

1905, l'année lumière

En 1885, le petit Albert Einstein, 6 ans, reçoit des mains de son père une boussole. Une révélation. Vingt ans plus tard, le même Einstein, alors expert technique de troisième classe au Bureau fédéral de la propriété intellectuelle à Bern, fait paraître quatre articles scientifiques. L'un lui vaudra le prix Nobel en 1921, un autre énonce une équation, $E=mc^2$, promise à un bel avenir, tous bouleversent la physique.

Entre-temps, il y a eu de pénibles années de lycée, pas même sanctionnées par le baccalauréat, des études atypiques au Polytechnicum de Zurich car Einstein s'y est comporté en autodidacte, des désaccords familiaux, un mariage, un travail en décalage avec ses capacités, des amitiés solides et intellectuellement fructueuses... et une immense curiosité qui l'a fait se pencher sur l'expérience de Michelson et Morley, le rayonnement de corps noir, le mouvement brownien, l'effet photoélectrique...

Alternant images fixes d'archives, scènes de reconstitution et interviews de scientifiques prestigieux (Claude Cohen-Tannoudji, prix Nobel de physique, Thibault Damour, membre de l'Académie des sciences, Étienne Klein, physicien et philosophe des sciences, Christophe Salomon, physicien à l'ENS, et Hervé This, physico-chimiste à l'INRA), cette fiction documentaire montre et explique l'importance fondamentale des découvertes d'Albert Einstein, et offre le récit vivant d'une formation intellectuelle. Ce large panorama des questions scientifiques qui ont agité le début du xx^e siècle s'achève par des considérations toutes actuelles, telles que le GPS et les accélérateurs de particules. Non, la relativité n'appartient pas au passé !

Disciplines, classes et programmes

Physique, 2^{de}. L'univers en mouvement et le temps.

Physique, 1^{re} S. Évolution temporelle des systèmes mécaniques. La lumière, modèle ondulatoire.

Philosophie, 1^{re}. Notions : La raison et le réel : théorie et expérience, la démonstration, l'interprétation, la vérité.

Travaux personnels encadrés, 1^{re} S. Savants et science, hier et aujourd'hui.

Découpage et structure

00 min : Contexte et générique

Albert Einstein est un savant universel reconnu. Cependant, bien peu de personnes sont capables d'expliquer le sens de sa formule célèbre $E=mc^2$. Charlie Chaplin résume ce paradoxe lors d'une rencontre des deux hommes en 1936 : « Ils m'applaudissent parce qu'ils me comprennent et vous parce qu'ils ne vous comprennent pas. »

01 min 28 s : Enfance

En 1879 : naissance du petit Albert en Allemagne, à Ulm. Un an plus tard, ses parents s'installent à Munich où son père dirige une usine électrochimique. À 6 ans, Albert reçoit de son père une boussole : il s'en émerveille et garde en lui l'idée d'un ordre invisible dans le monde.

03 min 08 s : La lumière à la fin du XIX^e siècle

La lumière est une onde, comme le son, mais contrairement à ce dernier, elle se propage dans le vide. Pour les physiciens du XIX^e siècle, elle doit donc avoir, comme le son, un support physique : ce sera l'éther, gaz ténu et invisible. Problème : l'expérience de Michelson et Morley, réalisée en 1887 (05 min 55 s : explication de l'expérience par le physicien Thibault Damour), semble montrer que la vitesse de la lumière est invariante, résultat qui contredit alors la loi de composition des vitesses.

06 min 57 s : Adolescence

Élève au lycée de Munich dont la discipline quasi-militaire le rebute, Einstein se passionne pour la physique et les mathématiques et se forme seul, lisant les textes de grands chercheurs (Maxwell, Hertz...). Le physicien et philosophe des sciences Étienne Klein évoque l'indépendance d'esprit d'Einstein, lequel quitte Munich en 1894 pour rejoindre ses parents à Milan.

09 min 18 s : L'énigme du corps noir

Le physicien Christophe Salomon explique l'énigme du corps noir au XIX^e siècle : on sait alors que tout corps chauffé émet une lumière dont la fréquence dépend de sa température, mais on ne parvient pas à modéliser le phénomène par des équations.

10 min 38 s : La formation de physicien

En Italie, loin du lycée munichois, Einstein profite de sa liberté et exprime son souhait de devenir professeur. Il renonce à la nationalité allemande pour éviter le service militaire, commence ses réflexions sur la nature de la lumière à partir

de deux énigmes : la vitesse de la lumière et le rayonnement du corps noir. En 1896, il intègre le Polytechnicum de Zurich. Il y rencontre Mileva Maric, sa future femme. Peu assidu en cours, car il considère que l'enseignement est en retard par rapport aux questions qu'il se pose, il obtient son diplôme, mais pas de poste universitaire.

16 min 35 s : Le rayonnement du corps noir, la solution de Planck

Le 14 décembre 1900, Max Planck obtient une démonstration qui rend compte du rayonnement du corps noir, démonstration s'appuyant sur l'hypothèse de « quanta » de lumière. Pourtant, le physicien n'en tire aucune conclusion sur la nature de la lumière.

17 min 22 s : 1901

Einstein ne trouve pas d'emploi à Zurich et retourne à Milan dans sa famille. Il veut se marier à Mileva, ce que ses parents refusent. Mileva s'en va accoucher en Serbie, son pays d'origine, d'une fille dont on n'entendra plus parler. Einstein publie son premier article dans les *Annalen der Physik*, grande revue scientifique allemande. Explication (à 19 min) par Hervé This de la loi de la capillarité trouvée par Einstein.

21 min 25 s : Einstein expert de troisième classe

En 1902, Einstein est embauché comme expert de troisième classe au Bureau fédéral de la propriété intellectuelle à Bern, travail de science appliquée dans lequel il s'épanouit et qui lui laisse du temps pour ses recherches personnelles en science fondamentale. Après la mort de son père, il vit avec Mileva.

22 min 20 s : L'énigme de l'effet photoélectrique

En 1902, Philipp Lenard découvre qu'il n'y a pas d'effet photoélectrique en lumière rouge, ce dont, ainsi que l'explique Christophe Salomon, la théorie ondulatoire de la lumière ne permet pas de rendre compte. Une nouvelle définition de la lumière doit s'imposer...

24 min 11 s : Quiétude d'une vie studieuse

Mariage avec Mileva en 1903. Einstein travaille avec bonheur avec le mathématicien Marcel Grossman et forme avec des amis (le philosophe Maurice Solovine, l'ingénieur Michele Besso et le mathématicien Conrad Habicht) « l'Académie Olympia », fausse Académie des sciences mais vrai cercle de réflexion. Ils y discutent notamment des travaux du physicien et philosophe Ernst Mach (1838-1916), qui remettent en cause le caractère absolu de l'espace dans la mécanique newtonienne. En 1904, naît un fils, Hans Albert. Einstein prépare sa thèse et teste ses idées auprès de Michele Besso dont il dit qu'il est le plus grand catalyseur intellectuel de toute l'Europe.

29 min 21 s : 1905, la taille des molécules et le mouvement brownien

Einstein soutient sa thèse qui porte sur la taille des molécules et le mouvement brownien. Explication d'Hervé This sur la détermination de la taille des molécules que permet la théorie d'Einstein.

31 min 51 s : 1905, les quanta de lumière et l'effet photoélectrique

Peu de temps après, Einstein publie dans les *Annalen der Physik* un article intitulé « Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière ». Il y avance l'hypothèse de la nature corpusculaire de la lumière (la lumière est constituée de « quanta de lumière », que l'on nomme aujourd'hui « photons »). Cette théorie explique l'effet photoélectrique. Max Planck, directeur de la revue, fait preuve d'une grande audace en publiant l'article d'un inconnu sur des arguments qui sont alors très controversés mais dont il perçoit l'importance.

36 min 22 s : Les expériences de pensée

Claude Cohen-Tannoudji précise comment Einstein, loin de tout laboratoire, construit sa réflexion sur des « expériences de pensée ».

37 min 50 s : La lettre à Habicht

En mai 1905, Einstein écrit une lettre à son ami Habicht où il lui présente ses quatre articles qui feront date dans l'histoire de la physique. Il y annonce des principes qu'il qualifie lui-même de « révolutionnaires ».

39 min 09 s : 1905, la relativité restreinte

En juin paraît, toujours dans les *Annalen*, l'article fondateur de la physique moderne, celui où Einstein pose les bases de la relativité restreinte. S'appuyant sur les mathématiques d'Henri Poincaré, il remet en cause les concepts traditionnels d'espace et de temps. Sa nouvelle théorie supprime l'hypothèse de l'éther et explique que l'expérience de Michelson et Morley est une vérification du principe de la relativité et de la constance de la vitesse de la lumière. La théorie de la relativité du temps fait apparaître l'étrange paradoxe dit « des jumeaux de Langevin ». De nos jours, la technologie du GPS (Global Positioning System) tient compte des effets relativistes.

44 min 58 s : 1905, $E=mc^2$

En septembre 1905, est publié l'article où apparaît pour la première fois l'équivalence entre la masse et l'énergie $E=mc^2$ (quand un corps massif émet ou absorbe de l'énergie, sa masse est modifiée). Thibault Damour explique en quoi cela révolutionne la chimie qui, depuis Lavoisier, identifiait la masse avec ce qui était permanent dans la matière : on peut donc créer de la matière à partir d'énergie (comme dans les accélérateurs de particules) ou, inversement, de l'énergie à

partir de la matière (ce qui est à la base du fonctionnement des centrales nucléaires et du soleil).

49 min 05 s : Vers la reconnaissance

Quatre articles fondateurs n'y font rien : Einstein n'est pas immédiatement reconnu par ses pairs, et reste quatre ans encore au Bureau des brevets à Bern. En 1909, il est nommé professeur à l'université de Zurich. C'est le début de la reconnaissance...

50 min 55 s : Générique de fin

Pistes pédagogiques

LA RELATIVITÉ DU TEMPS : UNE EXPÉRIENCE DE PENSÉE

Physique, T^e. Aborder la notion d'expérience de pensée. Première approche de la relativité restreinte. Le modèle ondulatoire de la lumière.

Par une discussion de classe, faire apparaître que les élèves ont des connaissances en apparence contradictoires : l'invariance de la vitesse de la lumière apprise au collège, et la composition des vitesses. Préciser le protocole expérimental de l'expérience de Michelson et Morley (se reporter au film, à partir de 03 min 08 s) : on mesure la vitesse de la lumière dans deux directions, l'une dans le sens du mouvement de la Terre, l'autre perpendiculairement. Si la lumière se comportait classiquement, on devrait obtenir des temps de parcours différents dans les deux directions et donc une figure d'interférence. Ce n'est pas le cas.

Présenter une expérience actuelle où la relativité des temps est mise en évidence. Par exemple, on pourra parler des corrections relativistes que l'on doit apporter aux horloges des satellites du Global Positioning System (GPS). L'écart dû à la dilatation des temps est de l'ordre de 0,1 ns par seconde, soit une dérive de 10 minutes après 5 minutes.

À partir de ces deux faits attestés par l'expérience – invariance de c et dilatation/contraction du temps propre –, proposer aux élèves d'imaginer une expérience de pensée conciliant les deux phénomènes. Une piste est apportée par le film (vers 41 min 50 s) : une vue subjective nous place « sur » le grain de lumière. Ainsi, on pourra proposer cet exemple d'expérience de pensée, toutes choses égales par ailleurs : un individu va à la moitié de la vitesse de la lumière et regarde passer un photon. Pour que le photon aille à la vitesse de la lumière pour l'observateur, celui-ci doit « vivre au ralenti » ; il aura l'impression que le photon va « plus vite ». Autrement dit, l'observateur en mouvement a un temps propre dilaté.

Le film explique (à partir de 41 min 22 s) l'expérience de Michelson et Morley réinterprétée par Einstein. On insistera sur la révolution qu'opéra Einstein : si notre expérience de pensée s'appuie sur la tranquillité de savoir que c est invariable et que le temps est relatif, choses acquises aujourd'hui, c'était l'inverse qui était accepté à l'époque d'Einstein : le temps était alors considéré comme absolu, et le résultat de l'expérience de Michelson et Morley aberrant. À noter, cependant, qu'en 1904 Lorenz publia ses transformations mathématiques, aujourd'hui célèbres, qui lient espace et temps, et qu'Albert Einstein utilisa en 1905. Toutefois, Lorentz conserva l'idée d'un référentiel absolu, l'éther.

En comparant des vitesses usuelles (marche, voiture et avion par exemple) et c , établir que les phénomènes relativistes ne concernent guère le monde sensible humain.

UN DISCOURS SUR LA SCIENCE

Physique, philosophie, T^h. Réfléchir sur les critères qui fondent la vérité scientifique.

Relever dans le film les éléments propres à construire l'image d'Einstein comme un « scientifique hors norme » : émotion lors de la découverte de la boussole, refus de l'autorité, non-présentation au baccalauréat, recherche en autodidacte, « purgatoire » scientifique au Bureau des brevets. Atténuer les éléments du mythe : Einstein a étudié au Polytechnicum de Zurich, l'une des meilleures écoles d'alors ; il soumet ses articles à la communauté scientifique puisqu'ils sont publiés dans les *Annalen der Physik* (la science allemande était la plus puissante du monde en ce temps-là, et cette revue la plus influente des publications scientifiques de référence). Comparer aussi le purgatoire d'Einstein entre 1905 et 1909 avec la situation des jeunes doctorants aujourd'hui. Ce qu'a vécu Einstein au tout début du xx^e siècle n'est pas très loin de ce qui se pratique aujourd'hui pour de nombreux chercheurs. On pourra finalement demander aux élèves de raconter, sur le mode de la fable et de la révélation, un émerveillement scientifique d'enfance équivalent à la boussole einsteinienne.

Faire réfléchir sur cette affirmation d'Hervé This parlant des molécules en 1905 : « C'est une hypothèse, une hypothèse n'a pas droit de cité en science. » Qu'est-ce qui sépare une hypothèse d'un fait ? En quoi les molécules ne sont plus des hypothèses aujourd'hui ? En montrant qu'un fait doit à la fois correspondre aux théories en cours mais aussi être partagé par la communauté scientifique pour être considéré comme vrai, on pourra expliciter les notions d'instances de légitimation internes (expériences, théories, cohérences mathématiques...) et externes (revues, université, communauté scientifique...). Par une recherche documentaire, préciser les titres de chacun des interviewés : Claude Cohen-Tannoudji est prix Nobel de physique, Thibault Damour membre de l'Académie des sciences, Hervé This, chimiste, a une forte activité éditoriale... Faire remarquer que ce sont tous là des scientifiques, parfois convertis à l'histoire des sciences ou à la vulgarisation, et non des historiens. Existe-t-il d'autres communautés qui possèdent ainsi la légitimité de faire leur histoire ? Par exemple : l'histoire de la politique est-elle faite par les hommes politiques ?

Justifier alors le discours hagiographique souvent tenu sur Einstein par les scientifiques : sa démarche solitaire affirme la prépondérance des causes internes (la cohérence mathématique) sur les causes externes (l'existence d'une communauté scientifique) dans la fabrication des vérités scientifiques et préserve ainsi l'image d'une science pure, c'est-à-dire détachée du monde social.

On pourra alors compléter le portrait d'Albert Einstein par une discussion de classe sur les éléments du mythe qui se sont construits après 1905 : Einstein démiurge découvreur de l'équation fondamentale $E=mc^2$, Einstein polisson qui tire la langue (réaction au *paparazzo* de l'époque qui le poursuivait alors qu'il se rendait à une fête pour son anniversaire), Einstein incarnation de la raison et de la connaissance (penser

aux multiples publicités où il est affiché comme l'icône du génie), Einstein père de la bombe atomique (ce qui est assez largement faux : il ne participa pas au projet Manhattan et s'opposa à son utilisation sur le Japon)...

Cependant, une recherche historique montrera qu'Albert Einstein devint célèbre, et cela n'est pas un hasard, à partir de 1919 : l'Europe, exsangue, se relevait de la Première Guerre mondiale ; on avait besoin d'idées neuves et généreuses. Qui mieux qu'un savant juif, allemand, pacifiste et légèrement excentrique pouvait incarner ce besoin de renouveau ? Einstein fit une très médiatique « tournée » en France en 1922, sur l'invitation de Paul Langevin et du Collège de France, pour expliquer ses théories par une série de conférences. Il joua alors pleinement son rôle d'incarnation vivante de la réunification des peuples autour de l'idée de progrès scientifique.

HISTOIRE DE LA LUMIÈRE JUSQU'À EINSTEIN

Physique, T^e. La lumière, modèles ondulatoire et corpusculaire.

Sur les quatre articles qu'Albert Einstein publie en 1905, deux portent plus ou moins directement sur la nature de la lumière. En premier lieu, il y a « Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière », article où Einstein énonce son interprétation de l'effet photoélectrique et qui lui vaudra d'être récompensé par le prix Nobel en 1921. À noter cependant : l'effet photoélectrique n'est pas le principal sujet de l'article. L'essentiel en est une réflexion sur le corps noir et la mise en évidence que l'on peut interpréter son rayonnement par l'hypothèse d'une assemblée de « quanta de lumière » (on dirait aujourd'hui des « photons ») excités. Ce n'est qu'une fois établie la validité de l'interprétation du rayonnement du corps noir par la théorie corpusculaire de la lumière qu'Einstein réfléchit sur l'expérience de la photoélectricité.

L'autre article, « Sur l'électrodynamique des corps en mouvement », pose les bases de la physique moderne en redéfinissant les notions d'espace-temps. c , la vitesse de la lumière, y apparaît comme une vitesse limite, infranchissable. La notion d'éther devient inopérante tandis que l'expérience de Michelson et Morley est confirmée et expliquée. L'équation $E=mc^2$ apparaît pour la première fois. En un an, la lumière change totalement de statut. En proposant et en justifiant l'hypothèse d'une nature corpusculaire de la lumière, Einstein résout les principales énigmes physiques du XIX^e siècle et ouvre les portes de la physique moderne.

La lumière, onde ou corpuscule ? À partir des pistes proposées par le film, abordons l'étude historique des conceptions physiques de la lumière. Certains noms, certaines théories ne seront vus par les élèves que dans les années suivant le baccalauréat (Maxwell par exemple). Cependant, ce rapide panorama leur permettra de saisir les avancées de chacun des scientifiques et d'inclure leurs nouvelles connaissances dans une continuité et un enchaînement historique des idées en physique.

À partir des informations du film, on précisera l'état des connaissances sur la question de la lumière à la fin du XIX^e siècle : la lumière est considérée comme une onde ainsi que le conceptualise la théorie (1864) de James Clerk Maxwell (1831-1879) et ses quatre célèbres équations. À l'identique du son qui a besoin d'un support pour se propager, on pense que la lumière se propage dans un « éther », fluide ténu censé emplir l'univers. On sait que lorsque l'on chauffe un corps, il produit de la lumière, et les caractéristiques de cette lumière obtenue dépendent de la température du corps (une application : la lampe électrique à incandescence de Thomas Edison, brevetée en 1881). On connaît alors aussi un autre phénomène illustrant l'interaction lumière/matière : un métal éclairé peut, ainsi que le montre Heinrich Hertz (1857-1894) en 1887, produire de l'électricité.

De même, à partir des informations collectées dans le film, on dressera le panorama des points qui posent alors problème :

– l'expérience de Michelson et Morley (1887) se révèle incompréhensible, il n'y a pas de frange d'interférence. On pourra faire le schéma de l'expérience à partir du schéma que propose le film (à 41 min 22 s) et calculer les différences de temps aller-retour entre les deux branches de l'interféromètre dans l'hypothèse d'une lumière sujette à la physique classique et aux règles d'addition des vitesses (pour le détail du calcul, voir par exemple le livre de Silvio Bergia p. 22, se reporter aux « Ressources » pour l'édition) ;

– le corps noir : si l'on connaît la loi empirique de distribution de l'énergie lumineuse, on ne sait pas l'expliquer. L'application stricte de la physique statistique de Maxwell et Boltzmann conduit à l'équation de Rayleigh-Jeans (1900) qui diverge à basse température ou à fréquence élevée. C'est la « catastrophe ultraviolette » (ainsi que la sur-nommait Paul Ehrenfest) : un corps chaud produirait un rayonnement énergétique infini. Max Planck, dans ce qu'il a appelé un « acte de désespoir » (il ne remet alors pas en cause la théorie ondulatoire de la lumière), trouve en 1900 une formule correcte mais doit, pour cela, modéliser le corps noir comme une assemblée d'oscillateurs dont l'énergie est multiple de $h\nu$ (h : constante de Planck, ν : fréquence des oscillateurs harmoniques) ;

– l'effet photoélectrique : en 1902, Philipp Lenard découvre que, quelle que soit l'intensité de la lumière utilisée, la lumière rouge ne produit pas d'électricité tandis que l'effet photoélectrique se manifeste bien avec la lumière bleue. Cela est en contradiction avec l'hypothèse ondulatoire selon laquelle l'énergie est une fonction continue de la fréquence et de l'intensité lumineuse.

À partir de recherches documentaires ou d'une série de courts exposés, on pourra dès lors décrire l'évolution des conceptions de la lumière. Deux approches sont possibles : soit en se focalisant sur certains physiciens célèbres (voir plus loin), soit, de manière plus transversale, en considérant un phénomène (comme la décomposition des couleurs, les figures d'interférence ou la diffraction) et ses interprétations successives. On verra ainsi que, contrairement à l'opinion courante, c'est la nature corpusculaire de la lumière qui domina longtemps dans la communauté des physiciens.

Rappelons rapidement les principales étapes des théories sur la lumière : Isaac Newton (1642-1727) cherche à expliquer par les corpuscules de nombreux phénomènes, et en particulier ceux que l'on caractérise aujourd'hui comme de nature purement ondulatoire : interférences avec les anneaux de Newton, diffraction aux limites d'une lame de couteau... À noter que Newton fait souvent intervenir un « éther » comme responsable de ces phénomènes. La théorie ondulatoire du Hollandais Christiann Huygens (1629-1695), plus compliquée mathématiquement mais pourtant plus proche de la description contemporaine, restera oubliée plusieurs siècles jusqu'à sa remise en scène par l'Anglais Thomas Young (1773-1829) et le Français Augustin Fresnel (1788-1827). Les travaux de ce dernier furent particulièrement décisifs pour le retour en grâce de la théorie ondulatoire, et ses questions sur la polarisation de la lumière et la nature des vibrations lumineuses (l'éther peut-il être le support d'oscillations transversales plutôt que longitudinales ?) préparèrent le terrain aux travaux de Maxwell (1831-1879). La construction de la théorie électromagnétique (vers 1865) par James Clerk Maxwell est assez étonnante et, même si elle fait intervenir des outils mathématiques assez sophistiqués, elle permettra aux élèves de voir l'origine géométrique des outils conceptuels – le rotationnel par exemple – qu'ils utiliseront plus tard. On pourra terminer l'histoire de la lumière par les découvertes concernant la lumière depuis 1905 : laser, fibre optique, optique adaptative...

UNE RÉVOLUTION SCIENTIFIQUE

Physique, philosophie, 7^è. Les notions de paradigme et de révolution scientifique.

La révolution conceptuelle qu'opéra Albert Einstein a largement été étudiée, commentée, analysée. Elle est devenue un cas d'école pour qui veut parler de « révolution scientifique ». Le film présente une excellente occasion d'introduire la réflexion du philosophe Thomas Samuel Kuhn (1922-1996), auteur de *La Structure des révolutions scientifiques* (1962).

On présentera la théorie de Thomas Samuel Kuhn selon laquelle la science s'organise en grandes périodes, dites de science normale, séparées par des moments de rupture, les révolutions scientifiques. Dans les périodes de science normale, les scientifiques obéissent au paradigme dominant, c'est-à-dire à l'ensemble des convictions et dogmes partagés, et donc implicitement acceptés par la communauté scientifique. Le paradigme est ce qui fait autorité à la fois intellectuellement et socialement. Une révolution scientifique apparaît lorsque s'accroissent les résultats d'expériences ou d'observations en désaccord avec le paradigme. On voit alors surgir des hypothèses *ad hoc* destinées à préserver l'édifice conceptuel ancien. Finalement, la révolution scientifique advient et le nouveau paradigme résout anomalies et désaccords. On demandera alors aux élèves de récapituler les éléments de la rupture einsteinienne exposés dans le film : fin de la règle d'additivité des vitesses et invariance

de la vitesse de la lumière, abandon du référentiel absolu et de l'éther, aspect corpusculaire de la lumière. On fera remarquer qu'Einstein fait preuve d'un positivisme strict : il prend pour point de départ les résultats des expériences et en tire les conclusions « qui s'imposent », sans l'adjonction d'« hypothèses *ad hoc* » comme l'éther. On synthétisera alors les caractéristiques de la révolution opérée : sur quels principes s'appuyait la mécanique newtonienne, quelles ont été les anomalies et les « hypothèses *ad hoc* », comment cela sera-t-il résolu dans le nouveau paradigme de la relativité.

Pour Kuhn, le paradigme est un concept fort. Ainsi, selon lui, quatre caractéristiques essentielles le définissent :

- deux paradigmes différents sont incomparables, ou plutôt incommensurables. L'un ne peut servir à valider ou infirmer l'autre car il ne parle pas la même langue. Il n'existe donc pas de critère absolu et supérieur pour choisir entre l'un ou l'autre ;
- il n'y a pas accumulation du savoir scientifique sur les longues périodes. Ce n'est que sur de courtes périodes que l'on peut croire que ce savoir s'accumule ;
- il n'y a pas d'expérience et d'observation théoriquement neutres : tout se fait dans un paradigme donné. L'objectivité est donc impossible ;
- un paradigme est toujours lié à une communauté sur lequel il s'appuie. Un changement de paradigme implique un changement de groupe social qui endosse et diffuse cette vérité.

À partir de ces critères, on pourra faire réfléchir la classe sur l'existence d'une réelle « révolution einsteinienne » au sens de Kuhn : la mécanique relativiste est-elle incommensurable avec la mécanique newtonienne ? Y a-t-il eu une nouvelle « caste » de physiciens relativistes opposés aux physiciens classiques ? On pourra comparer avec la révolution copernicienne où la conception ptoléméenne géocentrique du monde a été remplacée par la vision héliocentrique. Il y a bien là, entre autres, incommensurabilité des paradigmes et existence de deux communautés de pensée distinctes (les « philosophes de la nature », qui deviendront plus tard les scientifiques, et l'Église). Pour beaucoup de sociologues et de philosophes des sciences, Kuhn est le premier penseur à avoir introduit le relativisme dans les sciences exactes, même si certains précurseurs avaient débroussaillé le terrain théorique (Ludwig Wittgenstein, Willard Van Orman Quine ou Alexandre Koyré par exemple). En divisant la classe en deux – d'un côté les relativistes, de l'autre les rationalistes –, on pourra reprendre une par une les quatre caractéristiques du paradigme et débattre de la pertinence de chaque assertion.

Si la vision kuhnienne de la science est aujourd'hui un peu dépassée (on se penche désormais davantage sur les pratiques au jour le jour à l'intérieur des laboratoires que sur les grands systèmes globalisant qui veulent tout expliquer), elle a cependant imprégné l'ensemble de la pensée sur la science et permet de bien saisir les débats contemporains. Un exemple parmi d'autres : la matière noire de l'univers... Est-ce une hypothèse *ad hoc* ? Est-on à la veille d'une révolution conceptuelle ?

Ressources

À LIRE

Sur Einstein

- « La Révolution Einstein, 1905-2005 », *TDC*, n° 886, 15 décembre 2004, réf. 755A0872. Dossier sur l'année 1905 d'Einstein. Séquences pédagogiques, bibliographie et sitographie sur les quanta de lumière, le mouvement brownien, la théorie de la relativité restreinte, le mythe Einstein.
- BALIBAR Françoise, *Einstein 1905 : de l'éther aux quanta*, PUF, coll. « Philosophies », 1992. Une histoire du champ physique et une réflexion sur la rupture épistémologique qu'opéra Einstein en 1905.
- BERGIA Silvio, *Einstein : le père du temps moderne*, Belin, Pour la science, coll. « Les génies de la science », 2004. Histoire d'Einstein et de l'évolution des idées en physique. Des schémas clairs et une bonne mise en contexte des théories physiques.
- CHANGEUX Jean-Pierre (dir.), *La Lumière au siècle des Lumières & aujourd'hui*, Odile Jacob, 2005. Très beau catalogue d'exposition où dialoguent l'art et la science.
- DAMOUR Thibault, *Si Einstein m'était conté*, Le Cherche Midi, coll. « Documents », 2005. À travers le choix de scènes concrètes de la vie d'Einstein, ce livre donne à voir la formation de ses théories. Il nous entraîne aussi dans une réflexion sur leur impact philosophique.
- EISENSTAEDT Jean, *Einstein et la relativité générale : les chemins de l'espace-temps*, éditions du CNRS, coll. « Histoire des sciences », 2007. Une histoire de la relativité générale et de sa difficile diffusion dans la physique moderne toute acquise à la théorie quantique.
- HOFFMANN Banesh, *Albert Einstein : créateur et rebelle*, éditions du Seuil, coll. « Points. Sciences », 1979. Par l'un des collègues d'Einstein, une biographie totalement hagiographique. Un classique cependant.
- KLEIN Étienne, *Il était sept fois la révolution : Albert Einstein et les autres*, Flammarion, coll. « Champs », 2007. L'histoire de la relativité après 1905.
- MERLEAU-PONTY Jacques, *Einstein*, Flammarion, coll. « Figures de la science », 1993. Un classique sur Einstein construit en trois parties distinctes : la vie, l'œuvre et la philosophie d'Einstein.

Par Einstein

- EINSTEIN Albert, *Comment je vois le monde*, Flammarion coll. « Champs », 1995. « Ma condition humaine me fascine, je sais mon existence limitée et j'ignore pourquoi je suis sur cette terre [...] » : ainsi Einstein commence-t-il sa brève mais passionnante confession intellectuelle.

- EINSTEIN Albert, INFELD Léopold, *L'Évolution des idées en physique*, Flammarion, coll. « Champs », 1993. Écrit en 1936 à Princeton, cet ouvrage est désormais un classique sur l'évolution des idées en physique. Style simple et accessible à un large public, même non spécialisé.
- EINSTEIN Albert, *Œuvres choisies*, éditions du Seuil, éditions du CNRS, coll. « Sources du savoir », 1989-1993 (6 tomes). Édition de référence des textes d'Albert Einstein en français.
- EINSTEIN Albert, *Physique, philosophie, politique*, éditions du Seuil, coll. « Points. Sciences », 2002. Textes choisis et commentés par Françoise Balibar, l'historienne des sciences spécialiste d'Albert Einstein.

Sur la lumière

- « Les mystères de la lumière », *TDC*, n° 866, 15 décembre 2003, réf. 755A0365. L'histoire des connaissances sur la lumière depuis l'Antiquité à nos jours. Avec Galilée, Witelo, Newton, Huygens, Fresnel, Young, Einstein... Approche philosophique, comptes rendus d'observations et expériences.
- DARRIGOL Olivier, *Les Équations de Maxwell : de MacCullagh à Lorenz*, Belin, coll. « Belin Sup. Histoire des sciences. Physique », 2005. Une étude au plus près des textes de Maxwell pour suivre la construction des quatre équations. Largés extraits traduits des publications scientifiques originales. Niveau soutenu.
- EISENSTAEDT Jean, *Avant Einstein : relativité, lumière, gravitation*, éditions du Seuil, coll. « Science ouverte », 2005. Très bonne vulgarisation. La majeure partie du livre porte sur les théories de la lumière avant Einstein.
- MAITTE Bernard, *La Lumière*, éditions du Seuil, coll. « Points. Sciences », 1981. Excellente histoire des théories sur la lumière. Simple et complet. Une référence.
- ROSMORDUC Jean et Vinca, DUTOUR Françoise, *Les Révolutions de l'optique et l'œuvre de Fresnel*, Vuibert, coll. « Inflexions », 2004. Une bonne histoire de la lumière au XIX^e siècle.

Histoire et sociologie des sciences

- BONAN Ronald, *Qu'est-ce qu'une philosophie de la science ? : commentaire de l'article de Maurice Merleau-Ponty « Einstein ou La Crise de la raison »*, CRDP de Bourgogne, coll. « Documents, actes et rapports pour l'éducation », 1997. Réflexion sur un article de Maurice Merleau-Ponty relatant la rencontre entre Einstein et Bergson.
- BONREPAUX Christian, « Albert la science : relative célébrité », *Le Monde de l'éducation*, n° 334, mars 2005, pp. 62-63. La place des travaux d'Albert Einstein dans les programmes scolaires de sciences physiques en France, en 2005 : les raisons de leur absence et de leur complexité.
- KUHN Thomas Samuel, *La Structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, coll. « Champs », 1991. Un classique, point de départ de toute réflexion sur la science.

- MARTIN Olivier, *Sociologie des sciences*, Armand Colin, coll. « 128 », 2005. Bonne introduction aux réflexions sur la science.
- SHINN Terry, RAGOUET Pascal, *Controverses sur la science : pour une sociologie trans-versaliste de l'activité scientifique*, Raison d'agir éditions, coll. « Cours et travaux », 2005. Une introduction aux débats actuels sur la science. Sociologie critique.

À VOIR

- JOHNSTONE Gary, *E=mc², une biographie de l'équation*, Arte France, Tetra Media, Darlow Smithson, WGBH/Nova, Channel 4, NDR, TSR, la RTBF, 2005 (01 h 45 min). Un docu-fiction d'après l'ouvrage de David Bodanis sur la plus célèbre des équations dont chacun des termes (énergie, masse...) est l'occasion d'une mise en scène historique. Vivant, joyeux et rigoureux. Une réussite.
- LACHIEZE-REY Marc, LUMINET Jean-Pierre, DELESALLE Laure, *Infiniment courbe*, Pandore, La Sept-Arte, CRNS AV, Club d'investissement média, TEVA, ZA Production, 1994 (50 min). Initiation aux principaux concepts conduisant à la courbure de l'espace-temps selon la théorie de la relativité générale d'Einstein, grâce à une imagerie diversifiée.
- TOURANCHEAU Philippe, CARDON François, *Une sombre histoire de matière, in Limites de recherche 1*, CNDP, La Cinquième, 2000, réf. 755B0115 (13 min). Michel Spiro, astrophysicien, précise l'énigme de la matière sombre. Une question qui pourrait être à l'origine d'une révolution épistémologique dans le siècle qui vient...

À CONSULTER

- www.cndp.fr/themadoc/einstein/Einstein.htm : un bon dossier Them@doc sur l'année 1905.
- www.dialogus2.org/ : pour dialoguer avec Einstein. Amusant.
- www.numilog.com/fiche_livre.asp?PID=37717 : Einstein et l'histoire de la relativité par deux des intervenants du film (en CD ou téléchargeable sur ce lien).
- www.ulg.ac.be/ipne/garnir/gps/GPS.pdf : la théorie, très complète, du GPS.

