

PONTIFICIAE
ACADEMIAE
SCIENTIARVM
SCRIPTA VARIA

89

The Emergence of Complexity in Mathematics, Physics, Chemistry, and Biology

EDITED BY BERNARD PULLMAN

PROCEEDINGS

PLENARY SESSION OF THE
PONTIFICAL ACADEMY OF SCIENCES
27-31 OCTOBER 1992



PONTIFICIA
ACADEMIA
SCIENTIARVM

PONTIFICIA
ACADEMIA
SCIENTIARVM

THE EMERGENCE OF COMPLEXITY
IN MATHEMATICS, PHYSICS,
CHEMISTRY AND BIOLOGY

PROCEEDINGS

Plenary Session of the Pontifical Academy of Sciences
27-31 October 1992

Edited by
† BERNARD PULLMAN



EX AEDIBVS ACADEMICIS IN CIVITATE VATICANA

MCMXCIV

The opinions expressed with absolute freedom during the presentation of the papers and in the subsequent discussions by the participants in the Plenary Session, although published by the Academy, represent only the points of view of the participants and not those of the Academy.

Editorial committee for the preparation of the Proceedings:

Michael Sela
Renato Dardozzi
Giuseppe Del Re

DISTRIBUTED BY PRINCETON UNIVERSITY PRESS

Princeton, New Jersey
ISBN 0 - 691 - 01238 - 5

ISBN 88 - 7761 - 055 - 7

© Copyright 1996
PONTIFICIA ACADEMIA SCIENTIARVM
VATICAN CITY

CONTENTS

<i>Préface</i> (par BERNARD PULLMAN)	XI
Pontifical Academicians present at the Session.....	XVII

DAY ONE - 27 OCTOBER 1992

Opening Remarks (by G.V. COYNE and N. DALLAPORTA)	3
Commemoration of recently deceased Pontifical Academicians	7
OTTO CREUTZFELDT (by J. C. ECCLES)	7
GEORGE SPERI SPERTI (by G. V. COYNE)	8
Presentation of the new members (by G.V. COYNE).....	11
Acknowledgement speech (by BERNARDO MARIA COLOMBO).....	11
Acknowledgement speech (by GEORGES M. M. COTTIER)	14
Acknowledgement speech (by MINURO ODA)	16
Acknowledgement speech (by WOLF J. SINGER)	17
Acknowledgement speech (by RICHARD SOUTHWOOD).....	20
Pius XI Gold Medal Award.....	23

Scientific Papers

ENRICO BERTI: Ordre et désordre des Grecs à Galilée et de Galilée aux temps modernes	25
RENÉ THOM: L'Emergence des Structures	43
LÁSZLÓ LOVÁSZ: Information and Complexity: how to measure them.....	65
ADI SHAMIR: Information, Complexity, and Cryptography	81
Discussion	90

DAY TWO - 28 OCTOBER 1992

W. THIRRING: The Emergence of Order and Complexity in Physics.....	97
P. H. RICHTER: Harmony and Complexity: Order and Chaos in Mechanical Systems.....	103

Discussion	124
F.T. ARECCHI: Complexity in Science: Models and Metaphors	129
C. N. R. RAO: Aspects of Order and Disorder in Complex Solids	161
M. MOSHINSKY: Relativistic Complexity in Physics	177
Discussion	187
M. HELLER: The Non-Linear Universe: Creative Processes in the Universe	191
Discussion	210
M. J. REES: The Epoch of Galaxy Formation	217
Discussion	226
J. L. LIONS: Why is the Earth's environment so stable?	235

DAY THREE - 29 OCTOBER 1992

P.H. RAVEN: Biological Complexity	251
Discussion	266
G. DEL RE: Organization, Information, Autopoiesis: from Molecules to Life	277
Discussion	294
G. GERACI: Chemical Aspects of Evolution	307
Discussion	317

DAY FOUR - 30 OCTOBER 1992

R. CHAUVIN: Les théories réductionnistes en biologie	327
Discussion	335
J. SEIFERT: On the irreducibility of life to chaotic and non-chaotic physical systems	339
Discussion	359
J. C. ECCLES: Evolution of Complexity of the Brain with the Emergence of Consciousness	369
Discussion	388
B. NICOLESCU: Levels of Complexity and Levels of Reality: Nature as Trans-Nature	393
Discussion	411
M. SELA: First General Commentary	419
S. L. JAKI: Second General Commentary	423
J. LEJEUNE: Résumé (Summary and General Synthesis)	433

DAY FIVE - 31 OCTOBER 1992

Solemn Papal Audience.....	445
Address of the Acting President Father G. V. COYNE, SJ	447
Discours de M. le Cardinal PAUL POUPARD	449
Allocution de SA SAINTETÉ JEAN-PAUL II	455
English translation of the Papal Allocution	465

PREFACE

“Le monde est fait pour aboutir à un livre”

Stéphane Mallarmé

La vingt-huitième réunion plénière de l'Académie Pontificale des Sciences, qui s'est tenue à la Casina Pio IV, au Vatican, du 27 au 30 Octobre 1992, a été marquée par deux événements importants dont ce Volume perpétue la mémoire.

D'abord, comme il est de tradition dans ces réunions, l'Académie a consacré une grande partie de son activité à une discussion scientifique. Le thème offert à sa réflexion par le Conseil sur proposition de son Président, le Professeur Marini-Bettolo (malheureusement absent de la réunion pour cause de maladie): “L'émergence de la Complexité en Mathématique Physique, Chimie et Biologie”, a été particulièrement bien choisi à cause de son importance dans le contexte scientifique actuel, de son aspect pluridisciplinaire et aussi en raison de sa portée philosophique et des résonances religieuses que certaines de ses ouvertures ne manquent pas de susciter chez certains. Il répond par son envergure à la vocation de l'Académie Pontificale qui est de “promouvoir les progrès des sciences et l'étude des problèmes épistémologiques s'y référant ... et pouvant contribuer à l'approfondissement des questions morales, sociales et spirituelles” (articles 2 et 3 des Statuts).

Rien n'illustre mieux la richesse des débats dont le thème choisi a été l'objet que la nature des mots-clés qui apparaissent constamment sous la plume des participants et dont chacun pourrait constituer, seul ou couplé avec un terme complémentaire ou opposé judicieusement choisi, le thème d'une réunion séparée. Ordre et désordre, chaos et organisation, diversité et classification, hasard et nécessité, origine (du monde, de la vie, de la mort) et évolution, entropie et anthropie, le plein et le vide (le plein du vide et le vide du plein), la téléonomie et la téléologie, le réductionnisme et le holisme, sont

quelques-uns des concepts qui constituent les multiples facettes du problème de l'émergence de la complexité, autour desquelles se sont organisées des discussions hardies et animées. Les familiers de l'histoire et de la philosophie des sciences reconnaîtront dans le choix de ces concepts l'écho des angoisses spirituelles qui accompagnent la réflexion des hommes sur la nature et le sens de l'Univers depuis la plus lointaine Antiquité.

Qui dit émergence de complexité présuppose un instant de départ où celle-ci fut absente. Il est aujourd'hui quasiment admis que tel était la situation aux origines du monde — au Big Bang, à la naissance de l'espace, de la matière, de l'énergie et du temps — et que l'univers a commencé dans l'état le plus simple d'équilibre thermodynamique. C'est en particulier la thèse défendue, entre autres, par notre éminent confrère Stephen Hawking. La complexification du monde, l'apparition et le développement des structures diverses et composées et des forces multiples est une caractéristique de son évolution et de son ... refroidissement. L'amplification de la complexité paraît avoir été progressive — confirmant ainsi la réalité d'une "flèche de temps" cosmologique —, les êtres vivants doués de conscience représentant son apogée momentanée.

Les mémoires contenus dans ce Volume traitent en grande partie de la matérialité de cette évolution dont ils soumettent le(s) mécanisme(s) à une analyse scientifique et philosophique. En effet, contrairement à ce que croyait Diderot lorsqu'il écrivait que "*l'esprit doit être plus étonné de la durée hypothétique du chaos que de la naissance de l'Univers*", ce schéma évolutionnaire, qui implique la génération de l'ordre à partir du désordre, se heurte, à première vue, au 2^e principe de la thermodynamique qui nous enseigne juste le contraire, à savoir que l'univers doit évoluer toujours dans le sens du désordre croissant. Il paraît établi aujourd'hui que ce conflit n'est qu'apparent et que cette loi ne s'oppose pas à la création de l'ordre (organisation des structures et leur complexification) en certain endroits de l'Univers à condition que se produise en d'autres lieux un désordre compensatoire plus grand, de sorte que le *bilan net* soit un désordre croissant. L'expansion de l'Univers et la création continue du désordre par les étoiles qui convertissent leurs atomes (d'hydrogène) en énergie (lumière et chaleur) garantissent sinon la pérennité du moins la longévité de cette compensation. De fameux développements récents auxquels sont attachés les noms d'Ilya Prigogine et de notre confrère Manfred Eigen ont montré que les systèmes physiques déportés loin de l'équilibre thermodynamique deviennent instables et assument spontanément, par l'établissement de

corrélations de longue portée, des structures organisées (“structures dissipatives”). Ces phénomènes s'observent aujourd'hui facilement dans le monde inanimé. De là à imaginer qu'ils ont pu se produire à une échelle plus complexe et être à l'origine de la formation des structures primitives pouvant conduire éventuellement à l'apparition des organismes vivants, il n'y a qu'un pas, grand il est vrai, que certains n'hésitent toutefois pas à franchir. Paul Valéry, lui, exprime cette réussite de la matière par un des aphorismes, quelque peu paradoxaux, dont il a le secret: *“La Vie est un désordre qui fonctionne”*.

La structuration et la complexification ainsi permises par les lois de la physique, une question cruciale qui se pose est de savoir s'il est possible d'explicitier, dans le même cadre, les caractéristiques des “propriétés émergentes”, propriétés nouvelles qui apparaissent lors de la structuration d'un ensemble plus ou moins complexe à partir de constituants plus simples. C'est le vieux problème du tout qui est plus que la somme des parties, de l'information englobée dans le tout dépassant la somme des informations contenues dans les parties. Dans la terminologie moderne il met en jeu les approches dites holiste et réductionniste de la vision des choses.

Le problème apparaît naturellement déjà au niveau de l'émergence des complexités les plus élémentaires. Toutefois, dans le monde matériel auquel nous avons aujourd'hui affaire, tout au moins en chimie, physique et biologie, il se pose d'une façon particulièrement évidente au niveau de la combinaison de ces briques fondamentales, sinon élémentales, dont sont construits tous les objets de l'Univers, à savoir au niveau de l'association des atomes(*). Rappelons que l'objection principale contre la doctrine démocritienne, qui affirmait que tous les objets étaient formés par “l'agglomération”, “l'agglutination” des atomes indivisibles et impénétrables, était que cette représentation ne permettait pas d'expliquer et encore moins de prévoir l'émergence et la nature des propriétés nouvelles dont étaient doués les objets composés (nous dirions aujourd'hui, en premier lieu, les molécules). L'objection, formulée déjà par Aristote et reprise au cours des siècles, en fait des millénaires, par tous les antiatomistes de l'histoire — et Dieu sait s'il en eut et ceci jusqu'au début du siècle actuel —, n'a été mise en défaut que durant les dernières décennies, en fait depuis l'avènement de la

(*) Que l'on ne s'imagine pas pour autant que le deuxième “principe” constitutif de l'Univers selon Démocrite — à côté des atomes — à savoir le vide est lui le prototype de simplicité. Les théories actuelles nous montrent un vide aussi complexe, sinon plus, que le plein, comme l'ont souligné notre Président Nicola Cabibbo et Carlo Rubia.

prendre position sur ces questions délicates et qui suscitent beaucoup de passions, comme en témoignent certaines des présentations et des interventions reproduites dans ce Volume. Je me bornerai simplement à rappeler ici la phrase célèbre de Blaise Pascal qui, je l'espère, satisfera, elle, tout le monde: *"Toutes choses étant causées et causantes, aidées et aidantes, médiates et immédiates, et toutes s'entretenant par un lien naturel et insensible qui lie les plus éloignées et les plus différentes, je tiens impossible de connaître les parties sans connaître le tout, non plus que de connaître le tout sans connaître particulièrement les parties"*. Nul n'a mieux exprimé la complémentarité des visions réductionniste et holiste du monde. Dans l'exploration de l'Univers, elles correspondent aux deux vues que l'on obtient par les deux bouts d'une même lorgnette.

Si ce premier événement, que j'ai qualifié d'important, de la 28^e Session Plénière de l'Académie Pontificale s'est déroulé souvent sur un terrain mouvant et semé d'embûches, le deuxième frappe, au contraire, par son allure de grandiose solidité. Il s'agit de l'Audience solennelle que Sa Sainteté le pape Jean-Paul II a bien voulu accorder à tous les participants à la Session Plénière et à laquelle furent aussi conviés les dignitaires de l'Eglise et les membres du corps diplomatique accrédités au Vatican. Solennelle déjà par le cadre dans lequel elle s'est tenue (Sala Regia) et la composition de l'auditoire, elle l'a été surtout par ce qui en fut l'épisode historiquement le plus significatif et le plus émouvant et qu'il est conventionnel d'appeler la "réhabilitation" de Galilée. "L'affaire Galilée", qui fut depuis plus de 3 siècles et demi une pomme de discorde entre la Science et l'Eglise a trouvé ce jour-là (31 Octobre 1992) un dénouement heureux. Ce fut l'aboutissement d'une initiative prise par Jean-Paul II, peu de temps après son élévation au Pontificat, désirant voir le cas Galilée réexaminé dans un esprit d'équité par un ensemble de personnalités polyvalentes de stature incontestable. Dans ce but, le Pape a institué le 3 Juin 1981, une "Commission Pontificale pour l'étude de la controverse ptoleméo-copernicienne aux XVI^e et XVII^e siècles", une manière élégante de considérer le cas Galilée dans une optique plus générale et de le replacer dans l'atmosphère de l'époque, conditions jugées indispensables pour un jugement éclairé et équilibré. Les conclusions auxquelles ont abouti les efforts de cette Commission ont été exposées à l'Académie Pontificale par son Président, Paul Cardinal Poupard, Président du Conseil Pontifical pour la Culture. Le texte de ce rapport figure dans l'annexe de ce Volume et chacun peut donc se rendre compte de l'important travail d'exégèse historique et de réflexion qui fut accompli par les membres

de la Commission. On ne peut aussi qu'admirer la franchise intellectuelle et la noblesse de termes qui caractérisent ce texte, rédigé dans le but évident de mettre un terme définitivement aux querelles du passé. La réponse du Saint-Père, également reproduite *in extenso* dans l'annexe de ce livre, non seulement endosse les conclusions de la Commission et reconnaît les torts dont Galilée a eu à souffrir de la part de l'Eglise mais, décidément tournée vers l'avenir, réaffirme l'orientation franchement positive que ce Pape a imprimée, dès le début de son Pontificat, à l'attitude de l'Eglise envers la recherche scientifique et qui repose sur le respect mutuel de l'indépendance de la démarche scientifique et de la démarche religieuse, dont les méthodologies propres, estime-t-il, "*permettent de mettre en évidence des aspects différents de la réalité*".

De par ces événements importants et réconfortants qui ont jalonné la 28^e Session Plénière, cette réunion occupera une place particulièrement significative dans l'histoire de l'Académie Pontificale.

Je ne saurais terminer cette Préface sans exprimer, au nom de tous les participants, notre profonde reconnaissance au Professeur Cabibbo, Président de l'Académie Pontificale et à Monseigneur Dardozzi, Chancelier, pour l'excellente organisation intellectuelle et matérielle de cette réunion.

BERNARD PULLMAN
Académicien Pontifical

DAY ONE
27 OCTOBER 1992

OPENING REMARKS

G.V. COYNE

Pontifical Academician

Fellow colleagues, Ladies and Gentlemen,

It is my pleasant duty to formally welcome you all to this Plenary Session. I should let you know why I am doing this and why Professor Dallaporta is here with me to welcome you in the name of our President G.B. Marini-Bettòlo who, as most of you are well aware, after a serious sickness but fine recovery is unable to be with us at this meeting.

Our first point of business is the message that we would like to send to the Holy Father. The text in Italian is:

Il corpo accademico, riunito in Sessione Plenaria per trattare insieme agli esperti del campo il tema della Complessità e per esaminare il ruolo dell'Accademia Pontificia delle Scienze di fronte ai problemi della modernità, invia un devoto pensiero alla Santità vostra e attende la Vostra Illuminata parola in attesa dell'Udienza di sabato 31 Ottobre 1992.

Con devozione.

The English translation is:

The Academic body of the Academy gathered for the Plenary Session to deal with the theme of Complexity and also to re-examine the role of the Academy in modern society sends its most devoted thoughts to Your Holiness and we are waiting for your words to us on the occasion of the solemn Papal Audience to be held on this coming Saturday 31st October.

With great devotion.

We also propose the following message to the President.

Dear Professor Marini-Bettòlo, as we convene our meeting this morning our first moments were spent in thinking of you. We know that you are with us in spirit and we were happy to hear from the Council of the Academy on their

visit to you yesterday of your splendid recovery and we send you our finest best wishes that this recovery will continue.

I now ask Professor Dallaporta to continue the introduction.

N. DALLAPORTA
Pontifical Academician

Excellencies, Ladies and Gentlemen,

As an introduction to the 1992 Plenary Session of the Pontifical Academy of Sciences I would like, as Professor Coyne has already done, to express our best wishes for the rapid and complete recovery of our president Professor Marini-Bettòlo whom Professor Coyne and myself have been invited to represent on this occasion.

I should like to give a brief outline of the general structure of our meeting. First of all the Council of the Academy, as already mentioned yesterday evening by Monsignor Dardozzi, has chosen *Complexity* as the theme for this year's discussions.

The reason for this choice is already known to most participants but perhaps I can briefly remind you of it. We should see that our Plenary Session is dedicated to discussing some important interdisciplinary questions of great topical and cultural relevance.

Now, Complexity certainly falls into this category and is perhaps on the scientific horizon the theme that appears to be the newest, the most fundamental and the richest as regards its cultural implications. Therefore this choice was almost obligatory.

As this is a theme which has been in existence for only a few years and yet at the same time is a highly extensive one, it was considered advisable that speakers belonging to the Academy should be supplemented by a number of outside experts whose help was likely to enable a sufficiently complete survey of the topic to be made.

In respect to the programme as presented a small change has to be announced Professor Ennio De Giorgi will be unable to participate in this session but if his contribution is received in time it will be read by Professor Lichnerowicz.

The remaining contributions as announced are those of the following Academicians: W. Thirring, C. N. Rao, M. Moshinsky, M. Heller, J. Lions, P. Raven, J. Eccles.

The following Academicians will be chairmen of the various sessions: A. Lichnerowicz, G. P. Puppi, G. V. Coyne, B. Pullman, J. Szentâgothai, J. McConnell, R. Mössbauer.

The invited experts whom I have the pleasant task of introducing to the members of the Academy are, according to the order of their contributions as set out in the programme. Professors:

Enrico Berti	Philosophy	University of Padua
René Thom	Mathematics	Institute des Hautes Études Scientifiques, Paris
Lázló Lovász	Informatics	University of Budapest
Adi Shamir	Informatics	Weizmann Institute of Science, Israel
Peter Richter	Theoretical Physics	University of Bremen
Tito Arecchi	Theoretical Physics	Istituto Nazionale di Ottica, Florence
Giuseppe Del Re	Physical Chemistry	University of Naples "Federico II"
Giuseppe Geraci	Molecular Biology	University of Naples "Federico II"
Rémi Chauvin	Biology	Sorbonne, Paris
Josef Seifert	Philosophy	International Academy for Philosophy, Lichtenstein
Basarab Nicolescu	Theoretical Physics	Université de Paris VI

On behalf of the President and all the Academy I warmly thank them for their collaboration. Special thanks are also due to Professor Giuseppe Del Re.

As has been emphasized by the Holy Father on several occasions, our Academy does not consider itself as being simply a body of high scientific competence, but as a centre for the promotion of science as an integral part of our general culture. It therefore seemed right that our meeting, apart from the closed session which is to deal with internal matters on Thursday 29th October, should be open to a small number of invited guests, who will thus be directly informed of our work in person and prior to the publication of the proceedings. On behalf of the President and all of us I welcome them most heartily to our Academy.

COMMEMORATION OF RECENTLY DECEASED PONTIFICAL ACADEMICIANS

The first act performed by the 1992 Plenary Session was to honour the memory of those Members who had died in the preceding year: Otto Creutzfeldt and George Speri Sperti. The commemorations, by J. C. Eccles and G. V. Coyne, are published in the order in which they were presented

OTTO CREUTZFELDT

B. April 1, 1927. Professor of Neurology at the Max-Planck Institute for Biophysical Chemistry in Göttingen, Germany. Member of the Pontifical Academy of Sciences since October 1990. Died January 23, 1992.

Mr. Chairman, Academicians

It is a great honour and a privilege for me to be chosen to present a short statement on the life of my dear friend Otto Creutzfeldt, a Pontifical Academician from 1990 till his death on 23rd January 1992. He was one of the leading brain scientists in the world with a wonderful performance as a scientist and teacher and with his entrancing spirit. He had been for over 20 years Director of the Department of Neuro-Biology that he set up at the invitation of Manfred Eigen at the Max Planck Institute for Biophysical Chemistry in Göttingen. Before that, he had been for nearly 10 years at the Max Planck Institute for Psychiatry in München. As I contemplate the greatness of Otto as a scientist and scholar I come to his great teacher Richard Jung of Freiburg, who had a miraculous success for German Neuroscience, attracting wonderful students who were enthused by Richard's great insights in neurology and in humanity, and by one of the best electrophysiological laboratories in the world. Richard Jung was the first to appreciate my intracellular recordings for cortical neurons in 1951-52. And Richard Jung's institute was always visited when I came to Europe. So, I met there Otto as a young man in his early thirties and was enthused by his success in intracellular recording of neurons of the cerebral cortex, which was a great advance. Soon after my election to the Pontifical Academy I was invited by

the President Lemaître, the great cosmologist, to organise a meeting of the Academy on *Brain and Consciousness* and I chose Otto as one of my participants. That was in 1964. He spoke on transmission in the visual system. I think he was the youngest participant, 37, in this room here. He illustrated the story of the visual system with intracellular recordings of the neurons to the visual cortex responding to specific patterns of light on the retina. It can be seen in *The Brain and Conscious Experience*, a publication of the Academy.

Otto's next association with the Pontifical Academy was in 1988 when he participated in a conference I organized at the invitation of the President Chagas. It was entitled *The principles of design and operation of the brain* which Otto and I co-edited for Scripta Varia with the international publication in *Experimental Brain Research*, Series 21.

At that meeting he gave a talk with G. Ojemann of Seattle. It was the last of Otto's papers, entitled (and here is a very advanced subject), *Neuronal Responses in the Human Lateral Temporal Lobe to Speech*. This was done remarkably on conscious human subjects and recordings were of neurons in their brain. This study of Otto's can be regarded as the beginning of Otto's final goal in the study of the brain with his lifetime interest in the mind/brain problem and the philosophy of the person. But he did not live to go on with this. We will sadly miss his great wisdom. Had he lived he could have led us on to an understanding of the self transcending the dominant materialism of today with its banal value system. The Academy suffers a great loss after only two years of his fellowship, but today we are electing Professor Wolf Singer, a great friend and kindred spirit. The greatness of Otto is not only as a neuroscientist and philosopher but also as a human person radiating love particularly to his wife Mary and his children. May I ask that we all rise for a moment of silence in memory of Otto Creutzfeld.

J. C. Eccles

GEORGE SPERI SPERTI

B. in Covington, KY (USA) on January 17, 1900. Biochemist. Professor at St Thomas Institute for Advanced Studies, Cincinnati, Ohio (USA). Member of the Pontifical Academy of Sciences since October 28, 1936. Died on April 24, 1991.

I would like with these few brief words to commemorate George Sperti Sperti, who was an important figure in what I think can be defined as the second wave of the establishment of Catholic intellectual life in the United

PRESENTATION OF THE NEW MEMBERS

The next act of the Plenary Session consisted in the welcome to the new members, who answered with brief speeches of thanks.

Academician G. V. Coyne said:

Life in general, and the life of our Academy, has to deal with suffering and death. But there are also many positive events. We have the great joy of seeing our society revitalized with new members. Against this background I would like to welcome to our society the newly elected members, nominated on the 18th of September 1992.

Bernardo Maria Colombo of Italy,
Minuro Oda of Japan,
Wolf J. Singer of Germany,
Richard Southwood of Great Britain.

The solemn ceremony will take place before the Holy Father on Saturday, and you will receive the insignia of your office. It is my pleasure, however, to present to you the brief which nominates you as a Papal Academician.

During the Plenary Session, the nomination (on the 28th of October 1992) of Georges M. M. Cottier OP, of Switzerland, as an honorary member of the Pontifical Academy was communicated to the Academicians by Mrg. Renato Dardozi, Director of the Academy. Father Cottier's acknowledgement speech, although actually delivered during the scientific meeting, is printed with the others in this part of the Proceedings.

BERNARDO MARIA COLOMBO

B. in Olgiate (Como), Italy, in 1919. Professor of Demography at the University of Padua. Member of the Italian National Commission for the guarantee in statistical information.

Ladies and Gentlemen,

I am sorry for my limited command of the English language, which does not allow me to express in the right words how deeply I am touched by the nomination as a member of this Academy. I fully appreciate the honour paid to my person and what the nomination means in terms of confidence in my

possibilities for collaboration. I am sure you will kindly forgive me and I wish to express my best thanks.

To overcome the embarrassment in introducing myself, I shall start by speaking of another person, Marcello Boldrini, a Pontifical Academician. I was fortunate to be a pupil of Professor Boldrini's when at 19 I started attending the Statistical Institute he directed in Milan while preparing to graduate in Economics. There, I soon learned what it means to do research, with rigor, tenacity, open-mindedness, and last but not least, with intellectual honesty. War events then stole 5 years of my youth. But, in a concentration camp, I luckily had at my disposal the manual on Statistics that Boldrini had published in 1942. In more than 1,000 pages, making use of his deep knowledge in many fields, he was able to present statistical tools through a host of examples, showing the power of these procedures. I think I have been a little infected by this insatiable curiosity for everything new and intriguing.

After the war, I started as an Assistant of Statistics in Venice. My first interests were methodological ones and concerned mainly themes of foundations for statistical inference, at that time under discussion in my country. It was proposed that I should give a look at the strange phenomenon of birth rate recovery during the war in countries involved in the conflict or near the area of operations. I worked hard on this and I was able to discard some explanations which had been advanced but found it difficult to propose solutions that could be adequately supported by evidence. The book I wrote on the subject opened several doors for me. One of these was as a Rockefeller fellow for Social Sciences at the Office of Population Research at Princeton University. There, I enjoyed the opportunity of being in contact with several research workers who then became prominent figures in the world of demography. For quite a while, this remained my milieu, for research and various engagements, until problems of health — later solved — compelled me to restrict my activity.

Among my interests, there have always been biometrical ones. On this point, for instance, I gave attention to the sex ratio in man. Another book came out, in which I succeeded in drawing seemingly plausible conclusions about the level of the primary sex ratio. But I ended up stating, as I did in a paper read at a Symposium in Cold Spring Harbor, that in the interest of both science and life the problem of the determination of the human sex ratio remained unsolved.

When I returned to Italy from Princeton, I enjoyed the opportunity of being called to give lectures in Padua. There were many more departments at

Padua than at Venice. In its Statistical Institute, I started being contacted by many research workers from various fields asking for advice on statistical techniques. From that experience several things came out: papers of my own, both in statistical methods and substantive matters, co-authorships, acknowledgements. Among the colleagues seeking advice, was a young Botany student. She became my wife.

At that time I obtained a Chair of Statistics in Venice, but later on I switched to Padua and Demography, where I had the possibility of pushing for the creation of a new statistical Faculty. Soon other engagements fell on my shoulders, I was nominated as a member of the Parliamentary Commission for evaluation and proposals on the school system in my country: 110 meetings in Rome in eight months and a book on higher education were the consequence. Experts in educational sciences did not care much for it and continued to discuss the question among themselves.

I was also called as an external *peritus* in the preparation of what became a pastoral constitution of Vatican Council II. It was embarrassing to vote raising hands at the same level as the chairing Cardinal.

One subject which has occupied my mind since Princeton is that of demographic policies. At several international gatherings, I had also the opportunity of seeing in action the politics of demographic policies, but my personal interests were mainly scientific ones. A big challenge came when I was invited to give a lecture on human rights, ideology and population policies at the closing plenary session of a Conference of the International Union for the Scientific Studies of Population. But I have continued thinking about these problems, and have had other occasions to go further. The road for solutions is steep, and full of traps.

Later on, another avenue was opened up in my research, involving official statistics. This is a very rich and largely unknown field. Several papers on the subject and a series of administrative undertakings which I do not mention, were the result.

I wish to jump to my main current activity in research. I have come back to biometry, this time on the menstrual cycle and its relation to fertility regulation. It is a fascinating field. Much work, with collaborators, has been done on some first class documentation we have collected and more will come with an international multicenter prospective study.

May I conclude my talk with a prayer, taken from the Vespers of a day last summer. It is good for me, but perhaps also for the Academy. "To those who search for the Truth, may You grant the joy of finding it, and, having found it, the desire to seek for it again."

GEORGES M. M. COTTIER

B. in Geneva, Switzerland, in 1922 Professor at the Diocesan Seminar, Geneva,
Theologian of the Pontifical House.

Je tiens à vous remercier vivement du grand honneur que vous me faites en m'accueillant parmi vous.

Je me suis demandé quelle signification pouvait bien avoir cette nomination, qui est pour moi une surprise. Si je pose la question, c'est parce que la présence d'un philosophe dans votre Académie n'est peut-être pas évidente pour tous. C'est aussi parce que je dois m'interroger sur ce que pourra être ma propre contribution.

J'ai donc enseigné la philosophie jusqu'à ce que, il y a deux ans, un nouveau travail m'appela ici, à Rome.

Je me suis beaucoup occupé de Karl Marx. Pour un homme de ma génération, il n'y a là rien d'extraordinaire. Marx m'a conduit à Hegel, qui est un penseur d'une bien autre envergure. Or l'un et l'autre, Hegel et Marx, étaient habités par une même ambition, d'enfermer dans une connaissance exhaustive la totalité de la réalité qui, pour eux, est avant tout la réalité de l'histoire.

Karl Marx, sans cesser de dépendre de lui, critique Hegel, en qui il voit l'achèvement et la perfection de la philosophie spéculative. Il annonce la mort de la philosophie, à laquelle devrait succéder une nouvelle discipline, qu'il appelle le *matérialisme historique*. Ce qui fait la nouveauté et l'originalité de celui-ci c'est qu'il est présenté comme une *science de l'histoire*, de ses structures, de la nécessité de son cours et de son avenir. Le matérialisme historique prétend aussi nous apporter une connaissance prédictive, de nature scientifique, de l'avenir.

De là une première série de problèmes auxquels je n'ai cessé de réfléchir. Abstraction faite de la question, à vrai dire essentielle, de la vérité ou de la fausseté du contenu du matérialisme historique, que peut bien signifier ici le terme de science, si on le compare à son usage dans les sciences de la nature? La question posée à propos de l'histoire des historiens et de la philosophie de l'histoire, doit l'être également pour des disciplines comme l'économie, la sociologie, ou encore la psychologie et la psychanalyse, — en un mot, pour l'ensemble des sciences humaines. Il apparaît aussitôt que la parole science est polysémique et que son usage est analogique.

Hegel — qui est à l'horizon de Marx — pose une question qui, à mon avis, est beaucoup plus radicale. Cette question, elle ressort de deux

affirmations du philosophe. La première est: *tout ce qui est rationnel est réel, tout ce qui est réel est rationnel*. Réel signifie ici le cours de l'histoire humaine et le sens de cette histoire. La seconde est: la philosophie de l'histoire est la *véritable théodicée*, c'est-à-dire la justification de Dieu, que Leibniz avait tenté de construire sur des bases métaphysiques.

Jamais sans doute, dans l'histoire de la philosophie, la raison n'avait affiché une telle ambition. Mais jamais sans doute n'aura-t-elle fait une démonstration aussi patente que la raison humaine, quand elle perd le sens de la mesure et le sens de ses limites, est livrée à l'égarément.

Hegel, en effet, ne réussit à mener à terme son projet qu'en limitant à l'extrême la part du mal dans le cours des choses humaines, et ceci à un tel point que ce qui devait, dans son intention, constituer une théodicée, est devenu une justification du mal. De même la contingence se voit rejetée, comme un facteur négligible, dans les nuages du système.

Pour les hommes du 20ème siècle que nous sommes, après tant d'expériences terribles, il n'est plus permis de banaliser ainsi le mal; qui le tenterait encore recevrait des événements les plus immédiats un cinglant démenti. Ainsi, ce que nous devons considérer comme l'échec de la philosophie hégélienne de l'histoire nous oblige à regarder en face les questions de l'irrationnel et de la contingence.

Plus radicalement, puisque une raison qui prétend tout expliquer aboutit ainsi à des impasses majeurs, nous sommes conduits à nous interroger sur la raison elle-même et sur la rationalité, — quelles sont leur signification, leur autorité, et aussi leurs limites?

Ces problèmes philosophiques, sous un certain aspect, intéressent aussi l'épistémologie des disciplines scientifiques. Quand ces dernières réfléchissent sur elles-mêmes, il ne leur est peut-être pas inutile de se référer à un point de comparaison extrinsèque. En ce sens, le philosophe peut se sentir d'une certaine utilité vis-à-vis des ses collègues scientifiques.

Si tel n'était le cas, il lui resterait, en ce qui le concerne, la conviction socratique que le premier pas de la philosophie est de savoir qu'on ne sait pas. Telle est bien ma première réaction devant des exposés scientifiques d'une haute complexité qui recourent de surcroît à une technicité poussée.

C'est dans cette disposition d'esprit que je vous remercie chaudement de m'accueillir parmi vous.

delineated, often isolated description systems, that they are creations ultimately based on primary experience whereby the criteria for "truth" are not too different from those applied to pieces of art: aesthetics and consistency.

Anyway, the student felt that getting involved in the neurosciences would allow him to move freely back and forth or up and down across the different levels into which the world seemed to be subdivided - as Nicolai Hartmann had told him - and which - in some mysterious way - appeared to be interdependent. Otto Creutzfeldt accepted me as student and so I found myself in the laboratory, studying the exchange of electrical signals between the two cerebral hemispheres of animals, looking for the substrate that synchronizes their activity and assures that they wake up at the same time. In parallel, the medical curriculum required me to work in hospitals, to see patients, to act and to do something whose relevance was directly accessible. For many years I experienced the medical and the scientific approaches to the solution of problems as equally fascinating but they seemed difficult to reconcile. One required rapid assertive decisions, and pragmatic action, even if the database was poor - the other, by contrast, necessitated doubt and hesitation, even if the data seemed excellent. Finally, wanting to know more won over wanting to apply what we know and my attempts to explore the world became more and more indirect. Increasingly sophisticated equipment became intercalated between my senses and the world that I wanted to understand and rather soon, the phenomena which attracted most attention were those which could only be made to exist by using electron microscope amplifiers and chemical reactions, and the significance or meaning of the invisible and intangible phenomena most of the time escaped primary intuition it is only within the framework of theories that we manage to assign a particular meaning to the phenomena that we believe we can isolate with our methods - and very often we even ignore how and why we were driven to base our interpretation on that particular theory and not on another.

Of course, reality fell short of my expectations. We have not succeeded in moving freely back and forth between the description systems for mental and physical events, even if, in unreflected lab talks, we say things like "information about this event is only attended to and reaches consciousness if the responses of the cells signalling the event are sufficiently coherent". What we probably mean is that phenomena such as attention, consciousness and intentionality are emergent properties of highly complex aggregates of

matter such as our brains, that these phenomena come into existence only through interactions between such highly organized brains, when these observe one another and invent descriptions for the observed phenomenology. What we probably mean is that the biophysical processes that we define in individual brains and in the framework of description systems of the natural sciences, are somehow and obviously causally related to the mental phenomena that we define in the description systems of the humanities - but until now we seem to be unable to design even intuitively graspable concepts or metatheories which would allow us to unify the different systems of description, and for many who do not adhere to monistic concepts of emergentism this is a relief rather than a worry.

I avoided recapitulating those parts of my scientific vita which must have been made available to you when you had to decide on me, but feel I owe you a few words on our current interests. Above all we want to understand how the brain constructs representations of its environment, how it codes and represents perceptual objects, how it stores and how it recalls this information. To this end we study developmental learning processes which are known to lead to drastic and experience-dependent changes in the architecture of neuronal connections. We consider this early learning process as an interesting transition between embryonic, purely genetically determined development and adult learning. In addition, we investigate the functional organization of the cerebral cortex, in particular its dynamic properties and temporal codes, because it is generally assumed that cognitive representations reside in the neocortex. We pursue these questions primarily in experiments with animals when we examine system properties and in *in vitro* preparations of brain tissue when we analyse cellular and molecular mechanisms, but we attempt, whenever possible, to relate our findings to brain processes in humans. We do this by investigating the development of cognitive functions in babies and by testing predictions on cognitive performance in psychophysical experiments with adult subjects.

To me the most fascinating and at the same time puzzling issue of this research is the growing evidence, that there is no single site in the brain where all information converges and where a *homonculus* could be seated which decodes the results of the many parallel processes, interprets them and reaches decisions - as Descartes and most before and after his time had postulated. Rather, we face an immensely complex and distributed system, which lacks a coordinating metastructure and nevertheless, through the action of local rules, selforganizes towards ordered and coherent states. I

believe that our social and economical systems show some of these features and the recent and dramatic collapse of those systems which had the most hierarchical and centralized organization seems to indicate, that coordinating metastructures may not be a good solution for the management of systems once they have reached a critical level of complexity. Thus, studying the brain may not only assist us in improving the therapy of its diseases but it may help us in the search for principles of organization that are required to stabilize highly complex systems. To identify such principles and to translate them into political and economical structures appears to me as the most important challenge to which we are at present exposed. I assume that it is your expectancy that what I have learnt, which is in no way special, can make a small contribution to the interdisciplinary endeavours of this distinguished academy and that it can, in combination with the wealth of scholarship assembled here, make a modest contribution to the better understanding of the *conditio humana* and the world in which it evolved, and that this will help in turn to improve the management of the future of our biotope. I shall try my best to meet these expectancies and want to join this promise with the expression of my deep gratitude for your confidence. Thank you for accepting me.

RICHARD SOUTHWOOD

B. in Northfleet (Kent), Great Britain, in 1931. Linacre Professor of Zoology and Rector of the University of Oxford, England. Member of the Royal Society, of the U.S. National Academy of Science, of the American Academy of Arts and Science, of the Norwegian Academy of Arts and Science. Baronet since 1984 and "Cavaliere Ufficiale dell'Ordine al Merito" of the Republic of Italy since 1991.

Ladies and Gentlemen

I am a biologist, whose current interests lie particularly in the field of Environmental Studies. From my childhood I have had a keen interest in Natural History and at the age of 17 had the good fortune to go to Rothamsted Experimental Station (a large agricultural research institute) and work in the Entomology Department as a vacation worker. From the work I undertook there and some private studies, I was able to publish a few short scientific papers whilst still an undergraduate. For one of these papers I needed to read another study which had been published in Italian and it seems appropriate to recall here that the translation was kindly undertaken

for me by a Catholic priest. I studied for my first degree at Imperial College London, graduating in 1952. I was then given a scholarship by the Agricultural Research Council to return to the Entomology Department at Rothamsted (which was associated with London University) and work towards a Ph.D. The department was much concerned with the movements and migrations of insects and one part of my own studies was concerned with the ecology of field-margins: the interface between the natural habitat and what we would now call the agroecosystem. Those two threads have been an important part of my subsequent interests.

Returning to Imperial College as a teacher of Applied Entomology in the Department of Zoology, I continued my research into animal ecology, being more particularly concerned with insects. Why do some insects fly around a great deal whilst others remain fairly stationary? I was able to relate this in a semi-quantitative way to the permanence of the habitats that the insects occupied and that led me on to consider the role of the habitat in shaping the ecological strategies of species. One can view the biological characteristics of species, their size, shape and life cycle as exhibiting the characters which have been forged by the forces of evolution on the anvil of their particular environments. Those organisms that live in short-term situations, such as carrion, breed rapidly, move around a great deal and produce large numbers of offspring. Those that live in more stable situations, such as an insect living on an oak tree, will be more sedentary, will produce smaller numbers of offspring and will have defensive mechanisms to increase the probabilities of their survival. These sorts of patterns of nature have always fascinated me, and another variable which I noticed as a young student and which has now been thoroughly explored is the number of different species of insects associated with different varieties of tree: some such as the oak in Britain have many hundreds of insect species while others, such as the cedar in Britain, have very few. Studies have shown how this phenomenon may be related to many different factors including the length of time the tree has been present in the region, the relative abundance of the tree species and the level of its chemical defences.

Studies made on the edges of agricultural land have shown the striking impact of agricultural activities on these habitats. Why were the populations of partridges falling all over Western Europe? The answer proved to be the effect of herbicides in eliminating weeds from the cereal fields, which had provided shelter and food for the insects which were a vital food for young partridge chicks in the first few weeks of life. One can thus easily see how

one particular action can have repercussions which extend both in time and space. Such repercussions may be quite detrimental compared with the original procedure and so ecologists have met economists in trying jointly to address a cost benefit analysis of environmental change.

After a period as Professor of Zoology and Dean of Science at Imperial College, I came to Oxford in 1979 as Linacre Professor of Zoology and for the last four years have held office as Vice-Chancellor, the University's executive head. However, through work with a number of Government bodies, I have been concerned for the last twenty years with the environmental impact of various human activities ranging from the problems presented by the addition of lead to petrol, by the pollution caused by the excessive use of pesticides, by radiation from nuclear power and other sources to the impact of power station emissions on lakes and waterways, particularly in Scandinavia, through the phenomenon of 'acid' rain. A contribution to the resolution of these problems is the focus of my current activity.

ORDRE ET DÉSORDRE DES GRECS À GALILÉE ET DE GALILÉE AUX TEMPS MODERNES

ENRICO BERTI

Università di Padova, Italia

Avant tout il nous faut définir les notions d'ordre et de désordre. Par "ordre" nous entendons la disposition des éléments d'un ensemble selon un ou plusieurs critères reconnaissables: par exemple, si ces éléments sont des nombres, un ordre possible sera la série des nombres naturels, une progression arithmétique, une progression géométrique, ou encore une succession plus compliquée, résultant de plusieurs critères de succession (addition et soustraction, etc.). En tout cas, l'ordre implique la possibilité de réduire une multiplicité illimitée à l'unité ou à une multiplicité limitée, ou bien la possibilité de réduire l'indéterminé au déterminé. Le "désordre", par conséquent, n'est que l'absence d'ordre, c'est-à-dire de critère, de détermination.

Dans l'histoire de la science et de la philosophie — qui à l'origine étaient confondues ou étroitement liées — on rencontre deux types fondamentaux d'ordre reconnus par l'homme dans la réalité naturelle, c'est-à-dire dans l'univers. Le premier type est l'ordre "simple", fondé sur un critère unique: il pourrait aussi être appelé ordre "mécanique", non par référence à la science mécanique que nous connaissons aujourd'hui, mais parce que ses partisans assument comme modèle pour l'interprétation de la réalité la machine (en grec *mechanè*), réduisant tout changement au mouvement mécanique, c'est-à-dire au déplacement de parties matérielles dans l'espace. Le deuxième type est l'ordre "complexe", fondé sur plusieurs critères: il pourrait aussi être appelé "ordre biomorphique", parce que ses partisans présupposent comme modèle l'organisme vivant, où l'on observe plusieurs changements, qui ne

sont pas réductibles au simple mouvement mécanique, et cependant sont tous orientés vers le même but, la conservation de la vie¹.

Dans la première période envisagée par notre exposé, c'est-à-dire des Grecs à Galilée, on peut constater une évolution progressive des visions du monde, de la prépondérance de l'ordre complexe, de type biomorphique (antiquité et moyen âge), à la prépondérance de l'ordre simple (Galilée), tandis que dans la deuxième période, c'est-à-dire de Galilée à nos jours, on peut constater le passage inverse, de la prépondérance de l'ordre simple, de type mécanique (XVII^e et XVIII^e siècles), à un ordre complexe qui est encore, d'une certaine façon, biomorphique (XIX^e-XX^e siècle). Naturellement dans les deux périodes, et même chez les auteurs qui soutiennent l'un ou l'autre type d'ordre, il y a des exceptions à la tendance dominante, mais on peut parler également d'une prépondérance de l'un ou de l'autre type d'ordre. Je chercherai à illustrer avec plus de détails ces deux passages.

I. Des Grecs à Galilée

1. La naissance du concept d'ordre et sa double signification

On a l'habitude de faire coïncider la découverte du concept d'ordre avec la naissance de la philosophie (ou de la science, qui dans l'antiquité coïncide avec la philosophie), c'est-à-dire avec la pensée des philosophes de Milet (Thalès, Anaximandre, Anaximène, VII^e et VI^e siècles avant J.C.). Dans les oeuvres des poètes qui leur sont antérieurs, en effet, surtout chez Hésiode, on rencontre seulement la notion de désordre, indiquée par le mot *chaos*, faisant allusion à un espace immense et vide, à une sorte d'abîme, qui serait à l'origine de toutes les choses. Chez les premiers philosophes au contraire, en particulier chez Anaximandre, on rencontre la notion d'ordre, indiquée par le mot *taxis*² ou, plus généralement, par *kosmos*, qui désignait à l'origine seulement l'ornement (d'où la notion de "cosmétique"), mais a pris ensuite la signification d'"ordre" (peut être avant tout l'ordre de la cité et ensuite l'ordre

¹ J'adopte l'expression "ordre biomorphique" au lieu de "ordre biologique" pour éviter toute référence à la biologie, telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui, tenant compte des remarques qu'à ce propos m'ont été adressées par les professeurs B. Pullman, N. R. Rao e M. Sela.

² Anaximandre, frg. 1 Diels-Kranz, selon lequel les êtres s'engendrent d'un principe indéterminé et se corrompent en faisant retour dans ce dernier selon l'"ordre" (*taxis*) du temps.

du monde entier)³ et plus simplement de "monde" (d'où les mots "cosmique", "cosmologie", etc.).

Chez les philosophes de Milet, et même chez Héraclite, l'ordre du monde est essentiellement de type biomorphique, parce qu'ils réduisent toutes les choses à un principe qu'ils appellent *physis*, c'est-à-dire principe de la génération, ou de la vie, d'où les choses prennent leur naissance et auquel elles font retour d'une manière qui rassemble à la mort. Cela n'empêche pas l'existence, dans l'univers, d'un rythme cyclique (surtout chez Empédocle) où l'ordre alterne avec le désordre, ni l'existence de processus de type mécanique à la base de la génération et la corruption, comme la condensation et la raréfaction (Anaximène), ou l'agrégation et la désagrégation des quatre éléments (Empédocle). Le philosophe chez lequel cette conception de l'ordre atteint le maximum de complexité est Anaxagore, qui considère l'ordre cosmique comme le résultat de l'action ordonnatrice accomplie sur le mélange initial, qui était une forme de désordre, par une intelligence transcendante (*noûs*).

Si cette conception "complexe" de l'ordre peut être considérée comme la principale durant cette période, elle n'est pas la seule professée par les premiers philosophes grecs, puisque dans le même temps les Pythagoriciens ont élaboré, probablement sous l'influence de l'astronomie chaldéenne, une explication des mouvements des astres qui est essentiellement de type mécanique, parce qu'elle consiste à admettre des mouvements circulaires du soleil, de la lune, de la terre et des autres planètes autour d'un "feu" qui serait au centre de l'univers. Cet ordre est beaucoup plus régulier, c'est-à-dire plus simple, que l'ordre admis par les Milésiens et surtout il est fondé, comme par ailleurs, selon ces philosophes, l'est toute la réalité, y compris les phénomènes terrestres, sur des rapports mathématiques, c'est-à-dire sur les nombres.

Une conception mécanique de l'ordre cosmique, qui admet un ordre beaucoup moins régulier, mais paradoxalement encore plus simple, que celui des Pythagoriciens, est représentée par l'atomisme de Leucippe et Démocrite (V^e siècle), selon lesquels, comme il est bien connu, toutes les choses dérivent du mouvement mécanique des atomes dû au simple hasard. Il faut dire, cependant, que cette conception n'a jamais eu beaucoup d'audience en Grèce: elle a été reprise, en effet, par Epicure (III^e siècle) et par Lucrèce (I^e siècle), mais n'est jamais devenue la vision du monde dominante dans la culture grecque. En tout cas, il faut remarquer que, dès son origine,

³ W. JAEGER, *Paideia. Die Formung der griechischen Menschen*, Berlin 1933, vol. I, ch. IX.

le concept d'ordre s'est présenté dans la double signification que nous avons signalée, celle d'ordre biomorphique et celle d'ordre mécanique.

2. *Le développement des deux concepts d'ordre*

Chez les deux philosophes grecs les plus célèbres, ceux qui ont exercé l'influence la plus grande dans toute l'histoire de la pensée, c'est-à-dire Platon et Aristote, nous retrouvons les deux concepts d'ordre déjà mentionnés, combinés entre eux de sorte que l'un s'applique au ciel et l'autre à la terre, mais avec, dans l'ensemble, une suprématie de l'ordre biomorphique. Pour ce qui concerne les phénomènes célestes, Platon accepta le modèle introduit par les Pythagoriciens, le modifiant simplement sur un point, c'est-à-dire en substituant la terre au feu central et en faisant tourner tous les autres corps autour d'elle. De cette manière il créa ce qu'on a appelé le "modèle à deux sphères", selon lequel l'univers est constitué par deux sphères concentriques: la terre immobile au centre et le ciel qui tourne autour d'elle⁴. Il s'agit d'un modèle mécanique, parce que le phénomène principal auquel tous les autres sont réduits est le mouvement circulaire; cependant ce mouvement est produit par une âme immanente au monde, ce qui ressort du modèle biomorphique, parce que l'âme, chez les anciens, était essentiellement le principe de la vie.

Il semble, en outre, que Platon ait posé à ses disciples le problème suivant: comment expliquer, c'est-à-dire réduire à une règle, les mouvements apparemment irréguliers des planètes, en employant la formule devenue fameuse de "sauver les apparences" (*sózein ta phainomena*)⁵. Cela donna l'occasion à Eudoxe de Cnide de formuler sa célèbre théorie des sphères concentriques, selon laquelle le mouvement apparemment irrégulier de chaque planète serait le résultat de la composition des mouvements réguliers, c'est-à-dire circulaires, de trois ou quatre sphères ayant comme centre la terre, mais avec des axes différemment inclinées et avec les pôles de l'une fixés sur la surface de l'autre. Cette théorie, un peu modifiée quant au nombre des sphères par Callippe, disciple d'Eudoxe, fut acceptée par Aristote, qui par conséquent n'est ni l'inventeur ni le principal représentant du système géocentrique.

⁴ TH. KUHN, *The Copernican Revolution. Planetary Astronomy in the Development of Western Thought*, Cambridge, Mass., 1957, ch. I.

⁵ Simpl. *in de Caelo*, p. 488 Heiberg = Eudoxos, frg. 121 Lasserre.

Un autre disciple de Platon, Héraclide de Pontus, donna au même problème une solution différente, en faisant tourner les planètes autour du soleil et le soleil autour de la terre, ce qui ressemble beaucoup au fameux système proposé au XVI^e siècle par Tycho Brahe. Ensuite, Aristarque de Samos (III^e siècle avant J.C.) résoudra le problème posé par Platon en admettant le mouvement des planètes et de la terre autour du soleil, ce qui ressemble au système héliocentrique de Copernic. Hipparchus de Nicée (II^e siècle avant J.C.) reprendra l'hypothèse géocentrique de Platon substituant aux sphères d'Eudoxe des mouvements circulaires excentriques et des épicycles (c'est-à-dire des mouvements circulaires ayant comme centre un point qui tourne lui aussi autour de la terre). C'est à cette dernière théorie que se rattachera Ptolémée d'Alexandrie (II^e siècle après J.C.), le fameux astronome auteur du système dominant jusqu'à Galilée, qui lui ajoutera seulement quelques complications ultérieures. Dans tous ces cas nous sommes en présence de modèles d'ordre de type mécanique, qui réduisent tous les phénomènes célestes à des mouvements circulaires.

Il faut ajouter, cependant, que Platon, et probablement ses disciples aussi (sauf Aristote), considéraient ces théories comme simplement vraisemblables, et non comme nécessairement vraies, parce que pour Platon il n'y a pas de science des phénomènes sensibles, de sorte qu'on peut faire à propos d'eux seulement un "discours vraisemblable" (*eikôs logos*), étant donné que la véritable science a pour objet seulement les réalités transcendentes. Un discours encore plus éloigné de ce qui est vrai concerne, selon Platon, les phénomènes terrestres, où l'on retrouve des mouvements complètement irréguliers. Cela n'empêche pas, toutefois, qu'aussi bien le ciel que la terre, pour Platon, soient ordonnés selon des rapports mathématiques, qui s'expriment dans "les formes et les nombres", rapports dont l'auteur est une intelligence démiurgique⁶. On peut conclure, par conséquent, que chez Platon nous avons une suprématie de l'ordre mécanique sur l'ordre biomorphique.

Aristote, comme cela est bien connu, conserve pour les phénomènes célestes l'explication donnée par Platon, Eudoxe et Callippe, qui était de type mécanique, attribuant aux astres une matière incorruptible et inaltérable (l'éther) et admettant comme cause de leurs mouvements des moteurs immobiles, qui agiraient en exerçant une sorte d'attraction amoureuse sur les âmes des astres (explication de type biomorphique). Pour Aristote aussi les mouve-

⁶ PLATON, *Timée*, 27 C-29 D; 52 D-53 B.

dire, d'ailleurs, que cette dévaluation de la métaphysique était partagée, à l'époque, par les adversaires aristotéliens de Galilée eux mêmes.

Lorsque Galilée découvre, grâce à sa lunette d'approche, que les corps célestes ont les mêmes propriétés que les corps terrestres, par exemple que la lune a des aspérités et que le soleil a des taches, réfutant de cette manière la croyance d'Aristote en l'inaltérabilité des cieux, il semble assimiler les premiers au second, mais en réalité il trouve dans cette découverte la confirmation de l'homogénéité du ciel et de la terre, et par conséquent de la validité de l'application du modèle mécanique et mathématique à la terre aussi bien qu'en ciel. De cette façon, comme il l'admet lui-même, Galilée ne réduit pas le ciel à la terre, mais il porte la terre au ciel¹². Là nous voyons le triomphe de l'ordre mécanique, très simple, sur l'ordre biomorphique, bien plus complexe, c'est-à-dire l'extension de l'ordre mécanique à l'univers tout entier.

Cela induit Galilée à croire que le mouvement circulaire, propre aux corps célestes, appartient à tous les corps, c'est-à-dire qu'il est un état d'inertie, de même que le repos¹³, ce qui est notoirement faux, même si cette thèse mènera à la découverte du principe d'inertie, formulé par Descartes, selon lequel le mouvement rectiligne et uniforme d'un corps n'a besoin d'aucune cause, mais se maintient dans son être si rien ne vient l'empêcher¹⁴. Elle semble être manifestement en contraste avec la philosophie d'Aristote, selon laquelle tout changement requiert une cause, mais sa validité est vérifiable seulement dans des conditions idéales, c'est-à-dire pour des mouvements sans frottement, qui dans l'univers physique, n'existent pas. Encore une fois, donc, la mathématique l'emporte sur la physique dans le sens que la première absorbe la seconde.

Fort de cette assimilation, Galilée croit trouver la démonstration physique de la théorie copernicienne dans le phénomène des marées — qui au contraire, comme l'on sait, est produit par l'attraction lunaire —, et par conséquent il donne à cette théorie non seulement la valeur hypothétique qui lui était reconnue par le cardinal Bellarmine (par analogie à la valeur hypothétique reconnue à la théorie ptolémaïque par les commentateurs médiévaux d'Aristote), mais il lui donne la valeur d'une description fidèle de la réalité physique, c'est-à-dire la valeur d'une vérité ontologique. C'est pour cette raison, et par le fait qu'il donne la même valeur à toutes les théories physiques, que Galilée demanda d'être nommé par le Grand Duc de Toscane non seule-

¹² Ibid., p. 62.

¹³ GALILEI, *ibid.*, p. 53.

¹⁴ Voir A. KOYRÉ, *Etudes galiléennes*, Paris: Hermann, 1966, ch. III.

ment "mathématicien", mais aussi "philosophe" (naturel), c'est-à-dire connaisseur de la véritable nature des choses (naturelles).

Mais, comme il assimile la physique à la mathématique, Galilée doit donner aux démonstrations physiques la même valeur qu'il donne aux démonstrations mathématiques, c'est-à-dire la valeur de démonstrations nécessaires, qui non seulement montrent comment les choses se comportent, mais démontrent qu'elles ne peuvent pas se comporter autrement. Cela signifie relier les causes aux effets par un lien de nécessité, tel que les effets découlent nécessairement de leurs causes. Du reste, la convertibilité des propositions, et donc la convertibilité entre les prémisses et les conclusions, c'est-à-dire entre les causes et les effets, est un caractère déjà reconnu comme propre à l'analyse mathématique par Aristote¹⁵.

Pour cette raison le pape Urbain VIII a cru que l'argument des marées violait la toute-puissance divine, contraignant Dieu à créer le monde d'une certaine manière plutôt que d'une autre, et il se mit en colère lorsqu'il constata que dans son *Dialogue* Galilée non seulement releguait l'affirmation du caractère hypothétique de la théorie copernicienne dans une prémisses imprimée en caractères différents du reste de l'ouvrage, mais mettait l'objection, selon laquelle l'argument des marées serait incompatible avec la toute-puissance divine, dans la bouche de Simplicius, c'est-à-dire du personnage ridiculisé par l'ouvrage tout entier¹⁶. C'est pour cette raison, probablement, que Galilée a été condamné par le Saint-Office¹⁷.

Il n'y a pas de doute que le Saint-Office a eu tort de condamner Galilée, mais cela ne signifie pas que celui-ci avait raison: Galilée en effet n'a jamais fourni la démonstration scientifique que Bellarmin lui avait demandée pour pouvoir changer l'interprétation traditionnelle de la Bible, et que Bellarmin lui-même, il faut l'ajouter, tenait pour impossible, parce que lui aussi croyait qu'elle devait être une démonstration impliquant une nécessité. Le Saint Office a eu tort parce que les membres de cette institution, et aussi Urbain VIII, n'avaient pas compris l'absence totale de signification des théories physiques, quel que soit le type de démonstration qu'on attend d'elles, pour les vérités de la foi, et donc l'incompétence de l'Eglise dans les théories scientifiques.

Celles-ci sont d'une autre nature que la foi, mais non pas pour la raison

¹⁵ ARISTOTE, *Seconds Analytiques*, I 12, 78 a 6-13.

¹⁶ GALILEI, *Dialogo* cit., dans *Opere*, vol. VII, p. 488.

¹⁷ Pour la documentation sur ces affirmations je dois renvoyer à mon étude *Implicazioni filosofiche della condanna di Galilei*, "Giornale di Metafisica", n. s., 5, 1983, pp. 239-261.

avancée par Galilée, c'est-à-dire parce que la science nous enseigne comment "le ciel va" tandis que la foi nous enseigne comment "on va au ciel". Il y a des vérités de foi, en effet, qui sont des vérités de fait, indépendamment de la valeur sotériologique qu'elles ont pour ceux qui croient en elles, et qui semblent clairement en contraste avec la science, par exemple la résurrection de Jesus Christ, qui est le fondement de toute la foi chrétienne. Les théories scientifiques sont étrangères à la foi parce qu'elles n'atteignent pas le niveau où se trouve le principe qui rend possible toute révélation et donc tout contenu de la foi, c'est-à-dire le Dieu transcendant et tout-puissant, qui peut faire exception aux lois de la nature parce qu'il les a créées lui-même. Il s'agit du niveau métaphysique, c'est-à-dire d'un niveau qui peut être atteint seulement par un discours qui n'est ni science ni foi, et qui ouvre entre la science et la foi l'espace nécessaire pour rendre possibles (non pour démontrer) les vérités de la foi.

Ni Galilée, ni les aristotéliens de son époque, ni le pape Urbain VIII et ses ministres, n'avaient une idée claire de cette métaphysique. Les premiers, c'est-à-dire Galilée et les aristotéliens, prétendaient que la science, physique et mathématique, par ses théories copernicienne ou ptolémaïque, était la seule connaissance possible de la réalité, et donnaient à la foi une signification simplement sotériologique ou bien pratique. Les autres, c'est-à-dire le pape et ses ministres, niaient à cette science la valeur de vérité, craignant qu'elle puisse menacer les vérités de la foi, et de cette manière eux aussi sous-entendaient que la science embrassait toute la réalité, excluant toute autre forme possible de connaissance.

II. De Galilée à nos jours

1. Développement de l'ordre mécanique

Après Galilée, l'ordre mécanique triompha presque complètement sur l'ordre biomorphique grâce à l'oeuvre des principaux philosophes et savants des temps modernes. Descartes réduisit l'univers matériel simplement à l'extension et au mouvement (mécanique), formulant pour la première fois le principe d'inertie, selon lequel le mouvement rectiligne et uniforme peut se maintenir indéfiniment dans son être, s'il n'y a pas d'obstacles, et donc n'a besoin d'aucune cause. L'univers tout entier, y compris les êtres vivants et même le corps de l'homme, est une grande machine, créée par Dieu, mais capable de fonctionner indépendamment de lui, privée de toute finalité. Pour sauvegar-

der les vérités de la foi chrétienne, c'est-à-dire l'immortalité de l'âme humaine et la transcendance de Dieu, Descartes conçoit l'âme comme une substance indépendante du corps, c'est-à-dire comme un pur esprit, et considère les lois mathématiques et physiques qui gouvernent l'univers comme l'expression d'un choix fait par Dieu d'une manière complètement arbitraire.

Spinoza n'aura plus ces scrupules et, proclamant le mécanisme absolu de la réalité, c'est-à-dire la nécessité mathématique de sa structure, y inclura même l'âme humaine et Dieu, considérant la première comme un simple aspect, de même que le corps, de la substance unique qui forme l'univers et le second comme identique à cette substance tout entière. Dans sa philosophie une physique mécaniste et déterministe conduit à une métaphysique de l'immanence de Dieu dans l'univers, c'est-à-dire au panthéisme. Une réaction à cette métaphysique sera tentée par Leibniz, qui réaffirmera la transcendance de Dieu et la spiritualité de l'âme humaine, mais d'une manière plus dogmatique que critique.

La version proprement scientifique de l'ordre mécanique de l'univers fut rendue possible par Newton. Celui-ci réussit, en effet, à réduire tous les phénomènes, tant célestes que terrestres, à une même loi, la loi de la gravitation universelle, qui s'exprime uniquement en termes de masses, forces motrices et mouvements mécaniques. On a pu concevoir, de cette manière, l'existence d'un ordre unique, de type très simple, auquel se ramènent les phénomènes les plus complexes. La caractéristique principale de cet ordre, comme il a été remarqué récemment¹⁸, est la "réversibilité", c'est-à-dire la possibilité, pour les phénomènes mécaniques, de renverser la direction du temps dans lequel ils se produisent, sans qu'ils changent aucunement. Le modèle parfait de ces phénomènes est représenté par le mouvement d'un pendule sans frottement.

Probablement Newton lui-même ne partageait pas complètement cette vision de l'ordre cosmique, parce qu'il considérait la force de gravitation comme capable d'expliquer seulement les phénomènes macroscopiques et non les microscopiques (c'est-à-dire les mouvements des corpuscules, que cependant il admettait), et comme demandant, à la fois, une explication ultérieure. En outre il était convaincu que cette vision du monde était valable seulement pour la réalité physique, c'est-à-dire pour la nature entendue comme différente de l'homme, et il admettait même que l'univers dans son ensemble était sujet à un processus irréversible¹⁹. Mais les philosophes qui

¹⁸ I. PRIGOGINE - I. STENGERS, *La nouvelle alliance. Métamorphoses de la science*, Paris 1979.

¹⁹ J'accepte, à ce propos, les précisions qui ont été faites, au cours de la discussion, par les professeurs S. L. Jaki et M. Pullman.

s'inspirèrent de cette vision du monde, en particulier les "lumières", n'hésitèrent pas à appliquer le modèle mécanique à la réalité toute entière, y compris l'homme, faisant de celui-ci une simple machine, comme il résulte du célèbre traité, *L'homme machine*, de La Mettrie. Newton en outre, en tant que croyant, était convaincu que l'univers mécanique, décrit et expliqué par ses théories, était créé par Dieu. Laplace, le philosophe et physicien qui reprit la théorie kantienne de la nébuleuse primitive comme origine de l'univers, conclut que Dieu était désormais devenu une hypothèse inutile²⁰.

Il faut ajouter que les philosophes et les savants modernes (par exemple Galilée, Gassendi, Newton lui-même) reprirent aussi la théorie atomiste, élaborée par quelques philosophes grecs, qui nous présente un modèle d'ordre sans doute moins facilement réductible à la régularité et à la réversibilité des mouvements des astres. Mais il s'agit également d'un ordre de type mécanique, parce que pour la théorie atomiste tous les phénomènes sont clairement réduits au déplacement des masses dans l'espace.

2. La crise de l'ordre mécanique

Le modèle mécanique, qui pendant les XVII^e et XVIII^e siècles s'était affirmé en tant que le type d'ordre dominant, subit une crise au cours du XIX^e siècle à cause des développements de la thermodynamique, d'un côté, et de la biologie évolutionniste de l'autre. L'univers de Newton était fondé sur la réductibilité de toute forme d'énergie, et de la matière elle-même, à l'énergie mécanique, c'est-à-dire à une force capable de produire des mouvements de masses dans l'espace. Aux début du XIX^e siècle le physicien anglais James P. Joule démontra la transformabilité complète de l'énergie mécanique en énergie thermique, découvrant de cette manière le premier principe de la thermodynamique, c'est-à-dire que la quantité totale de l'énergie existant dans l'univers reste immuable.

Mais le physicien français Sadi Carnot et le physicien allemand Rudolph J.E. Clausius démontrèrent l'impossibilité de la transformation inverse de celle admise par Joule, c'est-à-dire l'impossibilité de transformer complètement l'énergie thermique en énergie mécanique: chaque fois, en effet, qu'on tente de réaliser cette transformation, par exemple par la machine à vapeur,

²⁰ Evidemment, du point de vue scientifique, Laplace avait raison, comme l'a observé le prof. M. Moshinski, parce que l'existence de Dieu relève du domaine de la philosophie, pas de celui de la science. Mais Laplace n'admettait autre domaine de connaissance que celui de la science, ce qui n'est pas un point de vue scientifique, mais philosophique.

à présent sont les recherches de Prigogine, parce qu'elles sont liées directement aux concepts traditionnels d'ordre et de désordre employés par les visions philosophique et scientifique du monde²³.

Dans leur livre récent, *Exploring Complexity*, Nicolis et Prigogine affirment que notre univers physique n'a plus comme symbole le mouvement régulier et périodique des planètes, qui est à la base de la mécanique classique. C'est au contraire un univers d'instabilité et de fluctuation, qui sont à l'origine de l'incroyable variété et richesse de formes et de structures que nous voyons dans le monde. Dans le monde qui nous entoure nous trouvons aussi bien des régularités inattendues que des fluctuations, également inattendues, d'une échelle très ample (par exemple dans le climat). A côté de changements réversibles comme le mouvement d'un pendule sans frottement où le passé et le futur sont interchangeable, il y a des changements irréversibles comme la diffusion et les réactions chimiques où il y a une direction privilégiée du temps. En outre nous sommes forcés d'admettre l'existence de processus "stochastiques", c'est-à-dire gouvernés non par la nécessité déterministe, mais par une probabilité statistique²⁴.

Selon la vision classique de la science (siècles XVII-XIX), il y avait une distinction très nette entre les systèmes simples, étudiés par la physique et la chimie, et les systèmes complexes, étudiés par la biologie et les sciences humaines. Or, cette différence est aujourd'hui en train de disparaître et dans le même temps s'affirme une vision pluraliste du monde physique, où différents types de phénomènes coexistent l'un à côté de l'autre lorsqu'on change les conditions auxquelles le système est soumis. Nicolis et Prigogine donnent plusieurs exemples de comportements complexes: l'auto-organisation des systèmes physico-chimiques, comme la formation d'un flocon de neige, cristal de forme dendritique, à partir d'un cc. d'eau lorsque la température arrive à 0 degrés; la convection thermique, les phénomènes induits par la tension superficielle et étudiés par la science des matériaux; les changements de climat et leur variabilité; l'histoire de la terre à travers l'alternance de glaciations et de diminutions des glaciers; l'histoire elle-même de notre univers à

la complexité", parce qu'il ne s'agit pas d'une théorie scientifique dans le sens courant du terme, mais d'un ensemble de recherches et d'interprétations de la réalité.

²³ Malgré les réserves soulevées par beaucoup d'interventions à propos des théories de Prigogine, j'estime celles-ci comme une référence très utile pour une discussion philosophique de la complexité, à cause des considérations très générales qu'elles contiennent et qui se prêtent facilement à des évaluations interdisciplinaires.

²⁴ G. NICOLIS - I. PRIGOGINE, *Exploring Complexity. An Introduction*, Munich 1987, Prologue.

partir du *Big Bang* vers une expansion progressive; le développement d'un embryon; les stratégies d'adaptation des insectes sociaux; l'auto-organisation des systèmes humains²⁵. On pourrait ajouter les changements qui se produisent, au niveau de la neurophysiologie des états de conscience, à la suite d'une "information"²⁶.

Nicolis et Prigogine introduisent la distinction entre systèmes conservatifs, constitués pas des changements réversibles et qui tendent à conserver inaltérée leur propre structure, par exemple l'univers de Newton, et systèmes dissipatifs, constitués par des changements irréversibles et qui augmentent de plus en plus leur complexité, par exemple — ce sont nos auteurs qui l'écrivent — la région sublunaire de l'univers comme elle a été décrite par Aristote. Or, les systèmes dissipatifs forment une classe vaste et importante des systèmes naturels. L'analyse des systèmes physiques, par conséquent, ne peut pas être réduite à un jeu de mathématique: les systèmes physiques sous beaucoup d'aspects doivent être regardés comme hautement atypiques, ou non-génériques, du point de vue mathématique²⁷.

Parmi les systèmes dissipatifs il y en a d'ouverts, qui échangent continuellement de l'énergie avec leur entourage, provoquant des changements même dans celui-ci: par exemple tous les êtres vivants sont des systèmes dissipatifs ouverts qui soustraient énergie à leur milieu, produisant dans celui-ci une augmentation d'entropie, et la transforment en vue d'une organisation toujours plus complexe. Dans ce cas, les systèmes vivants et les systèmes non-vivants forment un seul ensemble, où l'entropie et l'évolution sont complémentaires²⁸. Dans beaucoup de changements, affirme Prigogine, le passage vers la complexité est étroitement lié à la "bifurcation" de nouvelles branches de solution, qui naissent de l'instabilité d'un état de référence causée par la non-linéarité et par des liens qui agissent sur un système ouvert.

En conclusion, nous vivons dans un monde pluraliste, où des phénomènes simples, comme le mouvement périodique de la terre autour du soleil, nous apparaissent comme réversibles dans le temps et nécessaires, mais où

²⁵ Ibid., ch. 1.

²⁶ Voir G. DEL RE - E. MARIANI (edd.), *Il rapporto di Napoli sul problema mente-corpo*, Napoli 1991.

²⁷ NICOLIS-PRIGOGINE, *op. cit.*, ch. 2.

²⁸ Sur ce sujet on peut voir aussi le fascicule *Simplicité et complexité*, édité par M. Ceruti et E. Morin, dans "50 rue de Varenne", supplément italo-français de "Nuovi argomenti", n. 25, de l'Istituto Italiano di Cultura de Paris (mars 1988), et encore R. Morchio, *Sistemi ordinati e disordinati nell'evoluzione dell'universo*, "Giornata di astronomia", XV, 1989, nn. 3-4; *Quale portata ha l'evoluzione biologica in cosmologia?*, *ibid.*, XVII, 1991, nn. 1-2.

nous trouvons aussi des changements irréversibles comme les réactions chimiques, et des changements stochastiques comme le choix entre des états de bifurcation. Selon la conception classique, l'irréversibilité et le hasard à l'échelle macroscopique étaient seulement des apparences dues à la complexité des comportements collectifs d'objets intrinsèquement simples. La croyance dans la simplicité du niveau fondamental était l'une des convictions dominantes de la science classique des trois derniers siècles. Aujourd'hui il faut reconsidérer la situation: le niveau fondamental n'est pas simple. Par conséquent il faut élaborer un formalisme plus ample capable de comprendre, à côté des systèmes les plus simples, le caractère stochastique et l'irréversibilité des systèmes les plus complexes²⁹.

L'«émergence de la complexité», que nous avons très brièvement décrite, rappelle de très près la vision de l'univers élaborée par les philosophes anciens, en particulier par Aristote, c'est-à-dire un univers où l'ordre mécanique et l'ordre biomorphique cohabitent et forment un ordre global très complexe. Dans cet ordre, il y a de la place aussi pour ce qui peut être interprété comme une forme de désordre, c'est-à-dire qu'il y a des marges d'indétermination, de probabilité, de hasard, mais ceux-ci font partie eux aussi de l'ordre complexe.

Il ne faut pas, cependant, interpréter ces résultats comme une revanche de l'ancienne métaphysique par rapport à la science moderne, ni d'Aristote par rapport à Galilée. La théorie de la complexité, en effet, est une théorie simplement scientifique, qui n'a rien à voir ni avec la métaphysique ni avec la religion, et qui peut être interprétée aussi bien comme compatible avec une métaphysique de la transcendance, c'est-à-dire théiste, qu'avec une métaphysique de l'immanence, c'est-à-dire athée. Les théories scientifiques, en effet, sont complètement différentes par nature aussi bien de la métaphysique, parce qu'elles concernent l'ordre de l'univers et non son principe dernier, que de la foi, dont la possibilité suppose l'existence d'un principe transcendant par rapport à l'ordre du monde.

Il ne faut pas répéter, par conséquent, l'erreur commise par le Saint-Office aux temps de Galilée, c'est-à-dire surévaluer la signification des théories scientifiques et se prononcer sur leur valeur par rapport aux vérités de foi. Peut-être, la théorie de la complexité rend-elle plus facile l'acceptation d'une métaphysique de la transcendance, parce qu'elle nous présente un ordre cosmique qui, à cause de sa complexité, semble beaucoup plus récla-

²⁹ NICOLIS-PRIGOGINE, *op. cit.*, ch. 5.

mer un principe transcendant et intelligent, que ne le faisait l'ordre simple du modèle mécanique. Mais elle ne peut pas être un argument suffisant pour fonder cette métaphysique.

Les scientifiques aussi, par conséquent, ne doivent pas répéter l'erreur, commise par Galilée, de surévaluer les théories scientifiques, les considérant comme la seule forme possible de connaissance authentique, au delà de laquelle il n'y a de place que pour la foi. Si, en effet, la science était la seule connaissance possible, elle devrait embrasser toute la réalité qui est à la portée de la raison humaine, y compris le principe dernier de l'ordre cosmique, et inévitablement elle réduirait ce dernier à une partie de cet ordre, se transformant de cette manière en une métaphysique de l'immanence, incompatible avec la foi. C'est ce qui est arrivé, nous l'avons vu, aux temps modernes. Il faut espérer que les développements de la science contemporaine, en particulier les recherches sur la complexité, qui vont dans la direction opposée à celle qui a caractérisé le développement de la science dans les temps modernes, nous aideront à éviter que cette expérience se répète³⁰.

³⁰ Malheureusement, à cause du temps très limité dont je disposais, je n'ai pas pu tenir compte des théories épistémologiques de L. Boltzmann et de J.-H. Poincaré, qui m'ont été justement signalées respectivement par les professeurs A. Lichnerowicz et G. Puppi. Je remercie aussi les professeurs N. Cabibbo, Th. A. Lambo, W.K. Malu et B. Nicolescu, qui sont intervenus dans la discussion, apportant des précisions très utiles.

L'ÉMERGENCE DES STRUCTURES

RÉNÉ THOM

I.H.E.S., 91440 Bures-sur-Yvette, France

1. Introduction: A propos du vocabulaire

Ce titre qui m'a été proposé n'est pas sans comporter une certaine ambiguïté. Les deux substantifs qui le forment, en effet, sont affectés d'une redoutable polysémie. L'émergence, en principe, désigne l'entrée à l'existence d'une entité nouvelle. Mais l'émergence n'est pas la naissance: le neuf est immergé dans l'ancien, qui subsiste - au moins un certain temps - en concurrence avec lui. De plus, il n'est pas évident que ce phénomène d'émergence soit fondamentalement *temporel*, au sens qu'il aurait nécessairement lieu dans le temps historique ou physique. L'émergence peut avoir la signification abstraite d'un processus continu au cours duquel, en fonction d'un paramètre (s) paramétrisant cette continuité, l'état final $s(1)$ du système considéré diffère de l'état initial $s(0)$ par l'addition d'un nouvel objet (S) qui sera précisément la structure émergente. Qu'on pense à la *procession* du Néo-Platonisme et de la théologie comme exemple possible d'un processus intemporel d'émergence.

Quant au mot "structure", on connaît la vaste multiplicité de ses significations. Disons, pour simplifier, que ces sens sont distribués le long d'un spectre unidimensionnel (un segment) (Figure 1), qui, à gauche, désignerait les structures abstraites (le paradigme de la structure abstraite étant la structure formelle, logique ou mathématique), et à droite les structures concrètes, comme la structure d'un pont, d'un bâtiment ou d'un outil.

premier en mathématique, c'est l'ensemble N des entiers naturels (les cardinaux, qui dénombrent les ensembles finis). Si on lui applique le schème hylémorphique, on pourrait dire que la *matière* de N c'est la totalité des entiers naturels (n), sa *forme* sera alors l'opération $n \rightarrow n + 1$, qui, appliquée à l'entier initial 1, engendre tout l'objet. Vient ensuite, comme second objet, le groupe Z des entiers relatifs. Pour l'obtenir il faut ajouter à N l'ensemble défini par 0 et les entiers négatifs ($-m$). On voit de suite que cette opération n'est pas une déduction logique, car elle comporte *un engagement ontologique*, celui qui consiste à admettre qu'un symbole tel que $2 - 3$ a un sens. On crée ainsi une nouvelle matière - à adjoindre à celle de N -, les entiers négatifs (y compris zéro), et la forme acquiert un nouvel opérateur $n \rightarrow n - 1$ qui complète la forme de N de manière à former un groupe (le groupe abélien des entiers relatifs Z). Il serait aisé de voir que tout grand progrès de la mathématique a été lié à la construction d'un nouvel objet. Le continu (R) serait alors le troisième objet (défini par exemple selon Dedekind à l'aide des coupures de l'ensemble φ des nombres rationnels). En postulant que l'équation algébrique $x^2 + 1 = 0$ a deux racines i et $-i$ (nouvel engagement ontologique), on crée une nouvelle "matière", scientifiquement fort importante: celle qui constitue les objets analytiques. Une fonction analytique présente cette propriété fondamentale qu'elle est déterminée par sa valeur au voisinage d'un point. Tout comme Cuvier - à ce qu'on dit - reconstituait le squelette complet d'un fossile à partir d'un seul os, le mathématicien peut reconstituer une fonction analytique à partir de ses valeurs au voisinage d'un seul point (son "germe" en ce point) - par le processus dit du *prolongement analytique*. En un certain sens, toute fonction analytique a la propriété structurale de pouvoir se régénérer à partir d'un fragment. C'est ce fait, duement exploité en Physique, qui donne toute sa valeur à l'adage Galiléen: le livre du monde est écrit en langage mathématique, et le fameux miracle *de l'efficacité déraisonnable des mathématiques* à décrire le monde (E.P. Wigner)¹ repose sur ce principe.

Mais nous savons que ce miracle a ses limites; il ne fonctionne bien que dans le domaine où jouent les symétries globales de l'univers physique, donc en fait grâce à des hypothèses cosmiques. Pour les phénomènes locaux qui intéressent notre monde sublunaire - donc en particulier pour les structures locales qui peuvent apparaître ou disparaître du monde à notre échelle

¹ E.P. Wigner, The unreasonable effectiveness of mathematics in natural Sciences, Communications, Pure and Applied Math., 13, n° 1, February 1960.

humaine, l'application du formalisme analytique est, nous le verrons, fort suspecte. Mais ne peut-on croire que néanmoins le prolongement analytique y garde une certaine validité locale et approchée? Pratiquement, ce vaste domaine qu'on appelle les *mathématiques appliquées* repose sur cette confiance; admettons-la: car toute extrapolation d'une fonction numérique repose - en dernière analyse - sur le prolongement analytique, et c'est sur cet algorithme que repose tout l'efficace du formalisme mathématique en science. De plus, chose essentielle, le prolongement analytique est un *principe d'individuation* des phénomènes physiques: le mouvement de la pierre qu'on lance vers le haut et qui retombe consistait pour Aristote de deux mouvements: un mouvement *forcé* (*biaios*) vers le haut, suivi après le sommet de la trajectoire d'un mouvement *naturel* (*phusikos*) de chute vers le centre de la terre. Galilée démontre expérimentalement - à ce qu'on dit - que ces deux mouvements ont même équation ($z = z^0 - 1/2 gt^2$), établissant ainsi *l'unicité* du phénomène de la gravitation sur Terre.

Tout ceci ne permet pas d'affirmer que les êtres mathématiques non analytiques sont sans intérêt. En effet on sait qu'un objet non analytique peut être dans certains cas rendu analytique par un changement de variable approprié - au moins localement -. L'exemple type de ce phénomène est donné par le *théorème classique des fonctions implicites*: si une fonction numérique lisse F (pourvue de dérivées partielles continues $\partial F/\partial x_i$ autour de l'origine O , $x_i = 0$) admet une dérivée première non nulle en O , on peut, par changement de variables locales $x_i \rightarrow u_j$ transformer F en une coordonnée u_k (donc en une fonction linéaire). Bien entendu ce changement de coordonnées ne sera pas analytique (en général). Si on prend pour objet l'ensemble défini par l'équation $F = 0$, ce théorème montre que cet objet peut être transformé en $u_k = 0$, un "hyperplan" local. Un défaut dans la définition de l'objet peut être compensé par une transformation du milieu (un homéomorphisme). Par une telle transformation, on renforce la structure intrinsèque de l'objet - on le *linéarise* - au détriment des propriétés structurantes, intrinsèques, du milieu ambiant: la structure différentielle analytique de l'espace euclidien ambiant doit être perturbée - on doit donc y renoncer - pour régulariser l'objet. Ce type de transformation est utile pour une classification des formes fondée sur leur équivalence *qualitative*, phénoménologique comme celle que nous proposerons à propos des formes biologiques.

On a vu que l'édification des structures usuelles en mathématique ne procède pas d'une déduction logique (où il y aurait nécessairement perte informationnelle), mais au contraire *d'engagements ontologiques* successifs et

superposés, qui créent une hiérarchie de “matières” (hylè) au sens de la *materia signata* de l’aristotélisme. Notre manière de voir, évidemment, n’est pas sans contredire le point de vue aristotélicien sur les mathématiques. En mon sens, on devrait dire, en Mathématique, que *la matière est engendrée par la forme*, et plus la forme, en tant que processus génératif, est subtile, plus est subtile la matière engendrée. Ceci est déjà bien visible sur l’exemple de la hiérarchie entiers naturels \rightarrow entiers relatifs. La matière constituée par zéro et les nombres négatifs a évidemment un caractère beaucoup plus irréel que celle des entiers naturels. Ce phénomène explique les difficultés de l’enseignement des mathématiques, où l’étudiant - confronté aux premiers rudiments de l’analyse -, ne peut s’empêcher de penser: où *diable est-on allé chercher cela?* (Par exemple: Pourquoi s’intéresser à une expression telle que $\lim_{n \rightarrow +\infty} (1 + 1/n)^n$?) On pourrait penser que l’émergence d’objets nouveaux au sein d’une morphologie empirique procède d’un mécanisme analogue. Si, *Galileo dixit*, la nature calcule, pourquoi ne pourrait-elle pas inventer? Et si, dans l’esprit de l’analogie Microcosme - Macrocosme, elle inventait ses objets comme le cerveau du mathématicien les invente? La spéculation peut paraître audacieuse C’est néanmoins celle que nous allons explorer.

3. Structure et Morphogenèse: L’émergence des structures concrètes

Ici, je crois qu’il nous faut quelque peu changer notre recherche. Nous ne sommes pas parvenus à définir ce qu’est une structure. A tout le moins, dans le cas d’un objet matériel, on sera en mesure de définir sa forme spatiale (et l’évolution de sa forme) en tant qu’objet plongé dans l’espace-temps. On sera donc amené à considérer la *morphogénèse* des entités matérielles. Certes, beaucoup d’objets du monde ne sont pas des structures ni, a fortiori, des “organisations”. Mais au moins, dans la mesure où on peut localiser et décrire les objets, on saura ce dont on parle (ce qui, hélas, dans le discours de certains férus d’épistémologie, n’est pas toujours le cas des structures ...). Considérons donc une forme (F) comme un ensemble fermé plongé dans l’espace (ou l’espace-temps). Entre points de F on définit une relation d’équivalence (f), l’équivalence phénoménale. Deux points x, y de F sont (f) équivalents, s’il existe des voisinages U de x, V de y, et un homéomorphisme local $h_{xy}(U) \rightarrow V$ tel que si z et w sont des points de U, resp V, avec $h_{xy}(z) = w$, alors les points z et w ont des voisinages “phénoménalement homéomorphes”, i.e. ont *qualitativement* la même apparence. Cette relation (f) est

une relation d'équivalence et elle partitionne l'espace en sous-ensembles fermés, les "strates". A condition de ne pas regarder trop fin (cf. en Géologie la notion de "facies" d'un minéral laquelle précisément, sur une coupe de terrain, définit une strate de la géologie), il pourra se faire qu'on n'ait qu'un nombre fini de classes d'équivalences pour l'apparence ponctuelle du milieu en un point. C'est la situation des ensembles algébriques (et analytiques) dans l'espace euclidien (conduisant à la notion récente d'ensemble "stratifié"). Evidemment il se peut que certaines propriétés qualitatives d'un milieu puissent varier continuellement (par exemple la couleur), constituant en ce cas ce que classiquement, on appelle un genre (γένος). Il faut alors décomposer ce "genre" continu en espèces et procéder comme fit Aristote pour définir l'organisation biologique grâce aux notions d'homéomère et d'anhoméomère². On obtient ainsi une définition rigoureuse des différentes *parties* d'un objet spatialement défini, mathématisant la vague notion de "*situs partium*" par laquelle les Anciens définissaient l'organisation biologique. Cette systématisation, si imprécise et grossière qu'elle paraisse au réductionisme moderne, n'en est pas moins un préliminaire nécessaire à la classification *linguistique* des êtres et des choses. Mais avant d'aborder les structures biologiques, on évoquera, à titre d'intermédiaire, les instruments, les outils, les machines de l'homme.

4. L'émergence des structures artéfactuelles

Par structure artéfactuelle, j'entends les structures liées à la forme et au fonctionnement des outils. A cela on pourra aussi ajouter les instruments à caractère ludique, comme les instruments de musique et les jouets. Quand on considère l'apparition historique des techniques et des outils, on ne peut manquer d'être frappé par un fait: Très fréquemment, un appareil ou un outil est apparu bien avant qu'une théorie cohérente, scientifiquement fondée, en ait été formulée et en justifie le fonctionnement. L'invention de l'horloge à foliot, qui réalisait la première forme de l'échappement en horlogerie, date du XIII^e siècle, époque où aucune théorie de la dynamique n'existait (sauf celle, erronée comme chacun sait, d'Aristote). De même, on a taillé des verres de lunette dans la même époque, bien avant Snell et Descartes. Et

² Sur ce sujet, voir R. THOM, *Homéomères et Anhoméomères en Théorie Biologique d'Aristote à aujourd'hui* in *Biologie, Logique et Métaphysique chez Aristote*. Editeur P. Pellegrin. Paris: Editions du C.N.R.S. 1990.

en Anthropologie, il existe de nombreuses découvertes de techniques très importantes (comme l'agriculture, la domestication du bétail ... etc) apparues indépendamment et pratiquement de manière simultanée en des points trop éloignés du globe pour qu'on puisse raisonnablement invoquer une propagation géographique. Je ne crois pas non plus qu'on puisse uniquement faire appel à une expérimentation individuelle issue d'un *bricolage*³ couronné de succès pour justifier ces faits. On ne peut guère — me semble-t-il — éviter une théorie du style de la réminiscence platonicienne (le Menon) que j'esquisserais comme suit: la dynamique de notre organisme est régie localement par des objets mathématiques dotées de matière et de forme. (N.B: la matière est ici à concevoir sur le mode des êtres mathématiques définis au §1, et elle ne s'identifie que partiellement avec la matière physico-chimique.) Lors de l'activité motrice de nos membres, il y a inscription dans l'espace-temps de ces dynamiques locales qui se réalisent alors comme champs moteurs dans les activités usuelles de la vie. Certaines de ces activités, les plus simples, apparaissent nécessairement dans le développement canalisé de l'ontogenèse. Le jeu apparaît alors comme l'apparition de ces dynamiques, dans un cadre biologiquement non motivé, et s'appliquant sur une matière non vivante extraite de l'environnement. Par exemple, on a vu, au §1, que la mathématique partait de l'opération $n \rightarrow n+1$. Réalisée géométriquement sur la demi-droite \mathbb{R}^+ , cette transformation a pour espace-quotient le cercle (S^1) (positivement orienté). Par localisation au bout d'un doigt, par exemple, une telle structure dynamique — une rotation — se projette éventuellement matériellement dans un matériau plastique. D'où la possibilité de fabriquer des objets qui réalisent (par leur bord) ces structures cinétiques. On pensera ainsi à *la roue*, que les Mayas connaissaient dans leurs jouets, mais qu'ils n'eurent pas l'idée d'appliquer à la construction d'un chariot. (La roue a d'ailleurs une réalisation organique dans la rotule du genou). La bicyclette peut être regardée comme une simplification (la section par le plan de symétrie) du schéma tétrapodal du vertébré - où chaque roue réalise l'effet d'une paire de membres. Finalement, la morphologie de l'objet artéfactuel est le fruit d'un compromis entre une structure abstraite, de nature algébrico-dynamique - le schéma dynamique intrinsèque de la fonction opératoire -, et une dynamique concrète issue des déplacements du corps humains, ou visant à satisfaire imaginativement des besoins humains (cf. à ce sujet les idées de G.

³ Le *bricolage* a été suggéré par Lévi-Strauss comme responsable de l'origine des mythes. Voir à ce propos *La Pensée Sauvage*, Paris: Plon 1962, pp 26-27. Le biologiste F. Jacob a repris la même explication pour l'origine des morphologies vivantes.

nisme animal (Modèle dit de la *Blastula Physiologique*, escalier composé de quatre cellules de feed-back). Je crois qu'on peut considérer ce modèle comme une illustration de cette idée générale d'une évolution biologique construisant ses structures comme le mathématicien construit ses theories. Je suis trop grand admirateur d'Aristote pour ne pas déplorer que, dans une telle construction, j'ai quelque peu négligé le "substrat" (hypokeimenon). Mais ce qui importe dans un substrat, ce sont les contraintes qu'il apporte aux bifurcations virtuelles de la dynamique qu'il supporte. L'oscillation continue entre un point de vue "gradient" donc dissipatif, et un point de vue purement hamiltonien y est générale (cf. la transformation de Van der Pol d'un cercle "hamiltonien" en un "feed-back loop", cf. [7]). C'est celle qui s'impose dans la construction de deux "feed-back loops" fonctionnellement associés (*la coexistence des coplis*⁸ dans la concaténation de deux catastrophes cusps), dans une articulation, entre deux os contigus et les tendons mobiles qui les lient. Il faut en Biologie accepter une finalité de fait, dont on s'efforcera de trouver un modèle dynamique qui minimise le caractère arbitraire de la description et qu'on pourra s'exprimer comme un "changement de phase" (en un sens généralisé et *local*) du milieu. Il me semble qu'on retrouve ici sous une forme simple toute la complexité efficiente que montre souvent l'interaction à effet enzymatique d'une protéine et de son ligand. Ici, je ne peux m'empêcher de penser à la mystérieuse théorie du *Nous* aristotélien: une entité impersonnelle qui investit un être local qu'elle rend "intelligent": une sorte d'énergie dirigée permettant une bifurcation originale et stable de la dynamique ambiante à l'objet.

6. *Le problème philosophique de l'innovation.*

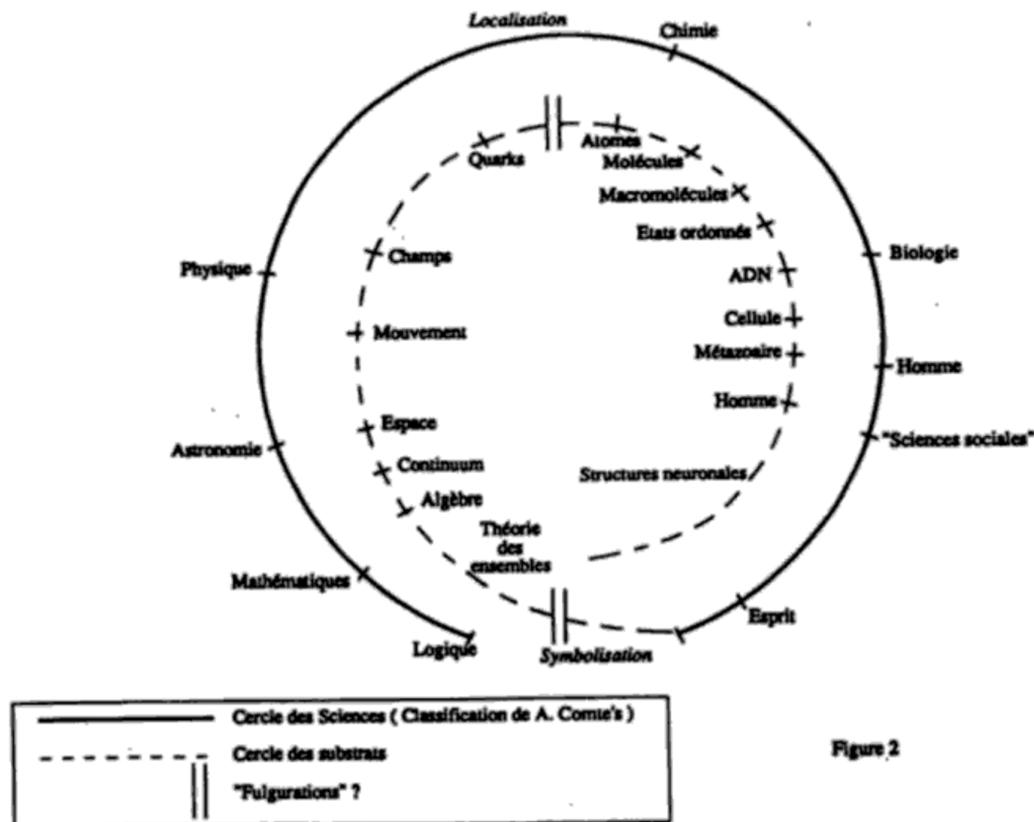
J'aimerais terminer par une réflexion générale sur la question de l'émergence - ou plus généralement - de l'innovation. Si l'on considère que tout savoir scientifique doit être transmissible (d'homme à homme), un tel savoir est nécessairement exprimé par un texte d'une langue reçue. (Il n'y a plus de science en tradition orale ...).

De ce fait, le savoir se formalise et s'enregistre en un texte comportant uniquement des symboles admis dans la collectivité sociale et *en nombre fini*. De là vient ce que Borgès a évoqué dans son essai: *La grande bibliothèque de*

⁸ La coexistence des coplis, marque de finalité, est explicitée au Chap. 3, § H du livre cité supra [7].

*Babylone*⁹. Le texte innovateur existe déjà virtuellement dans le corpus des textes formels lisibles par un homme au cours de son existence: il suffit d'aller l'y lire... Evidemment, la grande bibliothèque est très grande — et ceci explique qu'on puisse, parmi tous les textes existants, n'en retenir qu'un petit nombre comme réellement innovateurs et significatifs. Il n'en demeure pas moins que sur le plan de la production symbolique, l'innovation radicale n'existe pas, elle peut être mécanisée ...; on bute seulement sur le temps immense qu'il faudrait consacrer à cette recherche.

Tout le génie revient à savoir discerner dans l'ensemble des textes ainsi construits ceux qui présentent des idées innovantes particulièrement prometteuses. Au XIX siècle, l'Anglais George-Henry Lewes avait proposé le terme d'*émergence* pour caractériser l'apparition de propriétés nouvelles dans un composé, inexistantes dans chacun des composants pris isolément (Observation faite par le P. Jaki dans son rapport à cette Rencontre). "Au XX siècle le zoologue allemand Konrad Lorenz¹⁰ avait qualifié de *fulguration* l'apparition brutale d'une structure présentant des propriétés radicalement nouvelles par rapport au milieu (physique ou culturel) existant. (Ainsi l'apparition de la vie par rapport à la physico-chimie; cf. à ce sujet l'article de



⁹ JORGE LUIS BORGES, *La Bibliothèque de Babel*, in *Ficciones*, Buenos Aires: Emece Editores S.A. 1956.

¹⁰ K. LORENZ, *Die Rückseite des Spiegels, Versuch einer Naturgeschichte Menschlichen Erkennens*, München: R. Piper 1973.

Klaus Ruthenberg¹¹.) Cette problématique peut être symbolisée par la figure 2, où on a superposé un cercle des théories (des sciences), reprenant la hiérarchie classique d'Auguste Comte - à un cercle de leur substrats.

Contrairement à la vision habituelle, ce schéma suggère qu'on devrait remplacer la fulguration classique - apparition de la matière vivante émergeant de la physico-chimie - par une double émergence qu'on a représentée sur le cercle de la figure 2 par deux doubles barres verticales. L'une, en haut, exprime la localisation de la matière dans le noyau atomique (la matière se séparant du plasma des gluons, en fait l'ancrage matériel de la géométrie euclidienne), l'autre, en bas, précipitant la matière vivante dans la pensée symbolique.

L'impossibilité théorique de l'innovation scientifique radicale exprime un paradoxe:

Il y a une contradiction de principe entre l'induction par voie expérimentale (la description et l'enregistrement des régularités phénoménales) et le progrès scientifique par innovation.

Car si l'innovation est effectivement un phénomène concret, ce phénomène, en tant que processus descriptible, doit être plus qu'une conséquence déductible du savoir reconnu: il ne peut être une conséquence linguistiquement ou formellement dérivable des connaissances reçues antérieurement - auquel cas il n'y aurait pas innovation (cf. les deux exemples classiques: la supernova de Tycho-Brahé, la découverte de la radioactivité par Becquerel).

Comme d'autre part chacun accepte que la science progresse, on ne peut échapper au paradoxe qu'en remarquant le fait: dès qu'un phénomène est linguistiquement exprimé, il s'insère dans un ensemble théorique de propositions que véhicule avec lui le langage (et ceci, aussi bien dans le langage usuel que dans la formulation proprement scientifique du phénomène). C'est quand l'expérience *infirme* une de ces conséquences qu'a lieu la découverte innovante. En ce sens l'activité de la Science est *fondamentalement critique*, elle ne progresse qu'en niant ses progrès. Le plus souvent, au prix d'une complication du formalisme existant, on va pouvoir rendre compte du phénomène innovant. Il faut alors apprécier le caractère *ad hoc* du nouveau formalisme en liaison avec l'ampleur et les perspectives offertes par l'extension du langage. De là vient que le progrès de la Science provient plus d'une amélioration *des capacités déductives du langage descriptif* que de l'extension proprement dite du savoir empirique, une situation que le développement moderne

¹¹ KLAUS RUTHENBERG, *Is there a philosophy of Chemistry?* 9th International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science, Abstracts Vol. III, Section 11, Harper Torchbook 1990, p. 377.

des techniques expérimentales pris comme un but en soi tend à occulter dans l'esprit des scientifiques d'aujourd'hui.

Par une technique qualitative comme la Théorie des Calastrophes (fondée sur une structure fibrée où la Dynamique-fibre est rapide, la Dynamique-base est lente, le rapport de ces vitesses tendant vers l'infini), on n'obtient pas des conséquences vérifiables *stricto sensu* comme dans les modèles classiques de la Physique; les prédictions ne sont que qualitatives, et le modèle proposé n'en tire qu'une validité hypothétique. Mais là où, comme c'est souvent le cas en Embryologie, il n'y a aucune intelligibilité du processus, la seule possibilité d'une interprétation intelligible devrait, raisonnablement, être considérée comme un gain.

Partons du fait que tout savoir scientifique, étant verbalement exprimé, participe nécessairement de la "métaphysique implicite" que véhicule tout langage. Il ne faudrait surtout pas croire que le langage de la science est une langue formelle pure. Une des grandes difficultés (théorique - cela va sans dire -) de la Mécanique Quantique réside dans la jonction entre le schéma mathématique mis en oeuvre (Espaces de Hilbert, opérateurs, représentations des groupes, etc), et l'usage inévitable de concepts "classiques" dans l'interprétation expérimentale des prévisions théoriques. (DéTECTEURS, interface du monde quantique et du monde classique, measurement ...). Le langage usuel est vecteur de la causalité, et toute expérimentation vise à vérifier une hypothétique causalité. Il y a deux grandes structures théoriques du langage usuel: la prédication, qui apparaît dans la copule être: *Le ciel est bleu*, et la phrase transitive: *Pierre bat Paul*, ces deux types de phrase représentent (génériquement) les structures minimales porteuses d'une signification autonome. On peut penser (et beaucoup de linguistes semblent actuellement l'accepter) que ces deux structures apparaissent comme des universaux linguistiques, présents - *mutatis mutandis* - dans toutes les langues du monde. La description d'un savoir scientifique expérimental met en jeu ces deux structures, bien que ces formes de causalité ne soient pas toujours prises en compte dans le formalisme mathématique. Par ailleurs, notre problème de l'émergence est lié à une question récurrente depuis la Relativité d'Einstein: le temps n'est-il que la quatrième coordonnée d'un espace-temps minkowskien, ou est-il porteur d'un caractère spécifique qui le sépare des coordonnées d'espace? Le temps a-t-il des vertus créatrices de phénomènes et d'événements, ce que n'aurait pas l'espace, entité purement statique? Un philosophe comme A.N. Whitehead¹² identifiait Dieu à l'action continuellement

¹² A.N. WHITEHEAD, *Apart from the intervention of God, there could be nothing new in the*

SCIENCE/MATHEMATICS

The Emergence of Complexity

in Mathematics, Physics, Chemistry, and Biology

EDITED BY BERNARD PULLMAN

Complexity studies, though still in their infancy, are controversial. By viewing different systems—whether those in biological, physical, or even social sciences—as a series of interacting "agents," researchers involved in complexity explore a rich and diverse set of phenomena such as self-organization and adaptation. They use these phenomena to model and explain such things as the formation of cities, the behavior of the stock market, and the origin of life.

In this volume, some of the world's leading scientists discuss the role of complexity across all the scientific disciplines. Opinions differ: for some, complexity holds the key to a deeper and fuller understanding of the world about us; to others, it is merely a modern version of the philosophers' stone. For the reader, it provides glimpses and insight into arguably the most exciting approach to science currently available.

Bernard Pullman, who died in 1996, was a major figure in theoretical biochemistry, and was the Director of the Institut de Biologie Chimie Physique in Paris.

Proceedings of the Pontifical Academy of Sciences

ISBN 0-691-01238-5



9 780691 012384