d'interférence différentielle sont les suivantes : l'image restitue le vrai profil aussi bien des contours (bords) clairement visibles de l'objet que des structures continues (stries).

Voilà ce qu'on peut lire dans un catalogue actuel de Carl Zeiss. Qu'est-ce qui permet au vendeur enthousiaste de supposer que les images produites par ces différents systèmes optiques sont « vraies » ? Bien sûr, les images ne sont « vraies » que lorsqu'on a appris à ne pas tenir compte des distorsions. Il y a de nombreuses raisons de se convaincre qu'un élément de structure que l'on perçoit est réel ou vrai. La plus importante est l'une des plus naturelles. Pour en donner une illustration, je prendrai l'exemple de ma propre expérience, la première fois que je suis entré dans un laboratoire¹. Avec un microscope

1. J'ai une dette particulière envers mon ami R. J. Skaer de Peterhouse, à Cambridge, qui m'a permis de passer beaucoup de temps dans son laboratoire de biologie cellulaire au département de Médecine hématologique de l'université de Cambridge.

électronique de faible puissance, on découvre de petites taches sur les globules rouges. On les appelle des corps denses : cela signifie simplement qu'ils sont électron-denses, et qu'ils apparaissent au microscope électronique à transmission sans préparation ni coloration d'aucune sorte. En se fondant sur les mouvements et la densité de ces corps à divers stades du développement ou de la pathologie cellulaire, on fait l'hypothèse qu'ils pourraient avoir un rôle important dans la biologie du sang. D'un autre côté, il se peut aussi qu'il s'agisse simplement d'artefacts dus au microscope électronique. Il y a une manière très simple de s'en assurer : peut-on voir ces mêmes corps en employant des techniques totalement différentes du point de vue physique ? Si c'est le cas, le problème est facile à résoudre. Le microscope électronique à faible résolution est à peu près de même puissance qu'un microscope optique à haute résolution. Les corps denses n'apparaissent pas avec toutes les techniques, mais ils sont révélés au microscope à fluorescence en employant des colorants fluorescents.

On fixe des coupes de globules rouges sur une grille microscopique. Il s'agit littéralement d'une grille : au microscope, ce qu'on voit est une grille dont chaque carré est marqué d'une lettre en majuscule. À partir des coupes montées sur ces grilles, on réalise des microphotographies électroniques. Les échantillons présentant des configurations particulièrement frappantes de corps denses sont ensuite préparés pour la microscopie à fluorescence. Enfin, on compare les microphotographies électroniques et les microphotographies à fluorescence. On est sûr que les microphotographies montrent la même partie de la cellule, parce que cette partie est clairement repérable grâce à la lettre – par exemple *P* – qui marque le carré de la grille où elle se trouve. Dans les microphotographies à fluorescence, on retrouve exactement le même agencement de la grille, de la structure générale de la cellule et des sept « corps » qui figuraient sur la microphotographie électronique.

On en infère que ces corps ne sont pas des artefacts dus au microscope électronique.

Deux processus physiques – la transmission électronique et la ré-émission fluorescente – sont employés pour détecter ces corps. Ces deux processus n'ont à peu près rien de commun. Ils relèvent pour l'essentiel de segments disjoints de la physique. Il faudrait une coïncidence tout à fait incroyable pour que, à maintes et maintes reprises, deux processus physiques totalement différents produisent des configurations visuelles identiques qui ne seraient pourtant que des artefacts des processus physiques et non des structures réellement présentes dans la cellule.

Remarquez que personne, en pratique, ne formule jamais cet « argument de la coïncidence ». On se contente d'examiner les deux jeux de microphotographies (ou plus, de préférence) provenant de systèmes physiques différents, et on constate que les corps denses figurent exactement au même endroit dans chaque paire de microphotographies. Cela règle aussitôt la question. En fait, le Dr. Richard Skaer, mon mentor sur ces questions, pensait pouvoir démontrer que ces corps denses ne sont que des artefacts. Une fois qu'il eut examiné l'ensemble de ses microphotographies expérimentales, il ne lui fallut que cinq minutes pour comprendre qu'il s'était trompé.

Remarquez aussi qu'il n'est pas nécessaire que l'on sache ce que *sont* les corps denses. Tout ce que nous savons, c'est que la cellule possède certaines caractéristiques structurales qu'on peut rendre visibles par diverses techniques. La microscopie elle-même ne pourra jamais tout nous apprendre sur ces corps (à supposer qu'il y ait quelque chose d'important à dire). Il faut faire appel à la biochimie. En outre, nous disposons aujourd'hui de moyens d'analyse spectroscopique instantanée qui décomposent les corps denses en leurs éléments constituants, en combinant un microscope électronique et un analyseur spectroscopique. Le procédé est sensiblement le même

que celui que l'on emploie pour l'analyse spectroscopique des étoiles.

COÏNCIDENCE ET EXPLICATION

Le débat sur le réalisme scientifique a rendu beaucoup plus courant l'argument de la coïncidence. En particulier, J. J. C. Smart remarque que l'on a recours aux bonnes théories pour expliquer différents phénomènes. Ce serait une coïncidence cosmique, dit-il, si la théorie était fautive et permettait néanmoins des prédictions justes de tous les phénomènes :

Il faudrait supposer qu'ils s'est produit une quantité innombrable d'heureux hasards dans les comportements décrits par le vocabulaire observationnel, de sorte qu'ils se sont produits miraculeusement *comme* s'ils avaient été provoqués par les choses non-existantes dont le vocabulaire théorique est censé parler¹.

Van Fraassen conteste cette thèse ainsi que des raisonnements du même genre en faveur du réalisme qui recourent à ce que Gilbert Harman appelle « l'inférence à la meilleure explication », ou à ce que Hans Reichenbach et Wesley Salmon appellent l'argument de la « cause commune ». On pourrait penser que mes propos sur la coïncidence me jettent au cœur d'une bataille en cours. Pas du tout. Mon raisonnement est bien plus localisé et ne me lie aucunement aux positions de Smart ou de Salmon.

Premièrement, il n'est pas question ici du vocabulaire observationnel et théorique. Il se peut très bien qu'il n'y ait pas de vocabulaire théorique pour désigner les choses que l'on voit au microscope – « corps dense » ne désigne rien d'autre que quelque chose de dense, c'est-à-dire quelque chose qui

1. J. J. C. Smart, *Between Science and Philosophy*, New York, Random House, 1968, p. 150.

apparaît au microscope électronique sans coloration ni préparation. Deuxièmement, il n'est pas question d'explication. On voit les mêmes constellations de points, que l'on utilise un microscope électronique ou une coloration fluorescente, et on ne donne pas une « explication » de ce fait en disant qu'un certain type de chose bien défini (dont la nature reste encore inconnue) est responsable de ces configurations persistantes de points. Troisièmement, nous n'avons pas de théorie qui prédise une vaste gamme de phénomènes. La quatrième différence est peut-être la plus importante : ce qui nous intéresse, c'est de distinguer les artefacts des objets réels. Dans les débats métaphysiques sur le réalisme, on oppose des « entités réelles mais inobservables » à des entités qui « ne sont pas des entités réelles, mais plutôt des outils de pensée ». Avec le microscope, nous savons qu'il y a des points sur des microphotographies. La question est la suivante : s'agit-il d'artefacts produits par le système physique ou de structures présentes dans l'échantillon lui-même ? Mon argument de la coïncidence consiste simplement à dire que ce serait une coïncidence tout à fait incroyable si on obtenait les mêmes configurations de points sur les microphotographies réalisées avec deux types de systèmes physiques totalement différents.

L'ARGUMENT DE LA GRILLE

Je vais maintenant me risquer à un petit excursus philosophique sur le thème du réalisme scientifique. Van Fraassen affirme qu'on peut voir à travers un télescope parce que, même si le télescope est indispensable pour observer les lunes de Jupiter depuis la terre, on pourrait se rendre sur place et observer ces lunes à l'œil nu. Peut-être ce rêve s'accomplira-t-il un jour prochain, mais pour l'heure, cela relève de la science fiction. Le microscopiste se méfie des rêves. Plutôt que de s'envoler vers Jupiter, il réduit le monde visible. Prenez les

grilles évoquées plus haut, que l'on utilise pour réidentifier les corps denses. Ce sont des grilles métalliques minuscules, à peine visibles à l'œil nu. Pour les fabriquer, on dessine une très grande grille à la plume et à l'encre. Un dessinateur trace les lettres avec soin dans un coin de chaque case de la grille. Celle-ci est alors réduite photographiquement. Sur la microphotographie ainsi obtenue, on dépose du métal selon des techniques désormais courantes. Les grilles sont vendues par paquets, ou plutôt par tubes, de 100, 250 ou 1000 unités. Les procédés de fabrication de ces grilles sont parfaitement bien compris, et aussi fiables que n'importe quel autre système de production de masse de haute qualité.

En bref, plutôt que de nous transporter sur Jupiter à bord d'un vaisseau spatial imaginaire, nous réduisons routinièrement une grille. Ensuite, nous observons le disque minuscule à travers à peu près tous les types de microscopes et nous voyons exactement les mêmes formes et lettres que celles qui avaient été tracées à grande échelle par le dessinateur. Il est impossible de penser sérieusement un seul instant que ce disque minuscule, que je tiens avec des pincettes, n'a pas en réalité la structure d'une grille marquée de lettres. Je sais que ce que je vois au microscope est véridique parce que la grille est faite pour être exactement ainsi. Je sais que le procédé de fabrication est fiable, parce que le résultat peut être vérifié au microscope. Plus encore, on peut vérifier le résultat avec n'importe quel type de microscope exploitant un processus donné parmi la douzaine de processus physiques indépendants que l'on utilise pour produire des images. Peut-on néanmoins imaginer que, malgré tout, cela pourrait n'être qu'une gigantesque coïncidence ? Est-il faux de penser que le disque a bien en fin de compte la forme d'une grille marquée de lettres ? Y aurait-il une gigantesque conspiration de treize processus physiques totalement indépendants, de sorte que la grille à grande échelle aurait été réduite à quelque chose qui n'est pas une grille mais qui, observée au moyen de douze types de

microscopes différents, a néanmoins l'air d'une grille ? Pour être anti-réaliste à propos de cette grille, on serait condamné à invoquer, pour le moins, quelque Malin génie cartésien du microscope.

L'argument de la grille exige probablement une saine reconnaissance de l'absence d'unité (*disunity*) de la science, au moins du point de vue phénoménologique. Les microscopes optiques, c'est une banalité, utilisent tous la lumière, mais l'interférence, la polarisation, le contraste de phase, la transmission directe, la fluorescence, et ainsi de suite, sont autant de procédés qui exploitent des caractéristiques phénoménologiques de la lumière sans rapport les uns avec les autres. Si l'on peut discerner la même structure en utilisant plusieurs de ces aspects différents des ondes lumineuses, alors on ne peut supposer sérieusement que cette structure n'est qu'un artefact de tous ces différents systèmes physiques. Il faut souligner également que tous ces systèmes physiques sont créés par l'homme. Nous purifions pour ainsi dire certains aspects de la nature en isolant, par exemple, les caractéristiques d'interférence de phase de la lumière. Nous concevons des instruments en connaissant exactement leur principe de fonctionnement, précisément parce que l'optique est une science bien comprise. Nous passons un certain nombre d'années à mettre au point divers prototypes, et nous obtenons finalement un instrument opérationnel qui permet de discerner une structure particulière. Plusieurs autres instruments opérationnels fondés sur des principes entièrement différents, révèlent la même structure. Hormis le sceptique cartésien, plus personne ne peut imaginer que cette structure est produite par les instruments et n'est pas inhérente à l'échantillon.

Il fut un temps où il était non seulement possible, mais même parfaitement sensé de bannir le microscope des laboratoires d'histologie, pour la simple raison qu'il révélait davantage les artefacts du système optique que la structure des fibres. Ce n'est plus le cas aujourd'hui. Bien sûr, quand on

innove en microscopie, il est toujours délicat d'acquiescer la conviction que ce qu'on voit n'est pas un artefact dû à la préparation ou au système optique, mais fait réellement partie de l'échantillon. Pourtant en 1981, à la différence de ce qui se passait en 1800, nous disposons de tout un arsenal de moyens permettant d'établir une telle conviction. Pour m'en tenir à l'aspect « visuel » – et même là, je simplifie beaucoup –, je soutiens que si l'on peut voir une structure ayant les mêmes caractéristiques fondamentales en employant plusieurs systèmes physiques différents, on a une excellente raison de dire « c'est réel » plutôt que « c'est un artefact ». Ce n'est pas une raison absolument concluante, mais la situation est la même pour la vision ordinaire. Si l'on aperçoit des taches noires sur l'asphalte de la route, un jour de grosse chaleur, et que l'on continue à les voir toujours au même endroit sous plusieurs perspectives différentes, on conclut que ce sont des flaques que l'on voit, et non l'illusion familière. Et malgré tout, on peut encore se tromper. En microscopie aussi, il arrive de temps en temps qu'on se trompe. Mais, du fait qu'il se produit dans les perceptions macroscopiques et les perceptions microscopiques des types d'erreurs aussi semblables, on est d'autant plus enclin à dire, simplement, que l'on voit à travers un microscope.

Je dois répéter que, tout comme dans la vision grandeur nature, les « images » mêmes ou les microphotographies ne constituent qu'une petite part de ce qui fait notre confiance dans la réalité. Récemment, le biologiste moléculaire G. S. Stent a rappelé lors d'une conférence qu'à la fin des années quarante ou au début des années cinquante, le magazine *Life* avait consacré une pleine page de couverture à une microphotographie électronique, fièrement intitulée : « la première photographie du gène »¹. Étant donné ce qu'était

1. Stent faisait probablement référence au numéro de *Life* du 17 mars 1947, p. 83.

à l'époque la théorie du gène – ou l'absence de théorie –, ce titre n'avait aucun sens, disait Stent. Ce n'est qu'en comprenant mieux ce qu'est un gène que l'on peut parvenir à une conviction au sujet de ce que montre la microphotographie. Si nous finissons par être convaincus de la réalité des bandes chromosomiques et des intervalles séparant ces bandes sur les chromosomes, ce n'est pas simplement parce que nous les voyons, mais parce que nous avons élaboré certaines conceptions de leur fonction et de leur raison d'être. Mais là non plus, il n'y a pas de différence entre vision microscopique et vision macroscopique : un Lapon débarquant au Congo ne verra pas grand chose dans ce nouvel environnement bizarre, jusqu'à ce qu'il commence à se faire une idée de ce qu'on trouve dans la jungle.

Par conséquent, je ne prétends pas que l'argument de la coïncidence puisse fonder à lui seul notre conviction de voir juste (*to see true*) à travers le microscope. C'est là un des éléments, un élément visuel irrésistible, qui s'ajoute à des modes de compréhension plus intellectuels et à d'autres types de travaux expérimentaux. La microscopie biologique sans la biochimie appliquée est aussi aveugle que l'intuition sans concept chez Kant.

LE MICROSCOPE ACOUSTIQUE

J'évite d'aborder ici le microscope électronique. En réalité, on ne peut pas décrire « le » microscope électronique, pas plus que « le » microscope optique : toutes sortes de propriétés différentes des faisceaux d'électrons sont mises à profit. Une explication simple mais un tant soit peu complète exigerait un autre article. Toutefois, au cas où notre choix d'exemples fondés sur les propriétés de la lumière visible paraîtrait un peu maigre, nous allons examiner brièvement le

type de rayonnement le plus éloigné de nos exemples que l'on puisse imaginer : le son¹.

Le radar, inventé pour les besoins de la guerre aérienne, et le sonar, inventé pour la guerre en mer, nous rappellent que des fronts d'ondes longitudinales et transversales peuvent servir le même genre d'objectifs. Les ultrasons sont des « sons » à très haute fréquence. L'examen par ultrasons du fœtus *in utero* leur a valu récemment une publicité méritée. Il y a plus de quarante ans, des scientifiques soviétiques avaient eu l'idée d'un microscope utilisant des sons d'une fréquence 1000 fois plus élevée que le bruit audible.

La technologie n'a rattrapé cette idée que très récemment. On commence tout juste à faire fonctionner des prototypes opérationnels.

La partie acoustique du microscope est relativement simple. Le signal électrique est d'abord converti en signal sonore; ensuite, après interaction avec l'échantillon, il est reconverti en électricité. L'ingéniosité des instruments actuels réside moins dans le procédé acoustique que dans l'électronique. Le microscope acoustique est un appareil à balayage. Il convertit les signaux en images qui peuvent être affichées sur un écran de télévision, imprimées sur une microphotographie ou, lorsqu'on étudie un grand nombre de cellules, enregistrées sur une bande vidéo.

Comme toujours, l'intérêt d'un nouveau type de microscope est lié aux aspects nouveaux qu'il peut révéler dans l'échantillon. Les variations d'indice de réfraction sont beaucoup plus importantes pour le son que pour la lumière. De plus, le son peut se transmettre à travers des objets totalement opaques. C'est pourquoi l'un des premiers

1. C.F. Quate, «The Acoustic Microscope», *Scientific American* 241, oct. 1979, p. 62-69. R.N. Johnston, A. Atalar, J. Heiserman, V. Jipson, et C.F. Quate, «Acoustic Microscopy: Resolution of Subcellular Detail», *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.* 76, 1979, p. 3325-3329.

domaines d'application du microscope acoustique est la métallurgie, ainsi que la détection des défauts des puces de silicium. Pour le biologiste, il ouvre aussi de grandes perspectives. Le microscope acoustique est sensible à la densité, à la viscosité et à la flexibilité de la matière vivante. En outre, le scanner n'émet que des impulsions sonores très courtes qui ne causent pas de dommage immédiat à la cellule. De ce fait, il permet littéralement d'étudier la vie de la cellule : on peut observer les changements de viscosité et de flexibilité pendant que la cellule vaque à ses occupations.

La microscopie acoustique se développe rapidement sans que nous sachions pour autant où cela va mener. Il y a deux ans, les rapports de recherche prenaient soin de rejeter l'idée que les microscopes acoustiques puissent concurrencer les microscopes électroniques : ils étaient heureux de faire état de résolutions approchant celles des microscopes optiques. Aujourd'hui, en utilisant les propriétés du son dans des solides superfroids, on parvient à des résolutions équivalentes à celles des microscopes électroniques – ce qui à vrai dire n'est pas d'une grande utilité pour étudier les tissus vivants.

Est-ce qu'on voit avec un microscope acoustique ?

REGARDER AU MICROSCOPE

Est-ce qu'on voit à travers un microscope ? Commençons par faire un sort à ce mot anachronique : à *travers*. Le premier pas de la technologie fut de regarder à travers une lentille. Ensuite, on se mit à regarder à travers le tube d'un microscope composé. La microphotographie est un exemple plus pertinent : nous étudions des photographies prises avec un microscope. L'énorme distance focale des microscopes électroniques permet facilement de visionner l'image sur une grande surface plate : ainsi, chacun peut se tenir autour et montrer ce qui est intéressant. Avec les microscopes à balayage, l'image

se forme nécessairement sur un écran ou une plaque. Les images peuvent être numérisées et retransmises sur un écran de télévision, par exemple. En outre, la numérisation est merveilleusement efficace pour effacer le bruit et même pour reconstituer des informations perdues. Mais ne nous laissons pas impressionner par la technologie. Pour étudier les structures cristallines, un bon moyen de se débarrasser du bruit consiste à découper méthodiquement une microphotographie dont on va ensuite recoller les morceaux, et à la rephotographier pour le contraste d'interférence.

En règle générale, on ne voit pas à travers un microscope : on voit avec. Mais est-ce qu'on voit avec un microscope ? Il serait absurde d'ouvrir un débat sur le sens ordinaire du mot *voir*, qui est déjà affecté à un nombre incalculable d'emplois de nature complètement intellectuelle, comme dans : « je vois le problème », et d'autres usages apparentés en mathématiques. Pensons aussi à la manière dont les physiciens parlent des entités hypothétiques. Je cite une conférence où l'on dressait une liste de douze fermions, les constituants fondamentaux de la matière, incluant les neutrinos électroniques, les deutérons, etc. On nous dit que « de ces fermions, seul le quark top (*t*) n'a pas encore été vu. Quant à savoir pourquoi on ne parvient pas à observer avec le collisionneur PETRA des états $t\bar{t}$ dans les annihilations e^+e^- , cela reste une énigme »¹. Pour ce physicien des hautes énergies, il y a loin de l'œil à la vue et à l'observation. (Il est probable que voir ne s'est trouvé associé en particulier avec la vision oculaire qu'au début du dix-neuvième siècle, comme il apparaît dans les doctrines jumelles que sont le positivisme et la phénoménologie, ces philosophies qui soutiennent que voir est une opération de l'œil, non de l'esprit).

1. C. Y. Prescott, « Prospects for Polarized Electrons at High Energies », Stanford Linear Accelerator, SLAC-PUB-2630, oct. 1980, p. 5.

Prenons l'exemple du dispositif qui équipe les avions de combat chargés d'armes nucléaires forcés de rester à basse altitude et de voler en rase motte à quelques dizaines de mètres du sol pour déjouer la détection radar. Les échelles verticales et horizontales intéressent toutes deux le pilote, qui a besoin à la fois de voir à quelques centaines de pieds en dessous de lui, et à des kilomètres devant lui. L'information visuelle est donc numérisée, traitée et projetée sur la surface du cockpit par un système d'affichage « tête haute ». Les distances horizontales sont condensées tandis que l'échelle d'altitude est agrandie. Le pilote voit-il le terrain ? Certes oui ! Il serait ridicule d'aller chercher un mot qui serait moins naturel, comme *percevoir*, pour indiquer qu'on voit par le truchement d'un instrument. Remarquez qu'il ne s'agit pas d'un cas où le pilote aurait pu voir le terrain en descendant de son avion pour jeter un coup d'œil. Sans instrument, il n'y a pas moyen d'avoir une vue sur un paysage aussi étendu.

Prenons encore l'exemple du microscope électronique à diffraction avec lequel on produit des images soit dans l'espace direct, soit dans l'espace réciproque. L'espace réciproque est, pour ainsi dire, l'espace direct à l'envers : le proche est loin et le lointain est proche. Pour les spécialistes en cristallographie, il est souvent beaucoup plus naturel d'étudier les échantillons dans l'espace réciproque. Mais les voient-ils dans l'espace réciproque ? C'est en tout cas ce qu'ils disent, et de ce fait, ils remettent en cause la doctrine kantienne de l'unicité de l'espace de la perception.

Jusqu'où peut-on pousser le concept de vision ? Imaginons qu'au moyen d'un pinceau électronique, je dessine sur un écran de télévision l'image (I) fidèle d'une cellule que j'aurai préalablement étudiée à partir, par exemple, d'une image (II) numérisée et reconstituée. Même si dans le cas (II), je « regarde la cellule », dans le cas (I), ce n'est qu'un dessin de la cellule que je regarde. Quelle est la différence ? Le point important, c'est que dans le cas (II), il y a une interaction

directe entre une source d'ondes, un objet et une série d'événements physiques qui aboutissent à une image de l'objet. Pour reprendre à nouveau la citation [B], dans le cas (II), nous avons la carte des interactions entre l'échantillon et le rayonnement qui crée l'image. Si cette carte est bonne, alors (II) est bien un cas où l'on voit avec un microscope.

Assurément, il s'agit là d'une extension généreuse de la notion de vision. On voit avec un microscope acoustique. On voit avec une télévision, bien sûr. Cependant, on ne dit pas qu'on a vu une tentative d'assassinat *avec* la télévision, mais *à* la télévision. C'est une expression purement idiomatique, héritée de « je l'ai entendu à la radio ». On fait la distinction entre voir une émission diffusée en direct ou en différé. On peut se livrer à des distinctions sans fin grâce à une grande variété d'adverbes, d'adjectifs, et même de prépositions. Je pense qu'il ne peut y avoir aucune confusion quand on dit qu'on voit avec un microscope.

LE RÉALISME SCIENTIFIQUE

Quand une image est une carte des interactions entre l'échantillon et l'image produite par le rayonnement, et que c'est une bonne carte, alors nous voyons avec un microscope. Qu'est-ce qu'une bonne carte? Une fois supprimés ou négligés les aberrations ou les artefacts, une structure de l'échantillon devrait figurer sur la carte selon un ensemble de relations bi- ou tridimensionnelles essentiellement identiques à celles qui existent réellement dans l'échantillon.

Cela a-t-il une incidence sur le réalisme scientifique? Commençons par indiquer clairement que ce ne peut être qu'une incidence modeste. Mon raisonnement ici ne porte même pas sur la réalité des objets et des structures qui ne peuvent être discernés que par un microscope électronique (cela nécessiterait un autre article). J'ai parlé surtout de

microscopie optique. Imaginons maintenant un lecteur qui, au départ, serait sensible aux thèses de Van Fraassen, et qui penserait que les objets que l'on ne peut voir qu'avec des microscopes optiques ne peuvent pas être considérés comme observables. Ce lecteur pourrait changer d'avis, et accepter d'inclure ces objets dans la classe des entités observables. Cela ne menacerait en rien les principales positions philosophiques anti-réalistes de Van Fraassen.

Mais si nous arrivons à la conclusion que nous voyons avec les microscopes optiques, s'ensuit-il que les objets que nous déclarons voir sont réels? Non, dans la mesure où j'ai seulement dit que nous ne devrions pas rester enlisés dans l'ornière positiviste-phénoménologique du dix-neuvième siècle et que nous devrions nous autoriser à dire qu'on voit avec un microscope. Pareille recommandation manifeste un solide attachement au réalisme en matière de microscopie, mais constitue une pétition de principe qui élude le problème. On le voit clairement dans les propos optimistes que j'ai cités en physique des hautes énergies, affirmant qu'on a vu des neutrinos électroniques, des deutérons, et ainsi de suite. Le physicien est un réaliste, lui aussi, et il le montre en employant le mot *voir*, mais cet emploi n'est pas un *argument* qui prouve l'existence des deutérons. C'est peut-être l'une des raisons du scepticisme des philosophes à l'égard de la suggestion du Dr. Parakh, qui dit qu'on peut être converti au réalisme simplement par les progrès de la microscopie.

La microscopie élude-t-elle la question du réalisme? Non. À y regarder de plus près, l'idée de Parakh est juste. Nous sommes vraiment convaincus de la réalité des structures que nous observons à l'aide de différents types de microscopes. Cette conviction vient en partie de ce que nous avons réussi à supprimer systématiquement aberrations et artefacts. Ce n'était pas le cas en 1800. Bichat avait banni le microscope de ses salles de dissections parce que l'on ne pouvait pas, à l'époque, confirmer que les structures que l'on observait exis-

taient vraiment dans l'échantillon. Aujourd'hui, nous nous sommes à peu près complètement débarrassés des aberrations, nous avons supprimé beaucoup d'artefacts, nous avons appris à en négliger d'autres, et nous sommes toujours sur nos gardes pour éviter de nous laisser abuser. Nous sommes convaincus de la réalité des structures que nous semblons voir parce que nous pouvons intervenir physiquement sur elle, par des micro-injections par exemple. Nous en sommes convaincus parce que des instruments exploitant des principes physiques entièrement différents nous amènent à observer des structures pratiquement identiques dans le même échantillon. Nous sommes convaincus parce que nous comprenons clairement la plupart des théories et procédés physiques utilisés pour construire les instruments qui nous permettent de voir, mais cette conviction théorique ne joue qu'un rôle relativement faible. Nous sommes convaincus davantage en constatant les extraordinaires recouvrements avec la biochimie, qui confirme que les structures distinguées au microscope sont également distinctes du point de vue de leurs propriétés chimiques. Nous sommes convaincus, non pas par une théorie sur la cellule qui aurait un fort pouvoir déductif – il n'en existe aucune – mais à cause de l'enchaînement d'un grand nombre de généralisations de bas niveau qui nous donnent la capacité de contrôler et de créer des phénomènes dans le microscope. En bref, nous apprenons à nous mouvoir dans le monde microscopique. Berkeley n'a peut-être pas dit tout ce qu'il y a à savoir sur la vision binoculaire en trois dimensions chez l'enfant, dans son *Essai sur une nouvelle théorie de la vision*, mais assurément, il décrit bien ce qui se passe quand nous pénétrons dans ces nouveaux mondes à l'intérieur des mondes que nous révèle le microscope.

THOMAS KUHN

**COMMENSURABILITÉ, COMPARABILITÉ,
COMMUNICABILITÉ**

PRÉSENTATION

Miguel Coelho

Les écrits de Thomas Kuhn (1922-1996) ont exercé une influence déterminante sur l'épistémologie du vingtième siècle, et ont notamment inspiré l'un de ses courants majeurs : la sociologie des sciences. La *Structure des Révolutions scientifiques* (1962) rompt avec la philosophie des sciences du positivisme logique, qui mettait l'accent sur l'analyse de la forme logique des énoncés et des raisonnements et s'intéressait aux critères de rationalité scientifique (Carnap, Hempel); elle rompt tout autant avec la méthodologie du falsificationnisme, qui se proposait d'apporter une réponse au problème de la démarcation entre la science et la non-science (Popper); elle attribue un rôle décisif à l'histoire des sciences elle-même et à l'étude de sa dynamique, source de rationalité par la production de consensus au sein d'une communauté de savants et au sein d'un paradigme théorique à un moment donné de l'évolution de la pensée scientifique.