

BULLETIN N° 124
ACADÉMIE EUROPEENNE
INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES



Séance du mardi 8 avril 2008 :

Conférence de notre Collègue Gilbert BELAUBRE :
« Pour comprendre l'émergence : une réduction bien tempérée »

Prochaine séance le mardi 13 mai 2008 :

Conférence d'Anouk BARBEROUSSE, chargée de Recherche au CNRS:
« Emergence et réduction : le cas de la mécanique statistique revisitée »

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES
FONDATION DE LA MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

PRESIDENT : Michel GONDRAN
SECRETAIRE GENERAL : Irène HERPE-LITWIN

TRESORIER GENERAL : Bruno BLONDEL
CONSEILERS SCIENTIFIQUES :
SCIENCES DE LA MATIERE : Pr. Gilles COHEN-TANNOUJJI.
SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNOLOGIES : Pr. François BEGON
PRESIDENT DE LA SECTION DE NICE : Doyen René DARS
PRESIDENT DE LA SECTION DE NANCY : Pierre NABET

PRESIDENT FONDATEUR
DOCTEUR Lucien LEVY (†).
PRESIDENT D'HONNEUR
 Gilbert BELAUBRE
SECRETAIRE GENERAL D'HONNEUR
 Pr. P. LIACOPOULOS

mars 2008

N°124

TABLE DES MATIERES

- P. 3 Compte-rendu de la séance du mardi 8 avril 2008
- P. 5 Compte-rendu de la section de Nice-Côte d'Azur
- P. 8 Annonces
- P.10 Documents

Prochaine séance :
 MSH, salle 215-18heures
Mardi 13 mai 2008
**Conférence d'Annick BARBEROUSSE chargée de Recherches au
 CNRS**
**«Emergence et réduction :
 le cas de la mécanique statistique revisitée»**

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES
Maison des Sciences de l'Homme, Paris.

Séance du
Mardi 8 avril 2008

Maison des Sciences de l'Homme, salle 215, à 18 h.

La séance est ouverte à 18 h. 00 sous la Présidence de Michel GONDRAN et en la présence de nos collègues, Bruno BLONDEL, Gilbert BELAUBRE, Alain CARDON, Gilles COHEN-TANNOUDI, Jean-Pierre FRANÇOISE, Irène HERPE-LITWIN, Pierre MARCHAIS, Victor MASTRANGELO, Emmanuel NUNEZ, Alain STAHL .

Etaient excusés : François BEGON, Françoise DUTHEIL, Manuel GALAN, Marie-Louise LABAT, Gérard LEVY, Jacques LEVY.

Conférence de notre Collègue Gilbert BELAUBRE:
« Pour comprendre l'émergence : une réduction bien tempérée »¹

Notre Collègue déclare que ses réflexions sont inspirées par les travaux de John HOLLAND un proche de GELL-MANN, physicien, informaticien qui s'est ensuite tourné vers la neurobiologie et qui a inspiré les travaux du célèbre neurobiologiste EDELMAN.

Après une modélisation des jeux (jeu d'échecs, jeu de dames..) Les ordinateurs ont permis une modélisation de plus en plus efficace de phénomènes complexes comme le fonctionnement neuronal ou l'émergence à partir des propriétés microscopiques. Ils ont remis en question par leur puissance l'émergentisme du XIXème siècle. Ils ont permis dans de nombreux cas de faire le lien entre les propriétés macroscopiques émergentes et les propriétés microscopiques, le lien entre le niveau inférieur et le niveau supérieur. Les régularités observées le sont au niveau supérieur.

La modélisation repose elle-même sur le fait qu'un modèle n'est qu'une représentation symbolique du réel. Tout modèle repose sur symbolisation mémorisée des objets ou sur une création de **vocables**. Le passage de représentations brutes à des représentations symboliques de haut niveau constitue en lui-même une émergence.

Il existe divers modèles : le premier est celui du joueur d'échec de SAMUEL dans lequel on subsume le passé du système pour anticiper le comportement du joueur.

¹ La lecture du texte écrit par notre Collègue Gilbert BELAUBRE, présentée dans les documents de ce bulletin, permet une vision détaillée de la conférence.

Le second est celui adopté par HOLLAND dans la modélisation des réseaux neuronaux comprenant une pondération des activités synaptiques, une modélisation du comportement neuronal et de la formation de chaînes avec boucles de réentrées aboutissant à la mémorisation et donc à un nouveau niveau d'organisation. Les nouvelles boucles de réentrées sont des propriétés émergentes.

Une autre méthode de modélisation est fondée sur la méthode des automates cellulaires imaginés par Von NEUMANN et ULAM . Au bout d'un certain temps apparaissent des régularités, des phénomènes auto-reproductifs qui s'apparentent à des phénomènes émergents.

Récemment KUPIEC et LAFORGE ont introduit des modèles non déterministes pour rendre compte des phénomènes émergents en biologie : malgré un caractère très aléatoire on aboutit à des formes stables et reproductibles. HOFSTADTER a quant à lui introduit le modèle par COPY-CAT qui recherche les agents qui doivent détecter des analogies, des régularités dans des suites de lettres et qui ensuite jouent avec ces suites de lettres, avec des concepts.

Quelles que soient les techniques de modélisation il semble qu'il y ait une ascension de niveaux d'émergence distincts. A chaque niveau statistique il importe d'effectuer des réductions ,des tris entre les paramètres significatifs ou non pour analyser l'émergence. Le rôle d'ordinateurs puissants consistera à faire ces tris dans la complexité entre ce qui joue un rôle ou non.

Ce cheminement complexe aboutit au problème de l'émergence des idées².

Après ce riche débat la séance est levée à 20 heures ,

Bien amicalement à vous,

Irène HERPE-LITWIN

² nous vous proposons dans ce bulletin de lire à ce sujet deux documents sur l'intuition de PATY et de HOLTON

Compte-rendu de la section Nice-Côte d'Azur

Le consensus sur une question complexe est le signe d'une absence de pensée.

A. Laferrère – Commentaire (2007)
n° 120 Hiver 2007-2008.

Compte-rendu de la séance du 21 février 2008 (112^{ème} séance)

Présents :

Jean Aubouin, Richard Beaud, René Blanchet, Sonia Chakhoff, Pierre Couillet, Patrice Crossa-Raynaud, Guy Darcourt, René Dars, Jean-Pierre Delmont, Yves Ignazi, Jacques Lebraty, Jean-François Mattéi, Maurice Papo.

Excusés :

Alain Bernard, François Cuzin, Jean-Paul Goux, Michel Lazdunski, Jacques Wolgensinger.

1- Approbation du compte-rendu de la 111^{ème} séance.

Le compte-rendu est approuvé à l'unanimité des présents.

2- Le mois écoulé.

- Maurice Papo nous signale que M. Pierre Bernard, qui a grandement contribué à l'existence de Sophia Antipolis, a reçu le prix « Doyen Lépine » des mains du maire de Nice M. Jacques Peyrat, après son éloge dit par notre confrère Michel Lazdunski, et en présence de nombreuses personnalités de l'Université de Nice-Sophia Antipolis et de la Recherche.

Au sujet de la réforme de l'enseignement scolaire à l'ordre du jour actuellement, il se souvient de discussions semblables sur les matières à enseigner à l'Ecole Polytechnique, où nombre de professeurs voulaient ajouter des disciplines nouvelles prétextant qu'un bon ingénieur ne pouvait les ignorer.

Pour lui, il existe deux sortes de disciplines : celles qui peuvent être acquises après si l'élève le souhaite ou en a besoin, et celles qu'il ne peut acquérir qu'à l'aide d'un enseignement. Dans la première catégorie, il y a, par exemple, l'économie ou les langues. Dans la seconde, il y a, par exemple, la physique et les mathématiques. Il faudrait faire cette distinction, pour l'enseignement primaire, notamment en privilégiant les fondamentaux qui doivent être acquis (lire, écrire, compter, savoir observer) pour pouvoir apprendre plus tard les autres disciplines.

- Guy Darcourt : le Congrès de Psychiatrie et de Neurologie de Langue Française a choisi cette année comme un de ses thèmes « Psychiatrie et Précarité » et a chargé Jean Furtos, psychiatre à Lyon, de présenter un rapport sur ce sujet. Il apporte à cette question une contribution originale à partir du sentiment de sécurité.

Ce sentiment qui associe confiance en soi, dans les autres et dans l'avenir ne s'acquiert que progressivement au cours de l'enfance. En cas de difficultés, le sujet sain est aidé par la conviction qu'il aura assez de ressources en lui et d'aide extérieure pour y faire face mais le sujet qui n'a pas acquis ce sentiment est démuné. Dans les sociétés traditionnelles, chaque individu a la certitude du soutien indéfectible de son milieu mais dans notre société cette certitude n'existe plus. C'est paradoxal car il n'y a jamais eu autant de systèmes sociaux de protection (sécurité sociale, allocation chômage, RMI, etc.) et pourtant jamais le sentiment d'insécurité n'a été aussi répandu. La moitié des individus de la population de nos villes pense qu'elle peut devenir SDF, malgré toutes les protections. De là est née une pathologie nouvelle que ce rapport met bien en évidence. Le sujet en situation d'exclusion, pour ne plus en souffrir, s'exclut de cette situation et ne la pense plus. L'entrée dans cet état se fait par l'enchaînement du découragement et du renoncement qui aboutit à un syndrome comportant : hypoesthésie corporelle, émoussement affectif, inhibition intellectuelle, et des signes paradoxaux : absence de demande, refus de traitements, rupture des liens encore existants, ce qui pose des problèmes pour la prise en charge. Ces idées qui paraissent simples sont pourtant novatrices.

3- Relations avec le CUM.

Lors d'une réunion avec les responsables du CUM à laquelle participaient Guy Darcourt, Pierre Couillet et Patrice Crossa-Raynaud, remplaçant René Dars empêché, il a été décidé de consacrer, à partir d'octobre 2008, tous les 3^{èmes} lundis du mois à 18 heures 30, un cycle de conférences intitulé « *Les lundis de la connaissance* ».

Une convention quadripartite sera signée entre le CUM, l'Université de Nice-Sophia Antipolis, le Rectorat et l'AEIS.

La première séance de ce cycle aura lieu le 3^{ème} lundi d'octobre 2008.

Cette convention nous allège grandement sur le plan financier tout en nous laissant très libres sur le choix des sujets. Elle nous installe dans la durée, contrairement à nos premiers colloques, et peut-être fidéliser un public. On initie aussi, au CUM, un projet pédagogique pour lequel on souhaite la présence des étudiants, alors que la plupart des autres conférences sont à but culturel.

On peut en effet se poser la question de savoir si les politiques pensent que la Science est uniquement de la technique, car dans ce cas, elle pourrait, à terme, disparaître. Par exemple, les « plans cancers » n'ont jamais fait progresser la Science.

Heureusement, la préoccupation naturelle des scientifiques n'est pas l'application mais la découverte, donc la Science fondamentale. Encore faut-il que les financements suivent. On peut l'espérer en France avec des universités autonomes telles qu'elles le sont aux Etats-Unis.

Les scientifiques qui abordent les sciences fondamentales ne sont cependant pas indifférents au fait de savoir que leurs travaux ont des applications nombreuses.

Il y a toujours eu deux pôles. Un, totalement idéaliste, qui n'est intéressé que par une construction intellectuelle, un système, et un autre, réaliste, qui « bricole ». Mais il n'y a pas eu une seule découverte idéale qui n'ait eu des applications réalistes.

Certains scientifiques, comme Euclide ou Archimède, pratiquaient les deux.

4- Cycle de conférences.

Le cycle des conférences sur « *Les lundis de la connaissance* » s'est étoffé lors de cette séance.

1- Richard Beaud pourrait dialoguer avec M. François Mignard, astrophysicien à l'Observatoire de Nice.

2- Jacques Lebraty pourrait de même dialoguer sur la science économique et les notions de risque et de probabilité depuis les origines (Pascal ?) avec le Professeur Gaffard.

3- Richard Beaud souhaite ensuite organiser trois séances sur « les commencements » : 1) le big bang, 2) la vie, 3) l'Homme.

4- Patrice Crossa-Raynaud suggère que l'on ajoute aussi une séance sur Internet : son origine, mais surtout son influence dans tous les domaines, sur l'information, la culture, le commerce, l'argent, etc. et les comportements.

5- L'Institut Robert Hooke à St Etienne de Tinée.

Depuis quatre années, il y a, chaque été, des réunions de scientifiques à St Etienne de Tinée. Leur succès a incité le Maire et le Conseil Général à financer un bâtiment permettant d'accueillir ces réunions.

En attendant sa réalisation, l'été prochain, entre le 15 juillet et le 15 août, il y aura des conférences scientifiques « grand public » à Auron, St Etienne et Isola, destinées aux estivants, car l'expérience a montré que l'on touche ainsi un public de vacanciers qui n'a pas la disponibilité d'assister aux conférences du CUM.

Pierre Couillet nous fait savoir que dans cet esprit se créent, au sein des universités, des associations de culture scientifique du type de l'Institut Robert Hooke (IRH) de l'Université Nice-Sophia Antipolis, avec l'aide des présidents d'Universités.

La culture scientifique doit se faire par osmose, apprendre par le contact. Dans cet esprit, l'IRH a recruté une jeune journaliste chargée de rédiger des petits fascicules sur des sujets scientifiques divers. Le premier est sur l'arc-en-ciel. Elle va couvrir ainsi successivement des secteurs différents. Le prochain sera sur « La main à la pâte », le suivant « La Science de la vie », puis les « Sciences humaines ».

Pour cela, elle doit séjourner dans les laboratoires, discuter avec les gens, s'imprégner et donner un sens à la diffusion de la connaissance.

Cette mission ne peut être remplie par les enseignants-chercheurs dont ce n'est pas la vocation.

René Blanchet souhaiterait que l'on élargisse ce bon exemple en envisageant la formation de journalistes scientifiques.

O

Prochaine réunion
le jeudi 20 mars 2008 à 17 heures
au siège : Palais Marie Christine - 20 rue de France
06000 NICE

Annonces

Notre collègue Antoine FRATINI nous fait part de la tenue d'une conférence sur : *"la Psychanalyse aujourd'hui depuis Freud"* avec **présentation du programme de formation à la psychanalyse de l'Ecole de Formation de l'Association Européenne de Psychanalyse** (Lucien Lévy président Honoraire) avec : Paul DUPONCHEL , psychanalyste, Dr. Es Sciences Humaines et Jean-Yves METAYER, psychanalyste, délégué national de l'AEP.

La conférence aura lieu au Centre culturel Christiane Peugeot 62 , avenue de la Grande Armée 75017 PARIS (métro ARGENTINE) , le **mercredi 1 Octobre 2008 à 20 heures**

Contact: 06 88 21 75 75 Jean Yves Métayer

ECOLE DE FORMATION A LA PSYCHANALYSE de L'ASSOCIATION EUROPEENNE DE PSYCHANALYSE



« ATELIER Z » 62 Avenue de la Grande Armée 75017 Paris

Contact : 06 88 21 75 75 - psylh@voila.fr - Jean-Yves Métayer, délégué AEP France

Dans notre société marchande de consommation il y a un besoin de reconnaissance du «sujet». Ce besoin n'est pas satisfait tant qu'il n'est pas rentable. Et pourtant il est à la base d'une société qui se veut démocratique basée sur la liberté et l'autonomie des personnes en vue du contrat social.

Dans ce contexte historique et actuel s'inscrit le psychanalyste qui s'intéresse véritablement au «sujet», qui le défend, le promeut.

L'AEP (Association Européenne de Psychanalyse) propose un parcours de formation spécifique à la psychanalyse sur 5 ans: 3ans d'études théoriques et pratiques avec des professeurs et des psychanalystes qui assurent aussi une analyse personnelle (Pendant ces 3 ans l'étudiant peut adhérer à l'AEP à titre de Membre en Formation) et 2 ans de pratique professionnelle en supervision. Le candidat obtient ainsi une inscription sur la liste des Membres Ordinaires de l'AEP.

Le cours de formation en synthèse :

L'AEP France ouvre un cours de formation à l'«atelier z» selon la formule d'un séminaire d'un week-end par mois sur 9 mois par an et sur 3 ans.

Soit 27 week-end mensuels à partir d'octobre 2008: chaque 4ème semaine du mois.

Chaque week-end est divisé en 3 demi journées de 3 heures:

1. samedi matin: 10h30 à 13h30:

LES GRANDS PSYCHANALYSTES...leurs théories , leurs oeuvres.

2. samedi soir: 17h à 20h:

ATELIER DEBATTORIAL OU ETUDES COMPARATIVES

3.dimanche matin: 9h30 à 12h30.:LES CONCEPTS FONDAMENTAUX , ATELIERS PRATIQUES .

4. dimanche après midi: 14h à 19h:

ANALYSES PERSONNELLES .

Documents

P.11 : Le texte complet de notre collègue Gilbert BELAUBRE sur sa conférence « ***Pour comprendre l'émergence : une réduction bien tempérée*** »

Pour éclairer le problème de l'émergence des idées, des intuitions dans la recherche scientifique nous vous proposons deux articles :

P. 19: Intuition dans la recherche scientifique de Gerald HOLTON, Professeur d'Histoire des Sciences à l'Université de Harvard

P. 29 Pensée rationnelle et création scientifique chez Poincaré Par Michel PATY, Directeur de recherche émérite au Centre National de la Recherche Scientifique

Pour comprendre l'émergence : la réduction bien tempérée

G. Belaubre, Avril 2008.

Prologue

Les réflexions qui suivent m'ont été suggérées d'abord à la lecture attentive d'une série d'articles collectés par la revue « Sciences et Avenir », que j'ai trouvés extrêmement inégaux.

Le besoin de mystère et la quête ontologique ne sont pas les voies de la construction scientifique.

J'ai ensuite rassemblé les ouvrages dont les thèmes pouvaient, explicitement ou implicitement, concourir à éclairer les thèmes de l'émergence.

J'ai trouvé l'exposition la plus claire et la plus satisfaisante dans l'ouvrage de John H. Holland, savant américain proche de Murray Gell Mann, dans son livre « Emergence, from chaos to order », paru en 1998 chez Oxford University Press. Beaucoup des développements ci-après sont dus à cet ouvrage ou s'en sont inspirés.

Modèles

Précisons, pour la clarté de l'exposé, le point suivant : si, par le mot « modèle », nous entendons la transposition d'une partie du réel en un schéma mental, alors n'importe quelle représentation est un modèle, y compris la simple vision d'une scène dans laquelle nous « voyons » des choses et des événements, que ce soit par nos propres yeux ou par le truchement de nos appareils. C'est par un apprentissage que nous distinguons, dans toute perception, des « objets » que nous identifions par rapport à un « fond ». Nous composons ainsi notre représentation en décomposant le réel en entités que nous symbolisons par un nom. Ainsi toute perception est déjà un modèle. Il n'est pas inutile d'avoir cela présent à l'esprit quand on parle de science, car la démarche scientifique est un dialogue entre notre représentation, d'un niveau symbolique relativement faible, et nos capacités de symbolisations supérieures. Cette vision a l'avantage de nous tenir à l'écart de toute tentation d'invoquer la nature ultime du réel, son ontologie, ce qui peut être avantageux lorsqu'on étudie les phénomènes émergents. Cette vision peut être contestée au nom de l'évidence des manifestations du réel, que nous appréhendons directement. Je crois qu'il y a là aussi un piège, car si nous avions un quelconque accès direct à une quelconque manifestation du réel, nous bénéficierions de « données immédiates » invoquées par Bergson, or nous savons bien que toutes notre connaissance du réel nous vient par d'innombrables intermédiaires qui ne sont que des manifestations médiates du réel.

Nous ne sommes pas pour autant dépourvus de certitudes à l'égard du réel puisque nous établissons un dialogue permanent entre nos divers ordres de perceptions, mais aussi entre nos perceptions successives et les prévisions que nous pouvons faire sur les perceptions à venir ; ce sont pour nous autant de validations de notre assurance que notre représentation est valide, et c'est là que se fonde notre conception de l'objectivité du réel.

Dans les développements qui vont suivre, nous réserverons toutefois l'usage du vocable « modèle » pour désigner les diverses natures de schémas mentaux élaborés pour décrire des évolutions complexes, et plus particulièrement celles qui se prêtent à un traitement informatique.

Nombres et jeux

Le nombre est la forme la plus radicale de réduction symbolique, puisqu'il écarte toute autre caractéristique d'un groupe d'objets. Le dénombrement conduit à la mesure.

L'approche scientifique classique est indissociable de la mesure. Il s'agit donc d'une représentation se traduisant par des nombres. Les équations différentielles ont introduit la généralisation la plus efficace dans

les représentations mécanistes de la physique. Lorsque les éléments des ensembles étudiés ont des interactions qui s'équilibrent, ces représentations numériques permettent de construire des modèles très performants : les lois de Newton et de Maxwell sont les exemples majeurs de cette démarche.

Les formulations par des nombres, comme les lois physiques, représentent un effort considérable de réduction. Il s'agit toujours de détecter un nombre minimal de variables et de les lier par une relation mathématique qui sous-tend l'idée que nous avons de ce qui les unit. Par exemple, la loi de Newton est suggérée par l'idée que les corps massifs « émettent » une force d'attraction qui se propage dans l'espace, régulièrement et dans toutes les directions. Cette force, qui se dilue sur des sphères de plus en plus grande, a une « densité » qui décroît comme l'inverse de la surface de la sphère, donc en $1/D^2$, D étant la distance au corps émetteur (rayon de la sphère). Que cette force soit proportionnée aux masses des corps qui s'attirent est une hypothèse raisonnable. la formule mM / D^2 appelle la valeur de la force pour les valeurs unitaires des trois variables : c'est γ , et la loi de Newton s'écrit $F = \gamma mM / D^2$.

Lorsque les éléments étudiés sont très nombreux, et qu'ils ne sont accessibles ni à nos sens, ni à nos moyens calculatoires, la méthode statistique s'impose. Elle introduit des probabilités dans les mesures. Selon la nature et le mode de traitement des éléments introduits dans le calcul probabiliste, l'interprétation des probabilités peut être différente ; elle peut être source de différends.

Lorsque des interactions entre éléments sont aussi importantes que les contraintes qui leur sont extérieures, et qu'elles modifient le comportement ou même la structure du système, les modèles doivent prendre en compte ces relations internes pour établir la dynamique du système. Le système est non linéaire. Les mathématiques n'ont guère été développées, pour l'instant dans ce sens, mais l'ordinateur nous permet d'avancer vers ces représentations théoriques. La recherche de règles de fonctionnement dans une procédure séquentielle propre au calcul sur ordinateur nous place dans les conditions des jeux. A partir de règles simples, le système peut présenter des développements d'une extrême complexité.

Les jeux sont toujours fondés sur des règles simples, mais ces règles s'appliquent dans une succession discontinue qui exclut l'expression sous forme d'équations différentielles. Le joueur les exploite dans un système où, en permanence, il doit faire des choix. Ces choix, quand ils sont basés sur une longue pratique du jeu, ne sont pas faits au hasard, mais selon une stratégie propre à chaque joueur. C'est à ce niveau que se produit la complexification du système.

Modèles à base d'agents

Holland (1998) montre avec une grande clarté que le schéma mental à l'œuvre dans les jeux, et qui remonte à la haute antiquité (Egypte et Chine principalement), est tout aussi important pour l'activité mentale supérieure (en particulier la création scientifique), que la mise en oeuvre des nombres. Le jeu n'est autre qu'un modèle mental de relations. Ce genre de spéculation n'est pas de nature différente des développements logiques ou axiomatiques, auxquels se rattachent les modèles mathématiques à base d'équations.

Le système d'itération de règles a donné lieu à toutes sortes de modèles :

Modèles déterministes : le « chaos déterministe », les « automates cellulaires » de Conway.

Modèles à stratégies : modèles de jeux, modèles de réseaux neuronaux.

Modèles aléatoires : automates de Kupiec – Laforge, Copycat et ses dérivés.

Holland précise les points communs à tous ces modèles :

1 – Tout modèle est un modèle d'une réalité.

2 – Tout modèle est constitué d'un grand nombre d' « agents » interagissant.

3 – A toute étape, l'état du modèle est nécessaire et suffisant pour décrire son devenir qui est défini par une « fonction de transition ».

4 – Les interactions entre agents sont contraintes par un nombre limité de règles, qui déterminent la « stratégie », terme utilisé dans les jeux, ou « fonction d'interface ».

De tels modèles sont dits « modèles à base d'agents ».

Quelques modèles pour l'émergence

Les quelques modèles présentés ci-après sont une sélection déjà classique des efforts entrepris pour simuler la complexité. Il se peut qu'à l'heure actuelle des progrès aient été accomplis. Ces travaux ont commencé lorsque les ordinateurs ont dépassé les capacités de mémoire et de computation qui laissent loin derrière les possibilités du travail « crayon – papier ».

L'ordre dans lequel je les présente ne procède d'aucune hiérarchie.

1 - Modèle du joueur de dames ou d'échecs :

Ces modèles, étudiés initialement par Art Samuel (1959) prennent en compte, au fur et à mesure que le jeu avance, la position des pions (état du jeu) et leurs possibilités de mouvement (arborescence de jeu). Le modèle prend en charge l'évaluation des possibilités, en accordant un « poids » à chaque option, menée sur trois ou quatre séquences successives. Le choix se fait en simulant également la stratégie de l'adversaire. Au cours du jeu, des situations typiques « apprises » par le programme sont en quelque sorte des niveaux intermédiaires d'action qui déterminent le choix.

2- Modèle neuronal (Holland 1952–1998 mais aussi Hebb, 1949 et Edelman 1995).

Holland a étudié un modèle artificiel, et a ensuite modélisé des comportements de réseaux réels. Les paramètres dans les deux cas sont les capacités du neurone individuel à être activé, ce qui fait intervenir le nombre de contacts synaptiques instantanés qu'il reçoit, puis sa capacité à activer des synapses que ses dendrites établissent, enfin, la capacité à être réactivé après l'amortissement d'une activation.

Comme dans le jeu de dames, le poids de chaque synapse intervient, et il s'agit bien là d'une réalité fonctionnelle concernant l'intensité synaptique et sa durabilité. Les réseaux neuronaux se dessinent par l'enchaînement des synapses ; ce sont de premiers regroupements, mais le phénomène le plus intéressant est la création de boucles stables par « réentrance » du signal. Ces boucles de réentrées tendent à se renforcer par la répétition des inputs et le phénomène s'étend à de grandes zones (travaux de Singer).. Dans ce cas, les boucles de réentrées sont des niveaux d'agrégation qui peuvent être pris comme agents dans un modèle de niveau supérieur, vers de nouvelles « propriétés émergentes ».

3-Modèle de l'hypophyse (Laboratoire de génomique fonctionnelle de l'Université de Montpellier).

Un modèle est en cours de construction, par une équipe de Montpellier qui a choisi de travailler sur l'hypophyse de la souris, dont le nombre de neurones (quelques centaines de milliers), autorise des travaux de modélisation très approfondis. Dans ce projet, la modélisation ne se limite pas au seul phénomène de propagation d'un signal ; elle prend en compte toutes les données de l'électrophysiologie cellulaire : ouverture et blocages de canaux ioniques, concurrence entre canaux, production consécutive de molécules (protéines, enzymes). Le projet vise à prendre en compte l'ensemble des métabolismes à l'œuvre dans la glande, ce qui conduit à un travail de construction de modèle assisté par l'ordinateur. L'enjeu se résume dans la question :

Comment l'ordinateur permet-il donc un travail de découverte scientifique ? C'est un point central sur lequel je reviendrai.

Les mécanismes à l'œuvre étant repérés par des données physico-chimiques mesurables par l'électrophysiologie, ces mécanismes élémentaires peuvent être modélisés et conduire à des équations différentielles assez nombreuses. L'examen attentif de ces modèles mathématiques permet de faire des évaluations comparatives qui visent à retenir seulement les plus importants dans le but de rendre possible une modélisation plus large. On peut ainsi envisager de passer de l'étude de neurones individuels à des groupes de neurones suggérés par l'examen attentif de leurs relations entre cellules. Ce changement d'échelle offre un nouvel examen qui peut suggérer d'autres réductions par la recherche de régularités ou de symétries. Sans doute des modèles non linéaires vont-ils apparaître, et leur interprétation pourra conduire à des schémas de fonctionnement global. Notons que de telles recherches sont rendues possibles par (1) la mise au point d'électrodes nanométriques permettant de faire des mesures ponctuelles sur une partie de la membrane d'un

neurone spécifié, et (2) par la puissance et la capacité de mémoire des ordinateurs. L'équipe de Montpellier a programmé trois ans de travaux.

4 - Les automates cellulaires :

On a beaucoup travaillé et épilogué sur les automates cellulaires. Ils forment un ensemble de modèles intellectuels très riche imaginé par Ulam (1974) et von Neumann (1947) comme réseaux de développements automatiques à base de cellules d'un quadrillage plan. Ces modèles ont été source d'inspiration pour étudier les phénomènes complexes et von Neumann s'en est servi pour créer un modèle de machine capable de se reproduire.

Conway (1970) a proposé, à titre de divertissement, un modèle commandé par deux règles très simples, « le jeu de la vie », qui a eu un grand succès. A partir de ce jeu, on a longuement étudié d'innombrables variantes de règles , mais celle choisie initialement par Conway (avec un flair ahurissant), est la plus intéressante. Les automates de Conway sont des modèles déterministes. On part d'une structure donnée de cellules, (ou cases occupées) sur un quadrillage de dimension déterminée, et on précise des règles de proximité qui font qu'une case occupée devient vide et que des cases vides deviennent occupées. (disons pour être plus clair : le blanc devient noir et le noir devient blanc). Le modèle étant déterministe, à partir d'une configuration initiale donnée, on obtient toujours le même développement. On s'est beaucoup extasié sur le phénomène des « glisseurs », c'est à dire des régularités apparentes qui se forment à l'écran. Un glisseur est, on peut le dire, un phénomène émergent, puisque c'est une configuration cyclique stable (dans la limite du cadre). Mais un glisseur a bien moins de régularité que les lettres qui se déplacent sur un écran urbain d'information. A vrai dire, l'intérêt de toutes les études et variations faites sur ce thème ne m'apparaît pas et il ne semble pas qu'une quelconque de ces variations puisse représenter un morceau de réalité.

5 - L'automate cellulaire de Kupiec – Laforge.

Il n'en est pas de même pour l'automate cellulaire de Kupiec et Laforge. Ce modèle nous a été présenté lors de sa parution. Ce programme fait intervenir des choix aléatoires modifiant des paramètres du programme. Des cellules et des molécules y sont en jeu, et cette compétition conduit à la formation de structures cellulaires en bicouche dans un système qui va vers la stabilisation. Dans d'autres conditions, qui tendent à simuler la carcinogenèse, les développements sont invasifs et désordonnés. Ici aussi, des structures émergentes apparaissent, avec leurs niveaux de régularités et de lois, comme résultats d'interactions entre agents. D'après l'auteur, ces développements aléatoires conduisent à des régularités à un rythme plus rapide que ne le ferait un programme déterministe. C'est aussi pour cela qu'il le dénomme « modèle de développement darwinien ».

6 - Le modèle « Copycat » et ses dérivés.

Un modèle d'un type très innovant a été développé par Hofstadter (1995) et Mitchell (1993). Ce modèle probabiliste se présente comme un système capable de résoudre des jeux de lettres (ex ; si abc devient abd, que devient ijk ?) selon des procédures fondées sur des analogies.

L'analogie passe toujours par un réseau de ramifications et suppose, dans un traitement informatique, des choix dont la programmation est subtile .

Pour constituer le programme, les auteurs ont défini un espace de travail et des entrées à partir de deux ordres de données fonctionnelles :

1. – Une mémoire contenant un ensemble de « concepts » couvrant le problème à résoudre (du genre 'la lettre la plus à gauche', 'la lettre suivante' etc..) ; la liste de ces concepts peut être très longue.
2. – une « réserve » d'agents qui sont définis par des fonctions à accomplir, telles que : 'établir un lien entre deux concept, par ce balayage des concepts et des liens qui les unissent, renforce la structure définissant les analogies et les renforçant progressivement jusqu'à épuisement (la cible comporte tous les éléments qui lui confèrent la structure complète de la source) ou jusqu'au renoncement (les progrès ne sont plus significatifs)..Et enfin : arrêter la recherche et fournir le résultat.

Ces concepts sont appelés dans l'espace de travail où le problème est introduit. Les « concepts » sont progressivement liés entre eux par l'intervention des agents qui apprécient leur proximité en fonction du

problème posé et donnent un « poids » à chaque lien, D'autres agents détectent les analogies concourant à la solution et les intègrent au résultat déjà acquis. Enfin, les agents mesurent l'état de structuration progressive du résultat et la tendance à sa stabilisation ..etc Le mécanisme qui conduit progressivement à la solution est une comparaison permanente de la source et de la cible, , cette analyse portant sur les éléments que les agents reconnaissent comme analogues dans la source et dans la cible. La découverte d'analogies renforce les liens entre concepts y ayant concouru. Les agents finissent par arrêter le programme et fournissent le résultat.

L'efficacité de Copycat est évidemment facile à tester par le simple résultat fourni.

Ce jeu de lettres, si intéressant soit-il du point de vue de sa richesse conceptuelle, serait resté un jeu de lettres si un scientifique français, Parmentier (1998) ne l'avait transposé pour traiter avec succès un problème scientifique ardu ; à savoir une structure de recherche bibliographique scientifique.. Ce programme, qui a toutes les caractéristiques d'une typologie, peut certainement se développer dans de très nombreux domaines où les arborescences peuvent être intriquées. Il me semble qu'il devrait permettre d'aborder le mécanisme de reconnaissance des objets et des scènes, qui est fondamental dans l'appréhension du réel et la construction des concepts et la structuration de la mémoire : création de building-blocks, de leurs liens dans des scènes, de leur enchaînement dans des événements, création de la durée comme structure mentale)..

Procédures de génération sous contraintes (Constraint Generating Procedure).

La formulation générale des processus complexes par le CGP (Constraint Generating Procedure, « CGP ») est instaurée par Holland (1998) avec la comparaison des modèles de Samuel pour les jeux et de Holland pour les réseaux de neurones.

Il est intéressant de constater de fortes analogies dans les principes d'établissement et de fonctionnement de ces deux modèles.

- Ce sont des modèles du domaine étudié.

Le système est pris dans son état actuel qui est censé subsumer tout son passé.

- Les éléments, en plus ou moins grand nombre, sont en interaction, ce qui crée la complexité.

- Les interactions sont commandées par un nombre limité de règles : règles du jeu, et dans le modèle neuronal, seuils d'excitation, temps de relaxation, intensité des liaisons synaptiques, durée de latence entre deux excitations.

- On appelle plus généralement ces règles « fonction de transition ».

L'état du système à l'instant t étant défini par un ensemble de mécanismes dotés chacun d'une fonction de transition, on applique à ces mécanismes des input qui conduisent à l'état du système à $t+1$. L'interaction entre agents se traduit dans le modèle par la prise en compte d'une fonction d'interface faisant intervenir l'ensemble des inputs des agents entre eux.

Cette procédure doit faire les bons choix dans les inputs extérieurs aux agents autant que dans les inputs entre agents pour éviter une trop grande complication calculatoire.

Cette méthodologie introduit la réduction des paramètres par appréciation de leurs importances relatives (simulations, ou calcul de tendances par dérivées partielles)

Les propriétés émergentes apparaissent dès lors comme le résultat d'une méthode de travail.

Processus émergents : la non linéarité

La plupart des modèles à base d'agents présentent des « phénomènes émergents ». Il s'agit de manifestations qu'on peut analyser comme des procédures générant des possibilités multiples dont la production est limitée par des règles contraignantes.

Les agents mettent en œuvre de la matière, de l'énergie ou de l'information dans un processus qui produit une action, généralement un transport de matière, d'énergie ou d'information.

Il s'agit d'un schéma d « input – output » qui n'est autre que le CGP de Holland.

L'interaction entre agents exclut la possibilité d'une simple addition de facteurs. Les modèles à base d'agents développent donc des structures qui ne sont pas le résultat d'additions élémentaires : elles sont non-linéaires. Et, si l'on introduit dans le modèle la non-linéarité, alors on peut tenter de relier le comportement d'ensemble à l'ensemble des comportements individuels.

Les modèles théoriques présentent souvent des phénomènes cycliques ou des états possédant une certaine robustesse. Les phénomènes réels présentent aussi de telles régularités, des cycles, des symétries.

Ces circonstances permettent d'envisager de modéliser les systèmes au niveau où ces régularités permettent d'opérer des regroupements d'agents qui s'imposent à nous ou que nous choisissons par intuition.

Ces ensembles peuvent alors servir de base à une modélisation à leur niveau, les définissant comme agents et déterminant, dans ce nouveau contexte, de nouveaux mécanismes.

Nous sommes alors sur une voie de modélisation généralisée, par paliers, des phénomènes émergents.

L'outil mathématique, l'ordinateur et la réduction

L'interaction entre agents appelle des modèles non linéaires. Et, si l'on introduit dans le modèle la non linéarité, alors on peut tenter de décrire le comportement d'ensemble l'ensemble des comportements individuels, c'est à dire de définir un output global comme la combinaison des outputs élémentaires résultant des inputs internes (relations entre agents) et externes au système.

Les mathématiques ne nous donnent pas, pour l'instant, un cadre théorique général pour traiter la non linéarité.

Mais la puissance des ordinateurs, c'est à dire surtout leur rapidité calculatoire, permet de faire des séries de simulations dont l'examen attentif conduit à des choix et à des tests d'hypothèses.

Ainsi un va et vient s'établit entre le réel, ou plus exactement le choix que nous faisons de mesurer certains aspects du réel, et le travail mental qui vise à fonder une théorie sur le fonctionnement du réel, c'est à dire une formulation très contractée, le plus « réduite » possible de ce fonctionnement.

Jusqu'au 20^{ème} siècle, les sciences ont progressé dans la voie de la mathématisation par des hypothèses linéaires à la portée d'un travail « crayon – papier » et par des mesures de plus en plus précises. Mais la capacité calculatoire du cerveau humain est très limitée par rapport à ce que fournissent aujourd'hui les ordinateurs. Autrefois l'appareillage scientifique était consacré à fournir des mesures pour valider le travail du chercheur (travail « crayon – papier »). Désormais l'ordinateur est chargé de faire le travail de computation du cerveau, et de proposer des séquences de développements ad libitum, selon les valeurs attribuées aux paramètres et les fonctions associées aux variables. Mais l'ordinateur ne trouve rien et n'invente rien. C'est le chercheur qui dicte le programme, c'est lui qui scrute les résultats, c'est lui qui fait les choix.

Le chercheur accompagne donc l'ordinateur sur le chemin qui part des mesures effectuées sur le réel pour les structurer progressivement en vue de formuler une théorie. Dès le départ, des choix s'imposent : on ne peut pas tout mesurer. Au fur et à mesure d'autres choix s'imposent : il s'agit toujours de détecter l'essentiel et de le séparer de l'accessoire. A chaque niveau où il est possible de faire ces choix, parce qu'on a détecté des régularités, on opère ainsi des réductions. Si l'on renonçait à ce travail de tri, donc de réduction, on serait noyé dans les détails. L'avènement d'une vision synthétique est à ce prix. Récolter toute l'information ne peut conduire qu'à l'inextricable, à la confusion. Il faut accepter de perdre un peu

d'information pour gagner en clarté. Cette clarté se présente souvent sous la forme d'une grande simplicité. Et la satisfaction d'une formulation synthétique procure au savant un sentiment de beauté (qu'il ne tarde pas, en général, à attribuer à la nature).

Une réduction bien tempérée

Par ce titre assez flou mais porteur d'analogie, je souhaite désigner la manière progressive qui doit, à mon sens, accompagner l'effort de construction des modèles, et particulièrement des modèles de phénomènes émergents.

Il existe aujourd'hui un courant antiréductionniste qui se fonde sur l'idée qu'un réductionnisme total est illusoire.

Cette idée peut avoir des prémisses métaphysiques, et pas seulement celles de la dualité, mais aussi celles que la complexité engendre de la nouveauté irréductible. On ne peut pas balayer cette attitude par la boutade d'Alphonse Allais « tout est dans tout, et réciproquement ». Mais on peut affirmer sans hésiter que cette attitude annonce la clôture de la science. En effet, même si les ordinateurs atteignaient des puissances gigantesques, les phénomènes complexes seraient hors de leur portée actuellement prévisible. Il s'ensuit que la démarche scientifique est condamnée à évaluer ce qui est essentiel et à laisser tomber, fût-ce provisoirement, les détails. Et c'est en cela que consiste la réduction. Si, dans les sciences physiques classiques, la réduction peut s'opérer assez aisément par l'appréciation relative du « poids » de chaque paramètre ou variable, c'est parce que la caractère linéaire des représentations que nous formons nous autorise à décliner les valeurs de chacun de ces paramètres et variables « toutes choses égales par ailleurs ». Dès lors que ces paramètres ou variables interagissent, on n'est plus autorisé à appliquer cette méthode. On peut néanmoins l'appliquer avec prudence, et ici le flair peut jouer un certain rôle. Et comme les domaines concernés sont toujours complexes, l'ordinateur est d'un grand secours pour effectuer des simulations et guider les choix.

Ensuite intervient le niveau d'observation. Qu'est-ce que le niveau d'observation ? Nous pouvons en avoir une idée intuitive d'après l'examen de la réalité observée. L'étude cinétique des molécules d'un gaz est un niveau d'observation (directe ou indirecte, du temps de Boltzmann et Maxwell, c'était encore seulement une hypothèse). Le gaz, au niveau du nombre d'Avogadro pour les molécules, est un autre niveau. S'il s'agit d'étudier des réseaux de neurones, on peut avoir intérêt à étudier, entre le neurone individuel et le système nerveux, des groupements intermédiaires qu'on appellera assemblées (formation de cycles à pulsations entretenues), groupes, réseau. Il s'agit soit de niveaux de regroupements suggérés ou imposés par l'examen attentif, soit de choix délibérés permettant des regroupements d'informations et, par suite, un nouveau niveau de réduction. Ainsi, la réduction n'apparaît pas comme un impératif à caractère ontologique, mais comme un ensemble d'efforts successifs pour y voir plus clair. Ce faisant, on perd un peu de la description ultime du phénomène, et en cela un puriste dira que notre représentation, si elle est claire, est fautive.. mais Valéry répond que « tout ce qui n'est pas clair est inutile ».

Au demeurant, si notre représentation est efficace, ce qui peut être une propriété bien tangible dans une approximation, c'est bien l'essentiel, et c'est parfaitement scientifique au sens où la science ne peut avoir d'autre prétention que d'être une bonne approximation du réel. Et l'expression « bonne approximation » relève du seul « bon sens ».

Bibliographie

- Donald O. Hebb : The Organization of Behavior. A Neuropsychological Theory New York Wiley 1949
- Douglas R. Hofstadter : Fluid Concepts and Creative Analogies New York Basic Books 1995
- John H. Holland : Emergence, from chaos to order Oxford University Press, 1998
- Bertrand Laforge, David Gueza, Michael Martinez, Jean-Jacques Kupiec, _ :
Modeling embryogenesis and cancer: an approach based on an equilibrium between the autostabilization of stochastic gene expression and the interdependence of cells for proliferation Elzevier 2004
- Melanie Mitchell : Analogy-Making as Perception MIT Press 1993
- François Parmentier : Spécifications d'une architecture émergente fondée sur le raisonnement par analogie. Applications aux références bibliographiques. Thèse. Université de Nancy 1998
- Stanislas Ulam : Sets, Numbers, and Universes, Cambridge Mass. MIT Press 1974
- John von Neumann : Theory of Self-Reproducing Automata University of Illinois Press 1966ème

L'intuition dans la recherche scientifique

(Intuition in Scientific Research)

Traduction d'un article original de **Gérald HOLTON**,

Mallinckrodt Research Professor of Physics and Research, Professor of History of Science,
Harvard University, Cambridge

Traduction : Hubert de GERGONDEY³

I) Chercheurs et éducateurs scientifiques ont tendance à honorer les vertus des méthodes ayant subi l'épreuve du temps pour les progrès de la science : habileté expérimentale, virtuosité mathématique, planification rationnelle, hypothèses prudentes, induction et déduction rigoureuses, scepticisme quant aux résultats avant réexamen et, enfin, plaidoyer éloquent pour les résultats finaux de quelqu'un.

Tout cela est essentiel. Il y a pourtant un autre ingrédient, un talent additionnel qui, en fait, a été tout à fait important pour certaines des plus grandes percées historiques, mais sur lequel règne généralement un silence embarrassé dans les publications de recherche, et dans la formation de la nouvelle récolte de scientifiques. Pour décrire ce talent, Hans Christian Oersted employa une heureuse formule : « accord anticipateur avec la nature » ; Arthur Schopenhauer y reconnaissait la marque du génie ; Einstein parlait de « Fingerspitzengefühl », de sensation au bout d'un doigt ; et les étudiants et collaborateurs d'Enrico Fermi louaient en privé ce talent comme sa « formidable intuition ».

En vérité, cet élément qui, dans la présentation habituelle, n'est pas mentionné dans notre boîte à outils, bien qu'il soit familier aux historiens des sciences, c'est l'intuition innée de certains scientifiques dont la réponse pourrait prendre la tournure suivante : comment, en premier lieu, planifier le projet de recherche, quel bond imaginatif tenter au tout début de la recherche.

Ma présentation examinera quelques exemples de ce talent spécial, principalement à partir des travaux et des écrits de savants qui y excellèrent, parmi lesquels Henri Poincaré, Albert Einstein, Werner Heisenberg et Enrico Fermi – tout en mentionnant certains problèmes persistants qui méritent d'être discutés, par exemple les théories concernant les sources de l'intuition. Dans la section finale, nous aurons à aborder la transformation de l'idée classique et de l'usage de l'intuition que la mécanique quantique a imposée en physique.

II) Pour débiter, avouons qu'il y a un paradoxe embarrassant. La science est assurément une des entreprises intellectuelles les plus couronnées de succès. Pourtant, il n'y a pas d'accord quant au secret de sa méthode. Il serait sûrement utile de partager un tel savoir avec d'autres activités, peut-être de moindre réussite, telles que la politique et plus encore la sociologie ; ce fut l'espoir de John Stuart Mill, dans son « Système de Logique », et de bien d'autres jusqu'à maintenant. Mais, alors que durant leurs premières années d'apprentissage, les scientifiques arrivent à attraper de leurs instructeurs les trucs du métier et même l'important « penchant » pour un type de recherche, (- ainsi que l'exprime le physicien I.I. Rabi : « Il connaît déjà les paroles, il a encore à apprendre la mélodie » -) il n'y en a guère qui apprennent explicitement, par quelque cours ou entraînement, une « méthodologie », une démarche progressive à propos de « comment faire de la recherche ». En effet, il se pourrait bien que l'apprentissage le plus explicite qu'ils reçoivent les conduise à écarter de leurs publications toute présentation des processus de pensée qui les menèrent à leurs résultats et, au lieu de cela, selon le conseil de Louis Pasteur, à « les faire apparaître comme inévitables ». Bien sûr, des philosophes, de Francis Bacon à nos jours, ont écrit avec éloquence sur la méthode scientifique ainsi qu'ils la perçoivent ; mais il n'y a guère de scientifiques pour les lire. Pour la plupart des savants, leur « méthode » peut-être résumée par un passage bien connu du livre « Reflections of a physicist » (1955) de

³ Le traducteur a bénéficié de la collaboration involontaire et précieuse de précédents traducteurs d'Einstein, Hadamard, Heisenberg, Kant... et de Poincaré qui eut le bon goût d'écrire plutôt en français. Les [...] signalent des additions de son cru, et dont il assume donc la responsabilité

P.W. Bridgman (un des derniers physiciens-philosophes, qui reçut en 1946 le Prix Nobel pour avoir, pratiquement à lui seul, créé la physique expérimentale des hautes pressions). J'ai la chance d'avoir appris mon métier de physicien en étant son étudiant et j'ai connu, de première main, son vif intérêt pour la philosophie de la science. Mais à la fin, il écrivit : « la méthode scientifique, pour autant qu'il s'agisse d'une méthode, n'est rien de plus que : faire tout son possible avec son intellect, tous les coups sont permis ».

On peut en apprendre un peu plus en observant les savants au travail et en lisant leurs textes destinés à un public plus large, ou d'un caractère plus général. Ce qui ressort d'un tel examen est que, selon la plupart des auteurs, pour être aussi sûr que possible, le raisonnement scientifique doit en premier lieu être *inductif* ; ce qui signifie simplement, dans sa forme la plus primitive : être fondé sur l'expérience et la mise à l'épreuve, couche par couche, et pas à pas, d'hypothèses logiquement reliées, testables, jusqu'à ce qu'on atteigne le domaine d'une théorie – ou d'une loi – souveraine.

On peut l'admettre, dans ce procès supposé qui part des données sensorielles pour aboutir aux vastes généralisations, s'introduisent souvent des erreurs humaines ; ce procès n'est pas aussi faillible qu'on a l'habitude de le penser. Mais une raison pour la large, quoique tacite, acceptation de l'induction fut héritée du positivisme ou de l'empirisme logique qui régnèrent, par exemple, en physique sous l'influence d'Ernst Mach qui, dénonçant les traces métaphysiques dans nos concepts et processus de pensée, prônait, comme fondation alternative d'une bonne science, des descriptions basées sur les sensations.

L'un des admirateurs de Ernst Mach fut, dans ses tout premiers et magnifiques travaux, Albert Einstein. (À la fin d'une de ses lettres à Mach, du 17 août 1909, il écrivit : « je reste Votre admiratif disciple »). Et, en effet, quand on lit les premiers articles d'Einstein, on peut détecter, par exemple, la base empiriste dans le fait que, dans son texte fondateur de 1905 sur la relativité spéciale, il traite les notions d'espace et de temps de façon opérationnelle/instrumentale, c'est-à-dire en termes de perceptions sensorielles au cours des mesures.

Parmi les nombreux jeunes physiciens qui furent influencés par l'implicite méthode empiriste d'Einstein, il y eut Werner Heisenberg. Son autobiographie nous apprend qu'Heisenberg avait, très tôt, été captivé par l'oeuvre d'Einstein. Alors qu'il était encore lycéen, il lut et aima le livre populaire qu'Einstein venait, en 1917, de publier, puis il continua ensuite à étudier de près ses travaux ultérieurs. En 1925, Heisenberg publia son brillant article-brèche intitulé : « Sur la réinterprétation quantique des relations cinématiques et mécaniques ». Dans le résumé du papier, Heisenberg faisait déjà part du principe fondamental qui le guidait : « Ce travail est une tentative pour trouver des fondements pour une mécanique quantique qui se base uniquement sur des relations entre des quantités qui sont en principe mesurables ». Plus tard, il reconnut que cet aperçu crucial était un écho des jours où, étudiant à l'université, il se démenait avec la relativité. Son papier était le résultat d'une démarche de pensée de bout en bout rationaliste, sans indication de spéculations non opérationnelles. Mais une énorme surprise attendait Heisenberg. Escomptant l'approbation de ses travaux par Einstein, il sollicita de sa part une discussion (qu'il relata sous forme imprimée en 1969¹ mais qu'il m'avait auparavant décrite dans une lettre qu'il m'adressa en janvier 1966, à la suite de nos rencontres). Dans sa discussion avec Einstein, Heisenberg tenta d'attirer l'attention sur le fait qu'il ne s'occupait pas des inobservables orbites des électrons au sein des atomes, mais plutôt de la radiation observable. Il déclara à Einstein : « Puisqu'il est raisonnable de n'inclure dans une théorie que les grandeurs qui peuvent être observées, il m'a semblé naturel de n'introduire que celles-là (fréquences et amplitudes), pour ainsi dire en tant que représentantes des orbites électroniques ». Einstein répondit : « Mais vous ne croyez tout de même pas sérieusement que l'on ne peut inclure dans une théorie physique que des grandeurs observables ? ». Heisenberg poursuit son récit : « Fort surpris, je lui dis : ' Mais je pensais que c'est précisément ce que vous aviez fait pour fonder votre théorie de la relativité ! '. Einstein répliqua : ' J'ai peut-être utilisé cette sorte de philosophie, mais il n'en reste pas moins qu'elle est absurde. ' Puis vint sa célèbre formule : ' C'est seulement la théorie qui décide de ce qui peut être observé ' ».

Tout cela dut apparaître à Heisenberg comme une attaque cinglante contre ce qu'il considérait comme son orientation fondamentale, qui découlait de sa lecture des premiers travaux d'Einstein. C'est ce qui l'avait

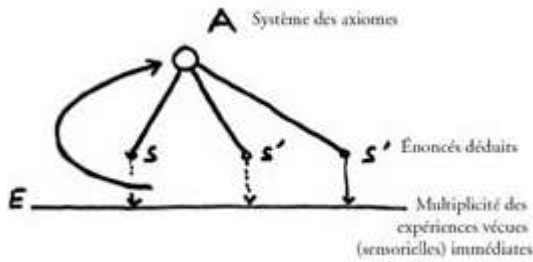
guidé depuis le début jusqu'à son plus récent triomphe. Einstein, dont Heisenberg n'avait pas remarqué l'évolution intellectuelle qui l'avait éloigné de l'instrumentalisme positiviste, se mit à lui expliquer de long en large à quel point toute observation est en général complexe, comment elle met en jeu des hypothèses sur les phénomènes, hypothèses basées à leur tour sur des théories. Par exemple, c'est presque inconsciemment qu'on utilise la théorie de Maxwell pour interpréter les comptes rendus d'expériences concernant les rayons lumineux.

Dans la lettre mentionnée plus haut qu'il m'adressa, Heisenberg ajouta une conclusion plutôt frappante : alors qu'une théorie détermine ce qui peut-être observé, le principe d'incertitude lui montre qu'une théorie détermine aussi ce qui ne peut pas être observé. Ironiquement, par cette conversation de 1926, Einstein procura à Heisenberg du « matériel génétique » pour créer, dans l'article de 1927, le principe d'incertitude. (Nous reviendrons ultérieurement sur le rôle d'Heisenberg).

III) Qu'est-ce qui avait modifié l'esprit d'Einstein, rendant « absurde » sa façon initiale de penser à propos de la physique ? Parmi ses nombreux écrits à ce sujet, j'en sélectionne deux. Dans ses *Notes Autobiographiques*, publiées en 1949, il remarqua que, bien que le livre de Ernst Mach sur l'Histoire de la Mécanique ait « exercé sur moi une profonde influence alors que j'étais étudiant » la position épistémologique de Mach « m'apparaît maintenant comme intenable, car il ne place pas sous l'éclairage correct la nature essentiellement constructive et spéculative de la pensée, et plus spécialement de la pensée scientifique ». L'état de la physique peu après 1900 lui montre que ni la mécanique, ni la thermodynamique ne pouvaient « prétendre à l'exactitude ». En conséquence, il en arriva à une décision fondamentale qui guida de plus en plus son travail : « Je me mis bientôt à désespérer de la possibilité de trouver de vraies lois par des efforts constructifs à partir de faits connus (c'est-à-dire : par induction). Et plus j'essayais désespérément, plus j'en arrivais à la conviction que seule la découverte d'un principe formel universel pouvait nous conduire à des résultats assurés. L'exemple que je voyais devant moi était la thermodynamique ». Cela le conduisit à la découverte du principe de relativité que, rétrospectivement, il considérait maintenant avoir été « dès le tout début... intuitivement clair ».

Ce thème est répété ailleurs dans les *Notes Autobiographiques* ; par exemple : « Concepts et propositions n'acquièrent de « sens » ou de « contenu » que grâce aux rapports qu'ils entretiennent avec les expériences sensibles. La relation à ces dernières n'est pas elle-même de nature logique, mais de nature purement intuitive. C'est le degré de certitude avec lequel cette relation peut-être établie, et rien d'autre, qui différencie les vaines élucubrations de la « vérité » scientifique... Bien que les systèmes conceptuels soient, d'un point de vue logique, totalement arbitraires, ils n'en sont pas moins soumis à un objectif : permettre d'établir une coordination aussi (intuitivement) certaine et complète que possible avec la totalité des expériences sensibles ».

IV) Dans l'une de ses lettres les plus intéressantes, Einstein expliqua clairement sa découverte du rôle de l'intuition dans la pensée scientifique. Il répondait à une réclamation d'un de ses plus vieux amis, Maurice Solovine, qui [ayant trouvé peu clair un passage de « *Out of My later Years* »] lui demandait en substance : ' Dites-moi une fois de plus, comment vous pensez en science ? ' La réponse d'Einstein (lettre du 7 mai 1952) contient une explication digne d'être retenue des rôles respectifs de l'expérience sensible, de l'intuition et de la logique dans le fonctionnement de l'imagination. Il sera facile de comprendre pourquoi je suis souvent revenu à ce passage de la lettre d'Einstein. Il commence son explication à Solovine par la phrase : « Schématiquement, je vois le problème de cette façon ». Suit alors un diagramme, ce qui n'est pas surprenant quant on sait la préférence d'Einstein pour la pensée visuelle. Dans une esquisse à la fois puissante et simple, Einstein concentre en quelques lignes une grande richesse d'information. Le diagramme décrit un processus essentiellement cyclique, commençant là où il devrait finir :



« 1. Les E (expériences vécues) nous sont données » Cela se réfère à la ligne horizontale en bas de la figure, marquée E et étiquetée : « Multiplicité des expériences vécues (sensorielles) immédiates ».

Cette ligne E est plutôt décevante. Elle représente en fait un plan dans lequel les divers points, pris ensemble, sont là pour la « totalité du fait empirique ». Il s'agit là d'un véritable labyrinthe d'impressions sensorielles, une diversité chaotique qui, d'une certaine manière, peut-être maîtrisée en y édifiant une structure de pensée qui apporte relation et ordre. Ensuite, ainsi que le montre le diagramme, s'élevant depuis une zone située juste au dessus de la portion du chaos des observables sur E, se trouve un arc-flèche qui atteint le sommet du schéma. Cela symbolise ce qu'on peut nommer un bond platonicien hardi, une tentative « largement spéculative », un « tâtonnement constructif » ou un saut désespéré de l'imagination quand il semble ne pas exister d'autres voies. La pointe de la flèche atteint une entité bien marquée étiquetée « A, système des axiomes ».

Pour donner une explication, Einstein écrit : « 2. A sont les axiomes d'où nous tirons des conséquences. Psychologiquement, les A reposent sur les E. Il n'y a cependant pas de voielogique des E jusqu'aux A, mais seulement une connexion intuitive (psychologique), toujours ' sujette à révocation ' ».

Quelle courageuse (et dangereuse) conception ! L'échelle de J.S. Mill, au moyen de laquelle la généralisation découlait par induction d'un ensemble d'observations, est retirée. Einstein dit ailleurs (dans son livre *Ideas and Opinions*) que cela ne convient qu'à « la jeunesse de la science ».

Le reste va de soi : à partir du système axiomatique de principes fondamentaux, postulés sur base de conjecture, supposition, « inspiration », « pari » ou « pressentiment », suivant les trois lignes descendantes, les déductions (vers les énoncés déduits S, S', S') dont Einstein suggère qu'elles peuvent être obtenues à partir du système des axiomes au moyen des procédés logiques appris à l'école. Et depuis ces énoncés déduits, en boucle, on peut alors regarder vers le bas la totalité des expériences afin de voir s'ils sont en cohérence avec ce qui peut être observé. (Cela ne marche pas nécessairement du premier coup, au premier tour – le diagramme est une sorte de sténographie pour une série cybernétique, autocorrectrice, de tentatives visant la découverte finale des bons axiomes, lois, principes). [Cette interprétation permet de ne pas considérer la répétition de l'énoncé S' comme une bévue, un lapsus calami : cet énoncé est obtenu au terme de deux déductions successives, la seconde profite des retours du premier examen de cohérence avec les observables ; apparemment le second examen de cohérence renforce l'adéquation de S' : la flèche descendant vers E est en trait plein, ce qui n'était pas le cas la première fois...].

C'est bien sûr cet arc, ce bond (que l'on pourrait étiqueter J) qui, au cours du processus « privé » de construction théorique, symbolise le précieux moment de plus grande énergie et de plus grande pénétration. Il y a en effet un parallèle étrange entre le processus décrit dans la figure et le modèle qu'Einstein proposa pour expliquer la motivation de la recherche en tant que telle. Ainsi qu'Einstein l'exprime (dans *Ideas and Opinions*), pour échapper au chaos dans le monde de l'expérience, le scientifique, le savant ou l'artiste bâtit une « image simplifiée et claire du monde » en y déplaçant le « centre de gravité de sa vie émotionnelle ».

V) Henri Poincaré, magnifique mathématicien-physicien, n'aurait pas non plus, lui qui était d'un naturel conservateur, mentionné le mot « intuition » dans les écrits scientifiques qu'il publiait. Mais, tout

comme dans le cas d'Einstein, ce terme apparaît dans les articles et livres qu'il destinait au grand public. C'est là qu'il nous permet de voir les idées saisissantes qu'il avait sur la psychologie de l'invention et de la découverte. Aussi familières que certaines puissent être, elles n'en méritent pas moins d'être mentionnées ici, tant elles sont captivantes.

Je me réfère, avant tout, à la conférence qu'Henri Poincaré tint à Paris, en 1908, devant la Société de Psychologie. (Cette conférence sur « L'invention Mathématique » constitue le troisième chapitre de « *Science et Méthode* », récemment réédité par les soins des Archives Henri Poincaré aux éditions KIME 2). Le subtil mathématicien que fut Jacques Hadamard estimait que cette conférence « avait jeté une lumière éblouissante sur les rapports entre le conscient et l'inconscient, entre le logique et le fortuit, rapports qui sont à la base du problème (de l'invention dans le domaine mathématique) ». En fait, Poincaré conta l'histoire de sa première grande découverte, la théorie des fonctions fuchsiennes et des groupes fuchsien. Il avait attaqué le sujet, deux semaines avant cette découverte, avec une stratégie – typique en mathématiques – : tenter de démontrer que de telles fonctions *ne pouvaient pas* exister. Dans sa conférence, Poincaré raconte : « Un soir, je pris du café noir, contrairement à mon habitude, je ne pus m'endormir : les idées surgissaient en foule ; je les sentais comme se heurter, jusqu'à ce que deux d'entre elles s'accrochassent, pour ainsi dire, pour former une combinaison stable ». Au cours de cette nuit d'insomnie, il trouva qu'il pouvait en fait bâtir une classe de telles fonctions, sans toutefois savoir encore comment les exprimer sous une forme mathématique adéquate.

Poincaré donne plus de détails : « A ce moment, je quittai Caen, où j'habitais alors, pour prendre part à une course géologique... Les péripéties du voyage me firent oublier mes travaux mathématiques ; arrivés à Coutances, nous montâmes dans un omnibus pour je ne sais quelle promenade ; au moment où je mettais le pied sur le marche-pied, l'idée me vint, sans que rien de mes pensées antérieures parût m'y avoir préparé, que les transformations dont j'avais fait usage pour définir les fonctions fuchsiennes étaient identiques à celles de la géométrie non-euclidienne. Je ne fis pas la vérification ; je n'en aurais pas eu le temps, puisque, à peine assis dans l'omnibus, je repris la conversation commencée, mais j'eus tout de suite une entière certitude. De retour à Caen, je vérifiai le résultat à tête reposée pour l'acquit de ma conscience ».

Poincaré analyse de telles intuitions dans ces termes : « Ce qui frappera d'abord, ce sont les apparences d'illuminations subites, signes manifestes d'un long travail inconscient ; le rôle de ce travail inconscient... Il semble que, dans ces cas, on assiste soi-même à son propre travail inconscient, qui est devenu partiellement perceptible à la conscience surexcitée... ».

Hadamard a rassemblé un certain nombre de témoignages similaires selon lesquels, à partir d'une incubation continue, souterraine au niveau subconscient, apparaît, d'une façon discontinue, dans une rupture d'une stupéfiante intensité, la solution consciente. Il mentionne Carl Friedrich Gauss, qui parle d'une telle rupture comme « éclat soudain d'un éclair » et des observations semblables par Hermann Helmholtz, Wilhelm Ostwald et Paul Langevin..., sans oublier Mozart qui, dit-on, parla un jour ainsi de la source de ses pensées musicales : « D'où viennent-elles et comment ? Je n'en sais fichtre rien – et je n'en ai rien à cirer ! » [Sacré Mozart, va !].

Poincaré lui-même exprime ainsi sa perplexité quant à la source de ses idées. Il confesse, toujours dans sa conférence de 1908 : « Je suis absolument incapable de faire une addition sans faute. Je serais également un fort mauvais joueur d'échecs ». Mais il déclare aussi : « [Si] j'ai le sentiment, l'intuition pour ainsi dire de cet ordre, de façon à apercevoir d'un coup d'œil l'ensemble du raisonnement, [je ne dois plus craindre d'oublier l'un des éléments...] ». Il célèbre « cette intuition de l'ordre mathématique, qui nous fait deviner des harmonies et des relations cachées ». Certainement, après l'intuition vient le labeur : « Inventer, c'est discerner, c'est choisir ». Mais, pour cela, il faut accorder une priorité à « notre sensibilité émotionnelle » en privilégiant « phénomènes inconscients », « beauté », « harmonie » et « élégance ». A la fin, Poincaré revient, dans cet exposé populaire de sa théorie de la découverte et de l'innovation à leur source principale, qu'il appelle « sensibilité esthétique ». Les artistes qui l'ont lu ont dû se sentir en forte résonance sympathique avec cette présentation.

Poincaré avait déjà discuté antérieurement la nature de la découverte, particulièrement dans son recueil de 1902 « *La Science et l'Hypothèse* ». Il fit une remarque qui, à l'époque, secoua le milieu : il notait que les concepts et les hypothèses ne nous étaient pas donnés uniquement par la nature elle-même, mais que, dans une large mesure, il s'agissait de conventions choisies par un chercheur particulier selon des raisons de commodité, et orientées par des « prédilections » personnelles. Il poursuivit : « Nous concluons donc que les principes de la géométrie ne sont que des conventions ; mais ces conventions ne sont pas arbitraires ». Et, dans le cas particulier de la physique, toute présupposition commode aurait encore, le cas échéant, à passer ce test : servir à expliquer des phénomènes observables.

Une part significative de « *La Science et l'Hypothèse* » était la seconde partie, constituée de trois chapitres consacrés aux géométries non-euclidiennes et à celles de dimensions supérieures. Dans ces pages, on ne trouve ni équations, ni figures, mais des prouesses d'analogie pour tenter d'expliquer les choses. Un seul exemple, célèbre : pour parvenir à rendre plausible l'espace d'une géométrie à plus de trois dimensions, Poincaré introduisit une distinction entre l'espace géométrique et l'espace conceptuel ou « représentatif ». Ce dernier a trois manifestations : l'espace visuel, l'espace tactile et l'espace moteur. Cet espace moteur est celui dans lequel nous effectuons nos mouvements, ce qui le conduisit à écrire, en italiques : « *L'espace moteur aurait autant de dimensions que nous avons de muscles* ». Et cela nous remet ceci en mémoire : Nos muscles, notre corps tout entier, abritent à foison des intuitions non-rationnelles – qui vont de la manière d'enfiler un imperméable jusqu'aux exploits quasi-surhumains des athlètes, des musiciens et des danseurs de ballet.

VI) Je vais maintenant me tourner vers un grand physicien qui, tous ceux qui l'ont connu en conviendraient, était tout ce qu'il y a de plus rationnel et de moins intéressé par les problèmes philosophiques : Enrico Fermi. Il fit, au début de l'année 1934, sa sensationnelle découverte scientifique lorsqu'il décida que lui et son équipe de recherche à Rome devraient employer des faisceaux de neutrons afin d'induire de la radioactivité dans les éléments de la table périodique. A ce groupe romain est dû un travail vraiment excellent, publié en un grand nombre d'articles dans un journal italien, si bien que le physicien I. I. Rabi aurait, dit-on, donné ce conseil : « Bon ! Eh bien, maintenant, il faut nous mettre tous à apprendre l'Italien ». Mais, vers la mi-octobre 1934, la situation dans leur laboratoire commença à se détériorer. Une étrange inconsistance surgit dans les résultats de l'irradiation des cibles avec les faisceaux neutroniques. Les relevés instrumentaux qu'ils obtenaient se trouvaient dépendre des tables sur lesquelles les équipements étaient placés – une table était en bois, l'autre, pas très éloignée, était une plaque de pierre. Quand l'expérience de radioactivation d'une cible d'argent était effectuée sur la première table, on obtenait une radioactivité notablement plus élevée que lorsque la même expérience avait lieu sur l'autre table, le support de marbre. Pour baptiser cela, le groupe trouva une expression fameuse : « le miracle des deux tables ».

Afin de découvrir le fin fond de l'histoire, Fermi entreprit, à partir du 18 octobre 1934, un ensemble systématique d'observations et le journal de bord du laboratoire a été conservé. Le groupe raisonna : peut-être le boîtier de plomb affectait-il les neutrons qui atteignaient la cible dans ces deux cas, et il observa que l'interposition d'un bloc de plomb modifiait quelque peu l'activation. Fermi décida alors d'insérer dans le faisceau de neutrons un filtre de plomb, un coin d'épaisseur variable. L'étonnant compte rendu des événements de la matinée de ce jour crucial (22 octobre 1934) que fit plus tard Fermi à son collègue S. Chandrasekhar fut publié par les soins de ce dernier, et, ce qui figure dans le dernier paragraphe de cette publication, essentiel, fut répété mot à mot par d'autres proches de Fermi, tels que Edoardo Amaldi et Emilio Segré, dans leurs écrits historiques. Qu'il me soit permis de citer ce paragraphe parce que nous aurons à en faire une analyse.

« Je vais [dit Fermi] vous conter comment j'en vins à faire la découverte que je suppose être la plus importante que j'ai faite. Nous travaillions très dur sur la radioactivité induite par les neutrons et les résultats que nous obtenions n'avaient pas de sens. Un jour, alors que j'allais au laboratoire, l'idée me vint que je devrais examiner l'effet du placement d'un morceau de plomb devant les neutrons incidents. Et, contrairement à mon habitude, je me donnai du mal pour que la pièce de plomb soit usinée avec précision.

J'étais manifestement insatisfait de quelque chose : j'essayai toute « bonne excuse » pour remettre à plus tard la mise en place du morceau de plomb. Quand finalement, à contrecœur, j'allai la placer, je me dis : Non ! Ce n'est pas du plomb que je veux, c'est de la paraffine. C'était comme cela : sans avertissement, sans raisonnement conscient, préalable. Je pris immédiatement le premier morceau de paraffine que je pus saisir et l'installai là où aurait été le morceau de plomb ».

Le résultat fut aussitôt évident : une forte augmentation de la radioactivité induite sur la cible, et cela même si l'expérience avait lieu sur la plaque de marbre. Comme le rappelle Segré dans son autobiographie, ce jour-là vers midi « tout le monde fut convoqué pour observer l'effet miraculeux du filtrage par la paraffine. Et c'est dans une extrême perplexité que nous rentrâmes chez nous pour le déjeuner et notre sieste habituelle... Quand nous revînmes vers trois heures de l'après-midi, Fermi avait trouvé une explication à l'étrange comportement des neutrons filtrés. Il fit l'hypothèse que les neutrons pouvaient être ralentis par des collisions élastiques [avec les noyaux d'hydrogène dans la paraffine], et devenir ainsi plus efficaces – une idée contraire à notre attente ». C'était, en effet, une rupture avec l'histoire précédente dans ce domaine.

Comme Edoardo Amaldi le nota, ce fut seulement plus tard que fut établie la loi « $1/v$ », c'est-à-dire la loi selon laquelle la section efficace de capture des neutrons est inversement proportionnelle à leur vitesse (si elle est faible). Mais, désormais le miracle des deux tables était démasqué. Car Fermi réalisait maintenant que, lors des premières et troublantes expériences d'irradiation d'un échantillon d'argent, une partie du faisceau neutronique était d'abord passé dans la table de bois, où les noyaux d'hydrogène avaient fortement ralenti les neutrons (qui sont presque de la même masse), puis que certains de ces neutrons lents avaient été dispersés sur la cible d'argent en y produisant l'effet inattendu. Par contre, les noyaux lourds dans le marbre de l'autre table ne pouvaient guère produire un tel effet. On répéta rapidement l'expérience en utilisant de l'eau au lieu de la paraffine, et l'hypothèse initiale de Fermi fut ainsi confirmée.

Immédiatement, toute la profession sut que le groupe romain avait franchi une nouvelle frontière. Ce fut un moment culminant pour l'équipe de Fermi et il s'avéra que c'en était un aussi pour le monde sur son chemin vers un futur incertain (car la découverte de Fermi fut, plus tard, essentielle pour la construction des réacteurs nucléaires – déclenchant en effet ainsi l'âge nucléaire).

Pour ce qui est de Fermi, la préparation et l'usage des neutrons lents, entre autres pour la fabrication de nouveaux éléments radioactifs, fut reconnue dans la formulation de la citation de son Prix Nobel : « pour sa révélation de nouveaux éléments radioactifs produits par irradiation neutronique et pour la découverte reliée de réactions nucléaires provoquées par les neutrons lents ».

Mais, dans cette histoire, il y a une énigme lancinante. Fermi avait, comme je l'ai dit, la réputation d'être le plus rationnel des savants ; pourtant ce n'est ni par accident, ni par hasard, mais bien par un acte de détermination soudaine, qu'il place cette pièce cruciale de paraffine devant la source de neutrons, « sans crier gare, sans raisonnement conscient préalable ». Pourquoi fit-il cela, lui, le moins impulsif des physiciens ? Une partie de la réponse est de nouveau, à mon avis, qu'il existe chez certains esprits brillants une sorte d'intelligence intuitive qui peut les guider secrètement, pour le meilleur et pour le pire, lors des phases primales de leur recherche.

Michel Polanyi, qui est à la fois un scientifique et un philosophe, a (par exemple dans son livre *Personal knowledge*) écrit abondamment sur ce qu'il a appelé la « connaissance tacite » des savants, une connaissance qui est le produit d'une longue immersion, ou « habitation », dans leur sujet de recherche. Cette vision des choses était aussi claire pour Einstein : dans un essai de 1918, *Les motifs de la recherche*, il écrivit : « Aucune voie logique ne mène à ces lois élémentaires ; seule y mène l'intuition soutenue par une sorte de sympathie avec l'expérience, (Einfühlung in die Erforschung) ». Polanyi a résumé cela en une simple phrase : « Nous savons plus que nous ne pouvons exprimer ». Peter Brian Medawar, faisant écho à Poincaré, notait : « L'intuition prend beaucoup de formes différentes en science et en mathématiques, cependant ces formes ont en commun certaines propriétés : la soudaineté de leur origine, la plénitude de la conception qui y est incorporée, et l'absence de préméditation consciente ». Le savant néerlandais Peter

Debye a eu lui aussi un avis pénétrant sur le processus de découverte scientifique : « Notre science est essentiellement un art qui ne pourrait vivre sans l'éclair de génie qui, de temps à autre, se produit dans l'esprit de quelque homme réceptif qui, sensible à la moindre indication, connaît la vérité avant même d'avoir la preuve ».

Ainsi pourrait-on comprendre que lorsque la main de Fermi atteignit ce « drôle de bout de paraffine » au lieu du coin de plomb, il fut guidé par une supposition qui, à cet instant, était en dessous du niveau de la conscience, mais résultait de sa connaissance intime de la physique du neutron, une connaissance élaborée durant deux ans d'étude intensive, de discussions et d'expérimentations avec la neutronique. Comme l'a montré le Professeur De Gregorio, Fermi pourrait bien avoir lu auparavant des publications de 1932-1933 dans lesquelles étaient discutés les neutrons lents et les effets des substances hydrogénées sur les neutrons ; Fermi avait par ailleurs participé à la conférence Solvay de 1933 où ces questions furent abordées.

Mais il est significatif que personne, en dehors de Fermi et de son groupe, ne se soit engagé dans le programme intensif de production de radioactivité artificielle, d'abord, pendant plusieurs mois, au moyen de neutrons rapides, et ensuite, à partir de cette matinée d'octobre 1934 (quand Fermi fut capable d'exploiter les ressources qu'il avait jusqu'alors glissées sous le niveau conscient), avec des neutrons lents. En fait, le récit rapporté par Chandrasekhar était une partie d'un texte plus long qui révèle que la discussion avec Fermi avait commencé précisément avec une considération sur le rôle des idées « subconscientes » dans le travail scientifique créatif.

Nous disposons d'autres témoignages sur des situations où Fermi fut capable de tirer, de ressources cachées, des réponses aux questions auxquelles il se trouvait confronté. Ainsi, Herbert Anderson a relaté qu'à un moment crucial, quand, en 1939, à l'Université Columbia, démarraient les difficiles travaux sur la possibilité d'une réaction en chaîne, « Fermi demanda qu'on le laissât seul pendant vingt minutes » puis qu'il sortit avec une estimation grossière de l'effet d'absorption résonante pour l'uranium. Anderson ajoute que cette estimation, que l'on put prouver être correcte, « était en grande partie intuitive. Fermi, pour ces choses-là, ne se trompait jamais... » ; et on peut imaginer quel effet bénéfique un tel talent avait sur le groupe de Fermi. On crédite par ailleurs Fermi d'avoir aidé les ingénieurs du réacteur pour obtenir d'autres estimations grossières de données non encore mesurées, telle que la section efficace de collision nucléaire.

En tout cas, dans le discours officiel que prononça le Professeur Hans Pleijel, de l'Académie Suédoise, lors de la remise du Prix Nobel à Fermi en décembre 1938, ce mot crucial fut aussi mentionné. Devant l'audience rassemblée, Pleijel déclara ce qui suit : « À côté des découvertes significatives de Fermi et, dans une certaine mesure, sur le même rang, on peut placer son talent d'expérimentateur, sa brillante inventivité et son intuition... qui jette un éclairage nouveau sur la structure des noyaux atomiques et ouvre de nouveaux horizons pour le développement futur de la recherche atomique ».

VII) Finalement, nous revenons à Werner Heisenberg qui, après l'entretien avec Einstein et les oreilles lui sonnent encore de la phrase « Seule la théorie décide de ce qu'on peut observer », se mit à publier des articles qui ébranlèrent le monde, dont ceux sur le principe d'Incertainité. Nous retournons vers lui parce que ces articles ont tourné le concept d'intuition en physique dans une direction tout à fait nouvelle. Il était l'homme qu'il fallait pour le faire, et ce dès le début. À vingt ans, il s'était lancé dans un projet de théorie quantique qui n'utiliserait que les demi-entiers. À l'inquiétude de son ami Wolfgang Pauli, Heisenberg répliqua avec sa confiance habituelle « Der Erfolg heiligt die Mittel » (« le succès sanctifie les moyens » ou, plus faiblement : « La fin justifie les moyens »). En fait ç'aurait pu être sa devise sa vie durant. Quand il persuada le jeune Heisenberg de le rejoindre à son Institut de Copenhague, Niels Bohr lui avoua qu'à l'origine il n'avait pas élaboré ses modèles atomiques en mariant des idées quantiques à la mécanique classique.

Cela lui était venu intuitivement, en tant qu'images représentant des événements dans un atome. Ce qui s'appliquait particulièrement à sa conception des trajectoires définies des électrons autour du noyau, qui étaient des extrapolations à partir d'événements observés dans la vie quotidienne. De même pourrait-on

visualiser intuitivement les quanta de lumière en termes de bulles ou paquets d'énergie. Cependant, la lumière possède aussi des propriétés d'ondes. Comment pourrait-on imaginer ensemble les deux aspects ? Par le passé, la possibilité de visualisation intuitive avait toujours été d'un grand secours. Mais, au début des années 1920, cette possibilité devenait très problématique.

Un événement-clé pour la solution du casse-tête fut la publication de cet article de 1925 qui, comme Heisenberg l'expliqua à Einstein l'année suivante, avait été mis en route selon la vieille tradition d'une physique basée sur les expériences sensibles. Heisenberg en avait banni complètement le concept d'orbite électronique, inobservable quoique « visualisable », ainsi que d'autres « images » de ce genre, et mis à la place un schéma mathématique, adapté pour refléter les *données* (par exemple les fréquences et les intensités observables). Il déclara qu'à l'« *Anschauung* » habituelle, dérivée de conceptions, en principe (et à nos yeux) continues, de l'espace-temps ordinaire, devait être substituée, lorsqu'on pensait à propos du domaine atomique, une nouvelle « *Anschaulichkeit* », nécessitée par la physique quantique. La réalité devait se rapprocher d'une description mathématique. Comme Heisenberg le déclara plus tard, dans son livre *Physique et Philosophie* (1958), « le physicien doit se replier sur le schéma mathématique », c'est là que règne la nouvelle « *Anschauung* ».

Un de ses articles fondamentaux (1927) arbore même le titre : « *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik* » (« Les contenus intuitifs de la cinématique et de la mécanique quantiques »). Certains lecteurs pourront être pris de perplexité devant des termes tels que « *Anschauung* ». Ce qui voudrait dire qu'ils ont échappé à la lecture de la *Critique de la Raison Pure* (*Kritik der reinen Vernunft*), ce livre extraordinairement complexe et important d'Emmanuel Kant, auquel pratiquement tous les physiciens germanophones (et un certain nombre d'autres), au XIX^{ème} siècle et au début du XX^{ème}, ont été confrontés (quand ce n'était pas au cours de leurs études, c'était avant : Einstein le lut pour la première fois à l'âge de treize ans, Mach à seize...).

Kant, philosophe et admirateur de la science newtonienne, signa la préface de son livre le 23 avril 1787, et, à partir de ce jour, grandit la conviction que c'était seulement en termes de conceptions intuitivement visualisables, (rapportées à l'expérience et à l'objet) que la vraie science pouvait parvenir à l'esprit de quelqu'un. Le dictionnaire allemand du début du XX^{ème} siècle définissait encore « *Anschauung* » comme « vision intuitive ; intuition ». Et Kant lui-même, au tout premier paragraphe – après l'Introduction – de sa *Critique*, dans la section qui commence avec l'analyse de l'espace et du temps, assène sur ce sujet une déclaration analogue au fracas de cymbales du début du « *Also sprach Zarathustra* » de Richard Strauss : « De quelque manière et par quelque moyen qu'une connaissance puisse se rapporter à des objets, le mode par lequel elle se rapporte immédiatement à eux et que toute pensée prend comme moyen pour les atteindre est l'intuition (*Anschauung*). Mais cette intuition (*Anschauung*) n'a lieu qu'autant que l'objet nous est donné, et, à son tour, l'objet ne peut nous être donné, du moins à nous autres hommes, qu'à la condition que l'esprit soit affecté d'une certaine manière ».

Pour Heisenberg, qui considérait que « la fin justifie les moyens », on pouvait remettre Kant « à jour » et remplacer l'« objet » par les schémas mathématiques. À ses collègues, à commencer par Niels Bohr et Max Born, il fallut un certain temps pour s'y habituer. Erwin Schrödinger avouait courageusement en 1926 « J'ai pris bien sûr connaissance de cette théorie (d'Heisenberg), mais je me suis senti découragé, pour ne pas dire rebuté, par la méthode d'algèbre transcendantale, qui semblait très difficile à utiliser, et par le manque d'*Anschaulichkeit* ».

Il ne semble pas que les américains aient éprouvé ce genre de problème. En février 1929, une tournée de conférences aux États-Unis conduisit Heisenberg à Chicago. À son habitude, il exposa ses nouvelles idées aux physiciens, et fut surpris qu'elles aient été reçues sans opposition. Il confia (comme il le raconte dans *Physics and Beyond*) à un jeune scientifique Américain, « l'étrange impression qu'il avait acquise durant cette tournée : alors que les Européens étaient généralement opposés et souvent ouvertement hostiles aux aspects abstraits, non figuratifs, de la nouvelle théorie atomique », la plupart des américains l'acceptaient « sans trop de réserves ». Son ami Américain, qui, clairement, n'était redevable en rien à Kant et son «

Anschaulichkeit », expliqua « Nous voyons les choses beaucoup plus simplement ». Tant que ça marche, on ne doit pas « commettre l'erreur de traiter les lois de la nature comme des absolus... Je peux voir que ça arrive dans la nature et c'est ça ». Heisenberg fut songeur : « J'eus la nette impression que ma façon de penser lui était plutôt étrangère ». Il aurait pu ajouter : et vice-versa.

Cet épisode prouva que le nouvel usage de l'intuition était devenu facile à accepter par ceux qui n'avaient pas épousé les anciennes conceptions. C'est ce que nous pouvons encore observer quotidiennement dans nos salles de classes, en regardant les visages nouveaux et ouverts de nos étudiants. Les historiens des sciences se démènent pour comprendre plus complètement les mécanismes qui sont derrière tous ces exemples d'« accord anticipateur avec la nature ». J'en ai présenté ici plusieurs qui me semblent souligner, en termes graphiques, le besoin d'explorer davantage cette vaste île de fructueuse ignorance.

Ouvrages de références :

1 W. Heisenberg, *Der Teil und das Ganze*, éd. Piper (1969) – La Partie et le Tout, Ed. Albin Michel (traduction française 1972).

2 On peut aussi trouver des extraits du récit de Poincaré, commentés par Jacques Hadamard dans son *Essai sur la Psychologie de l'Invention dans le Domaine Mathématique*, Blanchard (1959).

Colloque Henri Poincaré « Science et pensée », Table-ronde 1, Ecole des Mines, Sophia-Antipolis, lundi 17 janvier 2005.

Pensée rationnelle et création scientifique chez Poincaré

Par Michel Paty#

Directeur de recherche émérite au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) (EQUIPE REHSEIS, UMR 7596, CNRS et Université Paris 7-Denis Diderot), Paris, France ; et Professor Visitante, Departamento de Filosofia, FFLCH, Universidade de São Paulo (SP), Brasil. Courriel : paty@paris7.jussieu.fr

RÉSUMÉ.

On éclaire le « style » d'Henri Poincaré en physique théorique et mathématique, en prenant le cas de sa formulation théorique de l'électrodynamique relativiste, et de la place qu'y tient le principe de relativité ; dans ce travail créateur, le rapprochement et le contraste avec celui parallèle d'Einstein s'impose. On évoque ensuite ce que l'oeuvre et la pensée de Poincaré apportent de nouveau, dans le champ philosophique, concernant le problème de la création scientifique et de son rapport à la rationalité.

MOTS-CLÉS. Création scientifique, Electrodynamique, Intuition, Invention, Mathématiques, Philosophie, Physique mathématique, Physique théorique, Rationalité, Relativité (Principe de).

*

Je voudrais poser, à partir de la pensée et de l'oeuvre d'Henri Poincaré, le problème du rapport entre la rationalité et la pensée créatrice en mathématiques et en physique mathématique et théorique. Je considérerai tout d'abord son travail en physique mathématique et théorique, en m'arrêtant sur sa pensée de l'électrodynamique et du principe de relativité. J'aborderai ensuite l'aspect réflexif de la pensée de Poincaré sur le thème de la création scientifique, qui fait de lui l'un des premiers à s'être préoccupé d'une philosophie de la création selon la rationalité.

Rationalité et pensée créatrice en mathématiques et en physique mathématique et théorique

Prises séparément, les deux expressions, « pensée rationnelle » ou « rationalité » d'une part, et « création scientifique » d'autre part, seront acceptées sans difficulté, sinon en général, du moins concernant l'oeuvre d'Henri Poincaré. La pensée rationnelle est évidemment impliquée dans la recherche scientifique, notamment en mathématiques et en physique. Que le travail de Poincaré soit, en outre, un travail de création mathématique et physico-mathématique, c'est encore une affirmation qui sera peu contestée, et l'on se plait généralement à saluer l'aspect créatif et créateur de sa pensée, notamment mathématique.

Mais que la création mathématique ou scientifique en général soit directement liée à la rationalité, voire que l'on puisse parler de *création rationnelle* à propos des sciences, c'est là une proposition qui sera bien loin de faire l'unanimité⁴. Pour beaucoup, et notamment dans les courants dominants de la philosophie de la connaissance du XX^e siècle, du positivisme logique à la philosophie analytique en passant par le rationalisme critique poppérien, la part créatrice de la pensée scientifique se tient entre deux états de pensée (de connaissance) caractérisables rationnellement, dont la philosophie analyse les propositions, celui de la connaissance antérieure et celui de la connaissance actuelle.

Mais le moment créateur lui-même échapperait définitivement, par nature, à l'analyse rationnelle et relèverait donc de l'irrationnel, psychologique ou social. N'évoquons à ce sujet que les déclarations explicites dans ce sens de Karl Popper, et la distinction de Hans Reichenbach entre contexte de découverte et contexte de justification, le second seul étant approprié selon lui à l'approche rationnelle de la philosophie, distinction qui a fait longtemps et fait encore souvent autorité^{5 6}

⁴ Paty, M. [1999c], La création scientifique selon Poincaré et Einstein, in Serfati, Michel (éd.), *La recherche de la vérité*, Coll. « L'Écriture des Mathématiques », ACL-Éditions du Kangourou, Paris, 1999, p. 241-280.

⁵ Popper, Karl [1935], *Logik der Forschung. Zur Erkenntnistheorie der modernen Naturwissenschaft*, Springer Verlag, Wien, 1934. Ré-éd.avec additions, 1959 ; 1968. Trad. angl., *The logic of scientific discovery*, 1959 ; 1968 ; trad. fr. par Nicole Thyssen-Rutten et Philippe Devaux, *La logique de la découverte scientifique*, Payot, Paris, 1973. Popper, Karl [1972], *Objective knowledge, an evolutionary approach*, Clarendon Press, Oxford, 1972. Trad. fr. partielle par C. Bastyns, *La connaissance objective*, Complexe, Bruxelles, 1978.

⁶ Reichenbach, Hans [1938], *Experience and prediction*, University of Chicago Press, Chicago, 1938.

J'évoquerai tout à l'heure la pensée philosophique de Poincaré, qui semble s'inscrire par avance contre cette conception, toute centrée qu'elle est autour de l'invention scientifique, c'est-à-dire de l'activité créatrice de la pensée aux prises avec les problèmes des sciences. Je m'en tiens, pour l'instant, à son œuvre scientifique propre en mathématiques et en physique mathématique et théorique.

Ses pairs mathématiciens de l'Académie Royale de Suède avaient trouvé une formule significative pour indiquer la raison de leur couronnement de son travail sur le problème des trois corps qui connaîtrait une grande fécondité avec les développements contemporains de l'étude des systèmes dynamiques. Poincaré avait, déclaraient-ils, inauguré une « nouvelle manière de penser » en mathématiques et en physique mathématique, en jetant les bases de l'approche dite *qualitative* qui s'intéresse aux types de comportement des systèmes dynamiques et des solutions des systèmes d'équations qui les caractérisent. Cette voie neuve de l'approche qualitative et structurelle révélait davantage sur les systèmes dynamiques (non linéaires) que les solutions particulières elles-mêmes, qui sont sujettes aux effets d'amplification arbitraire de variations des conditions initiales, et ainsi imprévisibles à terme.

« Nouvelle manière de penser » : cette expression désigne, sans l'analyser explicitement, la *rationalité* (la manière de penser en mathématiques et en physique mathématique) comme l'agent et l'effet de la création de ces méthodes nouvelles et de ces nouveaux objets mathématiques.

Par delà cette reconnaissance officielle, quoique implicite, d'une *création rationnelle* par d'autres orfèvres en la matière, on pourrait reprendre l'œuvre de Poincaré, analysant son « style scientifique propre », et en caractériser les modes de rationalité et de créativité. Poincaré lui-même nous en a fourni des indications avec beaucoup de détails à propos de son invention des fonctions fuchsiennes ou automorphes⁷. L'intervention, dans le récit qu'il en a donné, de considérations psychologiques ne doit pas nous tromper : c'est aussi et surtout de rationalité qu'il est fondamentalement question. Il voyait bien lui-même comment le processus de l'invention comporte des phases en succession, alternant le travail conscient, volontaire et rationnel, de la pensée avec des phases de pensée miconscientes mi-inconscientes qui ne sont pas résolubles analytiquement : mais c'est toujours la pensée consciente et sa mise en problème (avec ses formulations de nature rationnelle) qui continue de guider le mouvement de la pensée, même au cours des phases inconscientes dans son jeu sur les symboles qui représentent les concepts. Sans pouvoir recourir aux réminiscences des moments d'invention au sens strict de notre auteur, moments du surgissement d'une idée qui n'avait jamais été pensée auparavant, qui nous sont à jamais enlevés avec les secrets de sa subjectivité, il nous reste les œuvres écrites, dans lesquelles nous pouvons tenter de retracer les chemins de l'intelligibilité suivant sa marque propre qui est celle de son style de pensée. Et ce d'autant plus que, chez Poincaré, la rédaction semble souvent reproduire dans sa spontanéité le mouvement de la pensée inventive.

On peut analyser de même ses contributions en physique et caractériser, ici encore, son *style de pensée* et de travail qui éclaire sa manière de comprendre les problèmes théoriques en rapport aux phénomènes considérés. Certes, le style de Poincaré en physique est différent de son style en mathématiques, à cause de la différence des objets considérés. (Soulignons à cet égard que Poincaré était aussi physicien à proprement parler, et que sa *physique mathématique*, comme il l'appelait, était aussi, quand l'objet l'y invitait, une *physique théorique*⁸.) Toutefois, si son style en physique diffère de son style en mathématiques, les deux s'informent mutuellement. Il lui arrive de nourrir son intuition mathématique avec la pensée de situations physiques ; et il fait généralement appel dans l'exercice de sa pensée physique, à des éléments qui viennent de sa pensée mathématique, et qui lui permettent de relier d'un coup des situations d'apparence différentes,

⁷ Poincaré, H. [1908b]. Comment on invente. Le travail de l'inconscient, *Le Matin* (Paris), 24 déc. 1908. Poincaré, H. [1908c], L'invention mathématique, *Bulletin de l'Institut Général de Psychologie*, 8^e année, 1908 (n° 3), 175-196 [Conférence à la Société de Psychologie de Paris] ; Également, *L'enseignement mathématique* 10, 1908, 359-371 ; repris dans Poincaré [1908a], *Science et méthode*, Flammarion, Paris, 1908 ; 1918 : éd. 1918, p. 43-63. Hadamard, J. [1945], *An essay on the psychology of invention in the mathematical field*, Princeton University Press, Princeton (N.J.), 1945 ; trad. fr. par Jaqueline Hadamard, *Essai sur la psychologie de l'invention dans le domaine mathématique*, Gauthier-Villars, Paris, 1975.

⁸ Paty, M [1999a]. La place des principes dans la physique mathématique au sens de Poincaré, in Sebestik, J. et Soulez, A. (éds.), *Actes du Colloque France-Autriche Paris, mai 1995, Interférences et transformations dans la philosophie française et autrichienne (Mach, Poincaré, Duhem, Boltzmann)*, *Fundamenta philosophiae* (Nancy/éd. Kimé, Paris) 3 (2), 1998-1999, 61-74.

mais structurellement semblables (il faudrait évoquer ici sa conception des « analogies mathématiques »)⁹. Ou encore il lui arrive de penser en termes de groupes, comme dans son travail sur l'électrodynamique relativiste abouti en 1905¹⁰, à propos des transformations de référentiels pour lesquelles il définit le groupe de Lorentz. Cette pensée des groupes correspond de façon éminente à une vue synthétique, qui lui permet d'accéder directement aux propriétés caractéristiques des systèmes physiques considérés (de l'addition relativiste des vitesses aux invariants des transformations de Lorentz).

Ses contributions en physique prennent généralement leur point de départ dans une étude critique des théories existantes et de leur rapport aux données d'observation ou d'expérience. Cette étude critique est une mise en place rationnelle des problèmes abordés, qui sont ainsi confrontés aux exigences de l'intelligibilité.

L'« habitus mathématique » facilite la perception synthétique par l'entendement d'éléments du problème, et Poincaré s'est souvent trouvé ainsi amené à proposer des vues originales, à souligner d'emblée la difficulté de telle théorie en vigueur, et à en indiquer des possibilités de perfectionnement ou de modifications, ou parfois simplement à déceler les limitations qui lui sont inhérentes. Par exemple, sur la nature de la lumière, qui se manifeste par des traits de phénomènes sur lesquels la « théorie mathématique de la lumière » inaugurée par Fresnel reste muette¹¹.

Considérons ce cas un peu plus en détail. La formule de Fresnel « de l'entraînement partiel de l'éther », surajoutée à sa théorie des ondes lumineuses pour rendre compte de l'aberration des étoiles et de l'expérience d'Arago sur le prisme entraîné dans le mouvement de la Terre, exprimait la modification de la vitesse de la lumière dans un milieu réfringent quand celui-ci est en mouvement. Cette modification permettait de maintenir inchangée la loi de réfraction dans le prisme en vigueur quand le prisme est en repos par rapport à l'éther, support supposé des ondes lumineuses. Le « coefficient de Fresnel » de cette formule¹² (qui intervient « au premier ordre en v/c », v et c étant, respectivement, la vitesse d'entraînement de la Terre dans son mouvement annuel et la vitesse de la lumière dans le vide) compensait pour ainsi dire, les effets du mouvement sur les lois de l'optique. L'hypothèse par laquelle Fresnel avait formulé son coefficient était basée sur un modèle de l'éther (en termes de densité de molécules du milieu éthéré, support des ondes lumineuses). Dans le cas de la double réfraction, examiné par Eleuthère Mascart, où deux rayons réfractés sont produits par un rayon incident de longueur d'onde donnée, Mascart avait trouvé que le coefficient d'entraînement partiel de l'éther, combiné avec la prise en compte de l'effet Doppler-Fizeau sur la longueur d'onde, est vérifié pour chacun des rayons déviés (le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire) avec sa longueur d'onde propre et l'indice correspondant. Au contraire, dans le modèle d'éther tel que Fresnel l'avait formulé, la réfraction des deux rayons aurait dû se faire suivant l'indice moyen. Ce trait, résultant des expériences systématiques de Mascart, effectuées en 1872-1874¹³, fut déterminant dans le choix, par Poincaré, de la théorie électromagnétique de la lumière proposée par Maxwell, dans sa version précisée par Hendryk A. Lorentz, avec des électrons vibrants comme source du champ électromagnétique et un éther immobile¹⁴.

⁹ Paty, M. [à paraître,b], L'analogie mathématique au sens de Poincaré et sa fonction en physique, in Durand-Richard, M.-J. (éd.), *Le statut de l'analogie dans la démarche scientifique*, L'Harmattan, Paris, à paraître.

¹⁰ Article paru en 1906 : voir plus bas.

¹¹ Paty, M. [à paraître,c], Poincaré et la relativité des mouvements pour l'optique, *Revue d'histoire des sciences*, à paraître.

¹² La formule de Fresnel de l'entraînement partiel est : $c'/n = c/n \pm v/c (1 - 1/n^2)$, n étant l'indice de réfraction du milieu réfringent (notation modernisée).

¹³ Mascart, E. [1872-1874], Sur les modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur, *Annales scientifiques de l'Ecole Normale Supérieure*, 2ème série, 1, 1872, 157-214 (Première partie); 3, 1874, 363-420 (Deuxième partie). Voir : Pietrocola, M. [1993], *E. Mascart et l'optique des corps en mouvement*, Thèse d'épistémologie et d'histoire des sciences, Université Paris 7-D. Diderot, 1993.

¹⁴ Maxwell, James Clerk [1873], *A treatise on electricity and magnetism* (1873); 3rd ed. (1891), 2 vols. Ré-éd., Dover, New York, 1954. Lorentz, Hendryk A. [1895], *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*, Brill; Leiden, 1895 ; également in Lorentz [1935-1939], *Collected papers*, Nijhoff, La Haye, 9 vols., 1935-1939 : vol. 5,

Pour Poincaré, d'un côté ce caractère révélait une limitation inhérente à une théorie purement mathématique de la lumière et indiquait qu'il faudrait en venir à une théorie qui se prononçât sur la nature physique du rayonnement lumineux. D'un autre côté, parmi les théories physiques de la lumière, celle de Maxwell-Lorentz obtenait comme conséquence, sans modèle particulier d'éther, le coefficient de Fresnel pour chaque longueur d'onde. L'expérience de Fizeau (effectuée en 1851), qui matérialisait, pour ainsi dire, le coefficient de Fresnel, et le résultat de Mascart qui précisait la dépendance de ce dernier en fonction de la longueur d'onde des rayons, comme on vient de le rappeler, déterminèrent donc Poincaré à choisir la théorie de Maxwell-Lorentz, de préférence aux autres théories concurrentes, et notamment celle de Maxwell-Hertz d'un éther lumineux électromagnétique totalement entraîné par le mouvement des corps dans leur voisinage. Il diagnostiquait cependant des insuffisances dans la formulation de cette théorie, qu'il énonça dès 1895, et qu'il n'eut de cesse de préciser par la suite, jusqu'à aboutir en 1905 à son résultat, parallèle à celui d'Einstein.

La voie propre de Poincaré sur ce sujet, différente de celle d'Einstein (les deux obtenant cependant des résultats convergents, mais de signification structurelle différente), était de faire de la théorie électromagnétique, une théorie de « physique mathématique » dans un sens aussi plein que la mécanique analytique lagrangienne, modèle ou idéal commun aux physiciens théoriciens de l'époque (sans « réduction mécaniste », c'est-à-dire sans recourir à des modèles mécaniques particuliers). Sur ce problème théorique (obtenir une plus grande rationalisation de la théorie électromagnétique), une étude comparative des contributions respectives de Lorentz, Poincaré et Einstein montre la différence des « styles scientifiques » et des exigences d'intelligibilité propres à chacun de ces trois grands chercheurs, dont les résultats obtenus convergent cependant pour des relations de grandeurs voisines, ou semblables, mais interprétées différemment, c'est-à-dire correspondant à une compréhension conceptuelle différente¹⁵.

Lorentz, Poincaré et Einstein : Électrodynamique et principe de relativité. Styles scientifiques et créativité.

Lorentz et Poincaré, après une dizaine d'années de travail sur ces questions, en se basant sur la première théorie de Lorentz (de 1895) que nous avons mentionnée plus haut, abordèrent le problème de l'électrodynamique des corps en mouvement d'une manière semi-empirique¹⁶ ¹⁷. Ils mirent en avant le résultat négatif de l'expérience de Michelson-Morley sur le vent d'éther (expérience du second ordre en v/c), et l'hypothèse supplémentaire de Lorentz de la contraction des longueurs (pour les bras de l'interféromètre) dans le sens du mouvement, en la généralisant à une transformation de coordonnées, qui impliquait aussi un « temps local » pour le système en mouvement, différent du « temps physique » universel du système au repos. Sans analyser, dans son travail de 1905, paru en 1906, la signification physique de ce temps local, qui contredisait le temps absolu newtonien, Poincaré l'admettait comme physique, comme le temps que donnerait localement une horloge, au contraire de Lorentz pour qui il ne s'agissait que d'une transformation

p. 1-137. Trad. fr. d'extraits in Abraham, H. et Langevin, P (dirs.) [1905]. *Les quantités élémentaires d'électricité: ions, électrons, corpuscules*, Gauthier-Villars, Paris, 2 vols., 1905, p. 430-476.

¹⁵ J'ai moi-même effectué une telle étude comparative (voir Paty, M. [1993], *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1993, chapitres 2 et 3), et prolongé ensuite l'étude des conceptions respectives de Poincaré et d'Einstein (Paty, M. [1996a], Poincaré et le principe de relativité, *op. cit.* ; et Paty, M. [1993], *Einstein, philosophe, op. cit.*, chap 6 et 7 ; Paty, M. [1996], Le style d'Einstein, la nature du travail scientifique et le problème de la découverte, *Revue philosophique de Louvain*, 94, 1996 (n°3, août), 447-470).

¹⁶ Lorentz, H. A. [1904]. Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light, *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen Amsterdam. Proceedings of the section of science* 6, 1904, 809-831 ; également dans Lorentz [1935-1939], *Collected papers*, Nijhoff, La Haye, vol. 5, p. 172-197 ; Trad. fr. par Paul Langevin, Phénomènes électromagnétiques dans un système qui se meut avec une vitesse quelconque inférieure à celle de lumière, dans Abraham, H & Langevin, P. [1905], , p. 477-495.

¹⁷ Poincaré, H. [1905b], Sur la dynamique de l'électron, *Compte-rendus des séances de l'Académie des sciences* 140, 1905, 1504-1508 ; également in Poincaré [1916-1965], *Oeuvres, op. cit.*, vol. 9, p. 489-493. Poincaré, H. [1905c], Sur la dynamique de l'électron, *Rendiconti del Circolo matematico di Palermo* XXI, 1906, p. 129-176 ; également in Poincaré [1916-1965], *Oeuvres, op. cit.*, vol. 9, p. 494-550.

mathématique auxiliaire¹⁸. Les mêmes formules de transformation avaient pour conséquence une loi d'addition des vitesses différente de l'addition galiléenne : cette propriété, notée par Poincaré, ne l'avait pas été par Lorentz (dans leurs travaux respectifs de 1904 et 1905). Poincaré obtenait ainsi l'invariance de la vitesse de la lumière et une forme invariante des équations de Maxwell-Lorentz sous les transformations de référentiel de Lorentz, ce qui impliquait le respect du principe de relativité. Les équations de la théorie électromagnétique invariante de Lorentz correspondaient à une électrodynamique relativiste. Poincaré allait également plus loin que la seule théorie électromagnétique en remarquant que le caractère fini de la vitesse de propagation de la lumière, si cette vitesse était aussi celle de la gravitation, obligeait à modifier la loi de Newton. Pour cette modification, il proposa une approche totalement nouvelle et à longue portée, qui serait ultérieurement suivie par tous les physiciens qui auraient à faire avec les groupes de transformation : rechercher les grandeurs qui laissent le lagrangien invariant. Pour obtenir une formulation mathématiquement plus homogène de la relation entre les coordonnées d'espace et le temps, donnée dans l'invariant $s_2 = x_2^2 - c^2 t_2^2$, il proposa d'écrire la variable temps comme une quatrième coordonnée d'espace en faisant intervenir la racine imaginaire de -1 , selon la notation qui est restée depuis¹⁹ (sans doute fut-il inspiré par une remarque à cet égard de Lagrange, reprise de d'Alembert²⁰).

Einstein suivait, de son côté (depuis plusieurs années, comme en attestent les documents de l'époque, lettres, manuscrits et témoignages contemporains)²¹, une réflexion sur les problèmes de l'électromagnétisme qui prenait appui sur la première théorie de Lorentz, en les abordant sous l'angle des principes théoriques qui devraient gouverner les théories en jeu, et notamment de la question de la relativité du mouvement quand on considère ensemble les corps matériels et l'éther électromagnétique et optique. Son article de 1905 « Sur l'électrodynamique des corps en mouvement » représente l'aboutissement de ces années de réflexions au cours desquelles il n'avait encore rien publié sur le sujet²².

La structure fondamentale de la thermodynamique, fondée sur ses deux principes, lui servait de guide. Il choisit donc, pour des raisons de physique très précises et argumentées, le « principe de relativité », que la mécanique pour sa part respectait déjà, énonçant la nécessité de rendre invariante par rapport aux états de mouvement d'inertie la théorie électromagnétique de Maxwell reformulée par Lorentz. En contrepartie, il demandait à la mécanique de se soumettre à un caractère que la théorie électromagnétique imposait, et qui, en quelque manière, la résumait, à savoir que la vitesse de la lumière dans le vide est constante et indépendante du mouvement de la source de lumière, dont il faisait un deuxième principe général de la nature, que les phénomènes physiques devaient respecter. Les deux principes paraissaient à première vue contradictoires entre eux : en effet, suivant les lois admises jusqu'alors du mouvement, celles de la mécanique, la vitesse de la lumière ne pouvait être la même dans deux repères en mouvement relatif,

¹⁸ Par ailleurs, Poincaré avait examiné de manière critique le concept de simultanéité et celui de temps, mais indépendamment de son travail sur l'électrodynamique, dans lequel il ne s'étend pas sur la signification physique du concept, qui est traité mathématiquement dans les formules. Pour une étude plus précise de cette circonstance, voir Paty, M. [1992], *Physical Geometry and Special Relativity : Einstein and Poincaré in Boi*, Luciano ; Flament, Dominique et Salanski, Jean-Michel (eds.), *1830-1930 : A century of geometry. Epistemology, history and mathematics*, Springer-Verlag, Berlin, 1992, p. 126-149 ; Paty, M [1996a], Poincaré et le principe de relativité, *op. cit.*

¹⁹ $x_4 = c \sqrt{-1}$. L'invariant spatio-temporel s_2 s'écrit alors de manière symétrique pour les quatre coordonnées : $s_2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2$.

²⁰ Paty, M. [1998e], Les trois dimensions de l'espace et les quatre dimensions de l'espace-temps, in Flament, Dominique (éd.), *Dimension, dimensions I*, Série Documents de travail, Fondation Maison des Sciences de l'Homme, Paris, 1998, p. 87-112.

²¹ Paty, M. [1993], *Einstein philosophe*, *op. cit.*, chap. 2 et 3.

²² Einstein, Albert [1905], Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik*, ser. 4, XVII, 1905, 891-921 ; trad. fr., Sur l'électrodynamique des corps en mouvement, in Einstein, Albert [1989-1993], *OEuvres choisies*, vol. 2 : *Relativités I*, Seuil, Paris, 1993, p. 31-59. Cet article fut suivi d'un autre de la même année sur l'équivalence masse-énergie : Einstein, Albert [1905], Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig ?, *Annalen der Physik*, ser. 4, XVIII, 1905, 639-641 ; trad. fr., L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie ?, in Einstein, Albert [1989-1993], *OEuvres choisies*, vol. 2 : *Relativités I*, Seuil, Paris, 1993, p. 60-62.

contrairement à l'exigence du principe de relativité (car cela signifierait que la théorie de Maxwell des ondes électromagnétiques n'est pas la même dans les deux systèmes en mouvement relatif).

Pour concilier ces deux principes physiques, il se rendit compte qu'il fallait modifier la loi classique (galiléenne) d'addition des vitesses, qui empêchait que la vitesse de la lumière puisse être la même dans deux systèmes de coordonnées en mouvement l'un par rapport à l'autre. Cela le conduisit à une re-définition physique des coordonnées d'espace et du temps considérés pour des repères respectivement en repos ou en mouvement : elles devaient être soumises aux deux principes physiques invoqués. La modification de la cinématique en résultait, et Einstein obtenait *par déduction des deux principes* les formules de transformations des coordonnées d'espace et du temps que nous connaissons comme les « formules de transformations de Lorentz », proposées en même temps et indépendamment, pour des raisons différentes comme nous l'avons vu, par Lorentz et Poincaré. La reformulation relativiste des équations de Maxwell-Lorentz, et donc des lois de l'électromagnétisme, en résultait.

Il faudrait entrer dans davantage de détails pour mieux comprendre la portée et la nature exacte de chacune des contributions fondamentales que nous n'avons fait ici que résumer. Je ne peux que renvoyer aux études plus détaillées déjà mentionnées (pour ce qui est de mes propres recherches), ainsi qu'aux autres descriptions, analyses et commentaires de ces travaux, même s'ils privilégient l'un ou l'autre point de vue, pourvu qu'ils soient menés par un souci de fidélité aux textes et aux faits²³. On ne saurait en dire autant de plusieurs publications récentes, qui semblent émaner d'un groupe, dictées par des *apriori* idéologiques inavouables²⁴, où le parti pris de procès d'intention et de calomnie à l'égard de la mémoire d'Einstein s'illustre d'arguments d'une accablante médiocrité : ces torchons pamphlétaires se présentent tantôt sous le genre de la vulgarisation, mais elle est détournée et falsifiée, tantôt de l'histoire des sciences, mais elle tout simplement usurpée, tantôt même de la science, mais visiblement mal assimilée et dans une ignorance complète de ce que peut être l'esprit de la recherche. Les auteurs de ces mauvais libelles ont en commun, outre une « einsteinophobie » qui renvoie à d'autres temps, une arrogance dans leur prétention à récrire l'histoire et à asséner leur prétendue « vérité », en absolue opposition à l'intelligence, la modestie et la générosité, qui sont souvent le fait des véritables savants, et qui étaient assurément le propre, de manière éminente, des grands esprits dont nous parlons ici, Lorentz, Poincaré et Einstein.

On voit, au contraire, à lire et à analyser ces derniers, en considérant les textes et les documents dans leur historicité et dans leur contenu de sens, comment chacune des contributions à la théorie de l'électrodynamique ou de la relativité, de Lorentz, de Poincaré et d'Einstein, est inventive et créatrice, suivant un chemin dicté par une exigence de compréhension rationnelle propre à chacun d'eux, et non pas une prétendue « voie qu'il aurait fallu suivre », car il n'y en a pas qui soit donnée à l'avance (ni dans ce cas, ni dans les autres). Au-delà de ce qui était donné en fait de connaissance, il n'y avait (et il n'y a jamais) que l'inconnu : il n'est pas de voie toute tracée ni de méthode assurée pour s'avancer sur de tels chemins, et c'est pourquoi l'on doit parler de création. Chacun d'eux ne pouvait suivre que ses propres exigences d'intelligibilité rationnelle, qui ne sont pas les mêmes d'un penseur à un autre, même chez les meilleurs connaisseurs du domaine, car elles sont tributaires de toutes sortes de facteurs, mais avant tout parce qu'il s'agit de représentation symbolique et conceptuelle, différente en nature de la réalité du monde elle-même.

On voit bien la différence et l'indépendance des manières de raisonner de Poincaré et d'Einstein dans leurs travaux pratiquement simultanés de 1905, qui aboutissent à deux théories dont les conséquences sont à peu près équivalentes (quant aux formules), mais dont la structure et la signification conceptuelle, du point de vue physique, sont différentes. En particulier, Poincaré ne détaille pas, dans sa théorie, l'implication, sur

²³ Comme le sont ceux de Wolfgang Pauli, de Edmund Whittaker, de Gerald Holton, d'Arthur Miller, d'Abraham Pais, de John Stachel, d'Elie Zahar et de quelques autres. Je ne puis alourdir le présent article en donnant toutes les références, que l'on pourra retrouver en consultant mes articles et ouvrages mentionnés.

²⁴ On peut fleurir dans ces pamphlets « dénonciateurs », tant par leur style que par leur contenu, nationalisme d'exclusion, français ou même ... serbe (dans ce cas associé à une féminisme de caricature, attribuant à la première épouse d'Einstein l'invention de la relativité restreinte...), antisémitisme, théories du complot... Aucune de ces publications, faites de citations tronquées et hors contexte, juxtaposées sans rigueur, et d'intentions supposées données pour preuves, ne répond aux exigences minimales de rigueur et d'objectivité d'une histoire des sciences même rudimentaire.

la définition du temps et de l'espace, de la nouvelle loi d'addition des vitesses qui résulte, chez lui, d'une hypothèse empirique (la contraction de Lorentz et les transformations qui la généralisent). Assurément, il aurait été en mesure de le faire, s'il en avait perçu l'importance, puisqu'il avait effectué, dans un travail indépendant, une analyse de la simultanéité et du temps en termes de correspondance de signaux. Le fait est qu'il n'a pas considéré cette critique conceptuelle dans son travail sur l'électrodynamique, précisément sans doute parce qu'il était porté avant tout par le souci de la dynamique. Alors que cette critique fut, pour Einstein, la solution nécessaire du problème posé : l'idée de régler la redéfinition physique de l'espace et du temps sur les deux principes choisis, et de percevoir que la dynamique devait être réglée d'abord par la cinématique, lui appartient en propre.

Quelque temps plus tard, tout en admettant les nouvelles propriétés spatio-temporelles requises par la « dynamique nouvelle » (électromagnétique), Poincaré exprimerait l'idée que l'on peut garder à côté d'elles une mécanique inchangée dans ses concepts et dans ses équations. Pour Einstein, au contraire, la mécanique et l'électromagnétisme classiques, en se réformant l'une par l'autre, obligent à une unification de leurs concepts. Cette modification brutale et forcée de conceptions bien acquises, et étayées sur une science d'une grande solidité comme la mécanique, pouvait d'ailleurs apparaître alors comme inutilement révolutionnaire. La question de l'originalité et de la différence des approches d'Einstein et de Poincaré étant ainsi résolue, on peut considérer celle de leurs justifications : l'une des théories, dans le contexte scientifique donné, était-elle meilleure que l'autre, et, pour leurs auteurs respectifs, l'un avait-il plus raison que l'autre ? Il est d'emblée clair qu'aucune des deux théories n'était fautive, même au regard de l'autre. Toutes deux correspondaient à des voies d'approche théoriques possibles, tant rationnellement qu'en rapport aux données d'expériences. Une autre manière de se questionner serait de se demander si l'une des deux théories était plus « normale » que l'autre. Il faudrait cependant définir ce que l'on entend par « normale », et situer la normalité par rapport à l'esprit créatif, dont les deux travaux examinés témoignent exemplairement : un tel exercice serait purement académique, et l'idée même de normalité apparaît bien relative...

Il serait dénué de sens de prétendre qu'Einstein aurait fait une erreur par rapport à Poincaré, par exemple, en n'attachant pas une valeur particulière à l'expérience de Michelson et Morley, et en n'y voyant qu'un indice de plus pour la relativité des mouvements en optique ; ou encore en se faisant une idée plus directe de l'adéquation des concepts physiques par rapport aux phénomènes et au monde réel. Il serait tout autant arbitraire de juger du travail de Poincaré à l'aune de celui d'Einstein, et de lui reprocher de n'avoir pas mis d'abord en avant les deux principes, et de ne les avoir formulés que comme une conséquence de l'invariance sous les formules de transformations de Lorentz, choisies empiriquement pour leur propriété remarquable par rapport aux termes des différents ordres du mouvement.

Les positions de l'un et de l'autre relevaient de choix possibles, parfaitement légitimes. Nul n'aurait pu dire, à l'époque, que la théorie de l'un était meilleure que celle de l'autre. Si l'électrodynamique s'était avérée être, comme bien des physiciens le pensaient alors, le fondement de la physique dans son ensemble, la théorie de Poincaré, qui était une électrodynamique relativiste, aurait peut-être été l'approche désormais privilégiée. Mais cela même cependant n'est pas sûr, car un Paul Langevin, proche de Poincaré et lui-même partisan d'une « vision électromagnétique du monde », trouva immédiatement que la théorie d'Einstein était plus directe et de portée plus générale, et s'en fit le propagandiste en France, tout en maintenant pendant quelques années sa pensée du « tout électromagnétique » et une référence à l'éther²⁵. De fait, avant la théorie de la relativité générale, chacune des théories, celle de Poincaré et celle d'Einstein, avait ses partisans. Les mathématiciens goûtaient davantage la théorie de Poincaré, plus formalisée et plus synthétique en ce qui concerne les implications des groupes de transformation²⁶

²⁵ Paty M. [2002], Poincaré, Langevin et Einstein, *Épistémologiques. Philosophie, sciences, histoire. Philosophy, science, history* (Paris, São Paulo) 2, n°1-2, janvier-juin 2002, 33-73 (in Bensaude-Vincent, B. ; Bustamante, M.-C. ; Freire, O. & Paty, M. (éds.), *Paul Langevin, son oeuvre et sa pensée. Science et engagement*, numéro spécial).

²⁶ Voir Walter, S. [1996]. *Hermann Minkowski et la mathématisation de la théorie de la relativité, 1905-1915*, Thèse de doctorat en Epistémologie et Histoire des sciences, Université Paris7-D. Diderot, 1996. Tel fut encore, bien des années plus tard, le choix d'un Edmund Whittaker qui, à contre-courant de la tendance générale de l'époque (en 1953), rapporte la théorie de la relativité restreinte comme étant due à Poincaré sans dire un mot de la contribution d'Einstein : Whittaker, E. T. [1953], *A History of the theories of aether and electricity, vol 2: The Modern theories, 1900- 1926*, Nelson, London, 1953. Par contre, Whittaker attribue justement au seul Einstein la découverte de la théorie de la relativité générale.

Les physiciens, qui ignoraient d'ailleurs généralement la théorie de Poincaré, publiée dans une revue de mathématiques, étaient éventuellement plus sensibles à l'argumentation directement physique d'Einstein sur la généralisation en un principe du fait constaté de la relativité du mouvement en mécanique, en optique et en électromagnétisme, et à la cohérence de la réforme fondamentale de l'espace et du temps pour mettre ces concepts en harmonie avec le rejet des actions instantanées à distance et avec la pleine acceptation du concept de champ. (Quand du moins ils ne rejetaient pas cette réforme, longtemps jugée inutilement révolutionnaire et iconoclaste, en particulier par des mécaniciens²⁷).

Mais, à l'époque de la publication de ces travaux, l'on ne constate aucun consensus chez les scientifiques du domaine (physiciens ou mathématiciens), dont les attitudes à l'égard de ces résultats pouvaient être très variées. Le physicien H. A. Lorentz rejeta tout d'abord l'approche d'Einstein, malgré son estime de ce dernier, préférant la théorie de Poincaré, plus proche de ses vues²⁸. Le mathématicien Hermann Minkowski adopta la physique d'Einstein tout en la mariant au formalisme de Poincaré, établissant ainsi la théorie physicomathématique de l'espace-temps²⁹.

Plus tard, un choix s'effectua entre les deux théories, privilégiant la voie qu'avait prise Einstein : ce fut à l'occasion du succès de la théorie de la relativité générale, suscité notamment par la constatation astronomique d'une courbure de l'espace au voisinage des grandes masses (au cours de l'éclipse solaire de 1919, grâce à l'observation d'un déplacement de la position dans le ciel des étoiles voisines du disque solaire, rapporté à une inflexion des trajets lumineux). Cette théorie prolongeait celle de la relativité restreinte en se situant, du point de vue de la physique, dans la même perspective principielle que celle-ci (à savoir que la théorie est fondée sur des principes physiques de portée universelle), et reformulait à nouveau l'espace et le temps en le liant aux masses matérielles sources des champs de gravitation. Elle joignait en outre à sa valeur quant à l'explication et à la prédiction des phénomènes de la nature, une perfection mathématique que Poincaré n'aurait certainement pas reniée, et qui fut d'ailleurs reconnue d'emblée par les mathématiciens, de David Hilbert à Elie Cartan. Ce furent d'ailleurs les mathématiciens qui développèrent ensuite la théorie de la relativité générale que les physiciens délaissèrent longtemps, passé le premier engouement, pour ne disposer alors que de trois tests expérimentaux ou observationnels. Mais la théorie de la relativité restreinte, qui avait été adoptée dans la foulée de la théorie de la relativité générale, survécut à l'effacement provisoire de cette dernière, en devenant l'un des principaux outils de pensée des nouveaux domaines de la physique qui s'ouvraient. En adoptant la relativité restreinte, c'était aussi la direction des principes et des concepts considérée par Einstein qu'ils adoptaient : elle dépassait d'emblée l'objectif spécifique de l'électrodynamique classique et s'imposait comme cadre dès que les concepts d'espace, de temps, de causalité spatio-temporelle et d'énergie étaient en jeu. Dans ce contexte, la contribution, pourtant historiquement fondamentale, de Poincaré fut largement oubliée, voire sous-évaluée. Comme nous l'avons indiqué, il reste cependant, dans la réception et la compréhension postérieure, jusqu'à nos jours, de la relativité restreinte einsteinienne, des éléments importants qui sont dus originellement à Poincaré (groupes

²⁷ Voir Paty, M [1987]. The scientific reception of relativity in France, in Glick (ed.) [1987], *The Comparative reception of relativity*, Coll. « Boston Studies in the Philosophy and History of Sciences », Reidel, Dordrecht, 1987, p. 113-167.

²⁸ Lorentz, H. A. [1921], Deux mémoires de Henri Poincaré sur la physique mathématique, *Acta mathematica* 38, 1921, 293-308. Repris in Poincaré [1950-1965], *Œuvres, op. cit.*, vol. 9, p.682-695.

²⁹ Minkowski, H. [1907], Das Relativitätsprinzip (exposé présenté à Göttingen le 5.11.1907, publication posthume, par les soins de Arnold Sommerfeld), *Annalen der Physik*, 47, 1915, 927-938. (Dans ce texte de publication posthume, Minkowski cite Poincaré, qu'il omet de mentionner dans les autres). Minkowski, H. [1908a], Die Grundgleichungen für die elektromagnetische Vorgänge in bewegten Körpern, *Nachrichten der Königlichen Gessellschaft der Wissenschaft und der Georg-August Universität zu Göttingen, Mathematisch-physikalische Klasse* 1908, 53-111. [Les équations fondamentales des phénomènes électromagnétiques dans les corps en mouvement]. Minkowski, H. [1908b], Raum und Zeit (exposé présenté à la 80^e assemblée des scientifiques et médecins allemands, Cologne le 21.9.1908), *Physikalische Zeitschrift* 10, 1909, 104-111. Trad. angl. : Space and time, in Einstein, A., Lorentz, H. A., Minkowski, H., Weyl, H. [1922], *Das relativitätsprinzip*, 4^e éd., Teubner, Leipzig, 1922 ; trad. angl., *The principle of relativity*, transl. by W. Perrett and G.B. Jeffery, Methuen, London, 1923 ; re-ed., Dover, New York, 1952, p. 73- 91. (C'est le texte de Minkowski le plus connu).

de Lorentz et de Poincaré, le temps comme quatrième coordonnée, l'invariant ds^2 , ...). A cet égard, la dénomination usuelle de « transformations de Lorentz », due à Poincaré, a valeur d'indice.

la science jugée, ou sanctionnée, comme la qualifiait Gaston Bachelard, est souvent oublieuse des circonstances qui l'ont rendue possible, et c'est la tâche de l'histoire des sciences de nous faire revivre le parcours effectif par lequel ce que nous savons aujourd'hui est apparu un jour, et de nous faire réaliser en même temps qu'avant cela, ce savoir n'existait pas. Comment du nouveau absolu peut-il apparaître, c'est une question que nous n'aborderons pas ici. Nous nous contenterons de noter que ce surgissement s'est effectué par des processus de travail de pensée qui ont droit à proprement parler au qualificatif de créations. De ces créations combinées et réarrangées résulte ce que nous connaissons. Les travaux parallèles de Lorentz, de Poincaré et d'Einstein qui établirent le principe de relativité en physique (pour les mouvements d'inertie) illustrent à merveille la diversité des styles de pensée et de recherche dans la création scientifique, et aussi la manière complexe, diversifiée malgré les apparences³⁰, dont ils ont réellement contribué à la formation des connaissances présentes et de notre compréhension actuelle. C'est assez dire que nous ne quittons pas, avec nos questions sur le style et la création, le terrain du rationnel.

Pensée réflexive et philosophie de la création rationnelle.

Nous pouvons donc reprendre ici le thème philosophique que nous esquissions en commençant, de savoir si l'on peut parler de manière rationnelle de « création scientifique », et si le processus de cette création relève lui-même de la rationalité. La notion de « style scientifique »³¹ nous fait comprendre qu'il n'y a pas une voie rationnelle unique pour découvrir ce qui était inconnu. Une connaissance nouvelle n'est pas inscrite d'avance, en puissance, et sous une seule forme possible, dans un ciel des idées, mais elle est le fruit d'un processus de création par la pensée. Si ce fruit est éminemment rationnel, il serait étonnant que les moyens de le mettre au jour fussent seulement irrationnels, comme de nombreux philosophes des sciences du XX^e siècle l'ont prétendu. Et, en vérité, il y a bien de la rationalité dans ce processus : elle passe par l'exigence des intelligibilités particulières, mais le résultat obtenu transcende nécessairement ces dernières, et se propose d'emblée comme objectif et universel. Communiqués aux autres pensées qui se portent également sur ce champ scientifique, les problèmes et résultats scientifiques, initialement formulés par des intelligences singulières, dépassent cette singularité de la formulation d'un seul pour se voir assimilés et, éventuellement, modifiés pour accéder à une compréhension plus universelle. Jean Cavailles a évoqué, dans ce sens, la nécessité d'une « philosophie du concept » pour résoudre la contradiction apparente entre l'invocation d'un sujet transcendantal, creuset du travail de la pensée, et celle de l'objectivité (rationnelle) des propositions, qui résulte de cette activité³².

Comme nous allons le voir, Poincaré se situe dans cette perspective : il ne nous donne pas seulement à considérer son oeuvre créatrice et à dérouler nous-mêmes le travail qui y a conduit ; il a proposé, de manière directe ou indirecte, une réflexion véritablement philosophique sur ce qu'est la pensée mathématique, physique, scientifique d'une manière générale, en la concevant aussi bien sous sa dimension de rationalité, que sous celle d'une pensée qui, voulant l'intelligibilité, est amenée à dépasser ce qui était donné, c'est-à-dire à inventer, à créer.

³⁰ C'est ainsi que lorsqu'on parle aujourd'hui de « théorie d'Einstein de la relativité restreinte », on désigne une théorie qui intègre d'autres apports, contemporains et postérieurs aux articles d'Einstein sur le sujet. De même la mécanique dite newtonienne est constituée aussi de nombreux apports contemporains de Newton (Huygens, Leibniz) ou postérieurs à lui (notamment la formulation en termes de calcul différentiel et intégral).

³¹ Sur la notion de style scientifique, je renvoie notamment à Gilles G. Granger, qui a abordé cette question sous une perspective philosophique : voir Granger, G [1968], *Essai d'une philosophie du style*, Armand Colin, Paris, 1968. D'autres auteurs l'ont abordé de façon simplement descriptive, du point de vue de l'histoire des sciences.

³² Cavailles, J. [1947], *Sur la logique et la théorie de la science* (rédigé en 1942, 1^e éd., 1947), 3^e éd., Vrin, Paris, 1976. Voir Paty, M. [à paraître], Des fondements vers l'avant, *Philosophia scientiae* (Nancy ; éd. Kimé, Paris), sous presse ; Paty, M. [à paraître]. Nouveauté et émergence dans la quête des fondements, *Principia, Revista de Epistemologia* (Florianopolis, SC, Brésil), sous presse.

Poincaré a lui-même indiqué que son intérêt principal en philosophie portait sur les aspects créateurs de la pensée scientifique. Plus tard, Einstein déclarerait pour lui-même une option du même ordre et, de fait, il semble bien que ces deux savants et philosophes soient les deux principaux penseurs à ce jour de ce que l'on pourrait appeler la pensée scientifique créatrice conçue dans une perspective rationnelle³³. Einstein s'est situé expressément dans la lignée de Poincaré à cet égard, tout en orientant un peu différemment sa philosophie, que l'on peut qualifier de « réalisme critique », par différence avec le « conventionalisme » de Poincaré. Tous les deux fondent leurs considérations sur la « liberté logique », ou « libre choix logique » entre les faits et les propositions théoriques, qui exprime une constatation tirée de la critique de l'induction de David Hume (telle était aussi sur ce point, en un sens, la position d'Ernst Mach et celle de Pierre Duhem). Tous les deux, Poincaré et Einstein, tiennent ensemble l'idée de création scientifique et celle de sa liberté, la rationalité et l'intelligibilité, l'intuition et l'invention.

De telles thèses n'étaient pas évidentes alors (elles sont encore trop peu prises en considération aujourd'hui), en raison de la dominance du néo-positivisme et de l'empirisme logique, ou au contraire de perspectives antirationalistes, à l'époque d'Einstein ; et, quant à l'époque de Poincaré, en raison de la dominance du psychologisme et du pragmatisme, ou du spiritualisme, ou encore d'une conception étroite du déterminisme. En fait, une condition pour que l'idée de création concernant la connaissance scientifique puisse voir le jour était la prise de conscience, quant à cette connaissance, de sa nature de représentation symbolique, distincte de l'objet représenté. Cette distanciation entre la représentation conceptuelle et symbolique et son objet s'était fait jour au XIX^e siècle, avec les reconstructions des théories mathématiques, en arithmétique et en algèbre, avec, en géométrie, la découverte des géométries non euclidiennes, et avec la formalisation mathématique de plus en plus poussée de la physique et son élaboration de concepts plus abstraits, non directement lisibles dans les phénomènes de la nature (par exemple, la formulation hamiltonienne de la mécanique, l'élaboration de la thermodynamique avec les concepts d'état et d'entropie, plus tard le concept de champ délié du support de l'éther, etc.). Il apparaissait visiblement que les théories scientifiques résultent d'un travail d'élaboration et de construction, par la pensée, sur des objets de pensée (symboliques). Mentionnons également, sans y insister ici, qu'une prise de conscience analogue avait eu lieu en arts, culminant avec le mouvement symboliste, et que résume l'expression de Mallarmé pour désigner la peinture d'une rose dans un tableau en marquant son irrémédiable différence avec la rose réelle : « l'absente de tout bouquet ».

Ce caractère symbolique et construit de la connaissance indiquait aussi bien les limitations d'une « philosophie de la nature » pour laquelle la connaissance scientifique était conçue selon une continuité avec le monde. Il faudrait ici reprendre en détail les éléments de la philosophie de la connaissance de Poincaré, pour faire voir leurs liens entre eux, et leur cohérence propre. Je ne puis ici qu'indiquer le seuil d'une telle étude. On peut marquer ce seuil, peut-être, en rappelant une phrase de Poincaré qui peut sembler à première vue anodine, mais qui apparaît à la réflexion grosse de signification quant à la conscience du caractère de représentation mentale, symbolique, de la connaissance par rapport à la réalité de la nature et de sa distinction d'avec elle. Cette phrase est la suivante : « Le cerveau humain, qui est un très petit coin de l'Univers, ne saurait contenir cet Univers »³⁴. Autrement dit, la pensée est vouée, par son appartenance même à la nature et son insertion en elle (que nous rappellent d'ailleurs la théorie de l'évolution et de nos jours la cosmologie contemporaine), à se constituer pour son propre usage, et avec ses moyens propres, une représentation de la réalité du monde qui ne peut, par définition, coïncider avec ce monde, tout en se proposant d'en être une image fidèle (selon les capacités de l'entendement, les exigences de l'intelligibilité). La fidélité de cette image sera, en fait, celle des relations entre ses éléments vis-à-vis de celles que nous pouvons attribuer au monde selon une correspondance « analogique » (le terme analogie étant pris ici dans le

³³ D'autres philosophes, comme Henri Bergson ou William James notamment, se sont penchés sur la question de la création, artistique ou scientifique, par la pensée, mais dans une perspective empiriste ou pragmatique, ou psychologique, privilégiant une sensibilité non rationnelle. Bergson, H. [1934], *La pensée et le mouvant*, Alcan, Paris, 1934 ; in *Œuvres*, Edition du centenaire, éd. Par André Robinet, Presses Universitaires de France, Paris, 1959, p. 1249-1482. James, W. [1907], *Pragmatism : a new name for old ways of thinking*, 1907 ; trad. fr. par E. Le Brun et M. Paris, Préface de Henri Bergson, *Le pragmatisme*, Flammarion, Paris, 1911.

³⁴ Poincaré, H. [1908], *Science et méthode*, Flammarion, Paris, 1908 ; 1918 : éd 1918, chap. 2, p. 20.

sens de l'analogie structurelle, « mathématique », développé par ailleurs et repris à de nombreuses reprises par Poincaré)³⁵. La pensée humaine est donc placée dans la situation de créer, c'est-à-dire de forger de toutes pièces, avec ses propres matériaux, mentaux et symboliques, avec ses catégories de pensée et ses concepts, sa représentation du monde, c'est-à-dire la connaissance qu'elle se donne de ce monde. Certes, elle le fera dans le monde, dont elle est partie prenante, mais aussi contre lui, puisqu'il lui faudra choisir, parmi les faits qui seront les garants de la correspondance et de l'adéquation, ceux qui sont significatifs, et ignorer ou laisser de côté les autres, qui ne procurent pas d'indication nouvelle, et qui sont multitude³⁶. La description est inverse de celle du cartographe trop méticuleux du conte de Jorge Luis Borges, que son souci d'exactitude amenait à dessiner sa carte en exacte coïncidence avec le modèle naturel...

Dans ce travail de création d'une représentation, le rôle le plus fondamental est celui de l'*intuition*, dans laquelle Poincaré reconnaît une vue synthétique globale et immédiate, qui précède tout travail d'analyse effectué ensuite pour assurer la certitude. Il s'agit d'une fonction de l'intellect, c'est-à-dire de l'entendement, qui opère dans la rationalité. Pour Poincaré parlant des mathématiques, l'intuition qui invente (qui a la fonction de l'invention, dans la pensée des mathématiciens intuitifs, mais aussi dans celle des analystes, qui mettent en premier l'aspect logique, car ils ont eux aussi leur forme d'intuition)³⁷, est une fonction proprement rationnelle ; autrement dit, elle est une *intuition rationnelle*, capable d'inventer rationnellement des formes rationnelles, correspondant d'une manière particulièrement adéquate aux formes du monde réel et qui constituent la connaissance scientifique. Cette considération est grosse d'implications sur la nature de l'invention scientifique et sur celle du rationnel qui rend cette invention possible, et c'est tout ce que je voulais en dire ici.

Sophia-Antipolis, 16 janvier 2005

Paris, 22 février 2005.

³⁵ Paty, M. [à paraître,c], Les analogies mathématiques au sens de Poincaré et leur fonction en physique, in Durand-Richard, Marie-José (éd.), *Le statut de l'analogie dans la démarche scientifique*, L'Harmattan, Paris, sous presse.

³⁶ Poincaré, H. [1908d], Le choix des faits, *The Monist*, 1909, 231-232. Publié dans Poincaré, H. [1908a], *Science et méthode*, op. cit., livre 1, chap. 1, éd. 1918, p. 16-18.

³⁷ Poincaré, H. [1889], Du rôle de l'intuition et de la logique en mathématiques, in *Comptes rendus du Deuxième Congrès International des Mathématiciens*, Paris, 1989, p. 115-130 ; repris dans Poincaré [1913-1965], *Œuvres*, op. cit, vol. 11, p. 129-133. Publié également sous le titre : La logique et l'intuition dans la science mathématique et dans l'enseignement, *L'Enseignement mathématique* 1, 1889, 157-162. Repris avec modifications dans Poincaré [1905a], *La valeur de la science*, Flammarion, Paris, 1905 ; 1970, chapitre 1.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABRAHAM, H. et LANGEVIN, P (dirs.) [1905]. *Les quantités élémentaires d'électricité: ions, électrons, corpuscules*, Gauthier-Villars, Paris, 2 vols., 1905.
- BERGSON, Henri [1934]. *La pensée et le mouvant*, Alcan, Paris, 1934 ; in *Oeuvres*. Edition du centenaire, éd. par André Robinet, Presses Universitaires de France, Paris, 1959, p. 1249-1482.
- EINSTEIN, Albert [1905]. Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik*, ser. 4, XVII, 1905, 891-921 ; trad. fr., Sur l'électrodynamique des corps en mouvement, in Einstein, Albert [1989-1993], *Oeuvres choisies*, vol. 2 : *Relativités I*, Seuil, Paris, 1993, p. 31-59.
- EINSTEIN, Albert [1905]. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?, *Annalen der Physik*, ser. 4, XVIII, 1905, 639-641 ; trad. fr., L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie ?, in Einstein, Albert [1989-1993], *Oeuvres choisies*, vol. 2 : *Relativités I*, Seuil, Paris, 1993, p. 60-62.
- EINSTEIN, A., LORENTZ, H. A., MINKOWSKI, H., WEYL, H. [1922]. *Das relativitätsprinzip*, 4 ème éd., Teubner, Leipzig, 1922 ; trad. angl., *The principle of relativity*, transl. by W. Perrett and G.B. Jeffery, Methuen, London, 1923 ; re-ed., Dover, New York, 1952.
- GRANGER, Gilles G. [1968]. *Essai d'une philosophie du style*, Armand Colin, Paris, 1968.
- HADAMARD, J. [1945]. *An essay on the psychology of invention in the mathematical field*, Princeton University Press, Princeton (N.J.), 1945. Trad. fr. par Jaqueline Hadamard, *Essai sur la psychologie de l'invention dans le domaine mathématique*, Gauthier-Villars, Paris, 1975.
- JAMES, William [1907]. *Pragmatism : a new name for old ways of thinking*, 1907. Trad. fr. par E. Le Brun et M. Paris, Préface de Henri Bergson, *Le pragmatisme*, Flammarion, Paris, 1911.
- LORENTZ, Hendryk A. [1895]. *Versuch einen Theorie der elektrischen und optiken Erscheinungen in bewegten Körpern*, Brill; Leiden, 1895. Egalement in Lorentz [1935-1939], vol. 5, p. 1-137. Trad. fr. d'extraits in Abraham et Langevin [1905], p. 430-476.
- LORENTZ, Hendryk A. [1904]. Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light, *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (Amsterdam). *Proceedings of the section of science* 6, 1904, 809- 831. Egalement in Lorentz [1935-1939], *Collected papers*, Nijhoff, La Haye, 9 vols., 1935-1939.vol. 5, p. 172-197. Trad. fr. par Paul Langevin, Phénomènes électromagnétiques dans un système qui se meut avec une vitesse quelconque inférieure à celle de lumière, in Abraham, Langevin (dirs.) [1905], p. 477-495.
- LORENTZ, Hendryk A. [1921]. Deux mémoires de Henri Poincaré sur la physique mathématique, *Acta mathematica* 38, 1921, 293-308. Repris in Poincaré [1950- 1965], vol. 9, p. 682-695 (également, vol. 11, p. 247-261).
- MASCART, Eleuthère [1872-1874]. Sur les modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur, *Annales scientifiques de l'Ecole Normale Supérieure*, 2ème série : Première partie, 1, 1872, 157-214 ; Deuxième partie, 3, 1874, 363-420.
- MAXWELL, James Clerk [1873]. *A treatise on electricity and magnetism* (1873); 3rd ed. (1891), 2 vols. Ré-éd., Dover, New York, 1954.
- MINKOWSKI, Hermann [1907]. Das Relativitätsprinzip (exposé présenté à Göttingen le 5.11.1907, publication posthume, par les soins de Arnold Sommerfeld), *Annalen der Physik*, 47, 1915, 927-938.
- MINKOWSKI, Hermann [1908a]. Die Grundgleichungen für die elektromagnetische Vorgänge in bewegten Körpern, *Nachrichten der Königlichen Gessellschaft der Wissenschaft und der Georg-August Universität zu Göttingen, Mathematischphysikalische Klasse* 1908, 53-111.
- MINKOWSKI, Hermann [1908b]. Raum und Zeit (exposé présenté à la 80 ème assemblée des scientifiques et médecins allemands, Cologne le 21.9.1908], *Physikalische Zeitschrift* 10, 1909, 104-111. Trad. angl. : Space and time, in Einstein, A., Lorentz, H. A., Minkowski, H., Weyl, H. [1922]. *Das relativitätsprinzip*, 4 ème éd., Teubner, Leipzig, 1922 ; trad. angl., *The principle of relativity*, transl. by W. Perrett and G.B. Jeffery, Methuen, London, 1923 ; re-ed., Dover, New York, 1952, p. 73- 91.
- PATY, Michel [1987]. The scientific reception of Relativity in France, in Glick, Thomas (ed.), *The Comparative reception of relativity*, Coll. "Boston Studies in the Philosophy and History of Sciences", Reidel, Dordrecht, 1987, p. 113-167.

- PATY, Michel [1992]. Physical Geometry and Special Relativity : Einstein and Poincaré in Boi, Luciano ; Flament, Dominique et Salanski, Jean-Michel (eds.), *1830-1930 : A century of geometry. Epistemology, history and mathematics*, Springer-Verlag, Berlin, 1992, p. 126-149.
- PATY, Michel [1993]. *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1993.
- PATY, Michel [1996]. Poincaré et le principe de relativité, in Greffe, Jean-Louis;Heinzmann, Gerhard et Lorenz, Kuno (éds.), *Henri Poincaré. Science et philosophie. Science and philosophy. Wissenschaft und Philosophie. Congrès international, Nancy, France, 14-18 mai 1994*, Akademie Verlag, Berlin/AlbertBlanchard, Paris, 1996, p. 101-143.
- PATY, Michel [1999a]. La place des principes dans la physique mathématique au sens de Poincaré, in Sebestik, Jan et Soulez, Antonia (éds.), *Actes du Colloque France-Autriche Paris, mai 1995, Interférences et transformations dans la philosophie française et autrichienne (Mach, Poincaré, Duhem, Boltzmann), Fundamenta philosophiae* (Nancy/éd. Kimé, Paris) 3 (2), 1998-1999, 61-74.
- PATY, Michel [1999b]. Les trois stades du principe de relativité, *Revue des questions scientifiques*, 170 (n°2), 1999 (*Les relativités. Première partie*), 103-150. Republié dans : *Les Relativités*, numéro spécial de la *Revue des questions scientifiques*, 2000, 103-150.
- PATY, Michel [1999c]. La création scientifique selon Poincaré et Einstein, in Serfati, Michel (éd.), *La recherche de la vérité*, Coll. « L'Écriture des Mathématiques », ACL-Éditions du Kangourou, Paris, 1999, p. 241-280.
- PATY, Michel [2002]. Poincaré, Langevin et Einstein, *Épistémologiques. Philosophie, sciences, histoire. Philosophy, science, history* (Paris, São Paulo) 2, n°1-2, janvier-juin 2002, 33-73 (in Bensaude-Vincent, Bernadette ; Bustamante, Martha-Cecilia ; Freire, Olival & Paty, Michel (éds.), *Paul Langevin, son oeuvre et sa pensée. Science et engagement*, numéro spécial).
- Paty, Michel [2004j]. Nouveauté et émergence dans la quête des fondements, *Principia, Revista de Epistemologia* (Florianopolis, SC, Brésil), 2004, -.
- PATY, Michel [à paraître, b]. L'analogie mathématique au sens de Poincaré et sa fonction en physique, in Durand-Richard, Marie-José (éd.), *Le statut de l'analogie dans la démarche scientifique*, L'Harmattan, Paris, à paraître.
- PATY, Michel [à paraître, c]. Poincaré et la relativité des mouvements pour l'optique, *Revue d'histoire des sciences*, (n° spécial, *Lumière et mouvement. L'extension de la relativité du mouvement à l'optique*, sous la direction de Michel Paty, à paraître.
- PATY, Michel [sous presse,j]. Des fondements vers l'avant. Sur la rationalité des mathématiques et des sciences formalisées, Contribution au *Colloque International «Aperçus philosophiques en logique et en mathématiques. Histoire et actualité des théories sémantiques et syntaxiques alternatives»*, Nancy, 30 sept.-4 oct. 2002, *Philosophia Scientiae* (Kimé, Nancy), sous presse.
- PIETROCOLA DE OLIVEIRA, Mauricio P. [1993]. *E. Mascart et l'optique des corps en mouvement*, Thèse d'épistémologie et d'histoire des sciences, Université Paris 7, 1993.
- POINCARÉ, Henri [1889]. Du rôle de l'intuition et de la logique en mathématiques, in *Compte-rendus du Deuxième Congrès International des Mathématiciens*, Paris, 1989, p. 115-130. Repris dans Poincaré [1913-1965], *OEuvres*, vol. 11, p. 129-133. Publié également sous le titre : La logique et l'intuition dans la science mathématique et dans l'enseignement, *L'Enseignement mathématique* 1, 1889, 157-162. Repris avec modifications dans Poincaré [1905], chapitre 1.
- POINCARÉ, Henri [1890a]. *Electricité et optique, I. Les théories de Maxwell et la théorie électromagnétique de la lumière. Leçons professées pendant le second semestre 1887-1888*, rédigées par Jules Blondin, Cours de physique mathématique, Carré, Paris, 1890. [Voir la ré-éd. revue et augm., Poincaré [1901]].
- POINCARÉ, Henri [1901]. *Electricité et optique. La lumière et les théories électrodynamiques. Leçons professées à la Sorbonne en 1888, 1890 et 1899. Cours de physique mathématique*. Deuxième édition, revue et complétée par Jules Blondin et Eugène Néculcéa, Carré et Naud, Paris, Gauthier-Villars, Paris, 1901. [Voir la première édition: Poincaré [1890a, 1891a], comportant les cours de 1888 et 1890].
- POINCARÉ, Henri [1902]. *La science et l'hypothèse*, Flammarion, Paris, 1902 ; 1968.
- POINCARÉ, Henri [1905a]. *La valeur de la science*, Flammarion, Paris, 1905 ; 1970.

- POINCARÉ, Henri [1905b]. Sur la dynamique de l'électron, *Compte-rendus des séances de l'Académie des sciences* 140, 1905, 1504-1508 ; également in Poincaré [1916-1965], *Oeuvres*, vol. 9, p. 489-493.
- POINCARÉ, Henri [1905c]. Sur la dynamique de l'électron (adunanza del 23 luglio 1905 [reçu le 23 juillet 1905]), *Rendiconti del Circolo matematico di Palermo XXI*, 1906, p. 129-176. Egalement in Poincaré [1916-1965], *Oeuvres*, publiées sous les auspices de l'Académie des sciences, Gauthier-Villars, Paris, 11 vols., 1916-1965.vol. 9, p. 494-550.
- POINCARÉ, Henri [1908a]. *Science et méthode*, Flammarion, Paris, 1908 ; 1918.
- POINCARÉ, Henri [1908b]. Comment on invente. Le travail de l'inconscient, *Le Matin* (Paris), 24 déc. 1908.
- Poincaré, Henri [1908c]. L'invention mathématique, *Bulletin de l'Institut Général de Psychologie*, 8^e année, 1908 (n° 3), 175-196. [Conférence à la Société de Psychologie de Paris] ; également, *L'enseignement mathématique* 10, 1908, 359-371 ; repris dans Poincaré [1908a], *Science et méthode*, Flammarion, Paris, 1908 ; 1918 : éd. 1918, p. 43-63.
- POINCARÉ, Henri [1908d]. Le choix des faits, *The Monist*, 1909, 231-232. Publié dans Poincaré [1908a], livre 1, chap. 1, éd. 1918, p. 16-18.
- POINCARÉ, Henri [1916-1965]. *Oeuvres*, publiées sous les auspices de l'Académie des sciences, Gauthier-Villars, Paris, 11 vols., 1916-1965.
- POPPER, Karl [1935]. *Logik der Forschung. Zur Erkenntnistheorie der modernen Naturwissenschaft*, Springer Verlag, Wien, 1934. Ré-éd.avec additions, 1959 ; 1968. Trad. angl., *The logic of scientific discovery*, 1959 ; 1968. Trad. fr. par Nicole Thyssen-Rutten et Philippe Devaux, *La logique de la découverte scientifique*, Payot, Paris, 1973.
- POPPER, Karl [1972]. *Objective knowledge, an evolutionary approach*, Clarendon Press, Oxford, 1972. Trad. fr. partielle par C. Bastyns, *La connaissance objective*, Complexe, Bruxelles, 1978.
- REICHENBACH, Hans [1938]. *Experience and prediction*, University of Chicago Press, Chicago, 1938.
- WALTER, Scott [1996]. *Hermann Minkowski et la mathématisation de la théorie de la relativité, 1905-1915*, Thèse de doctorat en Epistémologie et Histoire des sciences, Université Paris 7-D. Diderot, 1996.

MICHEL PATY, né en 1938, Directeur de recherche émérite au Centre National de la Recherche Scientifique, est actuellement (2005) Professeur invité au Département de Philosophie de l'Université de São Paulo (Brésil). Possédant une double formation, scientifique (en physique) et philosophique, avec un doctorat dans chacune des deux disciplines, il a travaillé pendant une vingtaine d'années dans la recherche en physique fondamentale (au Centre de recherches nucléaires et Université de Strasbourg), et s'est ensuite consacré à plein temps à la philosophie et à l'histoire des sciences (en fondant une équipe de recherche du CNRS à l'Université Paris 7 Denis Diderot). Ses travaux de recherche portent notamment sur les rapports de la philosophie et des sciences dans les périodes classique (18^e siècle) et contemporaine, sur la mathématisation de la physique et sur les questions d'interprétation de la physique quantique, ainsi que sur la philosophie de la création scientifique et de la rationalité. Parmi ses ouvrages :

- La matière dérobée*, Ed. Archives contemporaines, Paris, 1988 ;
- L'analyse critique des sciences*, L'Harmattan, Paris, 1990 ;
- Einstein philosophe*, Presses Universitaires de France, Paris, 1993 ;
- Einstein, ou la création scientifique du monde*, Belles Lettres, Paris, 1997 ; 2^e tirage, 2004 ;
- D'Alembert, ou la raison physico-mathématique au siècle des Lumières*, Belles Lettres, Paris, 1997 ; 2^e tirage, 2004 ;
- La physique du XX^e siècle*, EDP-Sciences, Paris, 2003.