



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Fondation Simone et Cino Del Duca

10 rue Alfred de Vigny, 75008 Paris

Colloque sur

L'enseignement philosophique et les sciences

Paris, 9 mai 2012

organisé par

l'Académie des sciences

(Comité sur l'Enseignement des sciences, Comité Histoire des sciences
et épistémologie),

l'Académie des sciences morales et politiques,
et l'Inspection Générale de l'Education Nationale

Comité scientifique et d'organisation

Claude Debru, Membre de l'Académie des sciences

Paul Mathias, Inspecteur général de l'Education nationale

Dominique Rojat, Inspecteur général de l'Education nationale

Bertrand Saint-Sernin, Membre de l'Académie des sciences morales et politiques

Daniel Secrétan, Inspecteur général de l'Education nationale

Charles Torossian, Inspecteur général de l'Education nationale

Alain-Jacques Valleron, Membre de l'Académie des sciences

INTRODUCTION

Le Colloque a pour but de promouvoir la coopération entre enseignants de philosophie et de sciences au niveau du Lycée, en vue de faciliter la diffusion de l'esprit scientifique chez les élèves, dont certains exerceront des fonctions d'enseignement à tous les niveaux. Des expériences d'interaction au Lycée seront présentées. L'attention portée au cheminement et à la construction de la pensée scientifique dans les enseignements scientifiques et philosophiques au Lycée nécessite un appel à la formation continue, l'utilisation d'outils innovants (sites internet), ainsi que l'introduction d'éléments d'histoire des sciences et d'épistémologie dans les préparations aux concours de recrutement des enseignants.

PROGRAMME

8h30 – 9h00 **Accueil**

09h30 – 09h45 **Bienvenue :**
Bertrand Saint-Sernin, Alain-Jacques Valleron et Claude Debru

09h45 – 10h30 **Etat des lieux**
Paul Mathias : Le point de vue philosophique
Charles Torossian, Marie-Blanche Mauhourat, Dominique Rojat : Le point de vue des disciplines scientifiques

10h30 – 12h45 **Présentation d'expériences**
Joël Jung, Paula La Marne

Présentation par deux groupes de professeurs de leurs interactions
Philippe Jeanjacquot et Pierre Vignand, Nicolas Righi et Sandrine Lesage

12h45 – 13h00 **Remise d'attestations**

Conférences scientifiques

Président : Jean-Pierre Kahane

14h30 – 16h30 **Espaces et géométries, entre mathématiques et philosophie**
Etienne Ghys
La dualité onde particule : quelques expériences avec des photons uniques
Alain Aspect
Du Discours sur les Révolutions du Globe de Georges Cuvier à l'Origine des Espèces de Charles Darwin : Géohistoire et Science de l'Evolution
Philippe Taquet

17h00 – 18h00 **Discussion générale**
Président : Pierre Léna,
Synthèse et conclusion
Paul Mathias

TABLE

Avant-Propos

Claude Debru p. 5

Allocutions de bienvenue

Bertrand Saint-Sernin (Académie des sciences morales et politiques) p. 7

Alain-Jacques Valleron (Académie des sciences) p. 8

Claude Debru (Académie des sciences) p. 10

Etat des lieux

Le point de vue philosophique :

Paul Mathias (Doyen de l'Inspection générale de philosophie) p. 12

Le point de vue des disciplines scientifiques :

Charles Torossian (Inspecteur général de mathématiques) p. 21

Marie-Blanche Mauhourat (Inspectrice générale de physique-chimie) p. 28

Dominique Rojat (Doyen de l'Inspection générale des sciences de la vie et de la terre) p. 34

Présentation d'expériences de terrain

Paula La Marne (Inspectrice pédagogique régionale de philosophie) p. 39

Joël Jung (Inspecteur pédagogique régional de philosophie) p. 42

Philippe Jeanjacquot et Pierre Vignand (Lycée Charlie Chaplin de Décines, académie de Lyon) p. 46

Nicolas Righi et Sandrine Lesage (Lycée Arthur Ribaud de Sin-le-Noble, Académie de Lille) p. 50

Conférences scientifiques

Jean-Pierre Kahane (Académie des sciences) : Présentation d'Etienne Ghys	p. 57
Etienne Ghys (Académie des sciences) : Espaces et géométries, entre mathématiques, physique, et philosophie	p. 58
Discussion	p. 69
Jean-Pierre Kahane : Présentation d'Alain Aspect	p. 70
Alain Aspect (Académie des sciences) : La dualité onde particule : quelques expériences avec des photons isolés	p. 71
Discussion	p. 109
Jean-Pierre Kahane : Présentation de Philippe Taquet	p. 112
Philippe Taquet (Académie des sciences) : Du <i>Discours sur les Révolutions du Globe</i> de Georges Cuvier à <i>l'Origine des Espèces</i> de Charles Darwin : Géohistoire et Science de l'Evolution	p. 113

Synthèse et Propositions

Pierre Léna (Académie des sciences)	p. 124
Paul Mathias (Inspection générale)	p. 127
Propositions à l'issue du Colloque	p. 131

Avant-Propos

Claude Debru (Académie des sciences)

Le colloque *L'enseignement philosophique et les sciences* est une conséquence de l'engagement de longue durée de l'Académie des sciences en faveur de la diffusion de la culture et de l'esprit scientifiques dans la société. Alfred Kastler, André Lichnerowicz, parmi bien d'autres membres, furent en leur temps les porteurs écoutés de ce message, qui allait jusqu'au soutien affiché à des disciplines certes spécialisées mais utiles, l'histoire des sciences et l'épistémologie. Il faut noter d'ailleurs que l'Académie des sciences possède un Comité d'histoire des sciences et d'épistémologie, fondé par Jean Dercourt, et dans lequel Pierre Buser, qui en a été le premier président, et Jean-Pierre Kahane jouent un rôle moteur.

Pour sa part, l'Inspection générale de l'Education nationale, tant en Philosophie qu'en Sciences, a encouragé depuis un certain temps les coopérations entre disciplines et s'est attachée tout particulièrement à renforcer la culture scientifique des philosophes et leur intérêt pour les sciences. Des contacts ont été entretenus ces dernières années avec les Doyens de l'Inspection Générale de Philosophie, Jean-Louis Poirier, Mark Sherringham et Paul Mathias. La Délégation à l'enseignement et à la formation de l'Académie des sciences, sous l'impulsion de Pierre Léna et aujourd'hui de Christian Amatore, a souhaité également cette coopération en vue de la préparation des futurs enseignants de tous niveaux. Le Comité sur l'enseignement des sciences, présidé par Alain-Jacques Valleron, en a débattu. Depuis quelques années, les enseignants de philosophie ont l'opportunité d'interagir avec leurs autres collègues, y compris scientifiques, dans le cadre de certaines activités aménagées, et cela à partir de la classe de seconde (ce qui correspondait, il faut le mentionner, à un souhait d'intervention plus précoce de la philosophie émis il y a déjà longtemps par des philosophes en vue). On assiste donc, depuis un certain temps, à un rapprochement des disciplines, également marqué au niveau universitaire par le soutien aux diplômes universitaires, masters, écoles doctorales, et aux laboratoires consacrés à l'histoire et à la philosophie des sciences dans notre pays.

Le moment était donc venu de soutenir ce dialogue et de faire en sorte qu'il ne se coupe pas des développements actuels des sciences. C'est dans cet esprit que l'Académie des sciences a pris l'initiative de proposer le colloque *L'enseignement philosophique et les sciences* qui a réuni de nombreux participants à la Fondation Del Duca le 9 mai 2012. Ce colloque a pu avoir lieu avec la participation de l'Académie des sciences morales et politiques, qui comprend une section de philosophie, de l'Inspection générale de philosophie ainsi que de mathématiques, de physique-chimie, et de sciences de la vie et de la terre.

La structure particulière définie pour le colloque nécessite quelques explications. Pour encourager, il faut à la fois montrer la possibilité et illustrer le propos. Montrer la possibilité, c'est-à-dire les premières réalisations, et définir l'esprit par des contributions croisées des différentes disciplines d'enseignement : c'est ce à quoi a été consacrée la première partie du colloque, avec les présentations des Inspecteurs généraux, d'Inspecteurs pédagogiques régionaux, et d'enseignants ayant contribué à des expériences originales de collaboration. Illustrer le propos, c'est ce à quoi a été consacrée la deuxième partie, formée d'exposés scientifiques donnés par des membres de l'Académie des sciences désireux de communiquer les acquis les plus récents de leurs disciplines, de montrer l'esprit qui les anime, et d'apporter le cas échéant des éclairages historiques utiles à la compréhension du présent. Les développements des mathématiques, de la physique quantique ou des sciences de la vie dans le cadre de l'univers ont de quoi motiver les esprits. C'est ce que l'on souhaite également de la publication de cette conférence.

Allocutions de bienvenue

Bertrand Saint-Sernin (Académie des sciences morales et politiques)

Les liens entre la science et la philosophie sont allés de soi pendant plus de deux millénaires dans la tradition occidentale : Platon a pour amis les grands mathématiciens de son époque ; Aristote est un savant ; à l'époque moderne, Descartes, Leibniz, Malebranche, etc., sont à la fois savants et métaphysiciens.

L'enseignement secondaire tenait compte de ce lien organique entre sciences et philosophie. Ainsi, quand, il y a 246 ans presque jour pour jour, en 1766, fut instituée en France, dans la Faculté des arts de l'université de Paris, la première agrégation de philosophie, le concours comportait des épreuves de mathématiques et de physique comme en témoigne sa structure établie par arrêté du Conseil du Roi en exécution de l'article XIII des lettres-patentes du 3 mai 1766 concernant l'établissement d'agrégés dans la Faculté des arts (cf. *Dictionnaire géographique, historique et politique des Gaules et de la France*, par M. L'Abbé Expilly, Amsterdam, 1768, tome V, p. 450 sq).

1^{ère} épreuve du concours :

deux dissertations en latin, la première portant sur « logique, métaphysique ou morale » (le sujet est tiré au sort), la deuxième portant sur « physique et mathématiques ».

2^{ème} épreuve du concours :

soutenir une thèse publique sur toute la philosophie. Deux actes de deux heures chacun : 1) logique, métaphysique et morale ; 2) physique et mathématiques.

3^{ème} épreuve du concours :

leçon publique d'une heure : ½ h d'exposé et 1/2 h pendant laquelle le candidat est interrogé par deux autres candidats sur un sujet tiré au sort.

En France, ces exigences scientifiques, sous des formes variées, ont duré deux siècles et ont disparu en 1964.

En revanche, le lien organique entre sciences et philosophie n'a pas disparu. Tout au contraire, il s'est intensifié dans la mesure où les sciences et les techniques interviennent de plus en plus dans notre vie de tous les jours et dans celle des nations.

L'objet de notre réunion d'aujourd'hui et de discerner sous quelles formes nouvelles, au début du XXI^e siècle, le lien entre l'enseignement philosophique et les sciences peut être conçu et réalisé dans l'enseignement secondaire de notre pays.

Alain-Jacques Valleron (Académie des Sciences, Président du Comité sur l'enseignement des sciences)

Je m'adresse à vous au nom du Comité sur l'enseignement des Sciences de l'Académie des Sciences qui est un des co-organisateurs de ce Colloque avec l'Inspection générale bien sûr, et le Comité d'Epistémologie et d'Histoire des Sciences. Je commencerai en vous rappelant en quelques mots les missions de ce Comité et en vous disant combien ce Comité juge importante la thématique qui a motivé cette réunion. Comme vous le savez tout au long de son histoire l'Académie des Sciences a eu, parmi ses missions prioritaires, celle de veiller à la qualité de l'enseignement des Sciences et de faire des recommandations au Gouvernement à ce sujet. C'est ce qu'elle continue à faire en émettant notamment des avis (au cours des dernières années, il y en a eu beaucoup ; sur la mastérisation, sur la réforme du lycée, ..) ; en organisant des Colloques : celui-ci bien sûr, mais pour donner un autre exemple celui qui a eu lieu il y a deux ans environ sur la formation des enseignants ; en pilotant de grands projets pédagogiques : des exemples bien connus sont celui de « La main à la pâte » à l'école élémentaire et celui de l'enseignement intégré de Sciences et Technologies, deux actions dont l'envergure a mené à créer récemment une fondation en partenariat notamment avec les Ecoles Normales Supérieures d'Ulm et de Lyon. Cette fondation est présidée par Pierre Lena qui est présent ici et qui en dira plus à ceux qui sont intéressés aux inters sessions. L'importance des missions au service de l'enseignement à l'Académie a mené à créer depuis plusieurs années une délégation à l'éducation à la formation, tenue actuellement par Christian Amatore, et d'autre part, un Comité sur l'enseignement des Sciences, qui comprend une vingtaine de membres de toutes les disciplines. Bien sûr ce Comité travaille sur des points précis de l'enseignement des Sciences, comme par exemple une réflexion sur l'enseignement des mathématiques revisitée dans le monde moderne, sur l'enseignement de l'informatique etc. Mais une doctrine qui lui est très chère et qui explique l'importance que nous attribuons à ce Colloque, c'est celle selon laquelle (je cite là un des textes issus de l'Académie) « *l'Education à la Science ne doit pas viser seulement*

les futures générations de scientifiques, d'ingénieurs et autres professionnels travaillant dans les secteurs publics et privés. Elle doit s'adresser aussi à l'ensemble de la population des enfants scolarisés aux adultes. Une éducation de base en Sciences pour tous les jeunes de par le monde est une question de justice ; elle leur permettra d'accéder à la beauté des découvertes scientifiques et de comprendre la puissance de la méthode scientifique. Ce n'est pas le moindre avantage de cette éducation aux Sciences que d'apprendre à raisonner de façon rigoureuse ce qui peut contribuer à protéger les jeunes esprits contre l'intolérance. La culture scientifique est essentielle pour permettre à chacun de se forger des jugements appropriés aux changements de l'économie moderne. Ces jugements impliquent de nombreux choix concernant par exemple la raréfaction des ressources naturelles, les changements climatiques, la sécurité alimentaire, la santé, les énergies futures et bien d'autres domaines qui appellent les décisions individuelles et collectives. Une société démocratique où seuls quelques scientifiques et une élite de scientifiques pourraient comprendre les bases sur lesquelles les décisions concernant ces enjeux sociétaux majeurs sont prises ne serait pas viable. Les plus grands efforts doivent donc être faits pour diffuser les concepts, les méthodes et les découvertes scientifiques à tous. «

Donc, on voit bien que face à cette ambition, on a tout à fait besoin du travail en commun des enseignants de philosophie et des enseignants des Sciences, travail en commun qui fait l'objet de ce Colloque. Bien sûr ce travail en commun va permettre d'ouvrir les élèves à des problèmes fondamentaux récents de la connaissance, qui dépassent les champs disciplinaires étroits, et qui relèvent de la culture générale de l'homme moderne : par exemple, pour donner un exemple dans le domaine des neurosciences, qui me touche beaucoup : comment doit on repenser au concept de libre arbitre au vu des découvertes et des concepts nouveaux des neurosciences et de l'épigénétique (qui démontre l'existence d'empreintes biologiques durables à la suite, par exemple, de stress vécus dans la petite enfance)?

Ainsi, dans cette introduction, je veux souligner à quel point le Comité attend de cette collaboration entre enseignants de philosophie et de sciences la construction cohérente d'une culture pas seulement technique, scientifique, mais d'une culture tout court des jeunes, qui justement ne soit pas réservée simplement aux jeunes qui font des études dites scientifiques. Cette culture n'est pas l'apprentissage de techniques ; elle vise à

permettre la compréhension de ce qu'est la science, la démarche scientifique, par chacun, qu'il soit engagé dans une filière ou un projet personnel « scientifique et/ou technologique », ou qu'il soit futur historien, juriste, commercial, citoyen tout simplement, en somme...

Claude Debru (Académie des Sciences, Président du Comité Histoire des sciences et Epistémologie)

Merci à tous d'être venu nous conforter, nous encourager dans cette entreprise, qui est une entreprise de renforcement permanent des liens entre la philosophie et les sciences. Comme vient de le rappeler Bertrand Saint-Sernin, les liens entre la philosophie et les sciences sont des liens historiques dans la formation des enseignants en philosophie. Ils ne sont pas aisés à maintenir et ont été parfois distendus. Cependant, on doit noter que l'enseignement universitaire de la philosophie des sciences et de la médecine et de l'histoire des sciences s'est bien développé dans les universités, tant en philosophie qu'en sciences. En effet, au moins depuis le début des années 80 avec la Commission présidée par Alfred Kastler, l'Académie des sciences s'est fortement impliquée dans le développement de l'enseignement universitaire de l'histoire des sciences. Sans cette action persévérante à divers niveaux, tant français qu'europpéen, nous ne serions pas au point où nous en sommes aujourd'hui. A cet égard, la conférence organisée par le réseau ALLEA des Académies européennes et la Commission européenne à Strasbourg en 1998 a été un stimulant efficace, suscitant en France le rapport Lecourt et les créations de postes décidées par Claude Allègre. Ces dernières années, des discussions avec l'Inspection générale de philosophie se sont poursuivies avec les Doyens Jean-Louis Poirier, Marc Sherringham et Paul Mathias, comme cela a été précédemment rappelé. D'autres contacts ont pu avoir lieu à l'occasion avec des responsables d'autres secteurs scientifiques comme la physique - chimie ou les sciences de la vie et de la terre. Des discussions ont également eu lieu avec des Présidents de la Conférence des Directeurs d'IUFM, en particulier avec M. Baillat. Bref, ce mouvement a été entretenu d'une manière assez régulière, également grâce à des initiatives régionales que l'on doit saluer. L'ensemble de ces initiatives a abouti au point où nous en sommes aujourd'hui. En outre, une coopération aussi agréable que fructueuse s'est nouée avec la Délégation à l'éducation et à la formation et ses délégués Yves Quéré, Pierre Léna et Christian

Amatore, ainsi qu'avec le Comité pour l'enseignement des sciences présidé par Alain-Jacques Valleron. Le Comité Histoire des sciences et épistémologie est également un instrument très utile de coopération, ainsi que le Comité national français d'histoire et de philosophie des sciences, dont Jean-Pierre Kahane a été le Président. Ces institutions sont nécessaires, elles sont utiles, et elles sont animées, vivifiées par un certain état d'esprit que l'on peut décrire brièvement.

Il y a un peu de «la Main à la Pâte» dans l'esprit en question. Aux Etats-Unis, l'enseignement scientifique est marqué par le même état d'esprit, qui définit la ligne à suivre : favoriser l'inventivité des élèves et étudiants. S'ajoute à cela l'utilisation massive des moyens électroniques de communication pour les besoins de la circulation de l'information scientifique et de la coopération entre les individus. De son côté, l'Académie des sciences lance dans son site internet des pages qui sont consacrées à l'histoire des sciences, à savoir des articles scientifiques majeurs présentés par un membre, ou des récits historiques, et cet instrument devrait être également très utile.

Puisqu'il n'y a rien de mieux pour favoriser la circulation des idées, la circulation de l'esprit que de mettre collectivement «la Main à la Pâte», nous sommes réunis aujourd'hui dans un programme que nous avons souhaité riche et varié, unissant des expériences de terrains et des exposés scientifiques données par des chercheurs du plus haut niveau, que nous devons remercier pour avoir bien voulu participer à cette journée et illustrer le rapport nécessaire et vivifiant entre la philosophie et les sciences. Il convient de remercier tout autant M. Gabriel de Broglie, Chancelier de l'Institut de France et Président de la Fondation Del Duca, ainsi que les personnes de la Fondation pour leur hospitalité, en particulier Mme Bouvier pour nous avoir présenté les activités de la Fondation.

Etat des lieux

Le point de vue philosophique, par Paul Mathias (Doyen des inspecteurs généraux de Philosophie)

Nous sommes réunis, aujourd'hui, pour évoquer ensemble l'enseignement philosophique dans ses rapports avec les sciences. La question que je souhaiterais me poser – et poser avec vous – est celle de savoir quel *sens* peut avoir le postulat d'une intime relation entre la philosophie et les sciences. Pourquoi faire cette demande, aujourd'hui ? Car au fond, la relation entre les sciences et la philosophie est évidemment ancienne et elle s'inscrit sur un territoire conceptuel relativement bien balisé par nos traditions, aussi bien scientifiques que philosophiques. Sur un plan institutionnel, notamment, j'en veux pour témoignage le rapport demandé, en 1999, au professeur Dominique Lecourt par le ministre de l'éducation nationale, de la recherche et de la technologie de l'époque, Claude Allègre, intitulé *L'Enseignement de la philosophie des sciences*.

Le rapport Lecourt

Dans ce rapport, Dominique Lecourt soulignait déjà au moins deux choses.

La première concernait l'impérieuse nécessité d'un enseignement philosophique destiné à accompagner l'apprentissage des méthodes de la pensée scientifique. Il ne s'agissait pas, simplement, d'un accompagnement dans l'apprentissage des contenus ou des connaissances scientifiques, les théorèmes ou les axiomes des différentes disciplines, par exemple ; il s'agissait véritablement d'une réflexion et d'une mise en problème de la méthode scientifique elle-même, de ce qui peut présider à la découverte de ses vérités ou à la compréhension approfondie de ce que sont, par exemple, des énoncés axiomatiques ou théorématiques.

Dans le même temps – c'est le second point – Dominique Lecourt dressait un constat des difficultés, des lenteurs et de l'incapacité, peut être, que rencontrait ou que manifestait le système français d'enseignement des sciences. Le vœu d'une philosophie accompagnant les sciences existait pourtant assurément ; mais c'était la capacité à mettre en œuvre et à réaliser pleinement ce vœu qui faisait apparemment défaut.

Dès lors, comme en écho d'une pensée husserlienne de la « crise », Dominique Lecourt stigmatisait, dans le début de son rapport – réservé aux « hypothèses » qu'il formulait – « une image purement calculatoire et opérative de l'activité scientifique, [qui tendait et qui tend peut-être toujours] à s'imposer aux chercheurs eux-mêmes »¹. Pour faire front à de telles supposées « évidences », une réflexion devait à son tour forcer la voie, non seulement vers une éventuelle collaboration des philosophes à l'élaboration et à la définition des cursus scientifiques, mais, peut-être aussi – et sans doute surtout – vers une éventuelle révision des enseignements, non pas seulement scientifiques, mais bien de la philosophie elle-même. Par là, même, on pouvait observer poindre l'idée selon laquelle il n'y a pas *un* enseignement, mais *des* enseignements de la philosophie. Celle-ci méritait, pensait Dominique Lecourt, d'être recentrée autour des sciences, dans leur diversité, à la lumière d'une meilleure maîtrise, par les professeurs de philosophie à venir, des problématiques scientifiques contemporaines. L'horizon dans lequel Dominique Lecourt posait sa réflexion n'était donc pas celui d'une simple modification des cursus scientifiques, mais il était, plus profondément, celui d'une transformation de l'enseignement ou des enseignements de la philosophie.

Un peu plus de dix ans après la publication de ce rapport, remis au ministre Allègre en juin 1999, est-ce que les choses ont véritablement changé ? Faut-il faire, en 2012, le diagnostic que faisait Dominique Lecourt, d'une distension conceptuelle entre l'enseignement philosophique et celui des sciences ; ou est-ce qu'une évolution véritable a, ces dernières années, eu lieu au sein de l'institution éducative ?

Pour répondre à ces questions, il faut regarder dans plusieurs directions à la fois, sans doute dans quatre directions congruentes.

Les programmes

La première direction est celle des programmes d'enseignement de la philosophie dans les classes terminales du lycée général. Entre le moment où Dominique Lecourt a composé et remis son rapport au ministre et aujourd'hui, deux nouveaux programmes de philosophie se sont succédé au sein de notre système éducatif. Le premier a été piloté par le professeur Alain Renaut et mis en vigueur à la rentrée 2001. Suspendu à la rentrée 2002,

1 LECOURT Dominique, *L'enseignement de la philosophie des sciences*, rapport au ministre de l'Éducation nationale, de la recherche et de la technologie, juin 1999, p. 13

il a été remplacé par celui qu'a élaboré le professeur Michel Fichant, entré en vigueur à la rentrée 2003.

Cette succession eut son drame, dont il reste encore difficile de décider, dix ans plus tard, s'il fut tragique ou tout simplement dérisoire, tant le souvenir des discussions d'alors les fait apparaître, rétrospectivement, sinon comme vaines, du moins comme surchargées, emphatiques et sans proportion avec l'examen attentif et comparatif des deux programmes en question. Ce qui paraît assez sûr, c'est qu'il y avait une part d'« épistémologie positive », pour ainsi dire, dans le programme Renaut. Une part de ce programme invitait, en effet, les professeurs à aborder, avec leurs élèves, des objets de savoir précisément définis et liés à des questions de positivité éthique – sur le thème de la liberté politique et de la justice sociale, par exemple – ou de positivité scientifique – sur le thème, par exemple, de la maîtrise de la nature : la révolution galiléenne, le progrès technique, etc. Cette partie du programme était, en outre, destinée à changer périodiquement.

La disparition de cette dimension « positiviste », souvent reprochée au programme de 2001, a masqué, très paradoxalement, la grande subtilité de celui de 2003, qui permet une grande liberté de parcours dans les différents domaines de la philosophie. Outre les notions générales de la philosophie auxquelles il invite à travailler, le programme élaboré par le professeur Michel Fichant a dressé une liste de « repères » qu'il a voulu mettre en relation avec les premières et les problèmes qu'elles suscitent, l'ensemble des « repères » permettant de circuler, en une variation très large, parmi l'ensemble des notions.

La subtilité qu'il y a dans ce programme s'est bien installée dans notre École. Cependant, les items du programme les plus proches des sciences et de leurs procédures, comme « la vérité », « la démonstration », etc., ne paraissent pas, à l'expérience, être les plus « populaires » parmi nos professeurs, qui leur préfèrent les thèmes liés à l'esthétique et à la morale, à la politique également – et les sujets du baccalauréat, en conséquence, leur sont, à ce jour, moins communément consacrés.

L'agrégation de philosophie

À la suite du rapport remis en 2001 au ministre de l'Éducation nationale par monsieur André Pessel, inspecteur général honoraire, la structure de l'agrégation de philosophie a été assez sensiblement modifiée, notamment à l'oral. Effectivement, une leçon d'oral sur

programme annuel a été introduite, se rapportant à des « domaines » tels que la métaphysique, la morale, la politique, la logique et l'épistémologie, l'esthétique ou les sciences humaines. En outre, dans le temps de préparation de leur épreuve, les candidats n'ont accès à aucune documentation ou bibliothèque. Ainsi, par exemple, l'oral de l'agrégation 2012 aura eu pour programme « Les sciences humaines », celui de 2013 porte sur « La métaphysique ».

Autrement dit, la structure de l'agrégation de philosophie devrait certainement permettre aux étudiants, aujourd'hui, à celles et ceux qui se forment à la maîtrise de leur discipline, d'entrer de plain-pied dans une réflexion, sinon strictement scientifique, du moins résolument *savante*, au sens où ce terme renvoie à une maîtrise de contenus positifs et non pas seulement à des catégories formelles générales. Il n'est, de fait, guère possible de prononcer une leçon d'épistémologie un peu sérieuse sans se référer à des contenus scientifiques positifs, sans être capable de thématiser leur logique, sans connaître quelques rudiments de physique ou de chimie, sans donner, en somme, quelques exemples de genèse et de structuration de la pensée scientifique. L'exigence d'une mixtion des sciences et de la philosophie a, du reste, été pleinement assumée par l'institution, notamment universitaire, et elle a donné lieu à un infléchissement de la formation des professeurs issus de ses rangs depuis environ dix ans.

L'enseignement de la philosophie

La troisième direction dans laquelle il faut regarder est celle des contours de l'enseignement de la philosophie au lycée ou, pour mieux dire, *aux lycées*, une distinction existant entre le lycée général et le lycée technologique. Sans doute ces contours ont-ils eux-mêmes évolué, à l'université, dans les grandes écoles et même dans les classes préparatoires, voire dans les classes terminales. Ces contours, jusque dans les années 70, étaient ceux de la philosophie classique, une philosophie qui commençait avec Platon, rarement les présocratiques – dont l'édition de la Pléiade date des années 80 – et s'achevait avec Sartre (encore vivant !) ou Merleau-Ponty, plus rarement Heidegger, c'est-à-dire avec la tradition allemande de la phénoménologie et sa reconfiguration française au détour des années 40 et 50.

Ce n'est, à l'évidence, plus le périmètre des études philosophiques prévalant à l'université, aujourd'hui, où la place de la philosophie analytique, celle des sciences cognitives ou celle

de l'épistémologie se sont véritablement étendues. Une sorte d'agacement mutuel et réciproque des « analyticiens » et des « continentalistes », qui s'est esquissé dans les années 90-2000, semble perdre à ce jour de son nerf et devenir parfaitement anecdotique, les professeurs formés à l'université et dans les écoles normales supérieures ne prenant guère plus à leur compte un « débat » qui n'a d'intérêt que s'il est théorique, non polémique, et s'il engage des discussions conceptuelles, non des positions idéologiques. En tout état de cause, l'univers philosophique contemporain est, très certainement, beaucoup plus largement ancré dans la logique et dans les sciences qu'il ne l'était encore dans les 70. Et il induit très manifestement – comme en attestent les leçons des professeurs, d'une part, les programmes des écoles normales supérieures, d'autre part – des transformations substantielles dans les contenus enseignés et donc dans la formation de nos élèves eux-mêmes.

La philosophie avant la terminale

La quatrième direction dans laquelle on regardera est celle d'un enseignement nouveau, et encore expérimental, mais dont il est permis d'espérer qu'il prendra de l'assurance et de l'ampleur, pourvu que nous parvenions à en définir clairement des règles à la fois pertinentes et recevables. Il s'agit de l'enseignement de la philosophie dans les classes de première et de seconde tel qu'il a été mis en œuvre depuis la rentrée 2011, et sur lequel il y a lieu de nourrir l'espoir d'une extension de l'enseignement de la discipline et de la méthode philosophiques dans des domaines qui ne sont pas étroitement ou strictement ceux de la philosophie elle-même : les sciences sociales, l'économie, les sciences dites « dures », etc. La circulaire de mars 2011, qui a largement infléchi les enseignements de philosophie dans les classes de première et, parfois, de seconde, a fortement appuyé la nécessité d'articuler le travail accompli avec le professeur de philosophie au travail accompli, dans un même temps, avec le ou les professeurs de la ou des disciplines dites « d'accueil » (histoire, lettres, sciences, etc.)

Le temps présent

Les choses ont donc, assurément, changé depuis le rapport Lecourt. L'enseignement des sciences s'en trouve-t-il pour autant dynamisé? « La pensée des citoyens devait gagner quelque allure de liberté », écrivait Dominique Lecourt, grâce à la collaboration, voire à la mixtion de la philosophie et des sciences. Plus de dix ans après la remise de son rapport,

est-il possible de s'assurer que les citoyens ont gagné – ou qu'ils n'ont pas gagné – une « allure de liberté » ?

Il faut, là encore, une réponse à double détente.

Premièrement, il faut considérer que nous sommes abondamment sollicités, en tant que citoyens, en tant que particuliers, pour opiner sur un certain nombre de questions qui engagent les valeurs et les normes que nous partageons, qui peuvent concerner l'avenir d'une région ou d'un pays, parfois même de la planète ou de ce que nous appelons « l'humain » – on pense évidemment aux problématiques liées au nucléaire, à l'environnement, au développement durable, mais aussi au génome, à la procréation médicalement assistée, à la fin de vie, etc.

À l'évidence, donc, nous sommes sollicités pour opiner sur un certain nombre de difficultés ou de problèmes qui relèvent, au moins pour partie, du registre des savoirs positifs. Or que savons-nous de la fission de l'atome, par exemple, si l'on vient nous interroger sur le nucléaire ? Tout au plus avons-nous à l'esprit quelques images, souvent belles – les « champignons nucléaires » – parfois atroces – les images d'Hiroshima ou de Nagasaki – et, au fond, principalement, notre culture se résume, au mieux, à ce que nous avons retenu du *Docteur Folamour* ou du *Syndrome chinois* – Peter Sellers ou Jack Lemmon formant, en somme, notre alternative nucléaire savante.

Or est-ce qu'opiner sur une question aussi grave que le nucléaire doit s'adosser simplement à des images cinématographiques et, au mieux, documentaires ? Ce qui est sûr, c'est que nous sommes amenés à opiner sur des thèmes et des problèmes du monde contemporain sur lesquels notre maîtrise, en tant que particuliers aussi bien que citoyens, est minimale, voire inexistante, alors même qu'ils touchent à des domaines d'une particulière complexité.

Dans le même temps, et c'est le deuxième point, l'on nous informe que l'ordre du monde et notre « être-ensemble », c'est-à-dire nos *choix de société*, sont de nature essentiellement économique et que, si nous en ignorons les règles fonctionnelles, nous prenons le risque de voir notre destin nous échapper et osciller entre l'erreur et le mensonge. Le refus d'une vision strictement économique des interactions sociales et politiques passe en effet, parfois – souvent ? – pour une naïveté coupable ou un déni de réalité. voire, pour une tromperie, quand ce discours acquiert une publicité suffisante : croire en une dimension

fondamentalement non-économique du monde, c'est à la fois errer soi-même et tromper autrui. Manière d'affirmer que la politique n'est pas affaire d'opinions, mais, principalement, affaire de savoirs et, même, de savoirs académiquement établis, au premier chef desquels l'économie et ses dérivées, les sciences sociales.

La symétrie dans laquelle se déploient ces deux points est en elle-même saisissante. D'un côté, il existe un certain nombre de sujets concernant intimement notre vie commune – l'atome, les énergies renouvelables, les organismes génétiquement modifiés, le développement de l'informatique – sur lesquels nous sommes appelés à *opiner*, alors même qu'il s'agit à l'évidence de sujets devant être rattachés à des disciplines scientifiques. Au rebours, sur des sujets ressortissant au politique en général, à des choix de vie ou à des préférences éthiques ou sociales, nous sommes sommés de *savoir*. Ainsi la réalité dite « objective » – celle de l'atome et des conséquences possibles ou prévisibles de notre échec à en maîtriser les effets – est ordinairement rattachée à l'opinion, tandis que la réalité « intersubjective » des valeurs de vie est commandée, elle, par des exigences de savoir et rivee aux règles imprescriptibles de la vérité, de l'erreur et du mensonge.

Un rôle particulièrement important d'une intime collaboration des sciences et de la philosophie pourrait dès lors bien être d'aider à rompre avec cette symétrie de la confusion. Ce ne sont pas les objets que nous confondons, ni les savoirs ; ce sont plutôt les modes de questionnement, les angles d'approche, les manières de nous poser les questions qui importent le plus à notre vie commune. Au fond, ce qui fait difficulté est la façon de nous poser ces questions d'existence, de sens et de non sens, et d'ordonner l'irréductible pluralité des registres auxquels elles s'articulent : le savoir, l'éthique, les choix de vie, etc.

Auprès des sciences, le rôle de la philosophie n'est pas de leur faire la leçon et de leur assigner leur place dans une hiérarchie des savoirs, les arbres de connaissance n'ayant plus l'allure cartésienne ! Réciproquement, le rôle des sciences, auprès de la philosophie, n'est pas de lui opposer la positivité de leurs savoirs et, comme on entend parfois dire, de la faire basculer dans le rang de la « littérature ». L'édification d'une authentique interdisciplinarité autour de thématiques pouvant les concerner *ensemble* devrait permettre de faire écho à la légitime demande du professeur Dominique Lecourt, celle d'une formation à la citoyenneté et, en somme, d'une « honnête » représentation des grands enjeux du monde contemporain.

L'honnête homme

La philosophie n'est pas une discipline technique et ne vise pas à fournir des protocoles intellectuels ou spéculatifs applicables à telle réalité ou à telle autre. Aussi, la question du rapport de l'enseignement philosophique aux enseignements scientifiques n'est pas, semble-t-il, celui d'un *usage* de l'enseignement philosophique, pris isolément. Ce n'est pas non plus celle d'enseignements scientifiques qui auraient besoin qu'on les éclaire sur leur sens ou sur leurs protocoles. La question de l'enseignement philosophique, dans son rapport aux sciences, est bien une question de *liberté*, de compréhension des problèmes majeurs du temps présent et de position existentielle vis-à-vis d'eux.

En effet, nous ne sommes pas libres de « tout penser », ni énoncer n'importe quelle proposition sans que cela porte *effectivement* à conséquence. Dès lors, concrètement, nous ne sommes pas libres de penser tout et n'importe, que deux fois deux font autre chose que quatre ou, pour reprendre une image bien connue, que notre cheval vaut plus que notre laquais !

La question d'un entrelacs de l'enseignement philosophique et de celui des sciences a partie liée avec les modes de régulation de notre liberté sociale, civile et politique, avec un exercice éclairé de la liberté citoyenne d'action et de choix. Postuler que les sciences et la philosophie pensent *ensemble*, c'est, en distinguant rigoureusement des espaces sémantiques – ceux de l'opinion et de la science – se donner les moyens d'une vision intégrée du réel, dans laquelle doivent s'ajuster des modalités diverses et à certains égards irréductibles du jugement. Il faut accepter qu'il y ait des régimes distincts de vérité. Ainsi, dans le domaine du politique, il est *essentiel* que nous ayons des opinions. Dans le domaine des choses, de leur réalité, de leur structure, il est *essentiel* que nous ayons des savoirs. Il ne faut pas prétendre opiner sur les choses et considérer savoir en politique, il faut opiner en politique et savoir sur les choses.

C'est, par là, faire apparaître la part de ce qui ressortit aux contraintes des choses et la part de ce qui ressortit aux contraintes de la vie et des hommes. Du côté des choses, les lois de la matière, celles de l'esprit, à supposer d'ailleurs que la matière et l'esprit soient deux choses différentes ; du côté des interactions sociales et politiques, les opinions, les croyances, les idéologies, les valeurs que nous pouvons tenter de construire ensemble prévalent dans leur pluralité et leur discutabilité.

En somme, notre raison d'être effectivement ensemble, ce 9 mai 2012, est de comprendre ensemble que la question de la vérité ne peut être appréhendée isolément du monde dans lequel elle se pose, mais qu'elle ne doit pas non plus être conçue comme un simple effet de ce monde, comme si nous produisions la vérité comme la nature produit les tulipes et les nénuphars. La liberté suppose mesure et équilibre entre des registres discursifs distincts, l'un de vérité, l'autre pratique, et elle s'inscrit dans un espace sémantique qu'il n'est possible d'appréhender et d'assumer dans sa complexité qu'à travers le très précieux ajustement, l'une sur l'autre, de la pensée scientifique et de la pensée philosophique.

Le point de vue des disciplines scientifiques

Charles Torossian (Inspecteur général de mathématiques)

Avant propos

Je souhaite dans un premier temps remercier nos collègues de l'Institut pour avoir initié et réalisé l'idée d'un tel colloque qui rassemble ce matin un grand nombre de personnes dans un lieu prestigieux. C'est dire l'intérêt que l'institution et donc par osmose la société accordent à la chose. Merci à nos hôtes.

Il est sans doute difficile en dix à quinze minutes de brosse un panorama assez vaste d'un sujet aussi essentiel que la relation des sciences et plus particulièrement des mathématiques à la philosophie. Tel ne sera donc pas mon propos ; je crois que d'autres personnes bien plus savantes ont écrit depuis des siècles sur la question. À dire vrai le sujet est intarissable.

Mon propos ce matin, se bornera à rappeler dans un premier temps ce que l'on attend des mathématiques dans l'enseignement scolaire et d'examiner dans un deuxième temps quelques exemples issus des programmes de lycée qui pourraient donner lieu à des débats utiles dans l'interaction mathématiques et philosophie.

La place des mathématiques dans l'espace scientifique scolaire.

Traditionnellement les mathématiques ont une place de choix dans l'enseignement scolaire français ; elles sont présentes de la maternelle à l'université. Les volumes horaires sont importants (5h en primaire, 4h au collège jusqu'à 8h en Terminale scientifique, 12h en CPGE) ; générant des masses enseignantes importantes (12 000 agrégés, 40 000 certifiés). L'agrégation de mathématiques recrute à elle-seule $\frac{1}{4}$ des agrégés.

D'abord à travers le calcul, puis à travers le raisonnement souvent issu de la géométrie, que l'on espère formateur pour le citoyen et enfin à travers l'outil, pourrais-je dire le

bras armé pour le professionnel en devenir que sont les ingénieurs, les professeurs, les chercheurs, l'enseignement scolaire place les mathématiques dans la résolution des problèmes ou l'acquisition de compétences. Faire des mathématiques *c'est résoudre des problèmes*. Faire des mathématiques *c'est acquérir des compétences : chercher, raisonner, calculer, modéliser, s'exprimer*.

La situation laisse peu de place en vérité à la réelle compréhension du lien avec les autres sciences. Pourrais-je dire ici, de manière non officielle, que la situation est perfectible car les disciplines dans l'enseignement scolaire se sont recentrées, sans doute à l'excès, sur leur propre champ, oubliant leur cousinage et perdant sans doute en richesse d'interactions.

Cet *outil* que les millénaires ont rendu efficace, terriblement efficace est l'objet d'admiration mais aussi de peurs. Du pilotage des tirs de canon à celui des missiles, des prédictions météorologiques à la conquête spatiale, du codage romain à Internet, de la mesure à la prédiction, les mathématiques sont présentes partout, souvent cachées.

Au-delà de ces banalités, il convient de s'interroger comment l'esprit humain arrive à condenser en sept symboles mathématiques les équations de Maxwell² ; $dF = 0$ et $d * F = * J$. Pourquoi Newton peut-il décrire la gravitation universelle en trois symboles ; $\sum f = M a$?

Les mathématiques sont puissantes et la question qui se pose est de savoir si ce langage est consubstantiel au monde ou à l'esprit humain. Mon camarade Stanislas Dehaene viendra lors de la remise des prix des Olympiades de mathématiques le 6 juin prochain nous parler de *l'évolution du cerveau et l'origine de certaines intuitions mathématiques*. Vaste sujet.

La mathématisation de la biologie est de mon point de vue, un objectif essentiel du XXIème siècle. Le vivant en ce moment, si l'on me permet ce parallèle, se trouve dans l'état de la physique avant l'arrivée de la dérivée et de Newton. Nous attendons des

² Ici $F = B - dt \wedge A$ est le champ électromagnétique, B le champ magnétique (c'est une 2-forme), A le champ électrique (c'est une 1-forme), $J = -j_0 dt + j_1 dx + j_2 dy + j_3 dz$ la 1-forme courant, $*$ l'opérateur de Hodge et d l'opérateur différentiel sur les formes.

choses exceptionnelles dans la mathématisation du vivant au cours de XXIème siècle ; les objets mathématiques qui permettront d'interpréter le vivant n'existent pas encore ou personne ne les a encore imaginés. Peut-on penser par exemple à des applications des catégories dérivées, je le pense, car ces objets sont conçus pour englober la fonctionnalité dans toute sa hiérarchie et l'on apprend de Teilhard de Chardin que le vivant se situe dans la branche de la complexité.

Notre ambition aujourd'hui en tant que professionnels de l'éducation est d'ouvrir l'esprit de notre jeunesse à des champs larges pour espérer y voir émerger des idées nouvelles qui révolutionneront l'interaction des mathématiques et du vivant.

Il est temps de faire une pause et de s'ouvrir au-delà des formules incantatoires, à une véritable réflexion sur la nature de la relation des mathématiques avec le monde et l'homme.

Au final nous pensons que les mathématiques ne sont pas uniquement un outil pour décrypter le monde, c'est un langage pour comprendre ce que nous sommes.

Quelques exemples issus des programmes de lycée dans l'interaction mathématiques et philosophie.

Je prendrai 4 exemples pour illustrer mon propos.

1/ Les Nombres complexes :

C'est au XVIème siècle qu'apparaissent réellement les nombres complexes. Vers 1535 Tartaglia redécouvre la technique de Del Ferro et l'explique imprudemment à Cardan qui passera à la postérité. En voulant résoudre les équations du 3^{ème} degré, l'introduction d'une racine carrée au nombre -1 s'impose comme une technique astucieuse, sans doute incomprise mais qui donne un résultat certain : en transitant par des nombres imaginaires on obtient bien 3 solutions réelles d'une équation ! Comment est-ce possible ?

Comme on sait que le carré d'un nombre réel est positif, cette racine $\sqrt{-1}$ n'est pas réelle. Est-elle imaginaire ? Le terme est resté et le statut incertain de ce nombre

questionne. Le franchissement de l'interdit permet de résoudre un problème ; c'est-à-dire que l'interdit n'indiquait pas un gouffre dangereux mais une porte sur l'inconnu.

Si l'objet est insaisissable, son rôle est tellement fondamental dans la résolution des problèmes que l'on souhaite qu'il existe. Peut-on alors poser le problème de la cohérence, peut-on affirmer que toutes les difficultés des calculs sont surmontables grâce à l'affirmation de l'existence d'un tel imaginaire. Affirmer est-ce se convaincre de l'existence ? Il a fallu attendre Gauss en 1797 pour avoir une interprétation géométrique de ces nombres.

L'enseignement scolaire a abandonné l'écriture $\sqrt{-1}$ préférant l'emploi du symbole i . Ainsi nous avons $i^2 = -1$. Mais au fond on substitue un problème par un autre. Le changement d'une notation ambiguë pour une notation algébrique plus droitière, plus désincarnée (*je hais l'algèbre* disait Simone Weil) n'est qu'une illusion. C'est cette approche qui figure dans le futur programme de mathématiques de 2012.

Et pourtant l'algèbre apporte une solution intéressante à ce problème. En voulant résoudre l'équation $x^2 + 1 = 0$ la solution est dans le problème. En vérité l'inconnue, le fameux x , est la solution du problème lui-même. Cette idée est déconcertante (elle déstabilise nos candidats à l'agrégation) mais est cohérente d'un point de vue mathématique³. Bref, l'algèbre nous apprend que poser le problème c'est déjà le résoudre et renvoie clairement à la question du positionnement dans le discours.

J'encourage nos professeurs à réfléchir à cet aspect des choses.

2/ La Dérivée :

En 1620, Fermat propose une méthode originale pour trouver le maximum d'une aire d'un rectangle connaissant son périmètre. C'est le problème phare dans l'enseignement des classes de seconde. Il est dommage de ne pas se référer à l'histoire quand nos professeurs abordent aujourd'hui ce problème en manipulant logiciel ou autre démarche d'investigation.

Que fait Fermat ? Il imagine que le produit xy est maximal (x, y sont les longueurs des cotés) et se propose de dire qu'il en est à peu près de même pour le produit

³ Il faut quand même dire quelque chose autour de l'irréductibilité du polynôme $x^2 + 1$.

$(x + e)(y - e)$, ce qui nous amène rapidement à penser que $ex \sim ey + e^2$, c'est-à-dire après avoir divisé par e , $x \sim y + e$. Comme e vaut 0 (ou presque) on trouve $x = y$ c'est-à-dire que la solution est le carré.

La question qui m'intéresse ici, c'est de comprendre le statut de l'objet e . Est-il nul ou non ? C'est le scandale de l'époque. L'incompréhension de la technique, malgré son efficacité rend suspect le raisonnement. Est-il juste ?

Là encore des décennies (les notions de quotients algébriques, des hyper-réels) ont réhabilité le raisonnement de Fermat. Sans doute trop tard. Dans les programmes de 2011, le nombre dérivé est défini comme limite du taux d'accroissement $\frac{f(x+h)-f(x)}{h}$ quand h tend vers 0. On ne donne pas de définition formelle de la limite. En définitive nous en sommes revenus à la méthode de Fermat de 1623.

Ce qui est intéressant, c'est de comprendre d'un point de vue de l'épistémologie le parcours qu'il a fallu réaliser pour comprendre ce que Fermat faisait. La question transversale qui doit intéresser nos collègues professeurs est d'accomplir ce même questionnement avec leurs élèves. Les débats philosophiques de l'époque n'ont pas manqué, il serait dommage de nous en priver aujourd'hui.

La question latente dans l'histoire de la dérivée de Fermat à nos jours est celle de l'efficacité eu égard à la question de l'existence, de la vérité (le juste), voire de la morale. Notre enseignement n'est pas sorti de cette vision et il se méfie en général de l'efficacité symbolique (le mot de Simone Weil que je citais tout à l'heure le prouve) que l'on soupçonne toujours de cacher une vérité plus noble. Mais en vérité, l'histoire prouve souvent que ce qui est efficace est souvent fondé. Je pense notamment aux calculs de renormalisation des intégrales divergentes en physique théorique, qui se trouvent aujourd'hui justifiés grâce aux travaux de Connes- Kreimer et la théorie des groupes. Bref, j'encourage nos professeurs à replacer le débat de l'efficacité dans une perspective historique.

3/ Le Hasard :

Beaucoup de hasard fonde la stabilité. C'est déjà un sujet de philosophie. Je jette un dé non truqué 1000 fois et je note combien de fois je trouve les chiffres 1, 2, ..., 6. J'ai peu de chance de tirer 1000 fois de suite le nombre 6. En définitive, les choses semblent aller de soi, et chaque nombre va sortir environ 160 fois. La physique statistique procède de la même idée.

Ce qui est quand même intéressant, c'est de mesurer aussi les écarts par rapport à cette stabilité, cette moyenne, cette normalité.

Bref, des milliards d'êtres humains sont en moyenne tous équivalents (vu de loin, de très loin, tous les êtres se ressemblent), mais nous souhaitons nous positionner par rapport à cette moyenne. Tous les champs des relations sociales et humaines voire économiques ou politiques sont guidés par cette mesure à la normalité.

Ce que nous apprennent les mathématiques c'est que cet écart est universel, ce sont les fameuses gaussiennes, les courbes en cloche qui ne nous quittent pas depuis l'enfance ; le poids, la circonférence du crâne, la taille, les résultats scolaires, les études internationales, les salaires, *etc.*

Cette découverte fondamentale est forcément stupéfiante. Elle signifie que le hasard total est contrôlé au premier ordre, mais ce que l'on oublie de dire dans le cours de mathématiques, c'est que l'on ne peut pas aller beaucoup plus loin dans l'analyse. Bref l'écart à la normalité étant lui-même standardisé, il est élevé au statut de vérité, voire de dogme.

J'encourage nos professeurs à réfléchir avec leurs collègues, à l'universalisme apparent du gaussien et à s'interroger sur le fait qu'une formulation aussi magnifique puisse être un guide de pensée pour l'homme, sans le conduire à des catastrophes. Les crises financières se fondent sur ces croyances ; le modèle de Black et Scholes exploite de manière fondamentale cette idée.

Sans doute nos élèves et nos professeurs n'ont pas pris assez de recul sur les objets qu'ils manipulent. Il serait temps d'y remédier et au plus vite.

4/ La Notion de groupe :

Elle a été introduite dans l'enseignement scolaire après la révolution des mathématiques modernes. Ce fut un échec patent.

Il est assez intéressant de comprendre le pourquoi de cet échec sur l'exemple de la notion de groupes mathématiques. En vérité, l'enseignement s'est concentré sur la description des éléments d'un groupe et des lois de composition. Bref, ce qui importait était de comprendre les états de l'objet. C'était surtout très ennuyeux et cela l'est toujours en première année universitaire.

Je crois que ce qui est important dans un groupe, c'est la manière dont il agit sur les autres objets mathématiques. C'est ce que nous apprenons à nos candidats à l'agrégation. Je ne suis pas sûr qu'ils comprennent bien de quoi il s'agit... ce qui n'est pas pour me rassurer.

En vérité, l'action du groupe révèle la nature profonde de l'objet. On le voit lorsqu'on veut différentier les groupes de dimension 1, $\begin{pmatrix} 1 & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ et $\begin{pmatrix} t & 0 \\ 0 & \frac{1}{t} \end{pmatrix}$; les représentations algébriques dévoilent leurs différences fondamentales. L'exemple montre que l'action est plus importante que l'état et que les choses se dévoilent par leurs actions. C'est clairement un pont sur un champ philosophique classique et c'est une ligne de fracture dans les mathématiques et dans la pensée philosophique.

Au fond la question renvoie à l'étude de l'objet pour lui-même ou pour ce qu'il fait ou peut faire.

Comme on le voit sur cet exemple élémentaire, les mathématiques, y compris dans l'enseignement secondaire portent déjà tout le questionnement du positionnement des sciences, par rapport à leurs actions ou leurs interactions ⁴.

Conclusion

⁴ Le raisonnement par récurrence m'a toujours fasciné. Nous devrions nous attarder sur cet exemple. Si $P(0)$ est vrai et si je démontre que pour tout $n, P(n) \rightarrow P(n+1)$, alors j'aurais démontré que $P(n)$ est toujours vrai. J'aurais démontré une infinité de propositions. Cette maîtrise de l'infini, la transcendance la pensée sur la matière est à mon sens spectaculaire. Elle touche à la définition profonde de l'être.

Je crois que les exemples que j'ai donnés, montrent qu'il est inutile d'attendre l'Université pour aborder les problématiques philosophiques qui sous-tendent l'enseignement des mathématiques. Je vous remercie pour votre attention.

Marie-Blanche Mauhourat (Inspectrice générale de physique-chimie)

Je vais tâcher d'exposer de manière concise, compte tenu du temps restant pour mon intervention, en commençant par remercier les organisateurs de cette journée.

Je souhaitais aborder deux points de la dialectique entre sciences et philosophie. L'importance de la philosophie en sciences et l'importance des sciences en philosophie,

Sans entrer dans le détail, en me plaçant du point de vue non pas des sciences en général, mais des sciences expérimentales en particulier, et en ce qui me concerne de la physique-chimie. Science de la nature pour la physique, science de la matière pour la chimie mais avec des frontières, la question des frontières qui nous concerne aujourd'hui. Frontières qui ne sont pas toujours étanches entre ces deux disciplines quand on se place au niveau microscopique. Frontières aussi ténues désormais entre chimie et biologie, puisque les réactions chimiques rendent compte des processus biologiques en biologie moléculaire. Frontières qui n'existent pas non plus entre physique et sciences de la Terre, quand les mouvements, les frottements, les échanges d'énergie des propagations des ondes dans la matière rendent compte des séismes. La question des disciplines dont le champ d'action a été circonscrit au XIXe siècle mériterait peut-être bien d'être repensée à l'aune des connaissances scientifiques actuelles, mais ceci est un autre débat. Tout comme la notion même d'experts disciplinaires avec son corollaire qui est le repli disciplinaire auquel nous assistons malheureusement dans l'enseignement, peut-être en partie lié à la formation des maîtres telle qu'elle est actuellement dispensée dans notre pays. En tout cas le problème des frontières entre les disciplines est posé.

Mon propos portera dans un premier temps sur l'apport de la philosophie à l'enseignement des sciences. Il y a eu peut-être, contrairement à l'enseignement de

philosophie, de grandes évolutions dans l'enseignement de la physique-chimie. L'enseignement de physique-chimie, comme celui de SVT, s'oriente désormais davantage vers la formation à la démarche scientifique, à la manière dont se construisent les savoirs, qu'il ne l'a fait par le passé où il se centrait uniquement sur des savoirs académiques, essentiellement disciplinaires.

J'évoquerai dans un deuxième temps l'apport de l'enseignement des sciences à l'enseignement de philosophie. A la lecture des programmes de philosophie. Comme le disait très justement Dominique Rojat, nous avons en effet énormément de liens à développer, d'objets communs sur lesquels travailler entre disciplines scientifiques et philosophie. On peut identifier ces liens, ces objets, et les proposer à nos enseignants, puisque les programmes ne les identifient pas encore explicitement. Il y aurait sans doute des documents ressources à produire et à diffuser pour ce faire.

L'importance de la philosophie dans l'enseignement des sciences, importance de la réflexion lors de la pratique de la science à l'Ecole et au-delà, importance du raisonnement, importance du *jugement réfléchi* (pour reprendre les termes du programme de philosophie de terminale), donc importance de la réflexion « philosophique » lors de l'apprentissage de la science.

Je me placerai du point de vue de la formation des futurs scientifiques, puis de la formation de ceux qui ne feront pas des sciences leur métier, et enfin et surtout de la formation des enseignants. C'est sans doute pour ces derniers que le bât blesse encore en formation, puisque les échanges entre les enseignants, la rencontre des enseignements ne sont possibles que s'ils disposent d'un minimum de langages communs, de cultures communes qui ne leur sont pas toujours apportés en formation des maîtres et relèvent souvent de démarches individuelles.

Pour les futurs scientifiques qui vont participer à cette exaltante aventure humaine que celle de l'enrichissement de la connaissance par la construction de nouveaux savoirs. Pour ces futurs scientifiques qui vont « marcher sur les épaules des géants » qui les ont précédés (Galilée, Newton, Einstein, Lavoisier, Lehn,....). Ces futurs scientifiques doivent être éclairés sur la manière dont leurs illustres prédécesseurs ont contribué à la construction de savoirs nouveaux, dont ils ont effectué leurs « découvertes », dont ils ont

élaboré leurs théories, de manière inductive à partir d'expériences, d'observations et de mesures répétées (Képler en astronomie), par l'expérience de pensée (Galilée et son plan incliné sans frottement...pour énoncer le principe d'inertie), par la pensée uniquement (Einstein cherchant à unifier Electromagnétisme et Mécanique postule l'invariance de la vitesse de la lumière)... Non pas par hasard comme semble le laisser à penser certaines images d'Epinal largement véhiculées par les medias et certains articles de vulgarisation scientifique (Depuis Euréka d'Archimède dans sa baignoire, en passant par Newton au pied du pommier et Becquerel avec ses plaques photos abandonnés dans un tiroir, ...), non pas par hasard mais parce que leurs connaissances scientifiques préalables les ont amenés à s'étonner, à s'interroger sur une observation que leurs corpus de connaissances et de théories ne leur permettait pas d'interpréter. Pour être en capacité d'innover, de trouver, il est nécessaire de connaître d'abord, d'analyser, de juger, de réfléchir.

Pour **ceux qui ne deviendront pas scientifiques**, mais qui seront les citoyens, et qui grâce à l'initiation aux pratiques et méthodes des sciences expérimentales et à leur genèse, doivent pouvoir être en capacité de penser le monde, d'exercer un regard critique nécessaire, d'analyser des données, des arguments (la science est souvent citée pour faire la promotion de tel ou tel produit dans les publicités), de faire le tri entre faits et opinions ou croyances, d'être des hommes libres par le savoir, avec un minimum de savoirs et un minimum d'outils pour le questionner, pour opiner comme le disait Paul Mathias. Nos programmes actuels permettent, précisément en série littéraire et en série économique et sociale, aux élèves, dans le cadre de leur enseignement de sciences, d'apprendre à argumenter, à débattre d'idées sur le monde contemporain (nourrir le monde, enjeux énergétiques, génétique, ...) en mobilisant les connaissances qu'ils ont acquises et en utilisant des données qui leur sont fournies.

Pour les futurs enseignants qui doivent être éclairés sur le long cheminement de la construction des connaissances du fait notamment des difficultés à passer du monde sensible, du monde de la perception, au monde parfois déroutant des lois et théories quand elles défient les sensations à notre échelle : héliocentrisme versus géocentrisme (le soleil tourne autour de la Terre !), principe d'inertie (mouvement sans force ou avec des forces se compensant !), chute des corps (même vitesse pour tous les objets dans le

vide ou sur la Lune...en l'absence d'air, de matière pour les freiner), chute de la Lune (qui si elle ne chutait pas, si elle n'était pas retenue s'éloignerait de la Terre), vitesse constante de la lumière dans tous les référentiels (alors que s'observe la composition des vitesses sur un tapis roulant...), relativité du temps (alors que sensation d'un temps propre (donc absolu) pour chaque individu), mécanique quantique avec échanges discrets d'énergie (alors qu'échanges continus à notre échelle...) . Les enseignants ne doivent pas ignorer les difficultés à changer de représentations à changer de paradigme ; la résistance des communautés scientifiques à changer de théorie tout au long de l'histoire des sciences en est la preuve. Il en sera de même pour leurs élèves, qui dès l'enfance se seront construits des premières représentations « naïves qu'il conviendra, lors des phases d'apprentissage, de déconstruire.

Il s'agit donc de donner à tous les élèves, dans l'enseignement des sciences, **une image la plus authentique possible de ce qu'est la Science** et surtout de ce qu'elle n'est pas. C'est pour cela que l'accent est désormais mis au lycée (mais aussi plus modestement en amont au collège et à l'école) non plus uniquement sur les connaissances (les résultats de la science) mais surtout sur la **démarche scientifique**, sur le **cheminement et la construction de la pensée scientifique** (à travers sa dimension historique et sa dimension méthodologique et réflexive) qui contribue à la construction des savoirs. La lecture des **préambules des programmes** illustre parfaitement ces objectifs⁵. Il y a autour des activités expérimentales un travail rigoureux à effectuer pour confronter les

⁵ Extrait du Préambule de la **filière scientifique** du lycée :

La Science est mode de pensée qui s'attache à comprendre et décrire la réalité du monde (monde de la nature et de la matière pour la physique chimie) à l'aide de lois toujours plus universelles et efficaces par allers retours entre modélisation théorique et vérification expérimentale. Contrairement à la pensée dogmatique, la science n'est pas faite de vérités révélées intangibles, mais de questionnements, de recherches et de réponses qui évoluent et s'enrichissent avec le temps.

*Initier l'élève à la **démarche scientifique**, c'est lui permettre d'acquérir des compétences : mettre en œuvre un raisonnement pour identifier un problème, formuler des hypothèses, confronter les hypothèses avec les constats expérimentaux, exercer son esprit critique*

Les activités expérimentales jouent un rôle fondamental en établissant un rapport critique avec le monde réel où les observations sont parfois déroutantes, ou des expériences peuvent échouer, où les mesures, toujours entachées d'erreurs aléatoires ou systématique ne peuvent permettre de déterminer les valeurs des grandeurs qu'assorties d'une incertitude qu'il faut pouvoir évaluer au mieux (rôle de la précision de la mesure dans le progrès scientifique, apprentissage de la rigueur et de la plus grande exactitude)

***Mise en perspective historique** : La science a été élaborée par des hommes et des femmes vivant dans un contexte temporel, géographique et social donné. En remettant en causes les conceptions du monde et la place de l'Homme, son progrès s'est souvent heurté aux conservatismes, aux traditions, aux arguments d'autorité, aux obscurantismes de toutes sortes. En ce sens, faire connaître à l'élève l'histoire de la construction scientifique est source d'inspiration pour sa liberté intellectuelle, l'esprit critique et la volonté de Elle est aussi une école d'humilité et de patience, dans la mesure où cette histoire s'est accompagnée d'un cortège d'hypothèses fausses et de notions erronées, autant de controverses passionnées. Cette approche permet d'identifier les obstacles épistémologiques liés aux apparences sensibles qui se sont opposés à la connaissance et qui se retrouvent dans les représentations premières des élèves. Elèves qui peuvent être rassurés par les erreurs commises par des grands esprits tout au long de l'histoire de la pensée scientifique.*

hypothèses (issues des représentations) à l'observation, pour modéliser et confronter la modélisation à d'autres expériences et engager une réflexion sur la validité, « la vérité ». D'où la nécessité, outre l'enseignement de philosophie qu'ont reçu tous les élèves en terminales S, que nos futurs enseignants de science et de physique-chimie se voient proposer des formations et des outils dès leur formation initiale. Bien entendu il faudrait s'interroger sur la manière dont, au sein des concours de recrutement, nous pourrions prendre en compte ces aspects, peut être de manière modérée au départ, mais ensuite de manière plus affirmée. Je pense que les concours de recrutement peuvent faire évoluer la formation des maîtres et montrer l'importance que nous accordons aux questions de philosophie en science.

Examinons maintenant, plus succinctement, **l'apport de l'enseignement dispensé en sciences, de l'école primaire au lycée, pour l'enseignement de philosophie de terminale**. Je ne reviens pas sur l'importance de l'épistémologie, car ce n'est pas le lieu ici. Mais entre autres, ce qui peut être important à considérer quand on lit le programme de l'enseignement de philosophie, *à travers cet exercice réfléchi du jugement et cette culture philosophique, est l'importance de s'appuyer notamment sur les savoirs scientifiques*. D'où l'importance, que les professeurs de philosophie discutent avec leurs collègues de science, sur la manière dont ces savoirs sont abordés afin que les élèves puissent les remobiliser, les questionner, les utiliser, puisqu'il est demandé dans les exercices de dissertations et d'explications de textes, que ce soit l'expérience personnelle de l'élève qui soit questionnée. Cette expérience personnelle, il faut qu'elle ait été vécue, et donc, il convient de s'appuyer sur ce vécu des élèves.

Enumérons quelques unes des notions rencontrées en physique-chimie, en amont de la classe de Terminale et qui constituent de réels sujets de philosophie : la perception ; les rapports entre théorie et expérience ; l'interprétation ; la matière et l'esprit (sont-ils différents ou non ?) ; la vérité ; les termes d'absolu et de relatif qui sont questionnés par la philosophie, et qui sont importants en sciences et en particulier en physique lors des études de mouvement, le temps, la vitesse ; la question de l'abstrait, du concret ; de la création de la croyance et du savoir (A cet égard, on demande de faire acquérir et comprendre aux élèves la distinction entre les faits et hypothèses vérifiables d'une part, les opinions, les croyances d'autre part).

D'autre part, un autre lien important, est celui qui mobilise tous les éléments relatifs à la maîtrise de l'expression et de l'argumentation. Dans l'enseignement des sciences, depuis « la Main à la pâte » à l'école en passant par les sciences au collège, puis au lycée, tous les élèves travaillent l'expression orale et écrite et l'argumentation à travers le travail de groupe, la présentation de leurs travaux, la tenue de cahiers d'expériences. J'en veux pour preuve la nouvelle évaluation des élèves en 1^{re} littéraire en 1^{re} sciences économiques et sociales, dans lesquelles, autour d'objets de sciences, on demande des synthèses, des commentaires, des argumentations. Les annales montrent la manière dont nous souhaitons que des jeunes, dont les sciences ne seront pas la profession, soient capables effectivement d'opiner, d'argumenter, ce qu'il nous a paru important de développer dans le cadre de leur formation.

Ces quelques points saillants, concepts et activités, illustrent l'articulation possible des programmes de physique-chimie et de philosophie, devraient être portés à la connaissance des enseignants, afin de les encourager, voire de les inciter, à partager leurs pratiques et à proposer aux élèves des enseignements en cohérence, qui se nourrissent et se font écho. De tous les outils de formation, celui de l'échange de pratiques entre pairs (avec des pairs différents, mais sur des thèmes et des objets de convergence) est celui qui en général revêt les plus grands taux de satisfaction lors des formations ; une fois dépassées les frilosités et les craintes du regard de l'autre sur ses limites. Il faut en finir avec le mythe du professeur omniscient, les connaissances ne connaissent pas de limite, plus de frontières ni temporelles et ni spatiales ; leur accès est désormais aisé et il n'est pas nécessaire de toutes les maîtriser à un instant donné, mais d'être en capacité de les construire.

En conclusion, et pour être optimiste, nous disposons de tous les leviers ; les ferments sont présents dans les programmes, en tout cas dans ceux de science, de physique-chimie, de SVT et peut être bientôt de mathématiques.. Nous avons tous les ferments pour que, dans les programmes, des liens puissent s'établir entre nos disciplines, des frontières être dépassées. Il n'empêche que, comme je le disais, pour se comprendre, il faut un minimum de langage et de culture communs, qui doivent être fournis aux enseignants ; les freins se trouvent plutôt en formation initiale.

Nous demandons beaucoup en ce moment aux enseignants avec la rénovation des programmes et les nouveaux dispositifs mis en place dans le cadre de la réforme du lycée. Il faut donc leur laisser un peu de temps, mais cela peut être un objectif à fixer à moyen terme. Parmi les raisons d'espérer une évolution de la dialectique entre les sciences d'une part, les sciences et la philosophie d'autre part, se trouvent l'autonomie des établissements, la possibilité d'expérimenter, les dispositifs dont parlait Dominique Rojat comme l'enseignement d'exploration MPS⁶ ou l'accompagnement personnalisé, dans lesquels des professeurs construisent des actions communes très intéressantes, dont certaines vont nous être présentées aujourd'hui, qu'il conviendrait de mieux faire connaître. J'ai vu sur le terrain des professeurs travaillant ensemble dans le cadre d'expérimentation d'une option « culture et démarches scientifiques » sur la question des révolutions scientifiques, avec d'un côté le regard du philosophe et de l'autre le regard du scientifique, qui travaillaient l'un sur des expériences et l'autre sur l'évolution de la pensée. Des projets naissent sur le terrain : ici ou là nous en avons croisé. Si je peux donc faire souffler un vent d'optimisme, je pense que nous pourrions avoir d'autres initiatives exemplaires sur le terrain, à condition de continuer à les impulser et à bien identifier tout ce qui peut être apporté à nos enseignements en faisant en sorte que les frontières entre nos disciplines ne soient plus aussi fermées qu'elles peuvent le paraître parfois. Il n'y a ni de la part de l'institution, ni de celle des acteurs aucune volonté qu'elles le demeurent, il nous faut éclairer et accompagner les pratiques. Je vous remercie.

Dominique Rojat (Doyen des Inspecteurs généraux de sciences de la vie et de la terre)

Les relations entre l'enseignement de la philosophie et les sciences de la vie et de la Terre sont bien nombreuses. Tant de choses sont faites, ou souhaitables, ou possibles ! Dans le peu de temps imparti, je ne pourrai que vous proposer une approche rapide, schématique, voire simpliste. Pour simplifier, je classerai les croisements envisageables en trois grandes catégories.

⁶ Méthodes et pratiques scientifiques

Le champ épistémologique

La question est de savoir comment, quand on enseigne les sciences, notamment de la nature et notamment de la vie et de la terre, on doit en même temps réfléchir la science - ce que j'appelle, d'une manière un peu sommaire sans doute, l'épistémologie. Voici quelques exemples des questions qui concernent le professeur de sciences de la vie et de la Terre.

Quelle est la place du raisonnement déductif dans nos sciences ? Ce raisonnement déductif existe aussi bien sûr en mathématiques, mais avec une petite variante : au moins implicitement nos hypothèses se terminent par des points d'interrogation, contrairement à celles qu'énoncent les mathématiques. Le raisonnement s'organise donc de manière un petit peu différente.

Quelle est la place du raisonnement inductif et comment peut on avec rigueur s'appuyer sur l'étude d'un nombre nécessairement limité de cas, pour tenter de tirer un certain nombre d'idées générales ? C'est une pratique constante, pour des raisons pratiques, dans l'enseignement. Mais il n'est pas aisé de le faire en conservant la rigueur de ce raisonnement inductif. Du raisonnement inductif, on passe ainsi insensiblement à la généralisation hâtive.

La question évidemment de la falsification, au sens de Popper : c'est la question du dialogue critique permanent entre les faits et les idées. C'est ce dialogue constructif que l'on met en œuvre en permanence pour construire le savoir dans le domaine des sciences de la vie et de la Terre. En relation avec cette question de la falsification, on rencontre aussi la question de la vérité en sciences. Paul Mathias évoquait tout à l'heure cette question : quel est le sens du mot vérité dans les sciences de la nature ? Comment peut-on concilier l'idée commune que la science dit la vérité avec l'idée tout aussi commune que la science progresse ? Si la science a dit le vrai aujourd'hui, dira-t-elle, demain, plus vrai que le vrai ? La question même de ce que veut dire « vérité » dans les sciences de la nature n'est pas simple. C'est une question éminemment philosophique,

qui ne peut s'aborder sans porter un regard historique – épistémologique – sur la construction de ces sciences.

Tout cela n'est sans doute pas très spécifique des sciences de la vie et de la terre. C'est sans doute vrai d'une manière générale des sciences de la nature au sens de la *physis*. Cette lenteur de la marche vers la vérité dans les sciences de la nature est sans doute en rapport avec la complexité des systèmes étudiés. Cette complexité des systèmes, biologiques, géologiques ou biologiques et géologiques, est souvent irréductible, ce qui limite sans doute l'approche mathématique que Charles Torossian appelait de ses vœux tout à l'heure.

Pour compléter cette réflexion, je propose quatre remarques.

Il n'est probablement pas possible d'enseigner sérieusement les SVT, même à un niveau assez élémentaire, sans tenir compte de quelques considérations épistémologiques.

S'il est clairement nécessaire d'avoir une réflexion épistémologique pour enseigner les SVT, faut-il pour autant rendre cette réflexion explicite pour les élèves ? Le professeur est pris entre deux risques. L'excès d'explicitation, qui conduisait par exemple un professeur de bonne volonté à demander, en interrogation, à ses élèves de 6^{ème} : « récitez les étapes de la démarche scientifique ». Le déficit d'explicitation, qui empêche alors de faire réfléchir les élèves sur la nature ou le sens du savoir scientifiques.

Les questions épistémologiques sont parfois présentes explicitement dans les programmes de sciences de la vie et de la Terre sous l'angle de l'histoire des sciences. Il s'agit alors d'une histoire épistémologique, bien entendu, et non d'une histoire purement anecdotique.

Enfin, l'un des obstacles majeurs à la prise en compte suffisante de la dimension épistémologique dans l'enseignement des sciences réside dans le déficit de formation des professeurs sur ces questions et donc dans la difficulté de prendre en compte cette dimension au moment du recrutement.

Le croisement entre les contenus des sciences de la vie et de la Terre et les préoccupations philosophiques

Dans bien des cas, philosophes et biologistes regardent le même objet et se posent des questions proches, tout en les abordant par des méthodes bien différentes : l'homme, le genre (question qui s'est justement trouvée au centre de l'actualité en raison de cette nécessaire convergence des regards), la vie, l'évolution, la responsabilité de l'homme face à la nature, etc. Autant de questions qu'aborde évidemment le professeur de science de la vie et de la terre mais qu'il n'est pas seul à aborder sans en être parfois conscient : souvent, dans une classe terminale, un professeur de SVT traite l'évolution de l'homme sans savoir que, pendant ce temps, son collègue de philosophie, aborde la question « Qu'est ce que l'homme » ? Ce sont alors les élèves, qui doivent faire la synthèse tout seuls !

Dans la pratique, comment résoudre cette difficulté ? L'hésitation est permanente entre deux solutions. Faut-il chercher, quand on parle d'un même objet, à unifier les deux discours ou au contraire faut-il faire converger deux discours dont chacun conserve sa spécificité ? C'est une question sans réponse, de nature pédagogique, qui est affaire de choix.

Les questions éthiques

Il y a d'abord les questions éthiques qui concernent le professeur dans l'exercice de son métier : par exemple, lorsqu'il évoque les OGM, un professeur de sciences de la vie et de la Terre, est capable d'avoir un discours expert explicatif sur le sujet. Mais il peut aussi être un citoyen qui a son opinion sur la question ; il peut même pourquoi pas être un citoyen militant. La distinction dans l'exercice du métier, entre le militantisme et le discours scientifique rigoureux est difficile mais évidemment nécessaire. C'est une question de laïcité, c'est-à-dire de respect des limites des compétences de chacun. Distinguer l'éducation au choix et l'enseignement des choix, voilà la règle, concrètement délicate à suivre. La respecter est bien une nécessité éthique.

Il existe un deuxième type de croisement entre l'éthique et l'enseignement des sciences, c'est la manière dont l'enseignement des sciences participe à la formation éthique de l'élève, au moins de l'éthique citoyenne. La formation à la rigueur, l'apprentissage de l'humilité du scientifique, du respect des faits, de la distinction entre faits et idée : voilà

qui participe à cette formation éthique. J'aurais pu évoquer aussi la question de la bioéthique, mais le croisement est alors si évident que ce n'est peut être pas la peine d'en parler d'avantage.

Il existe donc sans aucun doute une telle richesse infinie de croisements possibles entre les questions de l'enseignement scientifique et les questions philosophiques, qu'il est très probablement irréaliste d'espérer les explorer de manière exhaustive dans le cadre de l'enseignement, notamment secondaire.

La seule solution raisonnable ou réaliste est probablement une opportuniste : il existe toute une série d'occasions offertes par les programmes eux-mêmes, par la rencontre de personnes parfois, par l'existence de dispositifs pédagogiques. A chacun, à chaque équipe, d'en saisir l'une ou l'autre, pour le bénéfice des élèves.

Paul Mathias

Merci à vous trois d'avoir contribué à ces travaux et d'avoir présenté la problématique institutionnelle de la collaboration, alors, manifestement, non pas simplement entre la philosophie et les sciences mais entre la philosophie, les sciences et les sciences. Car au fond, nous ne formons pas deux espaces distincts moi tout seul dans mon coin et vous trois dans votre plus grand coin, et au fond la circulation des idées, des méthodes, des regards passent toutes les disciplines, manifestement. Ce que nous allons peut être voir plus concrètement puisque la prochaine étape de notre matinée va être consacrée à l'observation de travaux qui sont effectivement conduits dans les classes par des professeurs qui ont des élèves, de vrais élèves à qui ils enseignent de la philosophie, des sciences, mais ensemble. Et de la philosophie et des sciences avec lesquels donc, ils construisent ce que nous avons essayé d'esquisser un peu abstraitement à cette table de travail.

Présentation d'expériences de terrain

Introduction : Joël Jung, Paula La Marne

Paula la Marne

Nous intervenons, Joël Jung et moi, en tant qu'Inspecteurs académiques - Inspecteurs pédagogiques régionaux, de la Normandie pour moi (Rouen et Caen), du sud de la France pour mon collègue (Nice, Aix-Marseille, Corse). Nous vous proposons de rechercher comment on peut organiser, dans le cadre institutionnel qui nous est donné, cette coopération entre les sciences et la philosophie que nous appelons de nos vœux ce matin, bien qu'elle ait une longue histoire qui ne s'est jamais vraiment interrompue.

La récente réforme du lycée offre un certain nombre de possibilités que nous allons vous exposer. Il existe en effet depuis un an des dispositifs, c'est-à-dire un cadre institutionnel, qui présente plusieurs avantages, notamment celui de mettre un terme à cette prolifération d'initiatives isolées, sporadiques, de courte durée qu'on pouvait observer çà et là, lancées plus ou moins utilement. Les dispositifs récents que nous allons évoquer devraient nous permettre d'inscrire cette coopération entre sciences et philosophie au lycée dans le cadre d'une certaine systématité. Ils devraient permettre au dialogue entre les savoirs de s'inscrire dans une certaine durée, d'avoir une visibilité, de rendre possible une certaine mutualisation des pratiques. De quel cadre s'agit-il ? Nous renvoyons à une circulaire du B.O.E.N. numéro 9 du 3 mars 2011, dont le contenu a été élaboré par l'Inspection de philosophie et qui propose un certain nombre de moyens au professeur de philosophie pour intervenir autrement qu'il ne le fait habituellement dans sa classe de philosophie. En sortant de l'enseignement de préparation au baccalauréat, le professeur de philosophie peut aller à la rencontre d'autres disciplines, dont notamment, bien sûr, les disciplines scientifiques.

Précisons que le professeur de philosophie dans ce cas doit s'abstenir de traiter le programme de philosophie de terminale, les nouveaux dispositifs permettant d'inventer de nouvelles modalités de coopération avec nos collègues des autres disciplines.

Donc, de quoi s'agit-il ? Tout d'abord, le professeur de philosophie peut pratiquer des interventions ciblées, dans le programme d'autres disciplines, en choisissant les points de ces programmes extérieurs qui pourraient être éclairés par son approche spécifique. Dans ce cas, il s'appuie sur les programmes de ses collègues en partant de ce qu'ils sont. Ainsi peut-on travailler en mathématiques sur le hasard, les probabilités, l'infini, en sciences physiques sur les atomes, en S.V.T. sur l'évolution ou en première sur la vision, sous l'angle philosophique... Tels sont les exemples que nous proposons dans notre circulaire, mais ce ne sont que des exemples.

L'accompagnement personnalisé (l'AP) est un autre de ces dispositifs. Ce cadre est très important, parce qu'il correspond à deux heures hebdomadaires inscrites désormais dans l'emploi du temps de tous les élèves en seconde, en première (depuis 2 ans) et en terminale (à la rentrée 2012). C'est un dispositif dans lequel les professeurs identifient les besoins de leurs élèves et élaborent un projet pédagogique adéquat à ces besoins. Ils peuvent donc considérer que la formation à l'histoire des sciences ou la formation à la réflexion sur les sciences répondent à leurs yeux aux besoins des élèves. La circulaire qui autorise l'AP (B.O. du 04/02/2010) précise que ce dernier peut prendre la forme de travaux interdisciplinaires. Ainsi, j'ai accompagné et observé la mise en œuvre d'un projet d'AP sur l'astrophysique avec des classes de seconde, qui m'ont paru passionnées.

Il existe un troisième dispositif, déjà ancien, qui a fait ses preuves, à caractère pluridisciplinaire récent, ce sont les fameux T.P.E. (travaux personnels encadrés) qui n'existent plus qu'en première, où la coopération entre les disciplines est connue et habituelle, et fonctionne bien.

La circulaire de mars 2011 de l'inspection de philosophie qui proposait ces dispositifs lançait aussi un appel à projets. Les Inspecteurs d'académie - Inspecteurs pédagogiques régionaux ont, sur le terrain, collecté les projets, et les ont accompagnés pour qu'ils

s'inscrivent bien dans l'esprit de ces dispositifs. Nous avons ainsi validé un certain nombre de projets qui proposaient une coopération entre sciences et philosophie. Nous sommes dans la période où les projets qui ont été validés par l'inspection sont à l'œuvre. Nous proposons de vous donner quelques éléments de cette toute première mise en œuvre des trois dispositifs dans lesquels s'est donc mise en place une interdisciplinarité philosophie - sciences. Bien que nous soyons au début de ces mises en œuvre, nous en avons pu en observer un certain nombre, et nous pouvons tirer quelques enseignements de ces débuts.

L'engouement pour cette première année d'enseignement de la philosophie en dehors de la préparation directe au baccalauréat n'est encore pour l'instant qu'un frémissement. En effet, on n'a pas plus d'une quinzaine de projets par académie, pour environ 200 professeurs en moyenne par académie; néanmoins, c'est de façon banale qu'on découvre la présence de ces dispositifs dans les emplois du temps des professeurs quand on se rend dans les établissements, alors que notre avis n'avait pas été sollicité. La pratique semble gagner du terrain, discrètement et sûrement.

Quels choix ont fait les professeurs pour cette interdisciplinarité ? Sur les 15 projets observés en moyenne par académie, 40% relèvent de l'interdisciplinarité philosophie et sciences, le reste se partage entre philosophie et littérature, et entre philosophie et arts plastiques.

Du côté de la philosophie et des sciences, la coopération S.V.T. philosophie l'emporte de loin, avec pour thèmes majeurs les biotechnologies ou la bioéthique et, en leur sein, de façon tout à fait récurrente, la procréation médicalement assistée, le don d'organes, l'homme et l'animal, la place de l'espèce humaine dans les espèces. En second lieu viennent les sciences physiques, peut être plutôt même l'astrophysique, et en troisième viennent les mathématiques. Donc, c'est plutôt du côté des S.V.T. que l'intérêt se porte, et ce sera à nous de faire tout un travail pour inciter les professeurs à travailler d'une façon plus équilibrée le champ des sciences. Le dispositif plébiscité est l'accompagnement personnalisé et, second lieu, loin derrière, viennent les interventions ciblées. Sans doute cela tient-il au fait que les deux heures d'accompagnement personnalisé existent dans l'emploi du temps, on peut (et on doit...) s'en emparer, on

peut s'y installer. Pour les interventions ciblées, les choses sont plus aléatoires et difficiles à mettre en place, par des raisons de compatibilité d'horaires entre professeurs, alors que dans le cas de l'AP, il faut en faire quelque chose et s'il y a des affinités entre les collègues de sciences et le collègue de philosophie, on peut vraiment monter un projet. Peut-être le succès de l'AP tient-il aussi au fait que l'on bénéficie d'une certaine latitude et d'une marge de manœuvre, laissées à l'appréciation des équipes pédagogiques, car finalement ce sont elles qui identifient les besoins des élèves, qui les connaissent. Cependant, on remarque trop souvent que dans l'AP le professeur de philosophie officie souvent seul et a travaillé seul son sujet scientifique, même si en général on observe en SVT une coopération telle qu'une co-animation en cours, par exemple. Pour les TPE, les équipes des classes de première sont constituées, elles travaillent depuis longtemps ensemble, le professeur de philosophie n'est pas un partenaire « naturel », il a peut-être plus difficilement sa place, alors qu'autrefois il y avait des TPE en terminale, où l'on avait l'habitude du professeur de philosophie.

Néanmoins, un certain nombre de questions se posent, du point de vue de l'organisation, de ce que l'on fait, de l'évaluation des élèves, car l'objectif est, ne l'oublions pas, la formation des élèves. Que vont-ils acquérir, que peut-on proposer pour accompagner les professeurs ? Nous allons justement écouter Joël Jung, qui a un certain nombre de réflexions à nous donner et d'exemples précis à nous présenter sur ces points.

Joël Jung

Mon propos s'inscrit très naturellement dans le cadre que Madame La Marne a rappelé et éclairé à l'instant, en resserrant l'attention sur les volets scientifiques des expériences qui ont été évoquées, à partir d'exemples pris dans les académies dont j'ai la charge (nous sommes juste en train d'esquisser un bilan, aujourd'hui encore très partiel, de ces expériences) ; et sur la classe de seconde, parce que c'est la classe dans laquelle il y a le plus de dispositifs nouveaux ; parce qu'il y a en classe de seconde seulement des « enseignements d'exploration » dans lesquels des interventions communes de professeurs de sciences et de professeurs de philosophie peuvent prendre place ; parce que la seconde, dans le cursus des élèves, est le niveau le plus éloigné du « lieu naturel » des professeurs de philosophie, et que les élèves de lycée n'y ont pas encore été orientés

vers les filières scientifique, économique, littéraire ou technologiques. Je voudrais aussi évoquer différentes autres modalités du travail entre professeurs de disciplines scientifiques et professeurs de philosophie, qui existaient auparavant dans les académies dont je m'occupe (dans d'autres aussi), qui ont constitué un terrain très favorable pour la mise en place de ces interventions et qui, en retour, ont pu trouver leur place dans ces dispositifs nouveaux. Ces réelles innovations prennent place sur un fond de continuité : je partage avec quelques participants à ce colloque, le souvenir des journées de Saint-Jorioz de 1995, dont le titre : « contribution philosophique à l'enseignement scientifique » était aisément réversible.

Un certain nombre de démarches ont été entreprises depuis plusieurs années, en particulier dans l'Académie d'Aix-Marseille. En premier lieu le « Projet Callisto », lancé en 2002 au lycée de l'Arc à Orange en partenariat avec le CNRS et l'observatoire de Haute Provence tout proche, qui a développé de très importantes activités pédagogiques en direction des élèves et des professeurs : il s'agissait de mettre les élèves en contact avec les conditions réelles d'une recherche scientifique, sur des thèmes interdisciplinaires (l'astronomie de position, l'astrométrie des satellites de saturne, la construction d'un spectrographe, des ateliers d'astrophotographie, d'instrumentation, de radioastronomie, et même un atelier de polissage de miroirs), associés à un travail ambitieux de nature à la fois historique et épistémologique. L'objectif affiché par ce projet, qui a vite débordé de son établissement d'origine, était de permettre aux élèves d'appréhender « l'unité de la démarche scientifique dans une démarche de recherche effective » et de présenter la culture scientifique et technique comme un « un instrument de compréhension du monde ». Ce projet a été et est toujours porté aujourd'hui par un professeur de philosophie, enseignant la philosophie, mais qui a la particularité d'être chargé de mission par l'Inspection régionale de physique - chimie sur l'académie d'Aix-Marseille ! Il s'occupe aujourd'hui d'un dispositif régional, élargi à plusieurs académies, intitulée le « Ciel comme laboratoire » qui prend désormais la forme d'une initiation des élèves du second degré aux sciences de l'univers, en prenant toujours soin de garder le même fil conducteur qu'au début : intégrer ces élèves dans une démarche effective de recherche depuis la conception jusqu'à la mise en place et la réalisation.

Ce dispositif, mis en place depuis plus de dix ans, s'est aisément intégré dans les Travaux personnels encadrés, puis dans les nouveaux dispositifs de l'actuelle réforme du lycée, de l'accompagnement personnalisé aux enseignements d'exploration, en particulier *Méthodes et pratiques* scientifiques, à la satisfaction de tous, et loin du reproche parfois entendu d'une perte des exigences scientifiques. Des expériences d'inspiration voisine ont été menées ailleurs, en particulier au lycée Laetitia Bonaparte d'Ajaccio, là encore avec le remarquable investissement d'un professeur de philosophie associé à des professeurs de sciences. Je sais que Pierre Léna a apporté à plusieurs reprises sa contribution bienveillante à ce travail, autour du thème « Vision du monde et astronomie », avec un cahier des charges très impressionnant (avec la construction d'un télescope). Il serait vraiment dommage que ce qui commence à prendre forme dans ce cadre ne trouve pas de continuation dans les années qui viennent.

Deuxième lieu possible : les stages de formation communs aux professeurs des disciplines scientifiques et de philosophie. Cela fait cinq ans que de tels stages ont lieu dans l'académie d'Aix-Marseille, selon la même organisation chaque année : une première journée consacrée à un thème de travail et de réflexion (l'évolution, individu et identité, la matière...), une deuxième journée permettant des comptes rendus d'interventions communes dans les classes (auxquelles sont depuis cette année associés des professeurs de physique - chimie). Ces journées sont aussi l'occasion d'un échange entre scientifiques, qui découvrent que, d'une discipline à l'autre, la notion de matière, par exemple, n'a pas nécessairement le même statut. Je poserais volontiers que la philosophie y est pour quelque chose, et que le fait que l'enseignement de la philosophie soit fondé sur un programme de *notions*, c'est-à-dire non sur un contenu qui serait fixé d'avance, mais sur des « des champs de problèmes », permet justement des rencontres et un travail fécond de ce genre.

Enfin, le troisième lieu possible, sur lequel je passerai vite en dépit de son importance, parce que madame La Marne en a présenté les principes, et que des professeurs vont en parler dans quelques instants : les interventions ciblées de professeurs de philosophie dans des enseignements scientifiques, destinées à éclairer, de manière très simple, élémentaire, tel ou tel concept, telle ou telle démarche, que les élèves auront effectivement rencontrés dans cet enseignement scientifique. Dans un tel cadre, le

travail de préparation, qui suppose une collaboration active entre scientifiques et philosophes, qui suppose qu'on ne s'enquière pas simplement du contenu des programmes des disciplines scientifiques, mais qu'on aille voir et entendre comment ces programmes sont effectivement traités devant les élèves, etc., ce travail est décisif : c'est lui qui permet à une intervention philosophique de s'insérer de façon pertinente dans un enseignement scientifique. C'était d'ailleurs l'une des grandes questions : quel sera le statut de ces interventions philosophiques ? Certains professeurs ont pu avoir la tentation (que le cahier des charges s'efforçait d'écartier) de faire comme un cours de philosophie de terminale anticipé. De fait, lorsque des professeurs se sont laissés tenter, lorsque, par exemple, l'objet qu'ils s'étaient donné n'avait pas un rapport direct avec ce qui se faisait dans la discipline d'accueil, cela n'a pas marché. Des interventions bien intentionnées et fort intéressantes, par exemple, sur les physiciens ioniens, qui finalement, se sont déroulées de manière autonome par rapport à l'enseignement dans lequel elles prenaient place n'ont pas abouti. Toutes les interventions qui ont été plébiscitées par les élèves et les professeurs ont eu pour point de départ une réflexion sur la manière dont une intervention philosophique pouvait s'articuler à la démarche engagée par le professeur de sciences.

Ainsi, au Lycée Montgrand à Marseille, il est apparu au professeur de SVT et au professeur de philosophie que le concept d'évolution (proposé comme exemple dans le cahier des charges) pourrait être effectivement le concept le plus problématique et le plus intéressant pour une intervention. Ils ont en conséquence précisé ce qui, dans ce concept d'évolution, présentait le plus de difficultés et d'intérêt, et se sont arrêtés à la question du hasard. Pour ne pas simplement juxtaposer les approches (ce qui est aussi un risque), ils ont choisi un objet plus précis : la « querelle des monstres » du XVIII^e siècle. À partir de là, un travail commun a été possible, qui ne soit ni de justification d'un point de vue par l'autre, ni d'imposition d'un point de vue à l'autre. Cette démarche a suscité chez les élèves, aux dires du professeur de SVT, une foule de questions en rapport direct avec l'enseignement des SVT, mais qui n'auraient eu que peu de chances de surgir sans ce travail commun. Il y bien là un terrain tout à fait intéressant, où chaque discipline peut s'enrichir de l'autre, si l'on prend soin de respecter ce cadre strict, d'interventions philosophiques ponctuelles, prenant appui sur l'enseignement scientifique reçu par les élèves, et se proposant, non d'approfondir (cela viendra plus

tard) mais d'éclairer un concept ou une démarche de façon aussi élémentaire que possible.

Philippe Jeanjacquot et Pierre Vignand (Lycée Charlie Chaplin de Décines – Académie de Lyon)

Expérimentation entre astronomie et philosophie en classe de seconde

Une expérimentation pédagogique associant astronomie et philosophie existe depuis 2009 au lycée polyvalent Charlie Chaplin à Décines (dans la banlieue lyonnaise).

Cette expérimentation s'adresse à des élèves de seconde pour qui l'enseignement « méthode et pratiques scientifiques » devient l'enseignement d'astronomie et de philosophie. C'est une expérimentation correspondant à l'article 34 de la loi d'orientation de 2005.

L'idée est partie du constat que l'enseignement pluridisciplinaire sciences-humanités n'existait pas vraiment dans les établissements scolaires. Pourtant, malgré les apparences il y a beaucoup de points communs entre ces deux champs d'actions.

Alors pourquoi ne pas créer ce type d'enseignement et de voir l'impact sur les élèves, les professeurs, le lycée et les partenaires.

Le cours est en co-animation avec un enseignant de physique-chimie, pour l'astronomie, et un enseignant de philosophie. Cela montre la cohérence entre les deux disciplines. Toutes les interventions sont communes, sur un total de 2h par semaine, les professeurs interviennent chacun la moitié du temps en prenant soin que les deux parties soient bien liées. Cela permet aussi d'aborder et de mieux comprendre l'histoire et le fonctionnement de la pensée scientifique.

Les objectifs sont de :

- Proposer une nouvelle offre d'enseignement pour motiver les élèves.
- Créer un enseignement multidisciplinaire avec des disciplines qui ont à priori des champs d'étude différents.
- Donner un nouveau sens à la connaissance.

- Proposer aux élèves, quelque soit leur niveau et leur profil, un enseignement associant sciences et humanisme. L'enseignement n'est pas du tout élitiste, il est ouvert pour tous les élèves, il n'y a pas de sélection particulière en début d'année.
- Faire prendre conscience aux élèves de la complémentarité des disciplines et de l'unité de la culture.

Comme l'enseignement est une expérimentation, les professeurs doivent définir un programme, les compétences que doivent acquérir les élèves, les objectifs et les thèmes abordés pendant l'année.

Les élèves peuvent développer les compétences suivantes :

- Mieux comprendre les principes et les enjeux de la philosophie.
- Réfléchir à ce qu'est une science (Objet, méthode, progrès)
- Comprendre et utiliser différentes méthodes scientifiques.
- Apprendre à observer.
- Appréhender l'astronomie dans toutes ses dimensions depuis les aspects techniques jusqu'aux implications philosophiques et culturelles.
- Développer l'autonomie et l'esprit critique à travers des mini-projets. Savoir mettre en œuvre une problématique pouvant donner lieu à un débat. Savoir présenter et argumenter sur un mini-projet.
- Apprendre le maniement d'instruments scientifiques (Lunette astronomique, télescope...). Comprendre les principes de l'observation, de la mesure avec des instruments.
- Utiliser des logiciels (et sites) (Stellarium, logiciels de retouche photo comme Iris, pilotage de télescopes à distance avec les Faulkes Telescopes)

L'approche est faite à travers différents thèmes. Par exemple, une séquence se consacre à la mesure d'Eratosthène parallèlement à une découverte des philosophes présocratiques qui sont souvent à la fois philosophes, mathématiciens, astronomes. Dans une autre séquence les élèves s'initient à ce qu'est l'astronomie, la philosophie, les sciences, les techniques, les arts, les religions... Les élèves apprennent à se repérer dans le Ciel, ils étudient des textes sur Thalès et grâce à Stellarium simulent l'observation d'une éclipse lors de la bataille antique d'Halys, contemporaine à Thalès. L'accent est

surtout mis autour de Galilée, cela permet vraiment de faire travailler l'astronomie avec les aspects les plus techniques comme le perfectionnement du télescope par Galilée. Mais aussi, de comprendre comment cela peut changer la conception philosophique du monde et même la compréhension que l'on a de la théologie et de ses relations avec les autres disciplines. Les élèves étudient ainsi l'évolution des sciences et les révolutions scientifiques.

Le cours est en interactivité avec le monde extérieur. Jusqu'à présent il y a toujours une visite de laboratoire ou d'observatoire dans l'année. Un scientifique vient une fois par an faire une conférence en lien avec l'astronomie ou les métiers de la recherche. N'étant pas contraint par un programme, les leçons ont souvent des points d'actualité pour montrer que la science est vivante et qu'il a de l'actualité en permanence.

Les points forts de cet enseignement sont :

- Faire découvrir l'astronomie aux élèves et la philosophie par le biais de l'histoire des sciences. L'astronomie sert de fil conducteur pour étudier les philosophes pré socratiques comme Thalès, Pythagore. Les élèves étudient Platon et Aristote. Les élèves étudient aussi la révolution scientifique copernico-galiléenne, l'évolution des méthodes scientifiques, la vérité en science, la notion de doute. Ils étudient aussi l'art.
- L'ensemble est illustré par des exemples concrets liés à l'astronomie. Les élèves utilisent des logiciels pour observer le ciel. Ils pilotent des télescopes à distance (à Hawaï et en Australie). Ils travaillent sur les représentations du ciel. Ils travaillent aussi sur les techniques liées à des instruments comme les télescopes. L'enseignement exploite aussi des liens avec l'actualité.
- Les élèves apprennent à observer, à analyser et à comprendre le monde.

Voici deux exemples de séances :

La première se fait à partir d'une photo (la voie lactée de Serge Brunier) montrée aux élèves. La démarche pourrait s'apparenter à de la philosophie expérimentale. En fait, les élèves doivent regarder la photo tout simplement puis dire ce qu'ils voient. Certains disent qu'ils voient des points lumineux, d'autres qu'ils voient des étoiles, certains voient de la fumée, d'autres la voie lactée... À partir de là, les enseignants s'efforcent de

les faire réfléchir: qu'est ce que l'on voit vraiment ? à quel moment il s'agit plutôt de juger ? –ils sont amenés à comprendre l'importance du contexte- si l'on reconnaît qu'il s'agit d'un ciel étoilé, c'est peut être qu'on est en astronomie. Ils vont aussi réfléchir à l'importance du langage : on dit qu'on voit une étoile, c'est parce que la chose est dénommée. Ils vont réfléchir aussi à la notion de représentation: est ce que vraiment ce que l'on voit c'est le ciel étoilé ? Un élève dit toujours finalement à un moment donné : « non, c'est une image ». Alors quel genre d'image ? C'est une photographie, elle a pu être retouchée. Ils travaillent aussi sur les possibilités éventuellement de tromperie qui peuvent exister à partir du moment où l'on utilise les images. Cette fois ci, c'est la photographie d'une bulle de savon de Jason Tozer qui sert de support. Et cela se termine même, en leur demandant si cela ne pourrait pas être une représentation artistique, il y a beaucoup de vue d'artiste du ciel. Cela leur permet de travailler différents aspects de la représentation.

L'autre exemple de séance est sur Galilée et la découverte des satellites de Jupiter. A partir du logiciel Stellarium, les élèves simulent l'observation de Galilée, donc le ciel en janvier 1610, à l'époque où Galilée réalise sa découverte. Le logiciel permet de simuler aussi la vue à travers le télescope utilisé par Galilée et donc de se mettre dans les mêmes conditions. Les élèves se mettent « dans la peau de Galilée » et voient virtuellement ce qu'il observait. En utilisant les compétences acquises lors de la séance sur l'observation de la photo, ils doivent noter ce qu'ils observent avec leur jugement. En général, ils ne se font plus avoir, ils disent qu'ils observent des points autour de Jupiter. On va leur demander, oui, mais dans quel contexte est Galilée à l'époque. Donc ils vont dire que les points observés sont des étoiles. Finalement, en utilisant le « Messenger des étoiles », l'ouvrage de Galilée sur cette découverte, ils voient le cheminement de Galilée qui a permis de voir que ces points lumineux étaient des satellites.

Jusqu'à présent les élèves ayant suivi cet enseignement se sont montrés très intéressés par l'enseignement de philosophie en terminale et on eu de très bon résultats.

Par exemple lors d'une interview, on a demandé à un élève ce qu'il avait le plus retenu de l'enseignement de l'astronomie-philosophie en seconde. Il a répondu : d'être initié à la philosophie, il a parlé aussi de la notion de doute dans les sciences, comment faire

évoluer les sciences, la remise en cause. Pourtant la notion de doute a été abordée parmi bien d'autres idées, mais c'est ce qui est resté chez cet élève.

L'expérimentation continue, un stage est prévu à l'IFÉ, Institut Français de l'Éducation, le 13 novembre 2012, pour les collègues qui veulent se lancer dans l'aventure. L'inscription se fait sur le site suivant :

<http://acces.ens-lyon.fr/acces/formation/formations/formateurs/astro-philo-2012/>

Cette expérimentation n'aurait pu se faire sans le soutien du CARDIE (Centre académique de Recherche et Développement en Innovation et Expérimentation) de Lyon, les inspections régionales et générales, le dispositif Astro à l'École, l'IFÉ.

Voici deux sites pour en savoir plus :

<http://artsandstars.ens-lyon.fr/>

<http://astro.lyceechaplinbecquerel.fr/>

Nos adresses :

Astronomie : philippe.jeanjacquot@ens-lyon.fr

Philosophie : pierre.vignand@wanadoo.fr

Nicolas Righi et Sandrine Lesage, professeurs de Philosophie et de Sciences de la Vie et de la Terre (Lycée Arthur Rimbaud de Sin-le-Noble , Académie de Lille)

Nicolas Righi

La collaboration que Mme Lesage et moi-même avons mise en œuvre, au lycée Arthur Rimbaud de Sin-le-Noble, s'inscrit elle-même dans une expérimentation pédagogique plus large. Celle-ci, que j'ai intitulée «Pouvoir et représentation : une approche pluridisciplinaire d'une question philosophique», articule les enseignements de Sciences de la Vie et de la Terre, de Français, d'Histoire-Géographie, de Sciences Economiques et Sociales et une initiation à la Philosophie avant la Terminale. Elle s'adresse à des élèves de séries L et ES. Je vais en indiquer la genèse avant d'exposer ce

que nous avons fait en commun, particulièrement l'articulation des cours de Philosophie et SVT qui motive plus spécialement notre intervention d'aujourd'hui.

En ce qui concerne l'organisation matérielle de l'enseignement, nous avons pratiqué aussi bien l'intervention ciblée du professeur de Philosophie dans le cours d'un collègue que ma participation à l'aide personnalisée et aux TPE que j'encadre par ailleurs. Dans l'académie de Lille, le Sépia –pôle de Soutien à l'Expérimentation Pédagogique et à l'Innovation en Académie- a lancé un appel à projet, lui-même inscrit dans le cadre de l'expérimentation nationale, auquel j'ai répondu. En fait, cette expérimentation en première prolongeait des actions menées au lycée depuis plusieurs années conformément à une idée : l'apprentissage de la philosophie en terminale est généralement vécu par les élèves comme la découverte d'une discipline totalement nouvelle, si on peut souscrire en partie à ce jugement, on peut aussi faire valoir que cet enseignement se nourrit d'une culture constituée dans les années d'étude qui précèdent la Terminale. On peut donc anticiper l'apprentissage de la démarche philosophique en révélant aux élèves la solidarité profonde qu'entretient cette démarche avec l'ensemble du savoir qui leur a été délivré durant leur scolarité, en mettant en lumière les articulations et les correspondances qui peuvent exister entre leurs différents enseignements pour les préparer à faire usage de cette culture dans le cadre de leur cours de philosophie en Terminale.

Il s'agissait donc d'étudier, à plusieurs voix, une notion commune à différentes disciplines, propre à susciter un questionnement philosophique et à motiver la construction d'un problème, dans un enseignement qui se voulait élémentaire. « Pouvoir et représentation » devaient jouer ce rôle. Mais le premier dialogue interdisciplinaire que j'avais à l'esprit m'orientait vers les sciences humaines plutôt que les sciences exactes, vers l'Histoire-Géographie, l'ECJS et les SES. Je cherchais, en recourant à un fil directeur touchant l'esthétique et la philosophie politique, à déterminer en quoi la constitution d'une communauté politique repose sur des dispositifs scéniques, des spectacles, une mise en scène propre à développer un imaginaire collectif. Ce questionnement était nourri d'une lecture de Claude Lefort mais aussi des travaux récents de Marcel Gauchet sur les totalitarismes, l'étude de ces régimes figurant au programme d'Histoire des classes de Première. Comme elle nécessitait d'aborder le

concept d'idéologie, cette collaboration avec le professeur d'Histoire me semblait pouvoir utilement se prolonger par un travail avec le professeur de SES sur les « représentations collectives ». Mais le recours aux mises en scène, aux spectacles, si manifeste dans les régimes totalitaires, justifiait également une réflexion sur ces notions et les rapports qu'elles entretiennent avec la philosophie politique. Cela me rappelait des lectures plus anciennes, *la lettre à d'Alembert sur les spectacles* de Rousseau et les commentaires qu'en fait Jean Starobinski. Ainsi, il m'apparaissait finalement qu'il y avait également lieu d'articuler ce que j'étais en train de construire à un enseignement de français autour de la question du théâtre, « lecteurs et spectateurs ». J'étais donc en contact assidu avec 3 autres disciplines, Français, SES et Histoire.

A ce moment là, compte tenu de l'ampleur et de l'extension que j'étais en train de donner à cette notion de représentation, j'ai cherché à unifier l'usage que je faisais du terme et me suis dit que le mot « représentation », était indissociable de la question du sujet, de la construction d'un sujet exerçant son jugement et que ce terme devait être pris ainsi dans son extension pour en éprouver l'unité. J'avais alors un objectif pédagogique qui était de saisir avec les élèves la communauté de sens des usages du mot représentation dans différentes disciplines, d'éprouver les limites de cette communauté de sens. Philosophiquement c'était pour eux la première expérience d'une analyse conceptuelle qu'on pouvait décliner dans plusieurs matières : le cours d'Histoire traitant la notion de totalitarisme, le cours de SES autour des notions « société, communauté, identité », dans une perspective anthropologique, le cours de Français qui doit traiter de notions comme lecteurs et spectateurs. Mais puisqu'il s'agissait d'étudier la diversité des sens et des usages du mot « représentation », il devenait évident qu'il fallait associer à ce travail le professeur de Sciences de la Vie et de la Terre qui, dans les séries L et ES, traite la question « qu'est-ce que voir ? » C'est donc une collaboration entre cinq matières que je proposais au Sépia et à mes collègues dans ce projet pédagogique d'initiation à la Philosophie avant la classe de Terminale.

Nous avons exposé l'ambition de ce projet à nos élèves et assumé devant eux une hypothèse théorique, celle d'une communauté profonde des sens du mot « représentation », qui nous servirait de fil directeur. Sans tomber dans un artifice qui consisterait à dire que ce mot a exactement le même sens dans tous les champs

disciplinaires que je viens d'évoquer, on pouvait en relever le caractère métaphorisant et retrouver ainsi la question du sujet en se demandant à quel accès au réel un sujet rationnel pouvait prétendre. Cette problématique trouve bien sûr un développement particulièrement fort dans toutes les questions portant sur la perception et c'est à ces dernières que Mme Lesage et moi-même avons consacré notre travail commun. Nous avons cherché à montrer que même dans sa dimension la plus intuitive (la vision, l'acte de voir dont on pourrait croire qu'elle est un accès à une réalité matérielle qui, elle, n'est pas métaphorique) la représentation relevait de cette problématique.

Parallèlement à leur enseignement scientifique sur la « représentation visuelle », des élèves d'une première L et d'une première ES ont donc participé à des ateliers d'initiation à la philosophie. S'appuyant sur différents supports iconographiques, ces ateliers ont soulevé des questionnements sur la part de la culture personnelle du spectateur dans le regard qu'il peut porter sur des œuvres d'art. De même, les élèves se sont demandé s'il pouvait y avoir une représentation « naturelle » et « spontanée » et ont développé l'hypothèse que toute représentation devait être construite. Enfin, réunissant tous les élèves, une séquence de deux heures en présence de tous les professeurs engagés sur le projet a été organisée dans la salle polyvalente du lycée sous l'intitulé « enjeux philosophiques de la vision ». La séance a consisté en une présentation des problèmes posés à la philosophie par les rapports entre sensation et connaissance. On y a procédé à l'étude de quelques textes permettant d'opposer deux traditions que les élèves ont pu identifier, l'une de défiance envers le sensible, l'autre pouvant être qualifiée d'empirisme voyant dans les sensations la source de nos connaissances.

Le cours de science avait développé son premier chapitre consacré aux dimensions anatomiques et fonctionnelles de la vision, de l'œil au cerveau. Le chapitre suivant devait être consacré à l'organisation de la perception (avec en particulier un développement sur la plasticité cérébrale). Il a donc pu s'articuler à cette intervention du professeur de philosophie pour développer l'idée d'une nécessaire intégration des différentes sensations dans la construction d'une perception. Cette partie du cours a d'ailleurs été introduite par un exercice de description/retranscription d'un tableau de Picasso reprenant une partie des enseignements précédents.

Ainsi, pour le déroulement du projet d'ensemble de l'année (*Pouvoir et représentation*) les élèves ont vu à travers le problème de la vision, présumée comme accès au réel tel qu'il est en lui-même, que toute vision s'inscrit dans un dispositif plus général de perception intégrant certes une opération sensorielle mais également des actes de jugement et de connaissance. Sous ce rapport et sans les confondre, les différents usages du mot représentation soulèvent un point commun, un problème, celui de la métaphorisation du réel. C'était là l'ambition du professeur de Philosophie, je dois laisser le professeur de SVT exposer les siennes.

Sandrine Lesage

Je reprends donc pour le côté SVT ; mon souhait à travers cette expérimentation était de bien montrer aux élèves de Premières ES et L les apports conjoints de disciplines aussi différentes à leurs yeux que les SVT (a priori uniquement destinées, pour eux, à la filière scientifique) et la Philosophie (chasse gardée des filières plus littéraires). Or, on leur demande, depuis la réforme mise en place cette année, en épreuve anticipée en fin d'année de Première, un commentaire argumenté. Et le commentaire argumenté ne doit évidemment pas se limiter pour eux au fait de restituer des connaissances (qui doivent être présentes bien entendu) de façon brute et la plus précise possible, mais ce support doit permettre surtout de les organiser, de montrer qu'il y a une rigueur, une logique et une interrelation des causes et des conséquences. On leur demande par ailleurs de montrer qu'ils ont aussi un vécu, des expériences personnelles, des connaissances (autres que celles acquises tout au long de l'année en SVT et en science physique-chimie) qui leur permettent d'élargir leur réflexion, d'élargir le champ d'investigation et de mieux comprendre des phénomènes et des mécanismes qui pouvaient sembler très restreints à un champ disciplinaire donné. Il me semblait donc très intéressant et positif pour ces élèves de faire appel à d'autres matières et de travailler donc beaucoup l'interdisciplinarité.

Ce qui m'intéressait par rapport au programme de Sciences de Premières L et ES, ainsi qu'à la Philosophie, c'était de stimuler chez eux cette pensée qui ne s'arrête pas aux connaissances brutes, pures et dures scientifiques sur l'œil. « Qu'est ce que c'est que

l'œil ? Que permet-il ? » Ce récepteur fantastique qui capte de façon exceptionnelle les radiations lumineuses de notre environnement, est capable d'envoyer des informations très bien codées (quand tout fonctionne bien) au cerveau. Mais derrière cet œil, derrière cet instrument, derrière cet organe, il y a autre chose, certainement aussi essentiel que l'instrument lui-même, c'est la maîtrise de l'instrument, qui passe par le vécu, l'expérience, mais aussi la rigueur, la réflexion, tout ce qui permet de prendre du recul par rapport aux informations pures et brutes et qui permet d'enrichir ces informations en les interprétant et en les replaçant dans un ensemble, dans un contexte qui les enrichit : cela c'est tout ce que la Philosophie peut amener justement aux élèves de Première. M. Righi et moi avons constaté qu'il est difficile d'évaluer ce que nous avons fait, d'abord parce que c'est la première année et nous manquons donc de recul sur l'action et puis parce que qualitativement, en termes de note, il est difficile de pouvoir évaluer le chemin qu'un élève a parcouru dans sa tête, en terme de réflexion et de recul par rapport à un problème.

Nous aurons une idée plus précise du bénéfice de l'action de cette année, d'abord en terme de note en juin, aux épreuves anticipées de sciences, mais surtout, l'année prochaine, en terme d'approche de la discipline philosophique.

D'ores et déjà, nous avons pu constater que les élèves qui ont participé à l'expérimentation, ont évolué en terme de maturité de démarche, de réflexion, la façon dont ils abordent le commentaire argumenté s'est enrichie par une argumentation, une rigueur et une ouverture d'esprit plus importante. J'ai réellement ressenti une évolution puisque cette intervention de M. Righi s'est déroulée en tout début d'année, (le thème « vision » étant en effet un thème « passerelle » positionné volontairement en première partie de programme), fin octobre, et j'ai pu voir, d'abord, une réelle découverte des élèves de l'intérêt de mêler les savoirs amenés par différentes matières, puis un réel appel à l'interdisciplinarité pour expliquer les perceptions différentes de chacun face à un tableau, un paysage, des couleurs, une représentation bref des informations extérieures auxquelles nous sommes sans cesse confrontés... donc au fil du temps une vraie évolution dans la réflexion des élèves. Nous avons eu la chance de pouvoir intégrer ces interventions en dehors de mes heures de cours (puisque le programme de sciences est conséquent en volume et il me semblait évident de laisser suffisamment de temps à

ces interventions pour que les élèves en tirent le meilleur), nous avons donc profité des heures d'AP puisque nous avons, à ce moment là, une disponibilité commune avec les élèves.

Nous aimerions d'ailleurs conserver cette facilité l'année prochaine et généraliser, en terme de classes et de volume, ces interventions conjointes Philosophie/ SVT. Positionnées entre la fin de la partie « anatomie »(l'œil, en tant que récepteur, capteur ; organe sensoriel qui capte les informations) et le début de la partie « intégration cérébrale » (la participation du cerveau, des acquis, de l'expérience etc. à la représentation visuelle en tant que telle) ces interventions sont idéales pour les élèves et il faudrait qu'elles puissent concerner tous les groupes de Première ES et L avec un volume horaire permettant encore plus de discussion et ainsi de mise en place de l'apprentissage de la réflexion.

Nous avons vraiment essayé d'articuler cela pour que l'élève se sente vraiment impliqué dans la conceptualisation et dans le fait qu'il n'y a effectivement pas, uniquement un phénomène anatomique, matériel, mais également, en plus de ce support, beaucoup d'autres choses plus immatérielles.

Conférences scientifiques

Jean-Pierre Kahane

Le premier orateur sera Etienne Ghys qui est mathématicien et il se présente lui-même comme géomètre, topologue, spécialiste des systèmes dynamiques et intéressé aux mathématiques en général. Ce sont là les thèmes d'intérêt qui se trouvent sur son site. J'indique que sur le site de l'Académie des Sciences, on peut trouver la notice sur les travaux scientifiques d'Etienne Ghys. Une notice des travaux scientifiques est souvent illisible pour les non spécialistes et particulièrement en ce qui concerne les mathématiques. Or ceux et celles d'entre vous qui aurez la curiosité de regarder la notice d'Etienne Ghys y trouveront une introduction absolument remarquable à la compréhension des mathématiques dans les domaines de géométrie, topologie et systèmes dynamiques. Car la notice ne se borne pas à l'œuvre d'Etienne Ghys, c'est réellement un survol de toute une partie des mathématiques.

Je dois dire qu'Etienne Ghys est un grand propagandiste des mathématiques. Sans jamais céder à la facilité, il introduit aux notions les plus difficiles et quelquefois les plus modernes. Le DVD qu'il a appelé « Dimension » est à cet égard une sorte de chef d'œuvre et d'ailleurs il est assez bien connu. Etienne Ghys est l'artisan principal du journal électronique « image des mathématiques CNRS » qui est actuellement le meilleur moyen de se tenir au courant de l'actualité mathématique. Il a inventé la formule des billets dont les sujets sont très divers et qui ont pour auteurs d'assez nombreux mathématiciens (dont lui le premier). La collection des billets d'Etienne Ghys sur Henri Poincaré et son œuvre est un modèle d'exposition. Ce sont des billets courts sur des aspects différents de l'œuvre d'Henri Poincaré et comme nous sommes dans l'année du centenaire de la mort d'Henri Poincaré, je vous recommande de vous y référer aussi. C'est une excellente manière de faire connaissance à la fois de Poincaré et d'Etienne Ghys.

Etienne Ghys est Directeur de recherche au CNRS, il est professeur à l'Ecole Normale Supérieure de Lyon, et beaucoup de ses élèves et de ses collaborateurs occupent une place de premier rang parmi les mathématiciens dans le monde.

Etienne Ghys (Membre de l'Académie des sciences) :

Espaces et géométries, entre mathématiques, physique et philosophie

Le bulletin officiel du 13 octobre 2011, en préambule au programme de mathématiques des classes terminales scientifiques, commence par la phrase suivante :

*« L'enseignement des mathématiques au collège et au lycée a pour but de donner à chaque élève **la culture mathématique indispensable pour sa vie de citoyen** et les bases nécessaires à son projet de poursuite d'études. »*

Plus loin :

*« L'apprentissage des mathématiques cultive des compétences qui facilitent une formation tout au long de la vie et aident à **mieux appréhender une société en évolution**. Au-delà du cadre scolaire, il s'inscrit dans une perspective de **formation de l'individu**. »*

Le document analogue en physique commence par :

*« **Dans une société où des informations de tous ordres arrivent dans l'immédiateté et de toutes parts**, la priorité est donnée à la formation des esprits pour transformer cette information en une connaissance. »*

Et en philosophie, on lit :

*« L'enseignement de la philosophie en classes terminales a pour objectif de favoriser **l'accès de chaque élève à l'exercice réfléchi du jugement**, et de lui offrir une culture philosophique initiale. »*

A l'évidence, ces trois disciplines affichent donc des ambitions très convergentes et une collaboration entre les enseignants devrait aller de soi. Ce n'est malheureusement pas encore le cas général. Nous sommes réunis ici pour réfléchir à cette question et proposer quelques solutions. Je voudrais me contenter d'aborder le thème de l'espace, c'est-à-dire de la géométrie, puisque c'est ainsi que l'on appelle en mathématiques l'étude de l'espace.

La géométrie a beaucoup souffert dans l'enseignement secondaire, disons depuis une cinquantaine d'années. Il n'en reste plus que quelques bribes. Le programme actuel de géométrie en terminale S ne contient plus que trois thèmes. Le premier concerne les nombres complexes, d'ailleurs largement débarrassés de leurs aspects géométriques ; le second traite des droites, des plans et des vecteurs, et le troisième du produit scalaire. On peut se demander en quoi l'étude du produit scalaire est « *indispensable dans la vie de citoyen* » et « *aide à mieux appréhender une société en évolution* »... Alors qu'aujourd'hui deux tiers d'une classe d'âge sont passés par la case baccalauréat, je serais prêt à parier qu'une enquête montrerait qu'au plus 5% des citoyens peuvent expliquer ce qu'est un produit scalaire et que peut-être 1% l'utilisent de manière régulière. N'y a-t-il pas là un échec, une perte d'énergie, une occasion manquée par l'éducation nationale dans sa mission citoyenne ?

Il ne s'agit pas d'exprimer de la nostalgie vis à vis d'un passé lointain où la géométrie euclidienne jouait un rôle central dans la formation des élèves. Cette sorte de géométrie avait de grands avantages ; elle forgeait le raisonnement et elle pouvait procurer de vifs plaisirs aux élèves (et beaucoup de mathématiciens ont d'ailleurs des souvenirs émus de leurs premières amours géométriques, sur les bancs de la classe de quatrième). Pour être clairs, c'était plus l'apprentissage d'un certain mode de pensée, tout à la fois logique, implacable, et esthétique, qui était utile pour le citoyen, beaucoup plus que les résultats qu'il s'agissait d'assimiler. Soyons francs : qui se soucie du théorème de Menelaüs ou des pinceaux de coniques, à part une infime minorité ? Je ne regrette donc pas la disparition de la géométrie euclidienne en tant que corpus de connaissance, mais bien la disparition d'une école de raisonnement.

Voici ce qu'on lit dans un document préliminaire de réflexion sur les programmes de mathématiques en classes préparatoires :

« L'enseignement de la géométrie est chronophage. Cet enseignement est peu attrayant pour les étudiants de ce niveau et par conséquent peu productif. Le point précédent est d'autant plus regrettable que les collègues de physique ne sont en l'occurrence pas réellement demandeurs. L'évolution du travail des ingénieurs rend sans doute la géométrie en tant que corps de doctrine moins cruciale pour la majorité de nos étudiants. La géométrie a longtemps constitué la base des mathématiques en classes préparatoires scientifiques. Toutefois, sa part a reculé lentement mais sûrement depuis le milieu des années 1970. Parallèlement, son enseignement a suscité de moins en moins d'enthousiasme. Le maintien sous perfusion n'a plus de sens. »

Ainsi donc, plutôt que de se demander s'il ne serait pas utile de repenser le contenu géométrique enseigné, pour l'adapter aux besoins des élèves d'aujourd'hui, pour leur donner la « *culture mathématique indispensable pour leurs vies de citoyens* », on préfère débrancher la perfusion. Pourquoi l'enseignement de la géométrie est-il devenu « *peu attrayant pour les étudiants* » et « *suscite-t-il de moins en moins d'enthousiasme* » parmi les enseignants ? Peut-être n'a-t-on pas pris conscience que la géométrie elle-même évolue en même temps que la société et qu'il faudrait enseigner une nouvelle géométrie ? La solution proposée, débrancher la perfusion, est-elle adaptée ? Peut-on sérieusement penser que la géométrie est « *moins cruciale* » aujourd'hui pour les ingénieurs ? Que les physiciens ne sont pas « *réellement demandeurs* » ?

Je voudrais expliquer que le thème de l'espace pourrait être un merveilleux terrain de travail commun pour les enseignants de mathématiques, de physique et de philosophie, et qu'il pourrait y avoir là une vraie opportunité pour les élèves de mieux comprendre notre société, « *où des informations de tous ordres arrivent dans l'immédiateté et de toutes part* » comme disent nos amis physiciens.

La nature de l'espace qui nous entoure préoccupe les philosophes, les mathématiciens et les physiciens depuis plus de 2000 ans (et d'ailleurs pendant longtemps, ces trois activités n'étaient pas vraiment dissociées). Des débats passionnants, dont la conclusion

n'est pas toujours nette, ont fait évoluer notre vision de l'espace, ou je devrais plutôt dire des espaces, tant la multiplicité des concepts différents illumine le problème. Comment se fait-il que notre enseignement mathématique ne propose pas à nos élèves quelques réflexions, même primitives, sur ces questions si importantes, à l'interface physique-mathématiques-philosophie, au fondement d'une bonne partie de notre culture ?

Voici quelques exemples concrets qui pourraient à mon avis être enseignés au lycée *conjointement* par les trois professeurs.

Une controverse sur la nature de l'espace et du vide entre Newton et Leibniz, par l'intermédiaire de Clarke, est restée célèbre. Newton affirmait l'existence d'un espace absolu, existant même là où il n'y a rien, là où l'espace est vide. Pour lui, l'espace vide est d'une nature différente, le *sensorium dei*, l'organe grâce auquel Dieu peut ressentir « notre » monde physique, commun à tous les êtres humains. Leibniz répondait qu'il ne peut y avoir espace que lorsqu'il y a matière, et que l'espace n'est au fond que l'ensemble des relations liant les divers objets qui le constituent. Le point de vue de Leibniz est assez proche de ce que les mathématiciens d'aujourd'hui appellent un *espace métrique* : un ensemble d'objets n'ayant aucun intérêt en soi, mais structurés par des distances mutuelles. La géométrie serait ainsi l'étude des relations entre des entités qui constituent un tout structuré : nous voilà bien loin de la géométrie euclidienne et bien plus proche du quotidien des citoyens.

Quelles lettres merveilleuses échangées entre ces deux grands hommes ! Ne mériteraient-elles pas d'être lues et commentées par les enseignants qui les placeraient dans le contexte d'aujourd'hui ? Comme on le sait, les physiciens nous ont appris, bien plus tard, que le lien entre matière et espace est intime, que l'espace n'est pas seulement, comme le disait Newton, un réceptacle pour la matière, que Leibniz avait vu juste en quelque sorte. Les physiciens quantiques nous proposent une vision du vide d'une richesse inouïe : la mer de Dirac dans laquelle grouillent matière et antimatière, s'annihilant mutuellement. La belle phrase de Dirac : « *la matière n'est qu'un trou dans le vide* » ne suscite-t-elle pas de profondes réflexions sur notre place dans le monde qui nous entoure ? Je me souviens d'une belle conférence de Michel Mendès-France qui s'intitulait « *le vide, en art et en science* ». Certes, il n'est pas rare qu'un professeur de

philosophie aborde la lecture d'un texte de Leibniz avec ses élèves mais pourra-t-il le mettre en résonance avec la conception moderne de la physique ? Ce type de réflexions ne peut pas être du seul ressort du professeur de philosophie ; il nécessite l'expertise du professeur de mathématiques et de physique. L'argument du sceau d'eau en rotation, par exemple, avancé par Newton pour « démontrer » l'existence de l'espace absolu, a parfaitement sa place au cœur du cours de physique.

Quand je pense à ce qu'on m'a enseigné en mathématiques sur le vide, je ne peux qu'être frustré. Le vide mathématique, cet ensemble sans élément, triste, n'a à peu près aucun intérêt. Quelle dégradation conceptuelle depuis le *sensorium dei* ! L'espace dans lequel on m'apprenait à faire de la géométrie était présenté comme une espèce de vide intersidéral qui n'était pas si vide que ça puisqu'on me disait qu'il est constitué de points côte à côte, un pour chaque x,y,z ? Que sont ces points ? De quelle nature sont-ils puisque l'espace est vide ? Pourquoi considérons-nous l'espace comme un ensemble de points ? Le parti pris bourbakiste selon lequel les mathématiciens travaillent avec des ensembles mériterait pourtant réflexion. Leibniz par exemple — encore lui — ne pouvait accepter l'idée de cette rangée de points qui constituent un segment. Il préférerait penser à des intervalles bout à bout et à la possibilité de subdiviser ces intervalles autant de fois qu'on le souhaite. Au lieu de mettre des x côte à côte, on met des dx bout à bout. La théorie moderne de la géométrie algébrique, avec les schémas de Grothendieck, ne considère d'ailleurs plus un espace comme un ensemble de points.

Pourquoi le professeur de mathématiques ne discute-t-il jamais de la nature de l'espace ? N'y aurait-il pas la place dans le cours de mathématiques pour une réflexion de nature philosophique qui, j'en suis convaincu, serait du plus grand intérêt pour le citoyen ? Aujourd'hui, le cours de mathématique ne tente aucune définition raisonnable du plan ou de l'espace. On pense probablement que l'élève a l'intuition *a priori* de l'espace euclidien. En serait-on resté au point de vue de Kant ? L'espace nous serait accessible *a priori*, comme une espèce de cadre dans lequel nous placerions toutes nos sensations, visuelles, mais aussi tactiles ou auditives. Et ce cadre qui s'imposerait à notre esprit sans effort serait l'espace euclidien. Plus grand monde n'ose soutenir ce point de vue philosophique aujourd'hui. Et pourtant, nous le présumons chez nos élèves. Tout au plus, tardivement, on explique à nos élèves qu'un point du plan est repéré par deux

coordonnées x,y et par trois dans l'espace. On plaque dans les esprits de nos élèves le système des coordonnées cartésiennes. Quand on y pense, ce point de vue cartésien n'a rien de naturel et d'ailleurs bien des civilisations ont une toute autre intuition de l'espace. Essayez de demander votre chemin dans une ville indienne ou japonaise et vous verrez que nos réflexes cartésiens sont loin d'être universels. Insidieusement, notre programme de mathématiques force nos concitoyens à penser l'espace qui les entoure d'une manière formatée, identique pour tous, certes utile pour le scientifique, mais qui n'est que l'une des manières de se positionner dans notre monde.

Pourquoi ne pas proposer à nos élèves la lecture et le commentaire de quelques textes de Poincaré ? Par exemple le merveilleux « *Pourquoi l'espace a trois dimensions* ». On y lit entre autres choses :

« Pour définir le continu à n dimensions, nous avons d'abord la définition analytique ; un continu à n dimensions est un ensemble de n coordonnées, c'est-à-dire un ensemble de n quantités susceptibles de varier indépendamment l'une de l'autre. Cette définition, irréprochable au point de vue mathématique, ne saurait pourtant nous satisfaire entièrement. Dans un continu les diverses coordonnées ne sont pas pour ainsi dire juxtaposées les unes aux autres, elles sont liées entre elles de façon à former les divers aspects d'un tout. Cette définition fait bon marché de l'origine intuitive de la notion de continu, et de toutes les richesses que recèle cette notion. Elle rentre dans le type de ces définitions qui sont devenues si fréquentes dans la Mathématique, depuis qu'on tend à « arithmétiser » cette science. Ces définitions, irréprochables, nous l'avons dit, au point de vue mathématique, ne sauraient satisfaire le philosophe. Je ne veux pas dire que cette « arithmétisation » des mathématiques soit une mauvaise chose, je dis qu'elle n'est pas tout. »

Et Poincaré de continuer en expliquant les différences entre les espaces visuels, tactiles, mentaux, et de proposer sa célèbre théorie du conventionnalisme. Quelle subtilité, quelle richesse dans ce texte ! La compréhension de l'espace proposée par Poincaré n'est pas statique : elle est liée à l'existence du mouvement et à la possibilité du corps humain de se déplacer. Notre géométrie serait bien différente si nous étions enracinés comme des arbres. Aidé par ses trois professeurs l'élève pourra mieux comprendre

« son espace ».

Depuis 150 ans, la géométrie est devenue plurielle mais malheureusement cette révolution conceptuelle n'apparaît pas au lycée. Il ne s'agit pourtant pas uniquement d'une révolution interne aux mathématiques. La découverte des géométries non euclidiennes dans la deuxième moitié du dix-neuvième siècle a ouvert tout un champ d'espaces et de géométries possibles. Aucune géométrie n'est préétablie et la vénérable géométrie euclidienne perd son monopole. Les géométries se mettent à la disposition du monde qui nous entoure, et comme le monde a de nombreux aspects, il y a de nombreuses géométries. Comme écrit Poincaré dans la *Science et l'Hypothèse* :

« Dès lors, que doit-on penser de cette question : La géométrie euclidienne est-elle vraie ? Elle n'a aucun sens. Une géométrie ne peut pas être plus vraie qu'une autre ; elle peut seulement être plus commode ».

Au douzième siècle, Maïmonide écrivait que *« même Dieu, bien qu'Il soit tout-puissant et jouisse d'une liberté infinie, n'aurait rien pu créer qui aurait contredit la géométrie d'Euclide. Il n'aurait pas pu créer un carré dont la diagonale serait égale à son côté »*. La découverte de nouvelles géométries non euclidiennes, le fait que nous pouvons créer des géométries variées, adaptées à des problèmes différents, ce point de vue conventionnaliste sur le monde, tout cela a engendré au début du vingtième siècle une véritable période de libération intellectuelle, allant bien au delà des mathématiques et pénétrant profondément le monde artistique et notre culture en général.

Les géométries non euclidiennes ont remodelé la manière dont nous voyons le monde, et quand je dis nous, je ne parle pas des mathématiciens, mais de tout le monde, même si tous n'en ont peut-être pas conscience. Le physicien Eddington écrira : *« La libération du carcan de l'espace et du temps est une aspiration du poète et du mystique. Mais ce sont les mathématiciens qui l'ont réalisée »*.

Lorsque j'étais enfant, mon monde se limitait à un disque centré sur ma maison et dont le rayon était d'environ 5 kms. Rien ou presque à l'extérieur de ce disque n'existait pour moi. L'extérieur, c'était un peu comme sur ces cartes anciennes de l'Afrique : *Hic sunt*

leones ! Ma géométrie était parfaitement euclidienne. A vrai dire j'étais un peu dans la situation des Anciens dont l'univers était fini, limité par la sphère des fixes.

On ne peut que s'émerveiller de l'imagination des géomètres anciens qui n'hésitaient pas à penser à des droites parallèles infinies alors que l'espace physique qui les entourait était limité. Bien entendu, les droites chez Aristote ou Euclide sont infinies *en puissance* et pas *en acte*. Il a fallu le travail de nombreux penseurs et de nombreux expérimentateurs, Bruno, Galilée et bien d'autres, pour oser, à la Renaissance, sortir de la sphère des fixes et transformer l'espace en un espace infini *en acte*.

Le livre célèbre d'Alexandre Koyré « *Du monde clos à l'univers infini* » regorge de passages passionnants qui illustrent cette conquête de l'espace par l'homme. Conquête dont les aspects mathématiques, physiques et philosophiques sont inextricablement emmêlés. Par exemple, la « démonstration » de la finitude de l'espace par Kepler pourrait être insérée dans le cours de mathématiques. Elle est fondée sur le fait qu'une infinité d'étoiles distribuées uniformément dans un espace infini produiraient une luminosité infinie. Pourquoi ne pas en faire profiter les lycéens et leur permettre de sortir de leur bulle ?

Il y a bien entendu beaucoup d'autres questions philosophiques qui ne peuvent être appréciées et assimilées par les élèves que si on les éclaire mathématiquement, ou physiquement. L'étude, même sommaire, de quelques théories de la connaissance : le rationalisme, l'idéalisme, l'empirisme, le conventionnalisme, etc. tous ces -ismes chers aux philosophes, est « *indispensable pour la vie de citoyen* » car elle permet de mieux comprendre le rapport à l'autre, au monde extérieur. Mais là encore, la collaboration entre les professeurs s'impose. Il faut bien le dire, beaucoup de textes philosophiques anciens qui traitent de mathématiques, ceux de Kant par exemple, regorgent de ce qu'on pourrait appeler du jargon inutile et suranné et le regard du scientifique permet souvent de faire le tri. Je consultais récemment un manuel scolaire de philosophie dont une partie discute du temps et qui ne mentionne même pas la profonde révolution relativiste, qui a pourtant plus d'un siècle maintenant. Parler de Saint Augustin quand on parle du temps, c'est bien, mais ne pas parler d'Einstein, c'est à mon avis une erreur. De la même manière, comment concevoir, comme le programme de philosophie le prévoit,

une discussion sur la vérité et la démonstration si on ne discute pas des travaux de Gödel, Turing, ou Church ?

Le monde dans lequel vivent nos enfants est aujourd'hui gigantesque et n'a pas plus grand-chose à voir avec mon disque de rayon 5 kms. Non seulement il n'est plus euclidien mais il est devenu multiforme. Le monde « *où des informations de tous ordres arrivent dans l'immédiateté et de toutes parts* » est celui des communications rapides, des *smartphones*, des SMS, du TGV, d'*internet*, de *twitter* ou *facebook*. Quand j'étais gamin mon instituteur me demandait de calculer le prix d'un billet de train sachant que la SNCF faisait payer 12 (anciens !) francs du kilomètre parcouru. Mais aujourd'hui les prix, les temps de transports, n'ont plus rien à voir avec la géométrie de la France et semblent totalement indépendants de la distance parcourue.

Voyez cette carte de la France SNCF, où l'on a tenté, tant bien que mal, de représenter non pas les distances mais les temps de transport. Voyez comme Lyon est proche de Paris ! La feuille de papier n'est pas adaptée pour représenter une telle structure ; la SNCF ne connaît pas Euclide.

Voici une illustration grossière du réseau *internet*, qui joue un rôle de plus en plus important dans nos sociétés. Les sommets représentent les pages internet, il y en a environ dix milliards, et deux sommets sont reliés si on peut passer de l'un à l'autre en un clic. On montrerait des images analogues, mais différentes, pour le réseau *facebook*, ou le réseau de nos neurones, ou pour les réseaux de connaissances ou d'amitiés dans des groupes humains. Il y a tant de réseaux et chacun a sa géométrie. Ne serait-il pas utile pour le citoyen de lui apprendre les rudiments de la géométrie de ces grands réseaux, de leur expliquer des phénomènes tel que celui du "petit monde" par exemple. Il y a tant de choses élémentaires qu'on peut discuter au lycée sur la géométrie des graphes et des réseaux.

Une enquête demandait à des volontaires de dessiner la façon dont ils se voient à l'intérieur d'*internet*. Voici trois exemples de réponses, parmi des centaines. Celle-ci évoque l'espace non euclidien n'est-ce pas ? Celle-ci une structure arborescente, et celle-ci les nervures d'un arbre.

Je ne voudrais pas me contenter de vœux pieux. Je voudrais faire des propositions concrètes. Les philosophes fondent une bonne partie de leur enseignement sur la lecture et le commentaire de textes philosophiques. Pourquoi n'importerions-nous pas cette idée en mathématiques, à un niveau modeste bien sûr ? Pourquoi ne pas proposer une liste de quelques textes mathématico-physico-philosophiques dans les programmes de mathématiques ou de physique ? Pourquoi ne pas proposer que de tels textes soient commentés à la fois par les professeurs des trois disciplines, soit séparément, soit lors de cours communs, peut-être en classes dédoublées ? Pourquoi devrait-on limiter l'enseignement des mathématiques à la pratique de techniques de résolutions de problèmes, dont je ne mets bien entendu pas en cause l'importance ? En retour, les philosophes ne pourraient-ils pas ajouter quelques auteurs plus proches des mathématiques et de la physique dans la liste des auteurs « du programme de philosophie » ? Il est vrai que certains auteurs qui sont déjà au programme sont proches des mathématiques, comme Platon, Aristote, Descartes, Pascal, Kant ou Russell, mais les manuels scolaires que j'ai consultés ne choisissent que bien rarement des textes à connotation mathématique. Surtout, aucun de ces auteurs ne permet une approche d'une pensée mathématique contemporaine. Tous sont imprégnés par l'idée ancienne de l'unicité de la géométrie.

Est-il impensable d'ajouter aux auteurs du programme de philosophie des noms comme Henri Poincaré, Albert Einstein, Edward Lorenz, Benoît Mandelbrot, René Thom ou Alain Connes ?

Par ailleurs, pourquoi ne pas proposer aux élèves une initiation à d'autres géométries ? N'est-il pas possible par exemple de manipuler un peu de géométrie non euclidienne, dans le disque de Poincaré, pourquoi pas avec ces logiciels de géométrie dynamique, pour montrer aux élèves qu'il ne s'agit en aucun cas d'une vue de l'esprit mais d'un véritable monde concret, dont on rencontre un grand nombre d'aspects dans la vie de tous les jours ? Ne peut-on manipuler avec les élèves quelques réseaux, mathématiquement mais aussi physiquement ?

Le monde est un tout constitué d'entités connectées entre elles. Le monde est une

géométrie ou plutôt nos mondes sont des géométries. Leibniz avait vu juste.

Bien entendu, les ajouts que je viens de proposer devraient rester d'un volume très modeste dans les programmes. Je ne propose pas une véritable révolution ! Il s'agirait tout au plus de quelques heures dans l'année qui ne mettraient pas en péril la structure générale des programmes.

Mais il va de soi qu'ajouter des choses au programme n'a de sens que si on en retire d'autres. Je vais être iconoclaste. S'il le faut, on pourrait par exemple supprimer les équations du second degré. Soyons honnêtes, la plupart des élèves n'en voient pas l'intérêt et se contentent de scander des $\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ de manière automatique, ou, pire encore, de recopier la formule magique dans leurs calculettes, sans rien comprendre à ce qui devrait pourtant être limpide.

Je l'ai dit, je ne suis pas non plus convaincu que les vecteurs et le produit scalaire soient indispensables pour la vie de citoyen : ils ne représentent qu'un aspect de la géométrie, la vénérable géométrie euclidienne. Je ne serais pas opposé à supprimer le produit scalaire, ou tout au moins à en réduire l'importance. Je le sais, ma proposition ne sera pas populaire. Les enseignants de mathématiques sont très attachés aux vecteurs et à leurs produits scalaires. Ils y voient un outil pédagogique important. Peut-être ont-ils raison ? Quant à moi, je pense que proposer une vraie réflexion philo-math-physique sur la nature de l'espace, y compris dans le cadre du cours de mathématiques, pendant quelques heures dans l'année, serait du plus grand intérêt.

Il s'agit peut-être d'une utopie... Mais le colloque d'aujourd'hui n'est-il pas ouvert aux utopies ?

Alors, pour conclure, je peux citer un autre utopiste, Léo Ferré, lorsqu'il chantait, je devrais dire lorsqu'il hurlait :

*« Il faut tuer l'intelligence des mots anciens
Avec des mots tout relatifs, courbes, comme tu voudras*

*Il faut mettre Euclide dans une poubelle
Mettez-vous le bien dans la courbure ».*

Étienne Ghys
CNRS ENS-Lyon
UMPA 46 Allée d'Italie
69364 Lyon
etienne.ghys@ens-lyon.fr

Discussion⁷

Alain Aspect indique qu'il lui paraît indispensable de parler de Mach à propos de l'espace newtonien, de la controverse entre Newton et Leibniz sur l'espace et le vide, et de l'argument sur la rotation du seau de Newton comme preuve de la réalité de l'espace absolu. En effet, nous savons qu'il y a des référentiels absolus vis-à-vis de la rotation. Le référentiel est-il absolu parce que donné par un Dieu comme dit Newton, ou bien est-il là parce qu'il y a des étoiles lointaines ? Que se passerait-il s'il n'y avait pas d'étoiles lointaines, demande Mach ? Se limiter à cela avec l'apport de la relativité générale qui se lie directement aux géométries non euclidiennes serait déjà magnifique, sans entrer dans la question du vide qui n'intervient pas dans les représentations de l'espace.

Jean-Marc Pérol part de la question posée par Etienne Ghys de savoir s'il faut ou non conserver les équations du second degré dans les programmes, pour s'interroger sur le statut du savoir savant et des contenus disciplinaires dans l'enseignement. S'agit-il d'une fin en soi ou d'un moyen de réfléchir et de poser les bonnes questions ? Sinon, on est un professeur Google. Etienne Ghys répond qu'il a souhaité conclure avec des propositions concrètes à partir d'expériences personnelles sur le vécu. C'est une perte de temps pour les enfants que de mettre les équations du second degré dans leur calculette – même si l'on peut aussi aimer l'algèbre.

⁷ Discussion résumée par C. Debru à partir de l'enregistrement

Un intervenant souhaite que l'on distingue entre deux conceptions différentes de l'espace. L'une le considère comme un réceptacle, une boîte dans laquelle on met tout (Newton, Kant, à certains égards Poincaré qui parle aussi de mouvement). L'autre est celle des réseaux, qui sont des relations de position. Ce sont deux choses différentes. Etienne Ghys indique qu'il souhaite que l'on dise aux élèves qu'il y a beaucoup de façons de penser l'espace, soit comme un mathématicien, soit comme un physicien, soit comme un philosophe, soit même comme un artiste. Il voulait transmettre sa frustration devant le fait que les élèves ne sont jamais mis face à une réflexion sur la nature de l'espace et que l'on ne trouve aucune définition du plan dans les programmes de mathématiques. Jean-Pierre Kahane déclare que, dans les *Leçons de mathématiques* de l'Ecole normale de l'an III, il y a une discussion entre Monge et Fourier sur la nature du plan et de l'espace. Les questions se posaient déjà à cette époque.

Jean-Pierre Kahane

Alain Aspect n'a peut-être pas besoin d'être présenté. Lui-même aime dire qu'il est un expérimentateur, un expérimentateur dans le domaine de l'optique quantique. Cela veut dire qu'il y a une charge théorique énorme dans la conception même des expériences, mais il y a surtout une charge énorme des expériences sur la théorie elle-même. L'expérience d'Aspect est déjà ancienne, elle a pour une part répondu à une préoccupation tout à fait importante à l'époque sur la nature des éléments de la physique quantique et sur les paradoxes auxquels sont attachés les noms d'Einstein, Podolski et Rosen. Les avancées majeures dans ce domaine sont dues à Alain Aspect. Il m'en voudrait sans doute de limiter son apport à la physique et à ce qu'il a fait au moment de cette expérience. Il est Directeur de Recherche au CNRS, son activité est à l'Institut d'Optique et son laboratoire aborde tous les thèmes de l'Optique quantique moderne et des fondements de la physique quantique. Il a reçu des Prix tout à fait prestigieux. Le plus éminent, était le Prix Wolf en 2010. Mais, le dernier (en mars dernier) est la médaille Albert Einstein, décernée à ceux qui ont rendu des services exceptionnels en rapport avec l'œuvre d'Albert Einstein. Cela se passe peut-être d'autres

commentaires sur Alain Aspect. Il est temps de l'entendre après avoir entendu quelques mots à son propos.

Alain Aspect

La dualité onde particule : quelques expériences avec des photons isolés

Dans le cadre de ce symposium, je n'ai pas cherché à prendre un point de vue synthétique sur la problématique des rapports entre science et philosophie, mais j'ai décidé de vous proposer quelques réflexions sur le problème de la dualité entre ondes et particules. En effet, ce sujet revient au programme de terminale en physique. Je pense que c'est une magnifique occasion pour le professeur de philosophie et le professeur de physique de discuter. Ce n'est pas facile, cela demande un travail à plusieurs niveaux : au niveau institutionnel de l'inspection générale, de ceux qui font les programmes etc.. Mais je crois aussi qu'il y a la place dans des lycées pour des équipes motivées de professeurs de physique et de philosophie qui souhaitent travailler sur le sujet, parce que c'est vraiment très important. Pour quelle raison est-ce particulièrement important ? Il se trouve que dans ma vie j'ai essayé très sincèrement de regarder beaucoup de textes sur l'épistémologie. Et, quand on fait de la physique moderne, on se trouve immédiatement confronté au fait que Bachelard par exemple, ou même Poincaré sont certes des auteurs formidables - mais ils ne connaissaient pas la physique quantique, alors que la physique quantique pose des problèmes épistémologiques d'une nature totalement nouvelle, me semble-t-il. Je regrette que l'on n'ait pas l'équivalent d'un Poincaré, que l'on n'ait pas des livres et des réflexions épistémologiques de Poincaré sur la physique quantique (pour ma part je n'en connais pas). Cela ne veut pas dire qu'il faut abandonner, car les élèves savent que la physique quantique existe. Simplement, il faut avancer modestement.

Je vous proposerai donc une expérience simple, qui me semble-t-il sera enseignée en physique aux élèves de terminale, et qui peut alimenter la réflexion des professeurs de philosophie. Je vous prie d'excuser le fait que les transparents sont en anglais.⁸ On peut

⁸ Les illustrations publiées à la suite de la contribution d'Alain Aspect sont placées dans l'ordre des développements de l'article. Pour des raisons techniques, il n'a pas été possible des les numéroter. Mais il est relativement aisé de rapporter une illustration à un développement (note de l'éditeur)

mettre les transparents sur un site web, pour téléchargement, si vous le souhaitez. Mais le mieux est de faire référence aux éléments de ma page web.

Le modèle de la lumière a suscité la fascination de l'humanité depuis toujours. Sur une stèle égyptienne on voit bien que la lumière émise par le soleil est formée de fleurs multicolores. Est-ce si différent du modèle de Newton dans lequel il y avait des particules, chacune ayant une couleur différente ? Au Moyen-Âge, des progrès technologiques considérables ont été effectués, avec l'invention de la lunette de vision. Un certain nombre d'entre nous qui ont dépassé un certain âge savent combien il est important de mettre des lunettes si l'on veut continuer à avoir une activité. Dès lors que l'on a inventé la lentille, on a inventé le microscope, la lunette astronomique de Galilée. Il ne faut pas sous-estimer l'importance de l'ingénierie, de la technologie. Puis, aux XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles, a lieu le grand débat entre Huygens et Newton. Huygens tient de façon très convaincante pour le modèle ondulatoire : la lumière est une onde. Newton au contraire présente un modèle corpusculaire de la lumière. Le débat est tranché par un argument d'autorité, en faveur de Newton, à cause de son immense prestige lié à la gravitation universelle, à la compréhension du mouvement des planètes, prodigieuse réussite de la pensée humaine. L'autorité de Newton est telle que l'immense majorité des chercheurs ou des penseurs adopte l'image corpusculaire. Il faut attendre le XIX^{ème} siècle pour que cela soit remis en cause par deux véritables génies, Young de l'autre côté de la Manche, Fresnel de ce côté-ci. Analysant une série d'expériences sur les interférences, la diffraction, ils concluent que la lumière ne peut être qu'une onde. Cinquante ans plus tard, en 1865, Maxwell élucide la question de la nature de cette onde. Après Maxwell, on sait que la lumière est une onde électromagnétique. Mais il est extraordinaire de regarder le mémoire de Fresnel sur la théorie de la lumière, écrit cinquante ans avant Maxwell, mémoire qui peut être consulté sur le site Web de l'Académie des Sciences. Il y a absolument toute l'optique dans ce mémoire, à un détail près : Fresnel ne sait pas quelle est la nature de l'onde. Il décrit tout parfaitement : simplement il ne connaît pas la nature de l'onde. Mais le modèle ondulatoire est remarquable. Après Maxwell, on sait que c'est une onde électromagnétique, ce qui permet au tournant du siècle de dire que l'on a à peu près tout compris en physique. Dans une célèbre phrase, dont il ne faut pas se moquer car en fait elle est visionnaire, Kelvin a dit : « on a un magnifique ciel bleu, tout est compris, à part deux gros nuages

noirs, qui ne pourront se dissiper qu'au prix de remises en cause radicales». Des deux gros nuages noirs, l'un est le résultat négatif de l'expérience de Michelson, qui ne trouvera sa résolution qu'avec l'invention de la relativité restreinte. L'autre nuage est une question un peu compliquée de thermodynamique. Il ne pourra être dissipé que par l'invention de la mécanique quantique. Kelvin avait bien identifié les deux nuages.

Quoi qu'il en soit, à la fin du XIX^{ème} siècle, on croit qu'il n'y a aucun doute sur le fait que la lumière est une onde. Puis, arrive ce jeune homme qui est un génie absolu, Albert Einstein, qui fait en 1905 un pas considérable par rapport à Max Planck. En 1900, Planck avait fait l'hypothèse que les échanges d'énergie entre lumière et matière sont quantifiés. Einstein va beaucoup plus loin : il dit que si les échanges sont quantifiés c'est que la lumière elle-même est formée de quanta que l'on appellera plus tard les photons, qui sont des grains d'énergie. Personne ne croit à la prédiction d'Einstein. Millikan, qui a par ailleurs mesuré la charge de l'électron, déclare explicitement dans ses Mémoires qu'il s'engage au tournant des années 1913 ou 1914 dans une série d'expériences pour montrer qu'Einstein a tort. Deux ans après il conclut qu'Einstein a raison. Le Prix Nobel sera décerné à Einstein explicitement pour l'effet photo-électrique. Ceci montre que l'effet photo-électrique interprété en termes de photons était une révolution à laquelle personne ne croyait au début. Puis les preuves s'accumulent. Pourtant, ce n'est pas parce que l'on introduit le modèle des particules et que pour un problème particulier, celui de l'effet photo-électrique, ce modèle se révèle fructueux, qu'il faut oublier les arguments de Young et de Fresnel, dont le raisonnement était impeccable. Ils étaient arrivés à la conclusion que l'on ne peut pas comprendre des phénomènes d'interférence ou de diffraction sans introduire l'idée d'onde. On se trouve donc devant le problème : onde ou particule?

Ce problème n'avait évidemment pas échappé à Einstein. Dès 1909, dans une conférence donnée à Salzbourg et dont on trouve aisément le texte sur le Web, en allemand, dans une traduction anglaise, et dont on a aussi une magnifique traduction française dans le volume 1 de ses œuvres choisies⁹, Einstein développe une série d'arguments pour dire que la lumière est à la fois une onde et une particule. Une quinzaine d'années plus tard,

⁹ Ouvrage publié par les éditions CNRS –Seuil, dont on ne peut que regretter qu'il soit épuisé, et que l'on souhaite vivement voir réédité ou numérisé et mis à la disposition de tous.

Louis de Broglie, pour des raisons quelque peu esthétiques, va faire l'hypothèse réciproque, selon laquelle, lorsque l'on a des objets qui sont clairement des particules, par exemple des électrons, ils ont également, à ses yeux, un caractère d'onde. Einstein avait dit que la lumière, dont sait bien qu'elle est une onde, doit tout autant être considérée comme formée de particules; Louis de Broglie affirme la réciproque : des particules comme les électrons sont aussi des ondes.

On pense donc avoir résolu le problème en invoquant la dualité onde – particule, et comme je le dis quelquefois, on peut se mettre à psalmodier tous en chœur « dualité onde – particule », mais le problème n'est pas réglé pour autant, parce que les mots sont faciles à prononcer, mais il est beaucoup moins facile de représenter ces idées par des images. (Nous sommes ici au cœur d'une question qui peut passionner les philosophes en même temps que les physiciens, faut-il ou non chercher à se représenter ces idées par des images ? Pour moi c'est la condition nécessaire de ma pratique de la physique). Cette difficulté à se représenter conjointement un objet quantique comme une onde et une particule est l'un des problèmes conceptuels de la physique quantique, sans doute le plus simple à exprimer.

Avant de parler de ces problèmes, je voudrais faire un commentaire très important. Ce n'est pas parce qu'il y a des problèmes conceptuels d'interprétation de la mécanique quantique qu'il faut jeter le discrédit sur cette théorie, car c'est la théorie physique qui, dans toute l'histoire de l'humanité a eu le plus grand succès tant sur le plan des principes et de la physique fondamentale que sur le plan des applications. On ne peut pas surestimer l'importance de la physique quantique. Tout d'abord, elle a permis de comprendre réellement la structure de la matière. La physique classique, celle qui existe à la fin du XIX^{ème} siècle, est incapable d'expliquer pourquoi la matière est stable. En effet, à la fin du XIX^{ème} siècle, on sait que la matière est faite de charges positives et négatives, que les charges positives et négatives s'attirent, et donc se pose immédiatement la question : pourquoi la matière ne s'effondre-t-elle pas sur elle-même ? Il n'y a pas de réponse en physique classique, en physique classique la matière doit s'effondrer sur elle-même. Il faut la physique quantique pour comprendre qu'un morceau de matière peut être dur, stable. Elle permet de comprendre la liaison chimique, les cristaux. Elle permet de comprendre les propriétés électriques, les propriétés optiques de la matière

etc. Et elle donne le bon cadre pour inventer des objets tels que le laser, le transistor, les circuits intégrés. Ne pensez pas que ces objets ont été inventés par un bricoleur génial dans un garage de Californie ou d'ailleurs. Ce sont les plus grands physiciens du milieu du XX^{ème} siècle qui, réfléchissant à la façon dont la matière conduit le courant électrique, et développant à cet effet des modèles quantiques, inventent le transistor, puis les circuits intégrés. Ce sont les plus grands physiciens de la fin des années 1950 qui, réfléchissant à l'interaction lumière – matière, inventent le laser. Il ne vous échappe pas que la société de l'information et de la communication est totalement basée sur le laser et les ordinateurs. Le laser à cause des communications à haut débit par fibres optiques; les circuits intégrés à cause des ordinateurs. Donc, quand on parle des problèmes conceptuels de la physique quantique, il convient de garder toujours en tête les succès extraordinaires de cette physique, ce qui rend encore plus étonnant le fait que se posent des problèmes conceptuels si sérieux avec elle. Voilà une théorie qui marche magnifiquement bien, et pourtant, elle pose des problèmes conceptuels.

Tous les succès que j'ai cités correspondent à des domaines dans lesquels la mécanique quantique permet d'expliquer ce qui se passe en en considérant de grands ensembles d'objets quantiques. Quand on étudie le courant électrique dans un morceau de matière, on doit considérer des milliards de milliards d'électrons. Dans un faisceau laser, il y a des milliards de milliards de photons etc. Or, par sa structure mathématique, la mécanique quantique fait des prévisions probabilistes, qui ne posent pas de problème conceptuel tant que l'on étudie des grands ensembles. Mais la situation est différente quand on étudie un objet unique : peut-on appliquer la mécanique quantique telle que nous la connaissons à un objet unique, ou faut-il dépasser la description probabiliste? Cela va poser le problème du déterminisme, sur lequel les philosophes ont à réfléchir.

La question : "que se passe-t-il si on veut appliquer la mécanique quantique à des objets uniques ?" était considérée comme ridicule jusqu'à la fin des années 1950. Dans une citation qui date des années 1950, Schrödinger dit : nous n'expérimenterons pas davantage avec une particule unique que nous ne sommes capables d'élever un Ichtyosaure dans un laboratoire de paléontologie. A cette époque l'idée d'appliquer la mécanique quantique à un objet unique était complètement farfelue. La question ne se

posait même pas. Eh bien, il se trouve que depuis les années 1970, on sait le faire. Je vais vous en donner un exemple.

La question est donc : la mécanique quantique marche-t-elle, et si oui comment faut-il comprendre les prédictions probabilistes, pour une particule unique ? Pour répondre à cette question, je vais vous parler d'expériences avec des photons uniques, tout simplement parce que ce sont des expériences qui ont été réalisées par mon premier étudiant en thèse, Philippe Grangier, aujourd'hui l'une des stars mondiales de l'optique quantique.

La problématique telle que l'on peut la présenter très schématiquement et que l'on pourrait la présenter aux élèves de terminale est la suivante : j'ai une source qui émet des particules une par une et je fais tout mon possible pour qu'elles soient émises de façon aussi reproductible que possible. Donc, j'essaie de contrôler aussi bien que je peux les conditions initiales, puis j'envoie les particules sur deux trous, les fameux deux trous d'Young. Elles en sortent une par une. Quand la particule arrive sur un détecteur, cela fait un clic. Si j'attends assez longtemps, et que je regarde le nombre moyen de coups reçu par seconde à cet endroit, puis que je déplace un peu le détecteur, que je recommence, que je déplace encore un peu le détecteur, que je recommence, je peux tracer l'histogramme des probabilités de détecter une particule en chaque point. A un certain point elle est nulle, ici elle est maximale, ici elle nulle, ici elle est maximale, et cette probabilité présente donc une variation sinusoïdale dans l'espace. Si en revanche je ferme un trou, alors je constate que lorsque je déplace le détecteur la probabilité de détection est uniforme. La seule interprétation connue pour un tel phénomène est une interprétation à la Young ou à la Fresnel : chaque particule est en réalité décrite par une onde qui va passer simultanément à travers les deux trous, et c'est l'interférence entre ces deux ondelettes qui va déterminer la probabilité pour la particule d'arriver en tel ou tel point. Je peux vous en dire un peu plus sur le phénomène d'interférence de deux ondes. Si j'ai une onde qui passe à la fois par les deux trous, chaque trou se comporte comme une source secondaire qui réémet une onde qui arrive ici, l'autre trou une onde qui arrive ici, et finalement on a donc deux ondes qui arrivent ensemble au point D, l'une étant passée par le premier chemin et l'autre étant passée par le deuxième chemin. Une onde étant quelque chose qui oscille, deux ondes qui oscillent ensemble donnent une

amplitude doublée. Mais deux ondes oscillant en opposition donnent une amplitude nulle puisque lorsqu'une monte, l'autre descend. Il y a donc des points où les deux ondes arrivent ensemble et où on va avoir beaucoup de lumière, un renforcement de la lumière, cela va être appelé une frange brillante. Mais il y a des endroits où les deux ondes arrivent en opposition de phase. Lorsque c'est le cas, cela va faire zéro. C'est assez fascinant, parce que si vous fermez un des trous, vous avez de la lumière ici, et si vous fermez l'autre trou, il y a aussi de la lumière, mais le fait qu'une lumière plus une lumière fasse de l'ombre devrait vous étonner. Mais depuis Young et Fresnel on a appris qu'un tel phénomène est caractéristique des ondes.

A ce point, nous pouvons introduire une idée de Feynman présentée dans son cours de physique à la fin des années 1950. Feynman nous dit, en vertu du modèle de de Broglie : si vous faites l'expérience avec des particules uniques, comme dans le cas de la lumière, vous allez observer des franges brillantes et des franges sombres. Mais bien sûr il ne s'agit pas de lumière. C'est la probabilité de détecter la particule ici qui est élevée, alors que la probabilité de la détecter un peu plus loin est faible : faible – élevée – faible – élevée - faible etc. Mais cette expérience a-t-elle été réalisée ? Au moment où Feynman a donné son cours, il n'en était rien. Ce n'est que plus tard qu'elle a été faite avec des électrons. Avec des photons elle n'a été réalisée qu'en 1985, pour la thèse de Philippe Grangier.

Pourquoi a-t-il fallu attendre si longtemps? Le premier problème qu'il fallait résoudre était de prouver que l'on est capable de produire des photons uniques, émis un par un. Il y avait eu de nombreuses expériences où les chercheurs atténuent les faisceaux de lumière et concluaient : si le faisceau est tellement atténué que la distance moyenne entre deux photons est plus grande que la taille de l'appareil, alors il s'agit bien de photons isolés. Une analyse critique dans laquelle je ne peux pas entrer ici a montré que ce raisonnement était erroné et que produire des photons uniques, un par un, était un tour de force que personne n'avait jamais réalisé. Avec Philippe Grangier, nous nous sommes mis en devoir de le faire. Donc, si on affirme avoir une source émettant les photons un par un, comment le prouver ? Nous avons eu une idée extrêmement simple qui est la suivante : je reprends les deux trous d'Young, mais au lieu de regarder une figure d'interférence, je mets un détecteur D1 derrière le premier trou, et un détecteur

D2 derrière le second trou, et je connecte à ces deux détecteurs un circuit à coïncidence. Si les mots ont un sens, et si j'ai un seul photon à la fois, ce photon va passer soit par le trou du haut, soit par le trou du bas, et il ne pourra jamais être détecté simultanément par les deux détecteurs. Donc mon circuit à coïncidence me dira que la probabilité des détections en coïncidence est nulle. Ce sera le critère pour savoir qu'on a réussi à produire ce que l'on appelle des états à un seul photon. Si en revanche j'ai une onde, elle peut passer simultanément par les deux trous, il y aura une probabilité non nulle de détection simultanée en D1 et en D2, et le circuit à coïncidence observera des coïncidences de temps en temps. Tel est le critère que nous nous sommes fixé. Mais une question se pose immédiatement : un mathématicien sait parfaitement distinguer 0 de "non 0" ; un physicien en revanche, tentant de distinguer de 0 de non 0, va commencer à parler de bruit, de bruit de fond, dans les expériences, d'incertitudes... Comment alors distinguer quantitativement 0 de non 0 dans le point de vue du physicien expérimentateur ?

Pour ce faire, nous avons d'abord remplacé le montage des trous d'Young par des lames semi réfléchissantes, qui permettent une expérience plus tranchée. Comme vous le voyez, quand j'envoie un faisceau lumineux sur une lame semi réfléchissante, le faisceau se partage en deux. Mais si j'envoie un photon unique sur la lame semi réfléchissante, se partage-t-il en deux ? Si le mot particule a un sens, non, il ne se partage pas en deux. Je peux donc recommencer le petit jeu avec ma lame semi réfléchissante et mes deux détecteurs. S'il s'agit d'une onde qui s'est divisée en deux, la probabilité de coïncidence va être différente de 0, mais s'il s'agit d'une particule la probabilité de coïncidence est nulle.

Je vais maintenant montrer comment nous avons établi un critère quantitatif. Nous avons utilisé un outil mathématique génial, les inégalités de Cauchy-Schwartz. Grâce à cet outil, nous avons pu établir que si nous avons une onde, la probabilité de coïncidence doit être supérieure aux produits des probabilités simples. Donc la différence entre un comportement corpusculaire ou ondulatoire se traduit par le fait qu'un rapport entre probabilités mesurées, que j'appellerai α , est plus petit ou plus grand qu'une certaine limite, 1 en l'occurrence. Pour une expérience idéale avec des particules uniques, ce rapport devrait être nul. Même s'il y a des imperfections, par exemple des

signaux parasites dans les détecteurs qui provoquent des détections simultanées "accidentelles", on pourra toujours dire qu'il ne peut s'agir d'une onde, et qu'il s'agit de particules uniques séparées, à partir du moment où le rapport alpha reste inférieur à 1. Nous avons donc un critère quantitatif qui va permettre de trancher.

Le deuxième défi à surmonter était de produire des photons uniques. En principe la recette est simple. Pour émettre un photon unique, on prend un atome ou un ion, ou une molécule unique, on le porte dans un état excité, et on attend. L'atome n'a alors pas le choix. Il va tôt ou tard émettre un photon et un seul, il ne peut pas en émettre deux car dans ce cas il y aurait violation de la conservation de l'énergie. On sait qu'il va en émettre un seul. Donc, si je peux prendre un émetteur unique et observer la lumière émise, elle sera composée de photons uniques bien séparés. Mais en 1980 personne ne savait prendre un objet unique (depuis, on a fait des progrès considérables). Alors nous avons utilisé un stratagème. La source qui avait été construite pour tester les inégalités de Bell émettait en réalité des paires de photons. Nous nous sommes servis de la détection du premier photon, pour savoir que dans les quelques nanosecondes qui suivaient, on avait un et un seul photon qui allait être émis. En répétant le processus on s'attendait à avoir une succession de photons uniques bien séparés.

Nous avons alors mesuré le fameux paramètre alpha sur cette lumière, et avons trouvé 0,13. Pourquoi pas 0 ? Parce que quand on prend un photomultiplicateur et qu'on n'envoie aucune lumière dessus, il émet quand même un signal parasite de temps en temps, parce qu'il y a agitation thermique, ou qu'il y a un rayon cosmique qui passe par là etc. Mais, ce que signifie alpha plus petit que 1, c'est que le nombre d'événements totalement aléatoires est suffisamment faible pour ne pas masquer le fait que si l'expérience avait été idéale, on aurait eu 0. Du moment qu'on obtient un résultat plus petit que 1, il ne peut s'agir d'une onde. Cela prouve que l'on a bien une lumière qui se comporte comme une succession de photons uniques.

Que fait-on maintenant avec cette source de photons uniques ? Nous allons enlever les deux détecteurs et transformer le dispositif en interféromètre. Si nous avons une onde, l'intensité de sortie ici ou là devrait être modulée sinusoïdalement en fonction du déplacement de ce miroir. Pour des particules uniques, nous mesurons la probabilité de

détection dans chacune des sorties, en fonction du déplacement du miroir. C'est ce que nous avons fait avec Grangier. Et voici les résultats. A l'époque nous n'avions pas d'ordinateurs, pas de caméra vidéo, et donc je ne peux vous présenter que des enregistrements statiques. Mais vous voyez que les probabilités de détection dans les sorties sont modulées en fonction de la position du miroir. On voit ici une modulation très nette, caractéristique du comportement ondulatoire, bien que nous ayons des particules uniques isolées. Feynman avait raison.

Aujourd'hui, la recette qui consiste prendre un atome ou une molécule unique pour faire un photon unique peut être mise en oeuvre de façon beaucoup plus simple. Je vais vous présenter une magnifique expérience faite par Jean-François Roch et ses étudiants à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan. On prend une lamelle de microscope, on met sur la lamelle une solution très diluée de molécules, tellement diluée que les molécules sont bien séparées les unes des autres. Avec un microscope confocal, on arrive à viser une seule molécule, sur laquelle on envoie une impulsion laser. Elle réémet alors un photon et un seul. On récupère le photon réémis et on l'envoie vers le dispositif expérimental choisi, en l'occurrence le biprisme de Fresnel, constitué de deux prismes accolés déviant la lumière dans deux faisceaux différents, qui se croisent avant de se séparer. On place alors deux détecteurs dans les deux faisceaux séparés, et on mesure le paramètre alpha, que l'on trouve nettement inférieur à 1. Il est donc certain qu'il s'agit de photons uniques, qui passent soit dans le prisme du haut, soit dans le prisme du bas. On installe alors une caméra CCD très sensible dans la zone où les deux faisceaux se croisent, celle où on verrait des franges d'interférences si on avait une onde lumineuse intense. Avec des photons uniques, on va voir un point brillant à chaque arrivée d'un photon, comme je vous le montre maintenant sur cette vidéo réalisée avec une véritable expérience. Vous voyez les points brillants s'allumer un à un, et vous voyez se construire progressivement la figure d'interférence. Cela signifie que certes les photons arrivent un par un, mais qu'ils "préfèrent" arriver aux alentours de certains endroits, et n'arrivent jamais à d'autres endroits. Lorsqu'on a accumulé suffisamment de photons, on voit apparaître de magnifiques franges, que l'on ne peut interpréter que comme le résultat d'un interférence d'ondes.

Récapitulons. Ce que l'on a observé dans l'ensemble de ces deux expériences est étrange. Dans la première expérience, on a démontré que si on envoyait "un machin" que l'on appelle un paquet d'onde à un photon, ce machin va soit d'un côté, soit de l'autre mais pas des deux côtés à la fois, comme le montre la valeur nulle de la la probabilité de détection simultanée. Par contre dans la deuxième expérience, le même "machin" (issu de la même source, tombant sur le même biprisme ou la même lame semi réfléchissante) donne lieu à une modulation qu'on ne peut interpréter qu'en admettant que c'est une onde qui est passée des deux côtés à la fois et s'est recombinaée. Voilà, je vous ai montré ce qu'est la dualité onde-particule, un comportement vraiment mystérieux si on essaie de comprendre les deux expériences avec le même modèle de la lumière.

Comment pouvons-nous nous en sortir? Nous allons essayer de lire Bohr, et sa fameuse complémentarité. Le problème avec Bohr est qu'il est souvent obscur. On peut penser que c'est volontaire, car Bohr qui était l'inventeur du concept de complémentarité, disait qu'il y avait deux propriétés qui étaient vraiment complémentaires, l'exactitude scientifique et la clarté de l'explication. Il est donc clair que Bohr fait toujours les plus grands efforts pour être le plus exact possible, cela au prix de la clarté. En toute franchise, les textes de Bohr sur les problèmes conceptuels sont souvent incompréhensibles. Mais on peut imaginer ce que nous dirait Bohr sur cette expérience un jour où il aurait choisi d'être clair. Il nous dirait très probablement : vous avez ici deux aspects complémentaires du même objet, mais vous devez être rassuré par le fait que les deux expériences ne peuvent pas être faites simultanément. Et cela est vrai. Observez les schémas expérimentaux ; je dois choisir entre les deux situations expérimentales : soit je mets l'appareillage du haut et dans ce cas là je pose une question relative au caractère corpusculaire : par quel chemin la particule est-elle passée ? Cette question a un sens si je décris l'impulsion lumineuse comme contenant un seul photon, une particule unique. La réponse est "oui, il s'agit bien d'une particule unique dont on peut dire qu'elle passe soit d'un côté soit de l'autre." Considérons l'appareillage du bas, la question est : "observons nous un comportement ondulatoire?". La réponse est : oui, l'objet se comporte comme une onde. Bohr dit : il s'agit de deux aspects différents, complémentaires, mais vous devez changer d'appareillage pour avoir accès à ces deux points de vue différents, et il n'y a donc pas de contradiction. On donne parfois de la

complémentarité de Bohr l'analogie suivante, à mon avis trop simpliste : quand vous regardez un cylindre de côté, il apparaît comme un rectangle, mais quand vous le regardez du haut il apparaît comme un cercle. Cette analogie a néanmoins l'intérêt d'insister sur le fait que ce que nous observons dépend du type d'appareillage utilisé. Vous ne pouvez pas utiliser les deux appareillages simultanément, nous dit Bohr, donc la contradiction n'est pas si grave.

Devant cette réponse de Bohr, on peut être très naïf. J'aime bien poser un regard naïf sur ces débats, mais quelqu'un l'a été bien avant moi, et de façon particulièrement subtile. Il s'agit de John Archibald Wheeler, qui était un grand théoricien de la relativité générale et un esprit malicieux. Voici ce que peut dire un esprit naïf : ça dépend de l'appareillage ? Alors j'ai compris : quand le photon arrive sur la lame semi réfléchissante, il sait que son comportement va dépendre de la question qu'on va lui poser. Arrivé sur la lame semi réfléchissante, il regarde, et il dit, là on va me demander si je suis une particule, donc je vais choisir, je vais aller soit d'un côté, soit de l'autre, comme ça ils seront contents. Et puis, il regarde le deuxième appareillage là, et il remarque qu'il a déjà vu un tel appareil, il s'agit d'un interféromètre de Mach-Zehnder, et là il sait qu'il doit se comporter comme une onde. Au delà de cette façon humoristique de présenter les choses, nous pouvons légitimement poser la question : si c'est vraiment l'appareillage qui détermine le comportement de l'objet, à quel niveau est-ce que cela se passe ? Est-ce que c'est au moment où l'objet arrive sur la première lame semi réfléchissante ? C'est là que Wheeler entre en jeu, parce qu'il nous fait remarquer que rien ne nous oblige à choisir entre les deux appareillages au moment où le photon passe sur la première lame semi réfléchissante. On peut en effet attendre que le photon soit bien au delà de la première lame, pour choisir. C'est l'idée de base de l'expérience à choix retardé de Wheeler.

Pour choisir plus facilement entre les appareillages sans déplacer des appareils complexes, Wheeler a trouvé une astuce, en modifiant légèrement le dispositif. Il propose d'effacer ou de mettre en place la seconde lame semi-réfléchissante de l'interféromètre de Mach Zehnder, ce qui peut se faire rapidement. Dans le premier cas, chaque chemin est associé à un détecteur, on peut savoir que le photon est passé par un chemin et un seul, et déterminer ce chemin. Dans le deuxième cas, on est dans la configuration interféromètre, et on peut tester le caractère d'onde en observant des

interférences. Donc pour passer d'un appareillage à l'autre, il suffit d'introduire ou d'enlever la seconde lame semi réfléchissante. On sait faire cela, non pas avec une véritable lame semi réfléchissante, mais en appliquant une tension sur un dispositif électro-optique : s'il n'y a pas de tension appliquée, il n'y a rien ; si on applique la tension, il y a une lame semi réfléchissante. Le basculement peut se faire en une nanoseconde – en un milliardième de seconde. C'est ainsi que l'équipe de Jean-François Roch a réalisé l'expérience imaginée par Wheeler, avec un interféromètre de 50 m de long, dans les sous-sols de l'Institut d'Optique. Pour parcourir 150 mètres, la lumière met plus de 160 nanosecondes, et on attend que le photon ait voyagé pendant environ 80 nanosecondes pour décider de mettre ou ne pas mettre la seconde lame. Lorsqu'il entre dans le système, le photon ne peut donc savoir si on testera son caractère ondulatoire, associé à un partage entre les deux chemins, ou si on cherchera à savoir par quel chemin il est passé. Et pourtant, le résultat de l'expérience est que lorsque la seconde lame a été finalement en place tout se passe comme si on avait eu une onde partagée entre les deux côtés, tandis que dans l'autre cas tout se passe comme si une particule était passée d'un seul côté.

Que peut-on tirer de tout cela ? Je vais simplement vous lire la magnifique phrase de John Archibald Wheeler : « Thus one decides the photon shall have come by one route or by both routes after it has already done its travel ». Vous décidez que le voyage s'est déroulé suivant un scénario ou l'autre, mais la décision se prend à la fin du voyage. Etonnant non ?

Que conclure ? D'abord que les faits expérimentaux nous forcent à accepter la dualité onde - particule, quelque bizarre qu'elle soit, et bien qu'il soit impossible de réconcilier cette dualité onde - particule avec des images venant de notre monde. Néanmoins, on peut trouver quelque réconfort dans le fait que le formalisme mathématique ne demande pas de choisir. Il faut toujours revenir aux mathématiques. Ce qui est remarquable dans le formalisme mathématique de l'optique quantique (que l'on n'enseigne aux étudiants qu'au niveau du master, car il est difficile de l'enseigner avant), c'est que ce formalisme est unique pour les deux expériences. On n'a pas un formalisme d'onde pour la première expérience et de particule pour la deuxième. Un seul formalisme global est capable de décrire les deux expériences. La difficulté apparaît

quand on cherche à avoir des images. Enfin, il faut rendre justice à la complémentarité de Bohr, même si je me suis permis un peu d'ironie. L'argument qui consiste à dire que l'on ne peut pas faire les expériences à la fois est un argument solide, mais il ne faut pas le prendre trop au pied de la lettre. On trouve dans de nombreux livres l'affirmation beaucoup trop simpliste que tous les problèmes de la mécanique quantique sont résolus par le fait que c'est l'appareil de mesure qui détermine les propriétés, en un sens quasiment mécanique, à cause de l'interaction entre objet mesuré et appareil de mesure. Or on connaît de nombreux exemples où la complémentarité est à l'œuvre bien qu'il n'y ait aucune interaction mécanique directe entre l'appareil de mesure et l'objet mesuré. Ce que nous montre l'expérience à choix retardé de Wheeler, c'est que la complémentarité de Bohr est extrêmement subtile.

Se poser des questions fondamentales de cette nature est intéressant en soi (et susceptible d'intéresser les élèves). Mais on peut aussi se demander si des propriétés aussi bizarres ne sont pas susceptibles d'avoir des applications. La réponse est oui, il y a des applications radicalement nouvelles, en cryptographie quantique, dans l'ordinateur quantique. Les questions conceptuelles sur les fondements de la mécanique quantique ont provoqué l'émergence d'un nouveau champ d'applications qui donnent lieu à une recherche intense: c'est le domaine de l'information quantique.

Pour plus d'informations, consulter ma page Web :

<http://www.lcf.institutoptique.fr/Alain-Aspect-homepage>

Le photon onde ou particule?

L'étrangeté quantique mise en lumière



Albert Einstein

Fondation Del
Duca
9 Mai 2012



John Archibald Wheeler

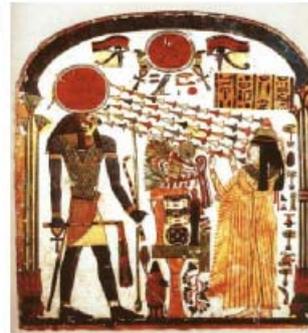
1

Light across ages: wave or particle?

Antiquity (Egypt, Greece): particles towards or from the eye (Epicure, Aristotle, Euclid)



Middle age, renaissance:
engineering: corrective glasses, telescope (Al Hazen, Bacon, Leonardo da Vinci, Galilée, Kepler...)



XVIIth cent.:
Waves (as "riddles on water")
Huyghens



Newton (Opticks, 1702):
particles (of various colours)



2

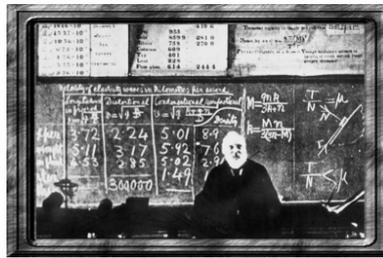
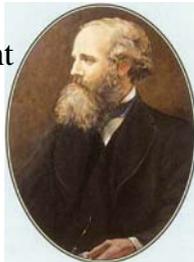
XIXth cent. The triumph of waves



Young, Fresnel (1822):
interference,
diffraction,
polarisation:
light is a
wave



Maxwell
(1865): light
is an
electro-
magnetic
wave



1900: “Physics
is
completed” (Mi
chelson,
Kelvin) ...
except for two
clouds!!!

3

Early XXth: particles come back

- Einstein (1905). Light made of quanta, elementary grains of energy $E = hn$ and momentum $p = hn/c$ (named “photons” in 1926 only).



➤ Quantitative predictions for the photoelectric effect

➤ Ideas not accepted until Millikan’s experiments on photoelectric effect (1915).

➤ Nobel award to Einstein (1922) for the photoelectric effect

➤ Compton’s experiments (1923): momentum of photon in the X ray domain



How to reconcile the particle description with typical wave phenomenon of diffraction, interference, polarisation?

Particle or wave?

4

Wave particle duality

Einstein 1909



Light is **both waves** (capable to interfere) and an **ensemble of particles** with defined energy and momentum...

Thermal radiation fluctuations

$$\overline{e^2} = \frac{\hat{E}}{E} \hat{h} \nu r + \frac{c^3 r^2}{8\pi n^2} \hat{\nu}^2 dn$$

Random particles ("shot noise")

Random waves ("speckle")



Louis de Broglie 1923

Similarly **particles such as electrons** behave like a **wave** (diffraction, interference)

$$l = \frac{h}{p}$$

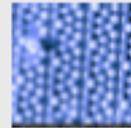
Easy to say the words, but difficult to represent by images

5

Wave particle duality: fruitful

A very successful **concept** at the root of the quantum revolution:

- Understanding the structure of matter, its properties, its interaction with light
 - Electrical, mechanical properties
- Understanding "exotic properties"
 - Superfluidity, superconductivity, BEC
- Inventing new devices
 - Laser, transistor, integrated circuits
- Information and communication society



Quantum mechanics applied to large ensembles

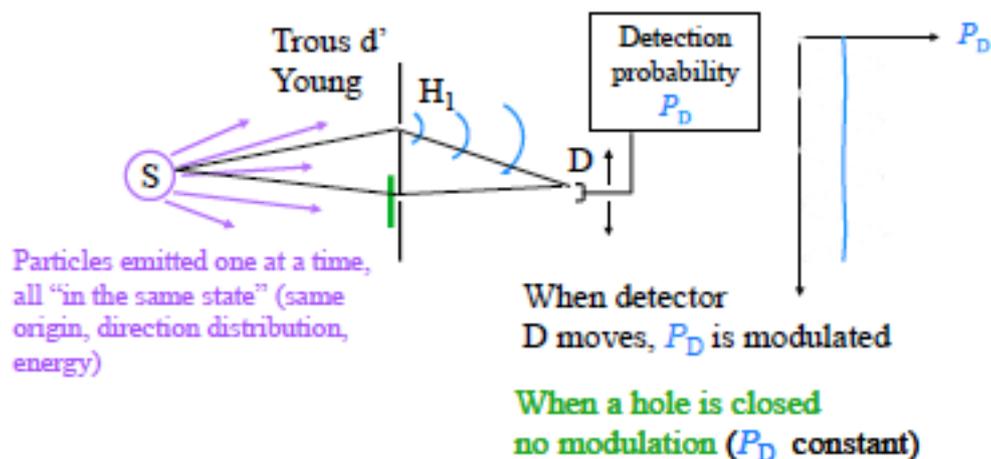
Does it work for a single particle?

From Einstein to Wheeler: wave-particle duality brought to light

1. Light: wave or particle?
Newton, Huguens, Young, Fresnel, Maxwell, Einstein...: both
2. Single photon experiments
Quantum weirdness brought to light
3. Wheeler's delayed choice experiment
Yet more quantum weirdness
4. From fundamental tests to applications
Quantum information

7

Wave particle duality in textbooks wave-like behaviour for single particles



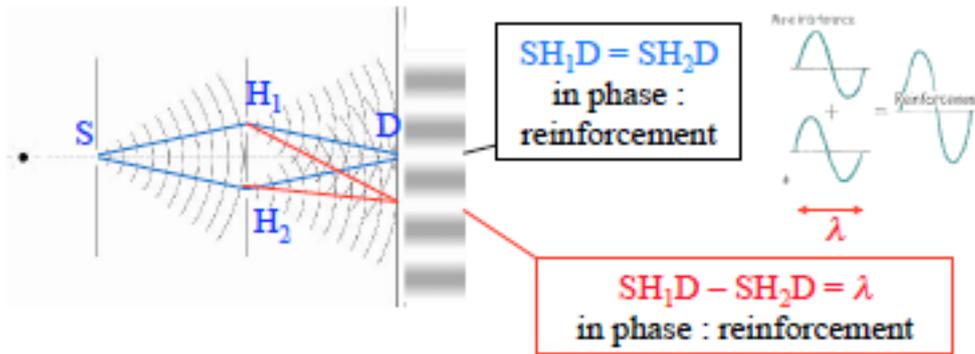
Interpretation: each particle is described by a wave passing through both holes and recombining on the detector.

P_D depends on the path difference $\Delta = SH_1D - SH_2D$

8

Interference pattern: wave-like behavior

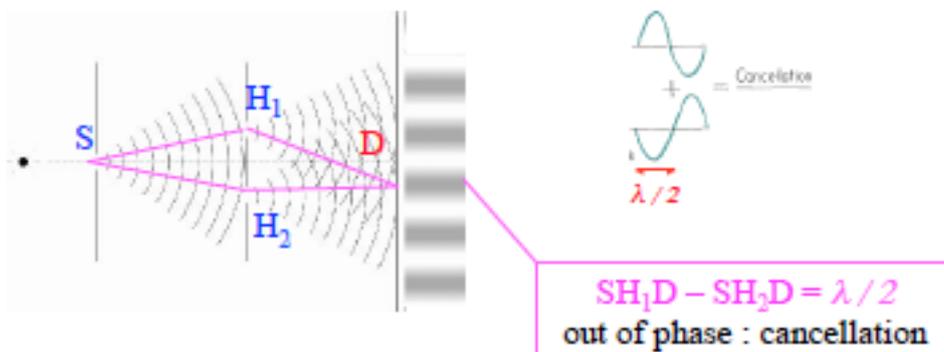
Bright fringes : in phase waves reinforce each other



9

Interference pattern: wave-like behavior

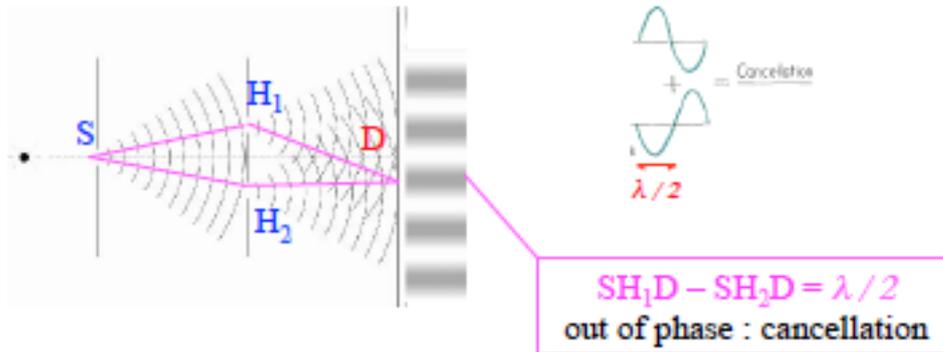
Dark fringes : out of phase waves cancel each other



10

Interference pattern: wave-like behavior

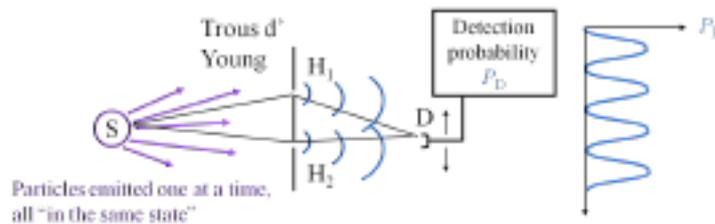
Dark fringes : out of phase waves cancel each other



Understanding dark and bright fringes demands the wave model of light (Young, Fresnel)

11

Wave particle duality in textbooks wave-like behaviour for single photons



Has it been observed in real experiments?

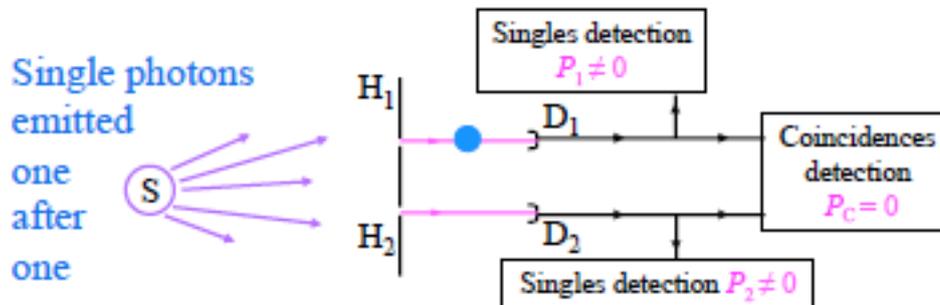
For the first time in 1985 (AA, P Grangier), with the first source of single photons (sim. with Hong and Mandel)

How could we prove we had realized a source emitting single photons?



12

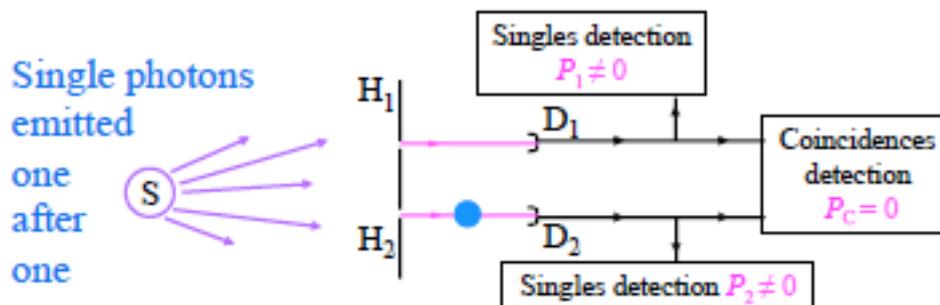
How to know one has single particles? The “which path” GedankenExperiment



A single particle passes either through H_1 , or through H_2 , not through both paths simultaneously. A single particle cannot be split.

Single particle $P_C = 0$: No simultaneous detection

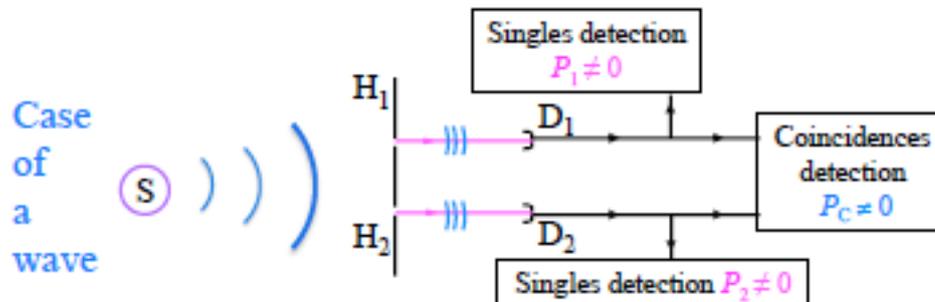
How to know one has single particles? The “which path” GedankenExperiment



A single particle passes either through H_1 , or through H_2 , not through both paths simultaneously. A single particle cannot be split.

Single particle $P_C = 0$: No simultaneous detection

The “which path” GedankenExperiment in the case of a wave

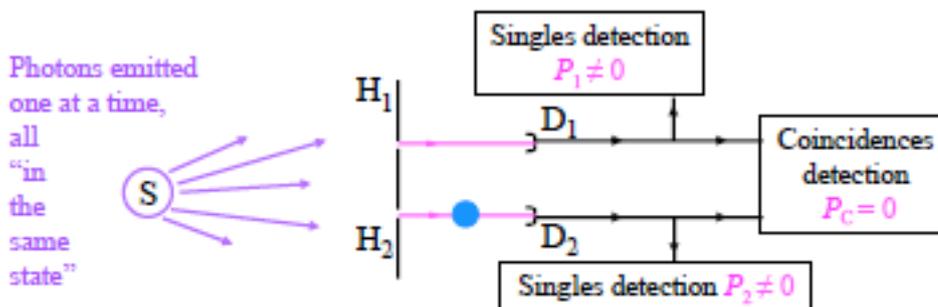


A wave passes through both holes, and falls simultaneously on both detectors. Simultaneous detection can happen.

Wave $\Rightarrow P_C \neq 0$: Simultaneous detection observed

Case of all light sources known until end of 1970's : wave-like behavior ¹⁵

The “which path” GedankenExperiment: a smoking gun for single particle behaviour



In contrast to a wave, a single particle cannot be split.

Single particle $P_C = 0$: No simultaneous detection

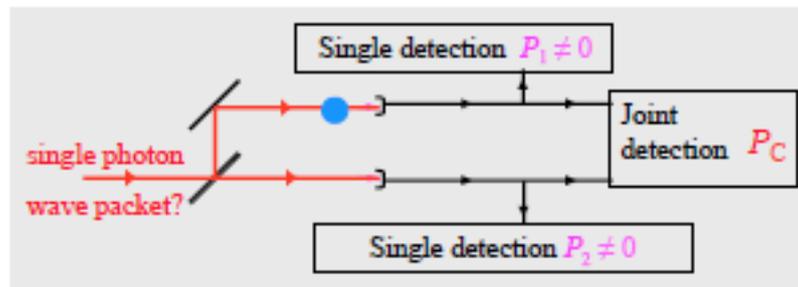
Lack of coincidences: particle-like behaviour,
smoking gun for single photon source

16

A beam-splitter to discriminate between a particle-like and a wave-like behaviour

(AA, Philippe Grangier, 1985)

Single particle:
one expects
 $P_C = 0$



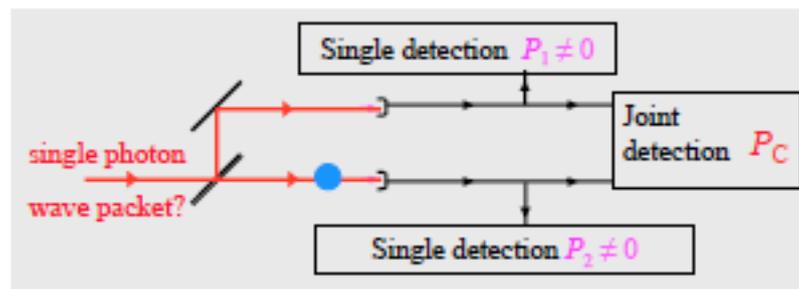
If light behaves as a single particle, it can be detected only once.

$$P_C = 0$$

17

A beam-splitter to quantitatively discriminate particle-like from wave-like behaviour

(AA, Philippe Grangier, 1985)



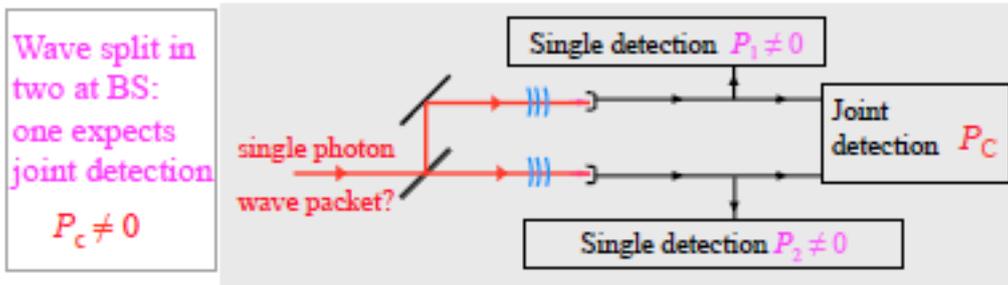
Single particle $P_C = 0$

Wave $P_C \neq 0$

In a real experiment, how to distinguish **zero** from **non-zero**?

A beam-splitter to quantitatively discriminate particle-like from wave-like behaviour

(AA, Philippe Grangier, 1985)



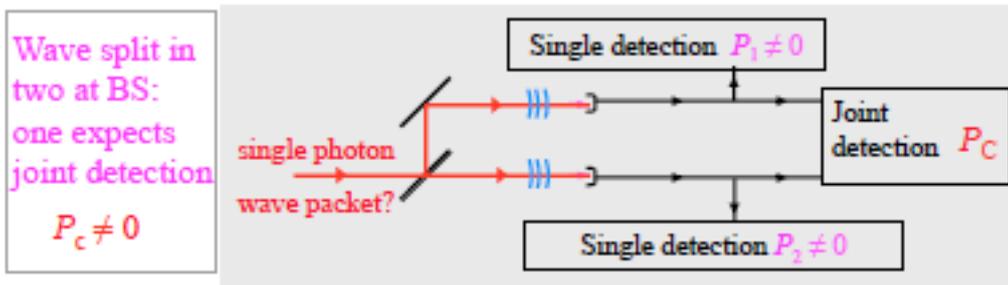
A wave can be detected on both sides of the beam splitter:
joint detections observed in the two channels

$$P_c \neq 0$$

Wave-like behaviour at a beam splitter

(AA, Philippe Grangier, 1985)

Quantitative criterion for a wave



More precisely, joint photodetection probability proportional to mean square of wave intensity $P_c = h^2 R \bar{I}^2$

while $P_1 = h R \bar{I}$, $P_2 = h R \bar{I}$

$$\text{but } \bar{I}^2 \geq (\bar{I})^2$$

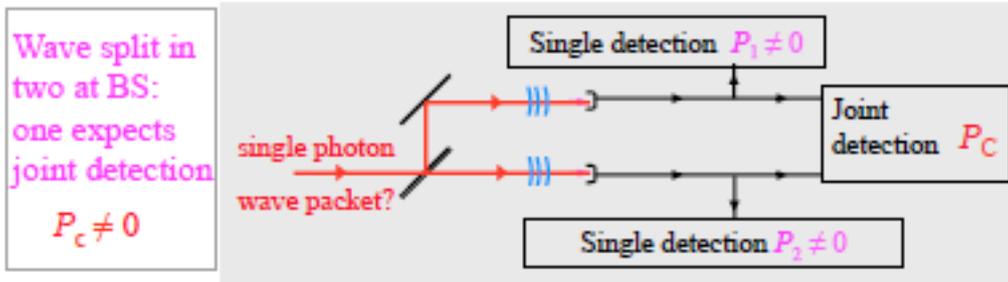
for a wave $a = \frac{P_c}{P_1 P_2} \geq 1$

20

Wave-like behaviour at a beam splitter

(AA, Philippe Grangier, 1985)

Quantitative criterion for a wave



More precisely, joint photodetection probability proportional to mean square of wave intensity $P_c = h^2 R T \bar{I}^2$

but $\bar{I}^2 \geq (\bar{I})^2$ if $P_c \geq P_1 P_2$

while $P_1 = h R \bar{I}$, $P_2 = h T \bar{I}$

for a wave $a = \frac{P_c}{P_1 P_2} \geq 1$

One can distinguish "zero" ($\alpha < 1$) from "non-zero" ($\alpha > 1$) !

21

How to emit a single photon?

Take a single atom, excite it, and wait



22

How to emit a single photon?

Take a single atom, excite it, and wait



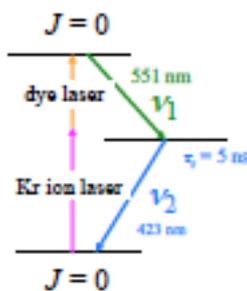
How to isolate a single atom?

23

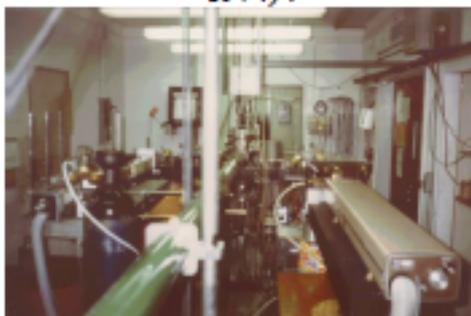


Isolating single photons emitters in time (AA, Philippe Grangier, 1985)

OKS



Assembly of atoms emitting 10^7 s^{-1} pairs of photons. In the 5 ns time window following detection of ν_1 , **only one atom is likely to emit a photon ν_2** (cf J Clauser, 1974).



Experimental result:

$$\alpha_{\text{meas}} = 0.18 \pm 0.06$$

Clear anticorrelation ($\alpha < 1$)

Particle-like behaviour

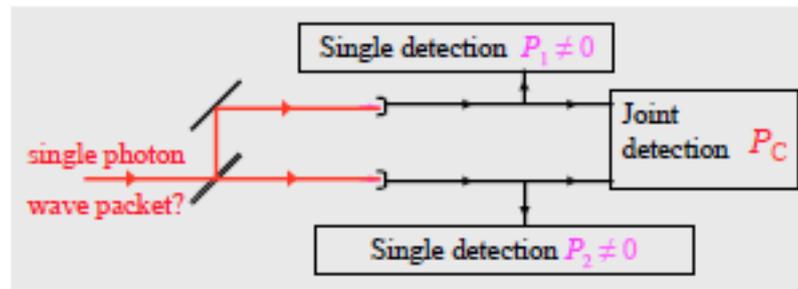
24

A beam-splitter to quantitatively discriminate particle-like from wave-like behaviour

Particle: one expects

$$\alpha = \frac{P_C}{P_1 P_2} < 1$$

Wave: one expects $\alpha > 1$



Experimental result (AA PG 1985):

$$\alpha_{\text{meas}} = 0.18 \pm 0.06$$

Clear anticorrelation ($\alpha < 1$)

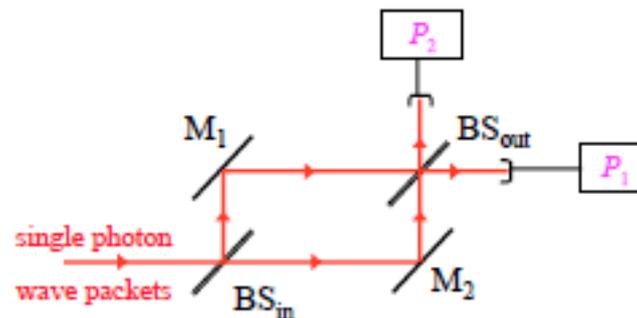
Particle-like behaviour

First single photon source : isolating single atom emission in time

25

Single photon interference?

Can we observe interference with single photon wave packets ($\alpha < 1$)?



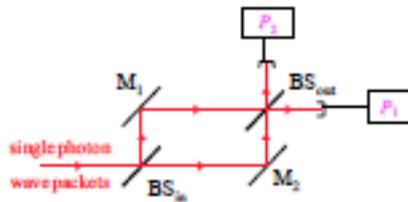
Do probabilities P_1 and P_2 vary (sinusoidally) when one varies the path difference?

26

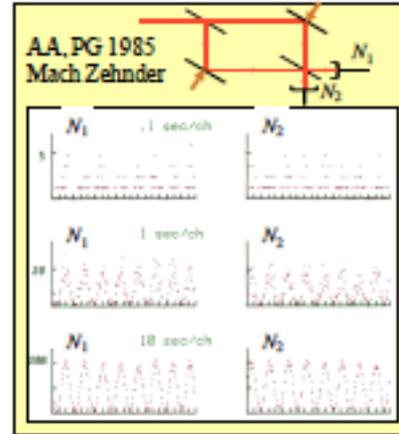
Single photon interference?

Can we observe interference with single photon wave packets ($\alpha < 1$)?

Yes!
(AA, PG 1985)



Probabilities P_1 and P_2 vary (sinusoidally) when one varies the path difference

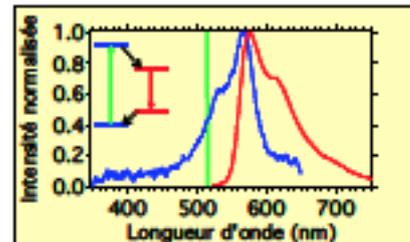
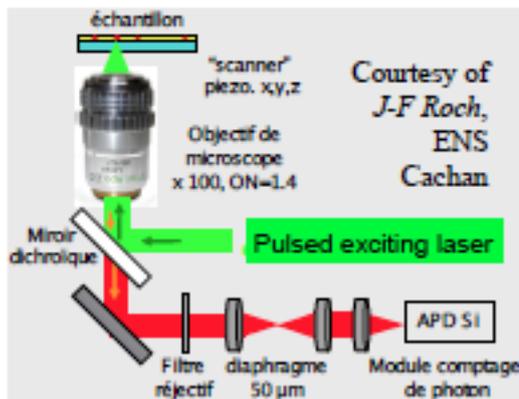


Unambiguous wave like behaviour for single photon

27

Modern sources: single photons emitters isolated in space and time

Isolated 4-level emitter + pulsed excitation (Lounis & Moerner, 2000)



V. Jacques et al., EPJD 35, 561 (2005)

Experimental result

$$\alpha_{\text{meas}} = 0.132 \pm 0.001$$

Clear anticorrelation ($\alpha < 1$)

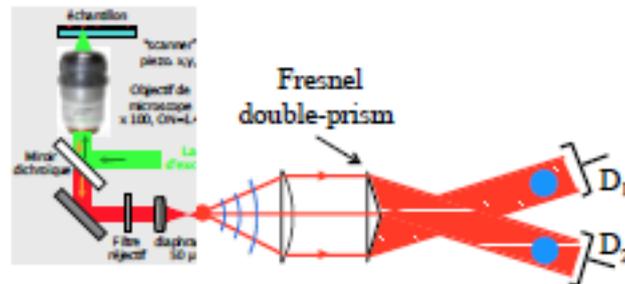
Particle-like behaviour

For a review: B. Lounis and M. Orrit, Rep. Prog. Phys. 68, 1129 (2005).
P. Grangier and I. Abram, Phys. World, Feb. 2003

28

A modern single photon source

A modern implementation (Jean-François Roch et al., Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2005)



Anticorrelation on detectors D1 and D2: joint detections suppressed
 The photon passes either up (detected in D2) or down (detected in D1)
 Evidence of single photon behaviour

Experimental result

$$\alpha_{\text{meas}} = 0.132 \pm 0.001$$

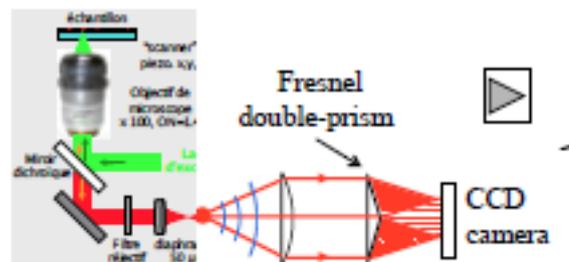
Clear anticorrelation ($\alpha < 1$)

Particle-like behaviour

29

Single photon interference experiment

A modern implementation (Jean-François Roch et al., Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2005)



Same single photon source

Observation in the overlap between two beams: interference fringes?

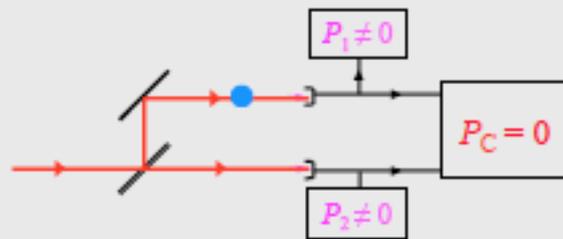
Unambiguous wave like behaviour in the single photon regime

30

Wave particle duality for single photons: weird

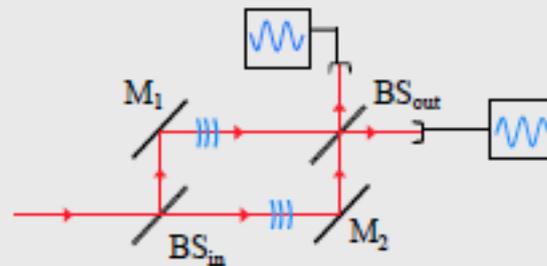
First experiment

Particle like behaviour: goes either to one side, or the other, not both.



Second experiment

Wave like behaviour: Travels along both paths (output depends on paths difference)



Same single photon wave packets, same beamsplitter, contradictory images

31

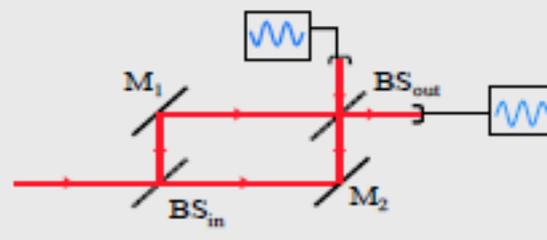
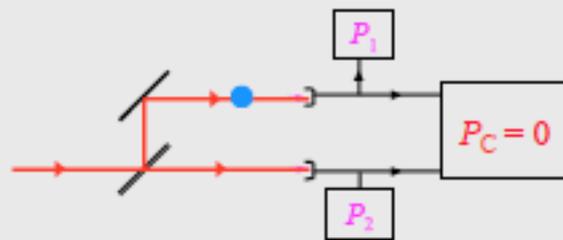
To comfort oneself: Bohr's complementarity

The two experiments are incompatible. One must choose the question:

- Which way ?
- Interference ?

The two questions cannot be asked simultaneously

Could it be that the photon behaves according to the question?



What would happen if the question was chosen after passage at the input beamsplitter? Wheeler's delayed choice experiment.

32

From Einstein to Wheeler: wave-particle duality brought to light

1. Light: wave or particle?
Newton, Hughens, Young, Fresnel, Maxwell, Einstein...: both
2. Single photon experiments
Quantum weirdness brought to light
3. Wheeler's delayed choice experiment
Yet more quantum weirdness
4. From fundamental tests to applications
Quantum information

33

Wheeler's delayed choice experiment

The two experiments are incompatible. One must choose the question:

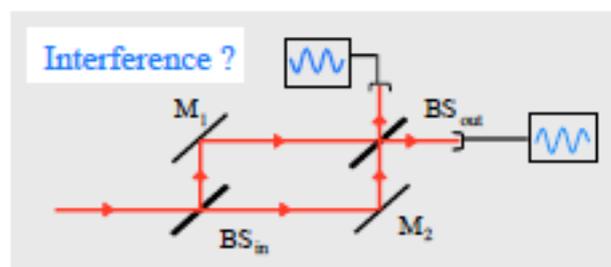
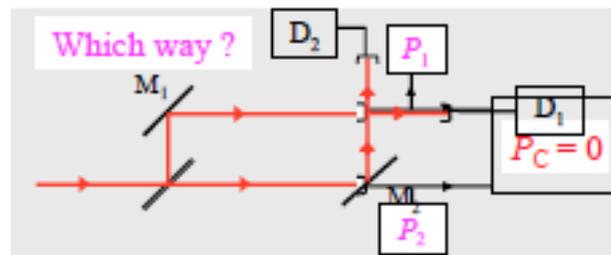
- Which way ?
- Interference ?

Can we ask the question after passage at the first beam splitter?

Slightly modify the "which way" experiment

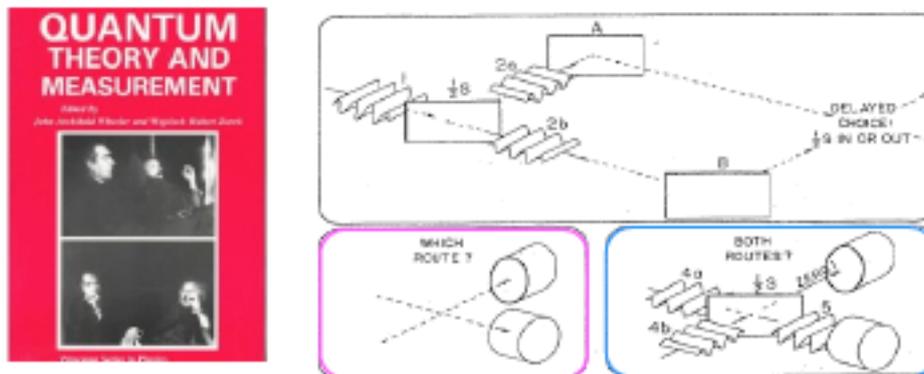
One can choose the question by introducing or removing BS_{out}

One can make the choice after the photon passed BS_{in}



34

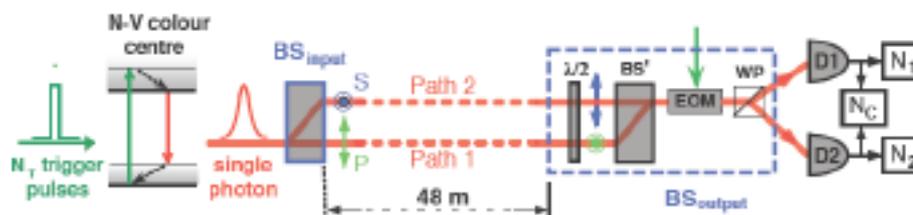
Wheeler's proposal (1978)



The choice of **introducing** or **removing** the second beamsplitter must be space like separated from the passage at first beamsplitter, so when the photon passes the first beam splitter it cannot know which measurement will be done.

35

Experimental realization (ENS Cachan / Institut d'Optique)



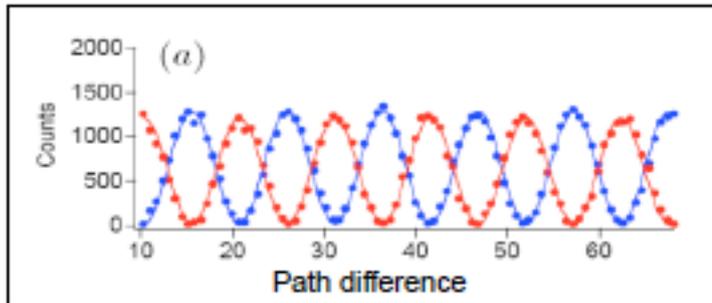
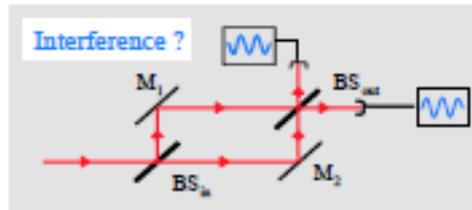
Electro Optical Modulator:
 • no voltage = BS_{output} removed
 • V_{π} = BS_{output} recombines the beams

The choice is made by a quantum random noise generator, after the photon passes the first beam splitter.

36

Delayed choice experiment: results

Observations with
BS_{output} "inserted"

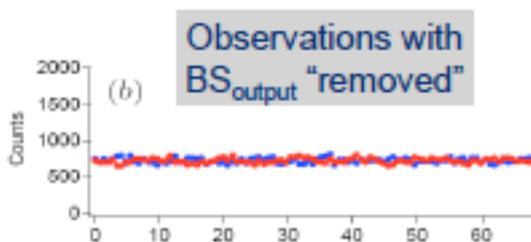


Fringe visibility:
94 %

Wave-like behaviour \Rightarrow both routes

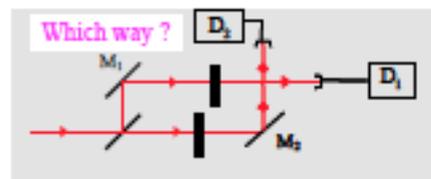
37

Delayed choice experiment: results



No interference fringes

Alpha parameter = 0.12

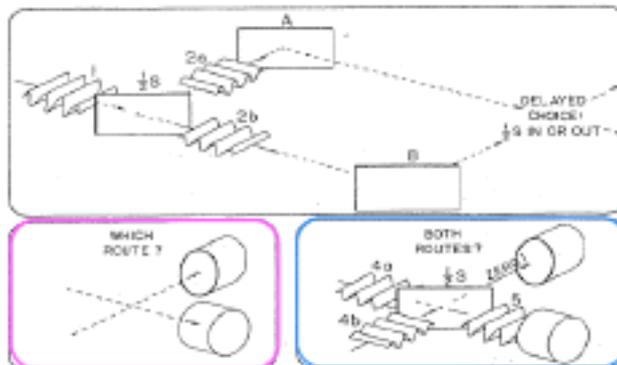


"Which way" parameter = 99%
correlation between detection rate
at either detector and blocking of
one path or the other

The photon travels one route or the other... and we
can tell which one.

38

Delayed choice experiment: conclusion



The photon travels **one way** or **both routes** according to the setting when it arrives at the position of the output beamsplitter.

“Thus one decides the photon shall have come by one route or by both routes after it has already done its travel” J. A. Wheeler

39

Wave particle duality: one of the “great mysteries” of quantum mechanics

Experimental facts force us to accept it. Impossible to reconcile with **consistent** images coming from our macroscopic world. To comfort ourselves:

- Quantum optics formalism gives a coherent account of it (one has not to choose one image or the other).
- Bohr's complementarity allows one to avoid too strong inconsistencies but...
- The delayed choice experiment shows that complementarity should not be interpreted in a too naïve way.

40

Wave particle duality: one of the “great mysteries” of quantum mechanics

Experimental facts force us to accept it. Impossible to reconcile with **consistent** images coming from our macroscopic world. To comfort ourselves:

- Quantum optics formalism gives a coherent account of it (one has not to choose one image or the other).
- Bohr’s complementarity allows one to avoid too strong inconsistencies but...
- The delayed choice experiment shows that complementarity should not be interpreted in a too naïve way.

Questioning the foundations of quantum mechanics is not only an academic issue. Clarifying the concept of single photon has led to quantum cryptography (BB84 scheme).

41

From Einstein to Wheeler: wave-particle duality brought to light

1. Light: wave or particle?
Newton, Hughs, Young, Fresnel, Maxwell, Einstein...: both
2. Single photon experiments
Quantum weirdness brought to light
3. Wheeler’s delayed choice experiment
Yet more quantum weirdness
4. From fundamental tests to applications
Quantum information

42

From Einstein to Wheeler: quantum weirdness brought to light

1. Light: wave or particle?

Newton, Hughens, Young, Fresnel, Maxwell, Einstein...: both

2. Single photon experiments

Quantum weirdness brought to light

3. Wheeler's delayed choice experiment

Yet more quantum weirdness

4. From fundamental tests to applications

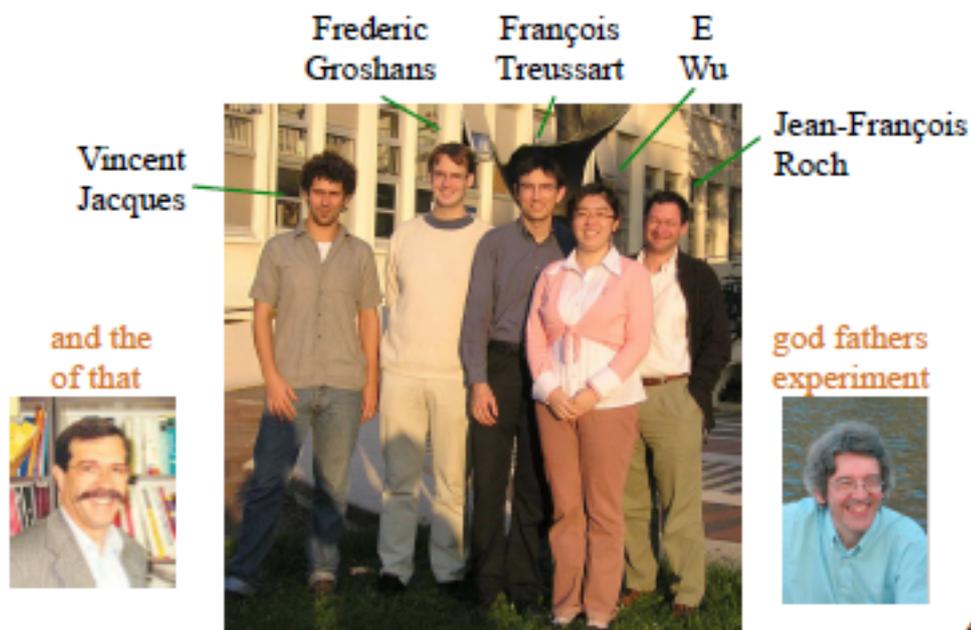
Quantum information

One of the
great quantum
mysteries
experimentally
demonstrated

Asking fundamental questions
may lead to applications

45

Delayed choice experiment: the family



46

Quelques références

Demain la physique, Odile Jacob 2005 : chapitre 5

Voir sur la page web de alain aspect

<http://www.lcf.institutoptique.fr/Alain-Aspect-homepage>

des documents et des liens utiles

47

References

Jacques V et al., PHYSICAL REVIEW LETTERS 100, 220402 (2008):
Delayed-choice test of quantum complementarity with interfering single photons
V.Jacques et al., SCIENCE 315 966 (2007): *Experimental realization of
Wheeler's delayed-choice gedanken experiment*
Grangier p., Roger G., Aspect A., Europhys. Lett., 1 (1986) p.173-179:
*"Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter: a
new light on single-photon interferences"*
A related paper:
Grangier P., Aspect A., Vigue J., Phys. Rev. Lett., 54 (1985) p.418: *"Quantum
interference effect for two atoms radiating a single photon"*

General references on single photons

B. Lounis and M. Orrit, Rep. Prog. Phys. 68, 1129 (2005).
P. Grangier and I. Abram, Phys. World, Feb. 2003
T. Legero, T. Wilk, A. Kuhn, and G. Rempe, in Advances in atomic
molecular, and optical physics, vol 53, Vol. 53, 2006, p. 253.

48

Discussion¹⁰

Claude Debru rappelle qu'Etienne Ghys a regretté qu'Einstein ne soit pas inscrit au programme des auteurs philosophiques. La lecture des premiers paragraphes de l'article de 1905 sur l'électrodynamique des corps en mouvement, où il s'agit de définir d'une manière opérationnelle ce que l'on entend par simultanéité s'agissant de corps en mouvement et donc de trouver des règles, est chose faisable et compréhensible. Les philosophes devraient prendre connaissance de ce mode de raisonnement absolument remarquable sur le plan conceptuel. Alain Aspect indique que la plupart des articles scientifiques d'Einstein, à l'exception de ceux sur la relativité générale qui demandent le formalisme des tenseurs, sont accessibles à des professeurs de physique. Ils sont limpides. Le fameux ouvrage *Albert Einstein Philosopher Scientist* édité par Schilpp, qui se trouve dans les bibliothèques, est aussi une grande aide pour les philosophes. Bohr est un génie, mais est-il obscur quand il tente d'interpréter. Einstein est lumineux.

Dominique Tyvaert, IPR de philosophie (Nancy-Metz, Strasbourg), souligne, comme l'avait déjà fait Mme l'Inspectrice générale de physique dans la matinée, que dans l'histoire des sciences en physique, il y a des périodes de blocage dues à des arguments d'autorité. Alain Aspect a mentionné le fait que la théorie corpusculaire de Newton avait totalement évincé ce qu'il pouvait y avoir déjà d'assez solide dans l'approche ondulatoire. Au XVIII^e siècle, Euler est le seul tenant de la théorie ondulatoire (avec quelques autres), qui a non seulement contesté le point de vue de Newton, mais a même fait valoir une expérimentation qui permettait déjà de montrer des difficultés dans l'interprétation corpusculaire. Dans l'histoire des sciences, une chape de plomb peut peser pendant un siècle parce que des tenants d'une théorie scientifique verrouillent institutionnellement la progression de la vérité. L'enseignement commun que nous essayons de développer gagnerait beaucoup à ce que les professeurs de physique introduisent cette dimension de l'erreur ou de la vérité dogmatique, aussi curieux que cela puisse paraître, à l'intérieur même de la science, car la vérité y gagnerait.

¹⁰ Cette discussion a été résumée par C. Debru à partir de l'enregistrement.

Le même intervenant souhaite discuter de Bohr, vu comme un immense génie. Alain Aspect a rappelé que la vérité ou l'exactitude étaient inversement proportionnelles au degré de clarté. Telle est la pensée de Bohr, qui s'inscrit dans une certaine conception de la vérité à rapporter au contexte philosophique danois. Le philosophe Harald Høffding, bon connaisseur des sciences, ami de Bergson ainsi que du physiologiste Christian Bohr, le père de Niels Bohr, entretenait de très nombreuses discussions, créant un climat intellectuel qui fait que dans la famille Bohr, on avait une conception presque dualiste de la vérité - ce terme de dualisme désigne le fait que l'on estimait être d'autant plus près de la vérité qu'on entrait dans le paradoxe absolu. Des disciples de Bohr ont constaté un jour avec effarement qu'au dessus de la porte d'une de ses cabanes en bois dans la campagne ou au dessus de son bureau, il avait disposé un fer à cheval - ce qui plongeait la communauté des savants des alentours dans une expectative profonde. Un jour quelqu'un s'est dévoué et lui a posé la question : mais enfin, maître, le fer à cheval, vous n'y croyez pas ? Et là dessus Bohr superbe a répondu : « Ah non, ne vous inquiétez pas, je n'y crois pas un seul instant. Mais il paraît que cela marche même quand on n'y croit pas ! » On aurait absolument tort de prendre cette petite anecdote comme n'étant qu'une anecdote. Elle est éminent révélatrice d'une conception qui est au cœur même du principe de complémentarité. La meilleure preuve que je suis du côté du vrai, c'est que mon discours est double. Tant qu'il est simple et unilatéral, il ne peut être que faux, et cela a engendré d'ailleurs des querelles entre lui-même et son disciple Heisenberg. Au moment où Heisenberg a tenté de suggérer que l'on pouvait se passer complètement du point de vue ondulatoire, Bohr n'a pas hésité de son côté à dire qu'il n'en était pas question, parce qu'à ses yeux ce qu'il y avait de plus intéressant dans sa théorie et à quoi il tenait pour des raisons a priori tenant à sa conception de la vérité, c'était justement le fait du « double registre », le fait que l'on est plus près de la vérité quand elle est paradoxale. Il ne faudrait pas que le qualificatif d' « obscur » vienne en quelque sorte limiter la cohérence grandiose de la pensée de Bohr.

Alain Aspect répond en disant qu'il tient également Bohr pour un génie absolu, et ajoute que dans la découverte scientifique tous les coups sont permis, peu importe le cheminement, peu importe que certains trouvent Bohr clair, que d'autres le trouvent obscur. Il a été génial et l'on peut même en dire beaucoup plus sur le fait que dans un de ses articles les plus obscurs (la réponse à Einstein concernant le fameux problème

Einstein, Podolski et Rosen), Bohr montre qu'il a compris ce qui ne sera compris que trente ans plus tard, à savoir que s'il cédait sur ce point, tout l'édifice quantique s'effondrerait.

Alain Aspect souhaite également revenir sur la question du dogmatisme, car il s'agit d'un point très sérieux lorsqu'il qu'il s'agit de former les citoyens, comme l'a dit Etienne Ghys. Le danger de ce que l'on peut dire, et qui est exact sur le plan historique, est de laisser entendre que ce dogmatisme passe son temps à brimer (on ressort en permanence l'affaire Galilée). Il faut dire et répéter en multipliant les exemples que dans la science moderne, la méthode scientifique est extraordinairement robuste et que toutes les questions posées par ce genre de problème y compris le dogmatisme se règlent en quelques années au maximum. Il déclare aimer citer les exemples suivants, qu'il souhaite donner aux élèves. Il y a une vingtaine d'années, deux événements majeurs contredisaient les dogmes. L'un était la fameuse fusion froide, où certains prétendaient avoir vu des fusions nucléaires dans un tube à essais – des chimistes. L'autre était la supraconductivité à haute température critique. Je vous signale que les deux étaient aussi choquantes l'une que l'autre. Pierre-Gilles de Gennes avait démontré qu'il ne pouvait pas y avoir de supraconductivité à haute température. Cela faisait partie des dogmes, cela ne pouvait pas exister. En quelques mois, en un an au maximum, on a su que dans le cas de la fusion froide, il s'agissait d'une erreur, alors que dans le cas de la supraconductivité à haute température critique, ce phénomène a pu être observé.¹¹ La méthode scientifique consiste en ce que, lorsque quelqu'un a trouvé un résultat extraordinaire après l'avoir vérifié et qu'il le publie, dès ce moment 1, 3, 5, 10, 20 laboratoires dans le monde se mettent à refaire l'expérience. Le critère de la méthode scientifique, c'est de pouvoir décrire ce qui a été fait de telle sorte que quelqu'un monte une expérience analogue et observe ce qui a été fait. Considérons ce qui s'est passé pour les neutrinos allant plus vite que la lumière. C'est un excellent exemple de bonnes méthodes scientifiques. Les chercheurs commencent à vérifier le résultat, ne trouvent pas de problème, le portent à la connaissance de la communauté scientifique - les Japonais et les Américains s'apprêtaient à répéter l'expérience. Puis ils ont trouvé un problème avec un fil mal branché. Mais il ne faut pas citer les expériences du passé, où

¹¹ Beaucoup de chercheurs étaient sceptiques à l'idée que la supraconductivité, observée au voisinage du zéro absolu, pouvait être créée à des températures plus élevées, comme celle de l'azote liquide. Ceci a pourtant été obtenu en 1987 pour certains matériaux (note de l'éditeur)

les idées circulaient si mal, où il y avait tellement peu de scientifiques qui travaillaient et où il faut un siècle pour surmonter le dogmatisme. Il ne faudrait pas en conclure à la permanence de l'attitude dogmatique, car dans la période actuelle, on ne peut pas avoir un blocage dogmatique qui dure un siècle, ni même une décennie, en tout cas pas en physique.

En biologie, si l'on prend l'exemple de l'Union Soviétique, certes il y a eu blocage, mais ce blocage n'a existé qu'à l'intérieur de l'Union Soviétique. Le dogmatisme n'a pas empêché le progrès dans le monde entier. Il faut toujours transmettre un message important sur la valeur de la méthode scientifique qui est le fait suivant : un résultat remet en cause les dogmes, il est publié, d'autres chercheurs immédiatement s'y mettent. Ce qu'il faut dire et que ne comprennent pas toujours les journalistes, c'est que les chercheurs sont loin d'être réticents devant un phénomène nouveau. Au contraire ils sont ravis parce que cela leur fait un nouveau sujet de recherche.

Jean-Pierre Kahane

Je crois que c'était une excellente conclusion pour le débat et merci d'avoir contribué au débat comme vous l'avez fait. Le dernier exposé ne sera pas de biologie, ni des sciences de la terre, mais peut-être des deux. En effet nous avons le bénéfice avec Philippe Taquet d'avoir comme il le dit un paléontologue spécialiste des dinosaures.

L'aventure de la découverte des dinosaures en 1966, on peut la retrouver dans les comptes rendus de l'Académie des Sciences à cette époque où il y a relation non pas de l'expérience mais d'une observation faite : la découverte d'un crocodylien nouveau dans le crétacé inférieur du Sahara. Alors ça c'est l'une des premières publications de Philippe Taquet, mais déjà tout à fait remarquable. Alors, Philippe Taquet, nous sommes impatients de l'entendre donc je dis simplement, il est Professeur émérite au Muséum National d'Histoire Naturelle. Il en a été le Directeur. Et quand même un mot sur son rôle comme Directeur, il a été le Directeur du Muséum dans la période où s'est constituée la galerie de l'évolution et la galerie de l'évolution, vous la connaissez comme un modèle de coopération entre les scientifiques, les architectes... Philippe Taquet a collaboré à une foule d'expositions et de manifestations scientifiques. Je dirai un mot aussi de son

attitude au Comité de l'Académie des Sciences sur les Pays en Développement. Depuis quelques années, il pousse à la réalisation d'un projet qui finira par aboutir, mais qui permettra aux scientifiques et aux chercheurs des pays pauvres d'accéder aux collections, qui se trouvent dans les musées des pays riches à la suite des expéditions coloniales, de sorte que l'on se trouve au Muséum. Mais, dans d'autres grands musées en Europe, posséder des génotypes ou des collections de minéraux, qui pour le moment peuvent être consultés librement par les chercheurs européens, mais qui grâce à Philippe Taquet, vont pouvoir être consultés, j'espère dans un avenir proche par les scientifiques des pays d'origine. A l'Académie des Sciences, il a déjà un rôle tout à fait imminent comme Vice Président de l'Académie, il va être le Président de l'Académie des Sciences l'an prochain. C'est une personnalité donc, qui mérite d'être connue et à tous égards.

Philippe Taquet

Du Discours sur les Révolutions du Globe de Georges Cuvier à L'Origine des Espèces de Charles Darwin : Géohistoire et Science de l'Evolution

Chers Confrères, Mesdames et Messieurs, en 1995, mon Confrère Claude Debru écrivait dans la revue « La vie des Sciences », une excellente revue publiée par l'Académie, un article passionnant qui était intitulé : « Quelle place pour l'Histoire des Sciences dans le savoir biologique ? ». Il posait la question : l'Histoire des Sciences a-t-elle un rôle à jouer dans la culture, l'enseignement, et la recherche scientifique aujourd'hui ? La réponse évidemment était oui. Dans ses conclusions, il écrivait : « l'histoire des Sciences ajoute à la compréhension du savoir biologique, une dimension philosophique extrêmement simple, et très essentielle, elle montre la capacité de l'esprit humain de saisir à travers l'énorme diversité des phénomènes et structures physiques et biologiques des articulations assez constantes et des principes assez généraux ». Claude Debru a donc de la suite dans les idées puisqu'il nous réunit aujourd'hui avec ses collègues. Pour prolonger son exposé, je voudrai montrer en présentant quelques exemples tirés des Sciences de la Terre et des Sciences de la Vie, combien l'histoire des Sciences apporte un

éclairage intéressant et pédagogique sur des questions générales telles que : D'où venons nous ? Qui sommes-nous ? Ces questions sont l'objet d'un grand intérêt et de débats évidemment passionnés ; elles sont au cœur de nos interrogations sur la place de l'homme dans la nature. D'où de nombreuses controverses, quelquefois très violentes. L'Histoire des Sciences apporte, je pense, un éclairage passionnant permettant de suivre les débats qui traitent de l'histoire de la vie.

Toute civilisation, toute culture humaine a produit son propre récit de création, c'est-à-dire un mythe de fondation qui a d'abord été tenu pour vrai. Il avait pour but de rendre compte du monde tel qu'il est et de lui donner un sens. Ainsi cette belle image traduisant la vision du jésuite Tchèque Athanasus Kircher qui en 1664 dans ses deux volumes magnifiques décrivait les mondes souterrains et représentait la structure de notre globe terrestre. Il imaginait que la Terre avait un feu central et que les océans communiquaient par le sous-sol avec le centre de la Terre ; que les eaux chaudes qui surgissaient à la surface étaient réchauffées par ce feu central. Ce que l'on savait de la Terre au XVIIème siècle se réduisait à peu de choses et à des choses inexactes. A partir du récit biblique, les clercs, les théologiens, vont étudier les textes et se lancer dans des travaux d'érudition pour tenter d'établir une chronologie des événements du passé. Au début du XVIIème siècle, L'Evêque irlandais Husher, déduisit d'après la succession des dynasties présentées dans la Bible, que la création avait commencé le 23 septembre 4004 avant Jésus Christ. Ces travaux avaient pour but, d'apporter du crédit à l'histoire, depuis la création jusqu'à l'incarnation selon la flèche du temps, c'est-à-dire avec un commencement et une fin. Ce travail des chronologistes était une réponse aux opinions des éternalistes qui croyaient au contraire en un temps cyclique. Ainsi sont les croyances des civilisations de l'Inde qui croient en un éternel recommencement. Cette interprétation littérale de la Bible au XVIIe siècle avec une chronologie courte et une tradition diluvianiste faisant appel au déluge, imposa pendant plusieurs siècles une contrainte intellectuelle pour rendre compte des données d'observation de la nature. Religieux, Intellectuels, se sont tournés vers l'étude des couches terrestres pour essayer de chercher une réponse au récit biblique. Ainsi, le danois Nils Stensen, qui visitait le Val d'Arno près de Florence en Italie examina les couches obliques et les fossiles qu'elles renfermaient ; il en en déduisit que le Déluge avait bousculé ces couches et qu'on en retrouvait les traces visibles dans les sédiments. Au XVIIIème siècle, Voltaire, qui n'était

pas particulièrement adepte des récits bibliques contestait le fait que l'on puisse trouver des coquilles fossiles au sommet des Alpes. Il imaginait que les pèlerins se rendant à Saint Jacques de Compostelle avaient abandonné ces coquilles durant leurs voyages. Au XVII^{ème} siècle, l'Anglais Thomas Burnet publia en 1684 un ouvrage qui était une *Théorie Sacrée de la Terre*. Selon cette théorie, les continents étaient interprétés comme étant les restes d'immenses ruines issues du Déluge. Burnet essaya ainsi de donner du sens à l'observation de la nature pour l'intégrer dans une synthèse et pour construire ce que l'on appelait à l'époque, une Théologie naturelle, afin de montrer que l'histoire a un début et une fin. Le Déluge aurait été une étape de cette histoire dont les traces se lisent encore aujourd'hui dans la nature. Au XVIII^{ème} siècle, les théologiens et exégètes allemands se sont bien doutés qu'un récit biblique en sept jours était un peu simpliste pour rendre compte des événements du passé. Puis, la découverte d'une cité ensevelie sous un lit de cendres volcaniques comme Pompéi, va mettre au jour lors de fouilles, des médailles et des objets qui permettent de reconstituer des événements du passé. C'est à la même époque qu'un naturaliste français qui deviendra célèbre, le Comte Louis Leclerc de Buffon publie un ouvrage intitulé *Les Epoques de la Nature* dans lequel il essaie d'estimer la durée des temps. Buffon est maître de forges à Montbard, ce qui le conduit à tenter une expérience en fabricant des sphères d'acier de diamètres différents, pour calculer lorsqu'elles ont été portées au rouge, le temps qu'elles mettent à se refroidir. En extrapolant les résultats au volume de la Terre, Buffon espérait estimer l'âge de la Terre. Buffon aboutit ainsi à un âge de 3 millions d'années, chiffre qu'il n'ose pas écrire dans la version imprimée de son ouvrage ; il donne un chiffre moindre pour ne pas froisser ces messieurs de la Sorbonne et pour ne pas risquer d'être excommunié par l'Eglise. Pour Buffon, la Terre a donc une histoire. Cette histoire est immensément longue ; elle a un commencement, mais dans cette histoire, l'homme est absent. Le mot de géologie est introduit par Jean-André Deluc, un protestant de Genève qui était à la cour de Grande-Bretagne. Deluc est bibliste et cherche dans les couches terrestres les traces du déluge.

En 1769, naît dans la petite ville de Montbéliard, dans l'Est de la France, un garçon qui deviendra célèbre sous le nom de Georges Cuvier. Montbéliard est alors rattachée au duché du Wurtemberg et le jeune Cuvier sera amené à faire des études en Allemagne au sein de l'Université Caroline. L'enseignement qui y est dispensé va jouer un rôle fondamental dans sa formation et dans son épanouissement. C'est une excellente

Université créée par le Duc de Wurtemberg, qui est beaucoup mieux adapté que l'enseignement qui est donné dans les établissements français de l'époque. Après ses années de formation, Cuvier revient au pays et il va passer les années de la Révolution en Normandie, à Caen et à Fiquainville près de Fécamp. Cuvier est un jeune garçon passionné, issu d'un milieu extrêmement modeste, mais il deviendra un des grands savants de son époque. Cuvier, très jeune a une immense ambition, celle de devenir l'Aristote des temps moderne. Il a pour projet de réécrire l' *Histoire des Animaux*. Ayant lu les travaux du chimiste Antoine Lavoisier qui vient de publier un ouvrage fondateur dans lequel est créée une nouvelle nomenclature chimique, Cuvier se propose de créer une nomenclature, une nouvelle classification du règne animal. Cuvier a lu également Antoine Laurent de Jussieu, le botaniste qui vient de publier son *Genera Plantarum* qui propose une classification des plantes prenant en compte les corrélations qui existent entre certains caractères distinctifs et qui montre que certains caractères sont plus importants que d'autres, qu'il ya donc une subordination des caractères. Cuvier se propose à son tour d'appliquer ces principes méthodologiques à la zoologie. Il consacre la majeure partie de son temps à disséquer tout ce qui lui tombe sous la main . Dans l'une de ses premières publications, il montre les résultats de ses dissections du larynx des oiseaux qui lui permettent de comparer les variations d'un organe, celui de la voix, chez les différentes espèces d'oiseaux. Cette anatomie comparée lui permet de relier des structures à une fonction : le chant des oiseaux diffère d'une espèce à une autre et ces différences correspondent à des structures différentes du syrinx, cette partie du larynx où se forment les sons.

Puis Cuvier quitte la Normandie pour Paris. Il va s'installer au jardin des plantes où Geoffroy Saint Hilaire l'accueille en Mars 1795. A cette époque, La France révolutionnaire, vient d'envahir les Pays-Bas. Elle y a saisi les collections du Stathouder Guillaume d'Orange qui possède un zoo magnifique. Les Hollandais ont exploré une grande partie de la planète et ont amené dans leur pays des spécimens d'animaux nouveaux ou peu connus.. Parmi ces spécimens, des crânes d'éléphants dont les collections du Muséum sont dépourvues. Entre autres un crâne d'éléphant d'Inde, assez bombé, et un crâne d'éléphant d'Afrique. A cette époque, on pense qu'il n'existe sur Terre qu' une seule espèce d'éléphant. Or, Cuvier, grâce à l'anatomie comparée, va montrer que les crânes de l'éléphant d'Afrique et de l'éléphant d'Asie sont différents :

ils n'ont pas la même forme et les dents de l'éléphant d'Afrique ont sur les tables d'usure des lamelles d'émail et d'ivoire en forme de losange tandis que les dents de l'éléphant d'Asie ont des lamelles parallèles. Cuvier va montrer au vu des crânes de ces éléphants, qu'il existe deux espèces d'éléphants, confirmant ainsi des travaux Hollandais et Allemands. Mais Cuvier va montrer aussi que le crâne d'une espèce de grand mammifère récolté dans les glaces de Sibérie et qu'on appelait le mammoth était bien un éléphant, d'une espèce d'éléphant proche de l'éléphant d'Asie, mais d'une espèce qui n'existe plus aujourd'hui sur la Terre. Ainsi l'anatomie comparée permet de faire la preuve qu'il existait autrefois des espèces différentes de celles d'aujourd'hui et de montrer que ces espèces ont disparu. C'est un acte fondateur dans l'histoire des sciences, puisqu'on va pouvoir explorer le passé grâce à un raisonnement anatomique très précis. Cuvier propose un *Tableau élémentaire de l'histoire naturelle des animaux*, qu'il présente au moment même où Napoléon est élu à l'Institut dans la section de mathématiques. La chance sourit encore à Cuvier puisqu'au même moment les carrières de gypse exploitées sous la butte Montmartre vont lui livrer une quantité de fossiles extraordinaires dont des crânes d'animaux mystérieux que personne n'était capable d'interpréter. Cuvier, fort de l'efficacité de la méthode de l'anatomie comparée va montrer que ces animaux dont on a aussi les pattes, sont proches des tapirs sud-américains. C'est un choc dans l'opinion qui découvre que l'on peut reconstituer des mondes inconnus. En lisant la préface de la *Comédie humaine* de Balzac, on constate l'influence des sciences sur la littérature, puisque le grand romancier choisit de s'inspirer de la méthode de Cuvier pour reconstituer l'anatomie de la société française du XIXe siècle. Cuvier va décrire également un crâne saisi par les armées françaises à Maastricht aux Pays Bas, crâne qui est celui d'un animal énorme et mystérieux : poisson, dauphin ou crocodile. Ce crâne est amené à Paris, où il se trouve toujours. Grâce à l'anatomie comparée, Cuvier va montrer que ce crâne est celui d'un lézard marin aujourd'hui disparu. Le simple examen de l'une de ses dents soudée à la mandibule permet de déduire que ce lézard est proche des varans. La méthode de Cuvier, quand on relit son texte, n'a pas vieilli, elle demeure parfaite et sa description est excellente. Cuvier a forgé un outil puissant pour plonger dans le passé. Cuvier a ensuite eu la chance de faire une rencontre heureuse, celle d'Alexandre Brongniart, le fils de l'architecte constructeur du Palais Brongniart. Alexandre Brongniart devient l'ami de Cuvier et ces deux compères vont inventer la Géohistoire. Ils se lancent tous les deux dans un essai de description de la géographie

minéralogique des environs de Paris ; ils vont, en se partageant le travail, élaborer une carte, colorée à la main, des formations géologiques du Bassin de Paris. C'est la naissance de la première carte géologique. A la même époque, en Angleterre, l'ingénieur William Smith élabore également une carte géologique ; mais elle n'est pas encore publiée. Cuvier et Brongniart font des profils des formations dans le Nord et dans le Sud à partir de Paris, profils qu'ils construisent grâce à des nivellements topographiques et ils proposent une coupe des formations géologiques du Bassin de Paris. Cette coupe est fondatrice, elle utilise les fossiles découverts dans chacune de ces couches pour réaliser des corrélations : à la base se trouve la craie de Meudon, qui correspond à cette craie de Maastricht qui a livré le lézard géant, le Mosasaure. Au dessus viennent les couches qui sont celles du gypse, qui renferment les animaux enfouis sous la butte Montmartre ; au dessus sont les couches pleines de coquilles marines et au sommet sont déposés les sédiments récents dans lesquels on trouve les restes de mammouths. L'utilisation de ces médailles du passé, permet de reconstituer l'histoire de la vie sur Terre et d'écrire ainsi une géohistoire. C'est un évènement fondateur. Fort de ce succès, Cuvier propose un programme un programme de recherche à tous ses amis naturalistes en Europe et en Amérique, en leur adressant un prospectus. Cuvier leur expose qu'il a trouvé une méthode pour étudier les vertébrés fossiles et leur suggère de lui envoyer les animaux fossiles qu'ils ont dans leurs pays. Il veut décrire ces fossiles dans un grand traité et en échange envoyer à ses collègues les ouvrages imprimés. C'est ce que Cuvier réalise : il publie en 1812 quatre tomes d'un ouvrage magnifiquement écrit, sur les ossements fossiles : « j'essaie de parcourir une route où l'on n'a encore hasardé que quelques pas, et de faire connaître un genre de monumens presque toujours négligé, quoiqu'indispensable pour l'histoire du globe. Antiquaires d'une espèce nouvelle. Il me fallut apprendre à restaurer ces monumens ». Cuvier va poursuivre ses travaux. Il a observé qu'aux grands reptiles présents dans la partie inférieure des couches, succède un autre monde, celui des animaux du gypse, puis celui des mammouths, puis celui des éléphants. Que s'est-il passé entre ces épisodes de l'histoire de la vie sur terre ? Pour Cuvier, il y a eu des catastrophes, des Révolutions du globe, un scénario qu'il expose dans son fameux *Discours sur les révolutions du globe*. Cuvier raconte une géohistoire rythmée par des événements soudaine, brutaux et catastrophiques. La dernière catastrophe pourrait correspondre au déluge. Les Britanniques, anglicans pratiquants s'emparent du discours sur la Révolution du globe et le traduisent en changeant le titre

qui devient une *Théorie de la Terre* ; la pensée de Cuvier s'en trouve déformée et le texte traduit tire l'oeuvre de Cuvier vers la Théologie naturelle dont les partisans souhaitent montrer que ce discours est parfaitement conforme au récit du Déluge. Un chanoine anglais William Buckland, qui a été un grand scientifique en décrivant notamment le Mégalosaure, le premier dinosaure, publie un ouvrage qu'il intitule *Reliquium diluvianae* (les Reliques du Déluge). Il nomme la couche d'alluvions anciennes qui renferment des os de mammouths le Diluvium. Sa présentation n'est pas conforme à ce qu'avait écrit Cuvier qui était resté prudent dans ses hypothèses. Dans une lettre adressée au chanoine de la Fitte à Londres qui l'interrogeait sur le Déluge, Cuvier écrit: «durant toute ma vie, dans ma carrière scientifique, je me suis toujours efforcé de ne pas aller au-delà des faits». Cuvier, contrairement à ce que l'on prétend, a bien mesuré ce qui relevait des faits et ce qui relevait de conjectures.

Un des grands fondateurs de la géologie, fut l'Anglais Charles Lyell, qui montra que les colonnes du temple de Sérapis à Puzzuoli près de Naples en Italie portaient en hauteur des incrustations de coquillages marins. Cela signifie que la mer a envahi ces lieux dans le passé et qu'elle s'est retirée ensuite. Pour Lyell, les causes actuelles suffisent à expliquer les événements du passé. Il n'est nul besoin de faire appel à des catastrophes. Les chercheurs débattent toujours, parfois avec passion, des différents scénarios explicatifs de l'histoire de la vie sur terre. Cette histoire est-elle graduelle, comme le pense Lyell ou bien est-elle marquée par des événements soudains, catastrophiques ? Plus généralement, les espèces, comme les dinosaures ont-elles disparu soudainement ou graduellement. Le débat est philosophique. Ainsi peut-on dire que les événements de 1789, de la Révolution française, ont été des événements soudains, catastrophiques, symbolisés par la prise de la Bastille le 14 juillet ou au contraire des événements graduels, faisant suite à une série de disettes et de famines en France, événements qui se sont prolongés bien après le 14 juillet. C'est un débat très intéressant qui demeure actuel. Dans les débuts de la géologie certains naturalistes ont essayé de faire ce que l'on appelé du concordisme, de faire coïncider les faits issus de la science avec les idées issues de la métaphysique. Le Déluge, avec un grand D, est une notion métaphysique bien différente des déluges au sens géologique du terme. Les tsunamis sont la cause de déluges. La différence entre le Déluge et les déluges est essentielle à faire comprendre aux élèves. Les géologues retracent les étapes d'une longue histoire qui a commencée il y

a 4 milliards 570 millions d'années, avec il y a 3 milliards 500 millions d'années l'apparition des premières traces de vie, il y a 230 millions d'années l'avènement des dinosaures, il y a 65 millions d'années leur disparition et il y a 7 millions d'années la naissance de l'homme. L'histoire de la vie sur terre est-elle, pour reprendre une excellente formule de François Jacob, le résultat du plus chanceux ou du plus adapté ? C'est une bonne question que les Américains reprennent avec une formule percutante : « bad luck or bad genes », manque de chance ou mauvais gènes ? la vie aujourd'hui est-elle le résultat du hasard ou de la nécessité. La question reste ouverte évidemment. Dès lors, on ne peut que se poser la question : que va-t-il arriver à notre espèce au cours des prochains millions d'années ? Combien de temps mettra notre espèce à disparaître ? disparaîtra-t-elle au cours d'une catastrophe ou à la suite d'évènements graduels ? Voilà des questions essentielles que posent tous les enfants de tous les pays du monde que ce soit en Afrique du Nord, au Laos ou en France. Voilà bien des questions suscitées par les résultats des recherches en paléontologie ou en géologie.

Si nous nous tournons vers les sciences de la vie., on peut remarquer que Cuvier, dans un ouvrage où il décrit l'ensemble du règne animal apporte quelque chose de fondamental ; il remet en cause le concept qui est celui de *l'Echelle des êtres*. Au XVIII^e siècle, le Suisse Charles Bonnet, a voulu montrer qu'il y avait de la cellule à l'homme une continuité, que la nature ne faisait pas de saut et que l'on pouvait passer de la cellule jusqu'à l'homme selon un continuum. Cuvier va démontrer que c'est une notion fautive, que la nature présente plusieurs types de constructions, de structures qui sont antagonistes ; il va montrer qu'il y a quatre embranchements dans le règne animal : les vertébrés avec un squelette interne et une symétrie bilatérale, les arthropodes, qu'il appelait les articulés, avec une symétrie bilatérale, mais avec un squelette externe, les mollusques et enfin les radiaires, qu'il appelait les rayonnés, comme les oursins, ou les méduses. On ne peut pas passer d'une structure à une autre, c'est anatomiquement impossible. Les embranchements de Cuvier vont avoir force de loi. Son ami Etienne Geoffroy Saint-Hilaire qui travaille également au Muséum, pense au contraire qu'il y a une unité de plan du vivant. Ceci se comprend assez si l'on examine les vertébrés ; l'oiseau, le poisson, le singe, ont le même plan de construction. Mais Geoffroy Saint-Hilaire va beaucoup plus loin et montre que l'on peut passer de la structure d'un poulpe à celle d'un mammifère, en retournant les organes pour retrouver le même plan

d'organisation. Cuvier est absolument indigné par cette conception et il y aura un grand débat scientifique à ce sujet en 1830 en France devant l'Académie des Sciences. Goethe en Allemagne va suivre avec passion cette révolution dans les sciences de l'organisation, pas la Révolution politique de 1830, mais celle de l'unité de plan. Geoffroy Saint-Hilaire avait une intuition de poète et son idée n'était pas absurde, mais elle était impossible à prouver en 1830. On sait aujourd'hui qu'il y a une unité du vivant et que les *Homéoboxes* découvertes par la génétique et la biologie moléculaire prouvent qu'il existe chez les organismes des tronçons, qui au début de leur développement, sont communs à la mouche et à l'homme, tronçons qui vont suivre un sort différent en fonction de la génétique.

Enfin, un autre débat eut lieu avec les animaux ramenés d'Égypte par Geoffroy Saint-Hilaire. L'Ibis sacré qui existait au temps des pharaons est-il le même que l'Ibis qui vit aujourd'hui en Égypte ? Peut-on observer une transformation des organes et du squelette pour savoir si le vivant évolue. Lamarck pense que oui, qu'il y a un transformisme des espèces; il sera le premier à penser que la vie évolue, en désaccord sur ce point avec le fixisme de Cuvier.

Après Cuvier, on franchit une étape majeure : un jeune homme qui a fait ses études à Cambridge, dans le Collège de Christchurch, part faire le tour du monde sur un voilier, le Beagle. Il rapporte de son voyage une foule d'observations, notamment sur les pinsons des Îles Galápagos. A son retour, Darwin se met à l'écart de toutes les institutions scientifiques dans une ravissante maison située à Down au Sud de Londres. Tout y est conservé : la serre à orchidée, le carré où Darwin étudiait les vers de terre, le sentier où il promenait son chien, les escaliers où il installait un toboggan en bois pour ses petits enfants. Darwin va montrer que les espèces évoluent sous la pression de la sélection. Il n'y a pas une Echelle des êtres, mais une histoire de la vie qui est buissonnante et les embranchements chers à Cuvier ne sont que les branches d'un arbre qui se sont séparées au cours du temps. Darwin montre que l'origine des espèces est le résultat de la sélection naturelle, d'une lutte pour la vie au cours de laquelle sont préservées les espèces les mieux adaptées. L'apparition de nouvelles formes vivantes est le fruit d'une succession de variations dont le seul moteur est la sélection naturelle. La théorie de Darwin constitue une révolution dans les sciences de la vie. C'est une approche nouvelle

et féconde en rupture complète avec toute vision finaliste. Cette théorie est aujourd'hui enrichie par la génétique et la biologie moléculaire. Evidemment, les idées de Darwin, en particulier celles qui traitent de l'origine de l'homme, vont susciter les polémiques et les passions. On a fêté Darwin en 2009 et l'Académie des Sciences a rendu hommage au grand naturaliste anglais, en publiant deux volumes magnifiques consacrés à la biologie et à la paléontologie. Dans ces volumes se trouvent des exemples remarquables de l'évolution des espèces, comme par exemple l'histoire des cétacés, histoire dont on connaît aujourd'hui parfaitement toutes les étapes, depuis le petit mammifère terrestre fossile de la taille d'un chien trouvé au Pakistan jusqu'aux énormes baleines franches qui se trouvent actuellement dans les océans. Nous pouvons suivre le retour à l'océan de ces mammifères terrestres qui vont perdre leurs pattes pour les remplacer par des palettes natatoires et donner les cétacés. De même, nous pouvons retracer précisément et de manière détaillée l'histoire des mastodontes et des ancêtres des éléphants depuis la naissance de leur lignée jusqu'aux espèces actuelles.

Les idées de Darwin ont suscité et suscitent vous le savez très bien, aujourd'hui encore, des réticences très fortes et les contestations des fondamentalistes, des créationnistes et aujourd'hui des partisans de l'Intelligent Design. Ces personnes mêlent sans aucun sens critique les questions du « comment des choses » et du « pourquoi des choses », ils confondent les réponses qui sont données par la science d'une part et par la métaphysique d'autre part. Dobzhansky a écrit fort justement en 1973, que rien n'a de sens en biologie si ce n'est à la lumière de l'Evolution. L'homme s'interroge tout naturellement sur le pourquoi et sur le comment de son existence. Ces deux magistères tentent chacun à leur manière de répondre à deux interrogations légitimes que l'on a mélangées dans le passé et que l'on se doit de bien distinguer aujourd'hui. L'approche métaphysiques ne peut pas être confondue avec l'approche scientifique. Il n'y a pas de recouvrement des deux magistères comme l'a bien montré l'américain Stephen Jay Gould qui enseignait à Harvard. Gould utilise le terme de NOMA « Non Overlapping Magister » pour signifier le non recouvrement des deux magistères. A la réponse, qui sommes-nous ? les scientifiques ont évidemment leur mot à dire, tandis que la question, pourquoi sommes-nous ? ne relève pas du domaine de la science. Malheureusement, dans de nombreux pays ou au sein de certaines cultures, les gens ne font pas ou ne sont pas capables de faire la distinction entre les deux questionnements. Les enseignants ont

bien évidemment un rôle déterminant à jouer sur ces sujets. Les Académies ont publié récemment un texte qui est disponible sur le site internet de l'Académie et qui expose tous les arguments en faveur de l'Evolution. La chance des naturalistes, des géologues et des biologistes, est de pouvoir montrer aux enfants, aux jeunes dans les musées des sciences et dans les musées d'histoire naturelle des objets extrêmement convaincants qui viennent conforter la théorie de l'évolution. Un squelette de dinosaure complet, extrait de couches âgées de millions d'années apporte un exemple très concret de l'histoire de la vie sur terre. L'anatomie de certaines espèces permet d'expliquer par exemple le passage des Iguanodons du Crétacé inférieur aux Hadrosaures ou Dinosaures à bec de canard du Crétacé supérieur. Aucun créationniste ne peut expliquer l'existence et l'histoire de ces énormes animaux. La Grande Galerie de l'Evolution du Muséum à Paris a été conçue pour montrer au public la richesse de la biodiversité, la théorie de l'Evolution et les relations entre l'homme et la nature. Elle a reçu depuis son ouverture 10 millions de visiteurs de tous âges.

Ce rapide survol de quelques chapitres de l'histoire des sciences de la terre et des sciences de la vie, nous a permis d'aborder des questions générales sur le temps, sur l'histoire de notre planète, sur les mondes disparus, les extinctions, les événements graduels ou soudains, sur le continu et le discontinu, sur l'origine animale de l'homme, l'histoire de la vie, l'évolution des espèces, la sélection naturelle, la place de l'homme dans la nature. Autant de questions qui sont posées aux enseignants par les élèves. Formuler des réponses tirées de l'histoire des sciences de la vie et de la terre, de l'histoire du progrès des connaissances, constitue certainement l'approche rationnelle et pédagogique la plus adaptée.

Synthèse et Propositions

Pierre Léna

Je n'ai heureusement pas à faire la synthèse de cette journée passionnante, ce dont mon voisin philosophe va se charger. Pour ouvrir cette discussion où la parole est à la salle, je veux simplement souligner deux principaux points qui, dans les interventions entendues, m'ont paru ouvrir d'intéressantes perspectives concernant l'enseignement et le rôle de ses différents acteurs.

Le premier point, qui est revenu souvent, est celui de la formation des professeurs. Je le résumerai par l'expression d'un souhait : celui d'une *ouverture* aux autres, aux autres disciplines, aux autres collègues dans l'établissement, aux autres scientifiques de différentes disciplines. La formation des professeurs se présente sous deux modalités bien distinctes. La première est celle de la formation initiale, profondément modifiée par les textes de 2009 et qui a sans doute être prochainement revue. Cette *mastérisation* vise à ce que tout professeur recruté par un concours de la fonction publique, qu'il enseigne ensuite en primaire, au collège ou au lycée, soit simultanément titulaire d'un master (niveau baccalauréat + 5 ans) et ait réussi un concours professionnel (professeur des écoles ou professeur certifié). L'agrégation demeurant un dispositif à part. Dès ses Avis formulés en 2007 puis en 2010 sur ce sujet, adressés aux autorités, l'Académie des sciences avait formulé deux fortes recommandations concernant la préparation universitaire des concours¹². Le premier proposait d'associer, de façon souple et ouverte, à la classique *majeure* disciplinaire (philosophie, mathématiques, sciences physiques...) une *mineure* prise dans une discipline significativement différente. Le but ici est de former des professeurs qui soient simultanément excellents dans une discipline possédée à fond, tout en ayant cultivé une ouverture plus large, développant curiosité et réflexion sur l'ensemble du champ scientifique. La seconde recommandation

¹² Voir <http://www.academie-sciences.fr/activite/enseign/ressource.htm>. *La formation continue des professeurs enseignant les sciences : école, collège, lycée* (nov.2010). *La formation des professeurs à l'enseignement des sciences* (nov.2007).

concernait le cœur des exposés entendus aujourd’hui, puisqu’elle exprimait le vœu que l’épistémologie et l’histoire des sciences soient présentes dans le cursus de master. Beaucoup d’universités disposent aujourd’hui d’enseignants-chercheurs compétents sur ces sujets et capables de collaborer avec les physiciens, les biologistes, les mathématiciens. Nous souhaitons également que l’inspection générale se préoccupe d’introduire ces dimensions dans certaines épreuves des concours scientifiques, afin d’inciter les universités à leur faire une place dans le cursus. Le souhait n’est pas la création d’une épreuve nouvelle et spécialisée mais plutôt la vérification, au sein des épreuves classiques, de connaissances d’histoire ou d’épistémologie. Ces deux propositions peuvent trouver réponse dans une conception ouverte de la formation et une complémentarité bien conçue entre master et concours, évitant l’étroit enfermement disciplinaire qui est souvent celui des professeurs d’école, de collège ou de lycée tels que formés aujourd’hui.

La seconde modalité de la formation est celle qui se déroule tout au long de la vie professionnelle : formation continue que nous préférons appeler *développement professionnel* pour marquer qu’elle est davantage une attitude de dialogue plus qu’un apprentissage passif et qu’elle est réussie quand le professeur se l’approprie réellement. Les Avis de l’Académie, déjà cités, comme plusieurs rapports officiels¹³, ont souligné l’absolue nécessité de repenser un dispositif de développement professionnel, qui est aujourd’hui en sérieuse perte de vitesse. Les universités devraient jouer ici un rôle majeur. Pour apporter sa contribution, l’Académie des sciences crée à la rentrée prochaine quelques Maisons pour la science au service des professeurs enseignant les sciences (école et collège), conçues comme des prototypes et grâce aux fonds des Investissements d’avenir. La Fondation *La main à la pâte*, qui se met en place a ainsi un double objectif¹⁴ : aider le professeur dans sa propre discipline, mais aussi cultiver son ouverture interdisciplinaire, notamment vers l’histoire des sciences, l’épistémologie, les sciences cognitives, sinon vers la philosophie elle-même.

¹³ *Evaluation de la politique de formation continue des enseignants des premier et second degrés (1998-2009)*, Rapport des Inspections générales MEN & MESR. [Media.education.gouv.fr/file/2010/08/3/2010-111-IGEN-IGAENR_216083.pdf](http://media.education.gouv.fr/file/2010/08/3/2010-111-IGEN-IGAENR_216083.pdf)

¹⁴ www.fondation-lamap.org

Je désignerai notre second point, illustré lors de belles présentations tout au long de la journée, par l'idée de *mutualisation*. Existe t il, au sein de notre éducation nationale, des dispositifs qui permettent à des expériences réussies d'en inspirer d'autres, et ainsi de les répandre rapidement par contamination ou dissémination, selon une vision qui fut chère à Georges Charpak et fonda l'essor de *La main à la pâte* ? Ces expériences sont-elles l'objet de suffisamment d'attention, d'explicitation, de regards critiques qui leur permettent de s'améliorer ? Prenons l'exemple de cette nouvelle et superbe option, offerte aux élèves de Seconde et intitulée *Méthodes et pratiques scientifiques* (MPS). Existe t il un outil de référence qui puisse aider un professeur ou une équipe, peu motivés au départ, à la développer dans leur établissement. Je m'interroge sur le rôle que pourrait jouer ici l'Académie ? Les exposés que nous avons entendus sur la géométrie, la lumière ou l'évolution montrent toute la richesse interdisciplinaire, touchant à la compréhension profonde de ce qu'est la science, qui pourrait être apportée aux professeurs désireux de s'engager dans cette option.

Au delà de ces deux points, je remarque qu'il a été souvent question d'éthique aujourd'hui, mais rarement sous l'angle de sa transmission à nos élèves, qui pourtant se posent aujourd'hui beaucoup de questions sur les rapports entre science et éthique. Comment l'enseignement peut-il rejoindre leur intérêt ? Dans le cours de philosophie, ou bien dans les cours de sciences ce qui serait une complète innovation ? S'agirait il de l'éthique interne à la pratique de la science (la recherche de la vérité) ou bien de l'éthique dans l'emploi de la science, confronté au droit ou à la justice ?

Nous n'avons guère abordé la question des programmes et c'est sans doute mieux ainsi, malgré l'importance que doivent à juste titre leur donner nos collègues de l'inspection générale. En effet, tout ce qui a été dit aujourd'hui suppose davantage un changement du style des professeurs, de leur ouverture d'esprit et de l'émergence d'une réelle interdisciplinarité plus que de prescriptions nouvelles qui pourraient ne guère modifier la réelle pratique en classe.

Paul Mathias

Il existe une véritable connivence des sciences de la nature, des sciences mathématiques, des sciences du vivant et, par ailleurs, de la philosophie ou, si l'on préfère, des « sciences philosophiques » : la logique, l'épistémologie, la métaphysique ou la morale.

Très prosaïquement, par exemple, l'idée de « nombre imaginaire » – un nombre qui « n'existe pas » ? – met en question autre chose que des êtres mathématiques, à savoir la capacité de créer, mais aussi de *réaliser* des espaces conceptuels théoriquement et techniquement efficaces, alors même qu'ils demeurent « imaginaires ». Les nombres imaginaires ne posent pas seulement des questions de mathématiques, mais ils touchent aux frontières de l'imagination, c'est-à-dire et de ce que signifie « imaginer ». Produire des *images* ? Produire des *concepts* ? Des procédures intellectuelles sont en jeu, par le moyen desquelles nous créons des objets mathématiques ayant leur régime propre de réalité et, dès lors, une vérité qui, d'une part, s'inscrit dans des systèmes logiquement autonomes et qui, d'autre part, conditionne elle-même, à titre de modèle, le déploiement d'autres types de discours de vérité.

Quand, également, on parle de « l'irréductibilité du vivant au géologique », on postule que le vivant est matière, mais non pas tout à fait de la même façon que la pierre est matière. Or il y a là des frontières qui ne sont pas simplement des frontières *de fait*, mais aussi des frontières entre des modèles de pensée et d'appréhension des choses du monde. Car la frontière entre les deux domaines du vivant et du géologique est épistémologique et non pas « chosique », c'est une frontière entre un champ de réalité mathématisable et un autre qui ne l'est pas et qui ne peut pas l'être – en tout cas, que nous n'avons actuellement pas les moyens théoriques de mathématiser.

Cette connivence des sciences dites « dures » et des sciences philosophiques n'est certes pas un fait nouveau, elle a même quelque chose d'un peu désuet et de poussiéreux qui s'apparente à la figure du savant humaniste – un personnage qui confinerait presque à une synthèse populaire de Bouvard et de Pécuchet ! Mais elle existe aussi sous une autre forme, dont le caractère tout à la fois ordinaire et imperceptible exprime tout l'intérêt et la valeur. Car cette connivence des sciences et de la philosophie est quotidiennement

mise en œuvre dans de nombreuses et diverses expérimentations pédagogiques témoignant, d'une part, des capacités d'invention des professeurs et de leur talent à intéresser leurs élèves ; et, d'autre part, de la curiosité et des progrès des élèves, non seulement dans l'acquisition des savoirs, mais également dans leur mise en relation et dans leur assimilation.

La connivence des sciences et de la philosophie ouvre des perspectives diverses sur les choses et sur le monde, c'est-à-dire qu'elle *pluralise* nos manières de penser le réel et, en même temps, ce que nous sommes nous-même au cœur de ce réel. Quel accès, cependant, donnons-nous à nos élèves et à nos professeurs à l'ensemble de ces savoirs, et à quelles fins ?

La difficulté d'accès à la philosophie des sciences ne tient pas seulement à la richesse du corpus qu'elle constitue – on pourrait imaginer une discipline scolaire spécifique s'étendant de Démocrite et des présocratiques jusqu'aux auteurs contemporains – mais principalement au degré d'imprégnation des sciences dans le milieu des professeurs de philosophie. Quand nous réfléchissons à des programmes d'apprentissage et à des pratiques pédagogiques, nous sommes inévitablement renvoyés aux parcours individuels des professeurs. Quand, dans le milieu de l'Éducation nationale, nous évoquons *l'aide personnalisée*, nous devrions peut-être en étendre le concept aux professeurs – de philosophie, mais pourquoi pas également d'histoire, puisqu'il doit être question d'histoire des sciences, ou de littérature, puisqu'on ne saurait manquer la question de l'écriture de la science et de ses rhétoriques. Il faudrait donc accompagner, encourager, provoquer l'intérêt des professeurs non scientifiques pour les sciences et pour leur enseignement. Dans ces alliances, les sciences de la nature exposeraient leur dimension intimement culturelle et les disciplines de sens trouveraient dans la réalité un terreau fertile pour leurs interprétations propres.

Maintenant, à quelle fin, de tels encouragements ? On parle légitimement de citoyenneté, d'appréhender une société en évolution, de comprendre le monde à travers les sciences – ce qui n'est pas seulement en expliquer les mécanismes ! Commençons par ce dernier point : si comprendre le monde est le décrire, décrire fait entrer dans multiplicité différenciée de registres de parole. On peut décrire le monde en analysant des photons

ou en reconnaissant que les tulipes sont de jolies fleurs. On peut décrire le monde au point de vue d'une approche savante, expérimentale, constructiviste, et ainsi élaborer un discours conceptuel et formalisé ; ou l'on peut construire un autre discours, également formalisé, mais sous le point de vue de la poésie, du roman, voire au moyen d'images. Le problème est, dès lors, au moins partiellement, celui des frontières entre registres sémantiques et paroles partagées. La ligne de partage entre des savoirs conceptuels et des énoncés littéraires est certes claire, mais elle induit peut-être un problème de mixité des discours et, assurément, une contrainte herméneutique forte, qui concerne l'histoire des discours et leurs relations réciproques. Comme la vérité scientifique, la littérature et la philosophie ont leurs ordres discursifs propres. Dans un tel contexte, une *culture* scientifique recouvre des savoirs qui ne tiennent pas exclusivement à la maîtrise des disciplines savantes, mais également à leur *discursivité* et à leur histoire, donc à la fécondité des disciplines de sens.

La question de la finalité sociale et politique d'un enseignement à la fois scientifique et philosophique est plus difficile. L'usage qu'on fait de la notion de « citoyenneté », qu'on rattache à toutes sortes de pratiques sociales ou intellectuelles, tend à en dissoudre la signification et le sérieux dans une répétition mécanique et aveugle du phonème. Or il paraît clair que les affaires de citoyenneté ou de politique sont principalement des affaires d'*idéologie* – ce qu'il entend en bonne part : il y est et il doit y être question de systèmes de croyance, de valeurs, de partage, de convictions, de tolérance et, pour employer un terme un peu décalé, d'*interopérabilité*. Il est essentiel de faire en sorte que les idéaux éthiques, politiques, que les éléments des idéologies qui coexistent réussissent à inter-opérer et à dialoguer pour donner réalité à un vivre commun. La politique est affaire d'échanges sémantiques et pratiques, et la citoyenneté un principe d'ajustement et de coïncidence.

Or à moins d'une perspective étroitement relativiste et « culturaliste », ni les sciences ni la philosophie ne sont, en ce sens, affaires d'idéologie. Avec la philosophie et avec les sciences, nous sommes installés dans un ordre des savoirs et d'une rationalité visant à rendre compte d'eux-mêmes en posant les questions du quoi, du comment, du pourquoi, voire des fins, non dans une perspective de rassemblement partisan, mais dans une perspective exclusive d'inter-compréhension intellectuelle.

La question est donc de savoir quel doit être le vrai rôle pratique et « idéologique » de ces sciences que sont les sciences de la nature, les sciences physiques et du vivant, ou les sciences philosophiques.

Sans doute faut-il, ici, multiplier les perspectives.

D'une part, assurément, les sciences ont partie liée avec la manipulation des choses et des hommes. Non pas nécessairement en mauvaise part, puisqu'il peut être question, ici, de la médecine ou des conditions du bien-être. Mais, pour ce qui concerne précisément l'ancrage des savoirs dans le monde – emblématiquement, les nanotechnologies ou l'informatique – la maîtrise savante et compétente des outils technologiques, quelle que soit leur nature, ne peut absolument pas être dissociée des questions politiques et des questions de citoyenneté. Parler d'informatique, c'est parler de citoyenneté ; parler de médecine, parler d'industrie du médicament, c'est à un moment ou à un autre parler de citoyenneté. Car on touche à quelque chose qu'on a coutume de désigner comme notre « être ensemble » et qui a partie liée à la manipulation des hommes, non pas simplement des corps, mais véritablement de notre humanité – et il n'est évidemment plus possible de faire l'économie de la question de la citoyenneté, de son espace d'expression ou de ses modes de résolution.

Mais il y a plus. D'autre part, en effet, au sujet de la relation entre la philosophie et les sciences, l'approche pratique n'est pas la seule possible. Un autre banquet des savants se tient du côté de la ou des constructions de la vérité. Qu'est ce qu'une particule ? Qu'est ce qu'un photon ? Qu'est ce qu'un nombre imaginaire ? Ces questions trouvent une réponse générique dans ce qu'elles produisent réellement et qui ne tient qu'en un mot : *savoir*. Les sciences et la philosophie ont un horizon au-delà du rapport qu'elles entretiennent aux choses et aux hommes, qui est que, quand on sait quelque chose, on en éprouve de la joie et du contentement. Ultimement, donc, la connivence des sciences de la nature et des sciences philosophiques s'accomplit, tout simplement, dans le bonheur d'être savant – en quelque chose. Si l'Institution parvenait à en convaincre, elle assumerait son rôle avec, non seulement rigueur et efficacité, mais aussi excellence et noblesse.

Propositions à l'issue du Colloque :

Les propositions qui suivent pour objet d'améliorer la compréhension et l'appropriation de la démarche scientifique dans l'enseignement de la philosophie au Lycée et d'accroître les interactions entre enseignants de philosophie et de sciences.

1 – Généraliser les expériences de coopération entre enseignants de philosophie et de sciences dans certains horaires existants, tant en seconde qu'en première, en s'appuyant sur le bilan largement positif de ces expériences qui consistent en des dialogues sur certains thèmes abordés en commun (astronomie, sciences de la vie etc.), et qui suscitent une forte adhésion des élèves.

2 – S'appuyer sur ces expériences pour renforcer la place de la réflexion sur les sciences et leurs méthodes dans l'enseignement de terminale en philosophie, également en vue de sensibiliser aux sciences les futurs professeurs d'école, largement recrutés parmi les littéraires.

3 – Donner une certaine place à des questions d'histoire des sciences dans les oraux des concours de recrutement des disciplines scientifiques et de philosophie en vue d'obtenir une meilleure compréhension du progrès scientifique et de la notion de vérité dans les sciences par les étudiants tant scientifiques que philosophes.

4 – Renforcer les coopérations dans les grands centres universitaires entre les différentes disciplines concernées, en impliquant en particulier les départements de formation des maîtres, et prévoir les recrutements correspondants qui seraient nécessaires.

