

Le courrier du CNRS 63

Auteur(s) : CNRS

Les folios

En passant la souris sur une vignette, le titre de l'image apparaît.

60 Fichier(s)

Les relations du document

Ce document n'a pas de relation indiquée avec un autre document du projet.□

Citer cette page

CNRS, Le courrier du CNRS 63, 1985-12

Valérie Burgos, Comité pour l'histoire du CNRS & Projet EMAN (UMR Thalim, CNRS-Sorbonne Nouvelle-ENS)

Consulté le 03/02/2026 sur la plate-forme EMAN :

<https://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/155>

Copier

Présentation

Date(s)1985-12

Mentions légalesFiche : Comité pour l'histoire du CNRS ; projet EMAN Thalim (CNRS-ENS-Sorbonne nouvelle). Licence Creative Commons Attribution – Partage à l'Identique 3.0 (CC BY-SA 3.0 FR).

Editeur de la ficheValérie Burgos, Comité pour l'histoire du CNRS & Projet EMAN (UMR Thalim, CNRS-Sorbonne Nouvelle-ENS)

Information générales

LangueFrançais

CollationA4

Informations éditoriales

N° ISSN0153-985x

Description & Analyse

Nombre de pages60

Notice créée par [Valérie Burgos](#) Notice créée le 05/10/2023 Dernière modification le 11/12/2024

LE COURRIER DU CNRS.

63

DOSSIER :

**OÙ VA LA PHYSIQUE
DES PARTICULES ?**

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Bimestriel - Novembre - Décembre 1965 - 10 F.



Depuis le 22 mai dernier, le chercheur Michel Seurat est détenu à Beyrouth en compagnie de Jean-Paul Kauffmann, enjeux, tous deux, d'une guerre fratricide à laquelle ils n'ont pris aucune part.

Depuis cette date aussi, ses collègues et amis réclament sa libération et que cesse pour lui et les autres cette odieuse situation d'otage.

La Direction générale du CNRS, de son côté, n'a négligé aucune opportunité d'entrer en contact avec tous ceux, universitaires, scientifiques, personnalités de tous bords au Liban, qui pouvaient influencer sur son sort ou nous donner de ses nouvelles.

Tout récemment encore, Pierre Papon, Directeur général, s'est rendu à Damas accompagné de Jean-François Miquel, Directeur des relations et de la coopération internationales et d'André Raymond, Directeur du Centre de recherches et d'études sur les sociétés méditerranéennes afin de faire valoir au plus haut niveau la nécessité de libérer des hommes dont la libre expression est le garant de la nôtre.

Aujourd'hui, l'espoir est vif qu'une solution rapide soit apportée à ce problème tant les voix ont été nombreuses, en France et ailleurs, pour qu'il soit mis fin à cette situation inique. La Direction générale du CNRS remercie tous ceux qui ont relayé son effort et les assure que celui-ci ne se relâchera pas jusqu'au dénouement.

CNRS
Dépot des archives
de la Délégation Paris Michel
Bâtiment 19
1, avenue de la Terrasse
91198 GIF-sur-Yvette

Rectificatif

Une erreur s'est glissée dans l'article "Pour une poignée de valeur ajoutée en plus" de notre numéro double 61-62, Spécial valorisation. Page 57, dans la biographie de l'auteur de l'article, Monsieur Jacques Villermaux, il fallait lire : professeur à l'Ecole nationale polytechnique de Lorraine, directeur du Laboratoire des sciences du génie chimique, LP 6811, Ecole nationale supérieure des industries chimiques, 1, rue Grandville, 54042 Nancy Cedex.

Directeur de la publication : Goëry Delacôte.

Rédaction : Véronique Brossollet-Condé (rédacteur en chef), Régine Ferré (rédacteur en chef-adjoint, responsable des sciences de l'homme et de la société), Françoise Bescond/Evelyne Grumberg (secrétaires de rédaction).

Secrétariat : Martine Roche.

Entretiens : Monique Mounier-Kuhn.

Comité de rédaction : Robert Bartsch, Jean Bourdon, Georges Chapouthier, Bernard Dormy, Claire Dupas, Max Fontit, Catherine Fuchs, Jean-Philippe Genet, James Hieblot, Louis Jauneau, Claudine Laurent, Jean Leca, Jacqueline Mirabel, Jean Montuelle, Janine Rondet, Dominique Simonnet, Hervé Thery, Maryvonne Tissier.

Membres correspondants : Nadine Chalem-Gouarin, Gérard Llamand, Jean Chouty.

Numéro 63 : 10 F.

Abonnement et vente au numéro : En 1986, le numéro : 20 F. Abonnement annuel : 74 F - 84 F pour l'étranger (voir bulletin d'abonnement pages 31-34 pour l'année 1986). Tout changement d'adresse doit être signalé à la rédaction. Revue bimestrielle comportant cinq numéros par an. Nous remercions les auteurs et les organismes qui ont participé à la rédaction. Les intertitres et les chapreaux introductifs ont été rédigés par la rédaction. Les textes et illustrations peuvent être reproduits sous réserve de l'autorisation du directeur de la publication.

Direction artistique : QDT/J. Galotti, 12-14, Rond-Point des Champs Elysées, 75008 Paris. Réalisation : Roto-France impression, boulevard de Beaubourg, Emerainville, 77200 Torcy.

C.P.A.D. 203 - ISBN - 2-222-03770-0 - ISSN 0153-985 X.

© Centre national de la recherche scientifique.

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE, 15, quai Anatole-France, 75700 Paris. Tel. : (1) 45.55.92.25. Télex : 260.034

LE COURRIER DU CNRS

CNRS
Paris - Siège
Département éditorial
Département éditorial - Bâtiment 19
4, rue de la Terrasse
91190 Gif-sur-Yvette
Tél : 01 69 82 39 17



Page 1 de couverture

Un arc de l'anneau du super synchrotron du CERN sur un fond étoilé : la nébuleuse de la Rosette.
© CERN / © CNRS photo OHP.

Page 4 de couverture

Wielopole - Wielopole. Le retour du déporté. (Tadeusz Kantor, Florence, juin 1980). Photo Jacque Bablet/CNRS.

Supplément : allocution de
Monsieur Hubert Curien prononcée
à l'occasion de la remise de la médaille d'or
à Monsieur Piotr Slonimski.

Sommaire N° 63

5 Editorial

Pierre Papon

7 Distinction

Piotr Slonimski, médaille d'or 1985 du CNRS

8 Dialogue

A la Cité, la culture scientifique est
accessible à tous : entretien avec
Maurice Lévy
Monique Meunier-Kuhn

13 Débats et positions

Où va la physique des particules ?

13 Présentation

Pierre Lehmann

14 Introduction à la physique des particules : la matière et les forces

Louis Jaumeau

18 Le modèle standard des particules élémentaires, ses succès et ses lacunes

Pierre Darrulat

23 Le bouillonnement des idées théoriques : vers une unification de toutes les interactions

Pierre Fayet

29 La réponse des expérimentateurs

Michel Davier

36 La physique des particules interroge l'Univers

Pierre Salati

41 Le retour sur terre : le développement des accélérateurs de particules

Guy Colinet

44 Le rôle insolite du neutrino

François Vannucci

46 A la recherche

46 Quand le mot et l'image s'en prennent à Tadeusz Kantor

Denis Bablet

50 Les gels physiques

Jean-Michel Guenet

54 L'étude de l'atmosphère par radar ST

Michel Crochet

59 Enquête

L'information scientifique et technique dans
les unités de recherche

Colette Deschamps, François Gladel

60 Chercheurs-jeunes : à la rencontre

Les "Journées scientifiques et techniques"
de Sélestat (Alsace)

Guy Meyer

61 Flash actualités

61 Les Editions du CNRS

Point de vue sur... Georges Chapouthier,
Jean-Philippe Genet, Jacques d'Olier,
Hervé Théry

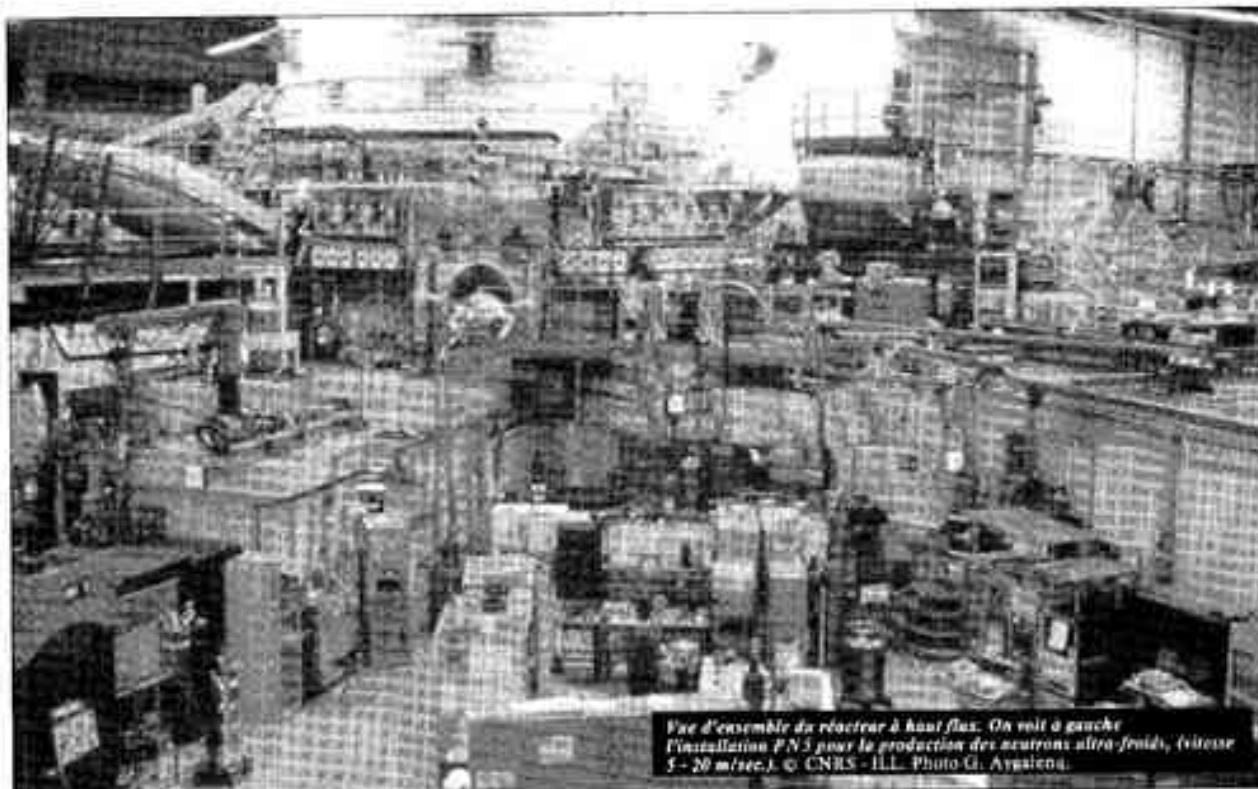
Bibliographie

LE COURRIER DU CNRS

Contents N° 63



- 5 Editorial**
Pierre Papon
- 7 Decoration**
Piotr Stonimski, CNRS Gold Medal 1985.
- 8 Dialogue**
At the Cité, scientific culture is accessible to all
Interview with Maurice Lévy, president of the Cité des Sciences et de l'Industrie de La Villette (La Villette Centre for Science and Industry).
Monique Mounier-Kuhn
- 13 Debates and positions**
Where is particle physics going?
- 13 Présentation**
Pierre Lehmann
- 14 Introduction to particle physics: the matter and forces**
What is the world made of? What are its mechanisms? These questions are not new. They are the basis of scientific approach at the forefront of which are particles (or high energy) physics.
Louis Jauneau
- 18 The standard model of elementary particles, its successes and failings.**
Is the standard model of particle physics an "open-Sesame" to the doors of the Universe?
Pierre Darrulat
- 23 The multitude of theoretical ideas: towards an unification of all interactions**
When space acquires new dimensions...
Pierre Fayet
- 29 The experimenters' reply**
Experimenters, like ancient navigators, set off into the infinitely small looking for a particle... and sometimes discover another.
Michel Davier
- 36 Particle physics interrogates the Universe**
Does our Universe stand a chance between yesterday's Big Bang, tomorrow's Big Bang or the deep cold of eternity?
Pierre Salati
- 41 The return to Earth; the development of particle accelerators**
From the first accelerator to the future Desertron or how to observe particles of ever decreasing size with increasingly enormous machines.
Guy Coignet
- 44 The strange role of the neutrino**
The neutrino, which can pass through almost anything and may destroy the Universe.
François Vannucci
- 46 Research reports**
- 46 When the word and the image attack**
Tadeusz Kantor
For the Pole Tadeusz Kantor and his theatre of death, ten years of radical research into the living.
Denis Bablet
- 50 Physical gels**
Several systems playing a part in our daily life may be termed "physical gels". Everyone has heard of the crystalline lense of the eye or the gelatin present in numerous foodstuffs. Few people are aware, however, that these have numerous things in common with "high modulus" polyethylene fibre or with certain fibres employed in the manufacture of tribo-electric underwear.
Jean-Michel Guenet
- 54 The study of the atmosphere by ST radar**
Studies of the atmosphere with a new instrument, ST (stratosphere - troposphere) radar, are currently developing very rapidly both for applied and fundamental research. The CNRS is involved with the work being carried out in this field in France.
Michel Crochet
- 59 Inquiry**
Scientific and technical information in research units
Who publishes, in what medium and in which language?
Colette Deschamps, François Gladel
- 60 Scientists encounter the young**
The "Scientific and technical meetings" at Sèlestat (Alsace).
An original experiment in communication which mobilises the whole young and adult population of a town.
Guy Meyer
- 61 Flash news**
- 61 The CNRS Editions**
Point of view on...
Georges Chapoutier, Jean-Philippe Genet, Jacques d'Olier, Hervé Thiéry
Bibliography



Vue d'ensemble du réacteur à haut flux. On voit à gauche l'installation P.N.5 pour la production des neutrons ultra-froids, (vitesse 5-20 m/sec.). © CNRS - ILL. Photo G. Aysa.

Pour le CNRS, la coopération scientifique internationale est, de longue date, une composante fondamentale de sa politique scientifique, car la science est par essence internationale. Au fil des années, le CNRS a conclu des accords, des conventions d'échange avec de très nombreux partenaires : avec la Royal Society en Grande-Bretagne (dès la fin de la dernière guerre), l'Académie des sciences de Chine (1978), la National Science Foundation aux Etats-Unis (1970), la société Max Planck en République Fédérale d'Allemagne (1981), la Direction de la recherche scientifique en Algérie (1985), etc. Ces accords permettant des échanges de chercheurs, des collaborations sur programmes, parfois ils conduisent à la réalisation d'un grand équipement comme le réacteur à haut flux de l'Institut Laue-Langevin à Grenoble, le télescope franco-canadien à Hawaï par exemple.

Cependant au cours des années quatre-vingts la conscience de nouvelles solidarités et d'impératifs nouveaux est peu à peu apparue. Celle-ci a conduit le CNRS, en pleine intelligence avec tous ses partenaires, à souligner dans sa politique de coopération scientifique internationale deux axes : l'Europe et le Tiers-Monde. Je souhaite expliquer ici pourquoi nous l'avons fait et dans quelles conditions.

L'Europe tout d'abord. Elle s'impose chaque jour un peu plus comme une évidence. La proximité géographique, la communauté de culture, l'homogénéité de nos organisations politiques et de degré de développement, tout nous incite à élire l'Europe occidentale comme le champ privilégié de notre coopération. Et de fait, spontanément, c'est avec ces pays que furent signées les premières conventions d'échanges à la fin de la seconde guerre mondiale et vers eux que se sont dirigés le plus grand nombre de nos chercheurs qui se rendent à l'étranger (pour de courtes durées cependant).

Mais il a fallu faire plus et mieux. Plus, car dans le contexte actuel de compétition internationale, l'instauration d'un véritable espace européen s'impose dans le domaine scientifique comme en bien d'autres. Mieux, car les ressources sont limitées et qu'il faut en faire une répartition optimale pour en recueillir le meilleur bénéfice.

Cet espace européen s'est tout d'abord organisé autour des grands instruments. Cet élan n'est pas brisé et la construction prochaine de l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) à Grenoble en est un exemple éclatant.

Aujourd'hui les pays européens ont pris conscience de l'importance de l'enjeu que représentent la science et la technologie pour leur indépendance. C'est un constat que le CNRS fait avec tous ses partenaires. Au niveau politique de nombreuses propositions, notamment du gouvernement français, en vue de promouvoir une plus étroite interaction entre les laboratoires européens, ont vu le jour ; elles ont conduit aux décisions, favorisant la constitution de réseaux de laboratoires et la mobilité des chercheurs, prises lors de la réunion des ministres de la recherche du 17 septembre 1984 ou plus récemment au formidable élan qui tente d'insuffler le projet EUREKA.

Le CNRS est présent dans tous ces projets. Qu'il s'agisse de promouvoir les séjours de longue durée de nos chercheurs dans des laboratoires européens, d'instaurer de véritables réseaux entre ceux-ci et d'une manière générale d'accroître la mobilité à l'intérieur de notre sous-continent, le CNRS a pris de nombreuses initiatives dont je rappelle les plus importantes :

- encouragement aux séjours post-doctoraux de longue durée par le versement d'une bourse substantielle ou l'indexation du salaire ;
- création d'une action incitative Europe afin de financer le volet international des projets de recherche mis en œuvre par les laboratoires du CNRS, ou inciter à la création de réseaux ;
- multiplication et financement spécifique de Programmes internationaux de coopération scientifique (PICS) de grande ampleur mettant en relation des laboratoires français et européens sur des recherches conjointes ;
- intensification de notre présence au sein de la Communauté économique européenne et accroissement de notre participation aux appels d'offres qu'elle diffuse. Un même effort commence à se manifester en direction de la Fondation européenne de la science. Enfin, après la signature en 1985 des accords de coopération avec le Portugal, la Suisse (Fonds national de la recherche), et l'Autriche (Académie des sciences), le CNRS entretient désormais des relations avec presque toutes les institutions scientifiques.

européennes. Il est clair que nous n'excluons pas du champ de nos coopérations l'Europe de l'Est ; pour des raisons historiques, le CNRS souhaite, en particulier, développer ses liens avec la Pologne et la Hongrie. Nous suivons d'ailleurs avec inquiétude et vigilance les conditions toujours difficiles dans lesquelles travaille la communauté scientifique en Pologne.

Mais l'actualité est, bien entendu, principalement centrée sur le projet EUREKA et je voudrais préciser la manière dont le CNRS peut s'y associer.

Ce projet, il faut le rappeler, a une finalité industrielle : il vise à renforcer le potentiel technologique de l'Europe dans des secteurs jugés stratégiques pour son développement (la microélectronique, l'informatique, les matériaux, les procédés industriels, etc.). Or, il est bien clair que dans nombre de ces domaines, la recherche et les techniques de pointe sont fortement corréllées. Une coopération entre organismes publics de recherche, universités et entreprises industrielles s'impose donc tout particulièrement dans les projets à long terme (cinq ans pour certains d'entre eux), cela est d'ailleurs conforme aux missions du CNRS. La stratégie du CNRS est donc de préparer dans un premier temps avec des industriels français des programmes qui pourront s'intégrer dans quelques projets EUREKA et ensuite si possible d'étendre cette coopération à des partenaires étrangers. L'expérience très encourageante des laboratoires du CNRS qui participent au grand programme ESPRIT des communautés européennes montre que cette stratégie est possible ; elle est aussi un facteur de dynamisme pour la recherche. Le ministère de la Recherche et de la Technologie a, dès le départ, encouragé le CNRS à s'engager dans cette voie, démarche encore confortée par le succès de la conférence ministérielle de Hanovre en novembre 1985.



Système d'irrigation des terres cultivées à Shendi au Soudan (l'eau provient du Nil). © CNRS - Photo Miller/Riviera.

La coopération avec les pays du Tiers-Monde, autre axe important de la politique internationale du CNRS, relève d'une approche différente. Il ne s'agit pas ici de promouvoir l'instauration d'un espace scientifique cohérent, mais plutôt de constituer le point d'appui qui permettra à ces pays d'opérer leur décollage scientifique.

En liaison avec le programme mobilisateur n° 4 "Recherche scientifique et innovation technologique au service du développement du Tiers-Monde", le CNRS a entièrement repensé ses modes d'intervention afin de les adapter aux problèmes scientifiques de ces pays. La difficulté était grande au départ, car le CNRS, dont la vocation est la recherche fondamentale, rencontrait en face de lui des partenaires dont les préoccupations se situaient, souvent, beaucoup plus en aval. En outre, la mise en œuvre d'une politique globale au niveau de l'ensemble de l'organisme se révélait très délicate tant sont diverses, à ce niveau, les approches de chacun des départements qui le composent.

Ceci a conduit notre Centre à agir dans trois directions :

D'abord rechercher, face aux problèmes du développement, en quoi son aide pouvait être décisive ; l'expérience acquise démontre que dans le domaine de la formation par la recherche de chercheurs, voire de techniciens supérieurs issus du Tiers-Monde, le CNRS peut mettre à profit le grand potentiel d'accueil de ses laboratoires de qualité et fournir ainsi l'élément de la chaîne de formation qui fait cruellement défaut à ces pays. De là sont sorties des initiatives nouvelles, telles que les prix de thèse ou les bourses de docteur en sciences pour l'ingénieur à destination de ces pays, dont l'effet d'entraînement est double : il s'agit de former des cadres qui contribueront au développement de leur pays et de constituer peu à peu des viviers de chercheurs qui seront nos futurs partenaires. Par ailleurs, le CNRS a voulu amplifier son action dans ce domaine, en prenant l'initiative avec d'autres organismes de recherche (INSERM, l'ORSTOM, etc.) et des organisations non gouvernementales - la CIMADE (service œcuménique d'entraide), le Comité catholique contre la faim et pour le développement (CCFD), le Groupe de recherche et d'échanges technologiques (GRET), etc. - de créer une association qui doit se transformer en fondation "la Fondation Nord-Sud". Celle-ci a pour objectif de stimuler la politique de formation, notamment par une politique d'attribution de bourses.

Ensuite, le CNRS a entrepris d'approfondir sa coopération avec les organismes français de recherche spécialisés dans la coopération avec les pays du Tiers-Monde, notamment l'ORSTOM et le Centre de coopération internationale en recherche agronomique et développement (CIRAD). Des actions communes avec ces organismes sont de plus en plus nombreuses et s'inscrivent, notamment avec l'ORSTOM, dans un accord cadre qui a suscité une véritable dynamique.

Enfin, la multiplicité des disciplines couvertes par notre organisme l'a conduit à affiner son dispositif de coopération avec les pays en voie de développement et des actions spécifiques ont ainsi été mises en œuvre dans chaque département dans le cadre du programme incitatif coordonné par la Direction des relations et de la coopération internationales (DRCI) en liaison avec la Direction du programme mobilisateur n° 4.

Mais si les lignes d'action sont aujourd'hui clairement tracées, il faut avoir la modestie de reconnaître que le problème est trop ardu pour avoir été entièrement résolu. L'entité "Tiers-Monde" est elle-même si composite qu'elle ne permet pas l'application d'un traitement global. Ainsi, à la multiplicité des approches disciplinaires s'ajoute celle des approches géographiques. C'est pourquoi la DRCI procède actuellement à une adaptation de ses modes d'intervention en fonction du niveau de développement scientifique de ces pays : des moyens nouveaux sont mis en œuvre tels que, pour l'Europe, les programmes internationaux de coopération scientifique (PICS), d'autres voient leurs objectifs et leurs mécanismes refondus afin de satisfaire les besoins de coopération de nouveaux partenaires.

Ainsi, la coopération internationale est une partie intégrante de la politique scientifique du CNRS. Les inflexions récentes qui lui ont été imprimées répondent, pour l'Europe, à la prise de conscience de plus en plus aiguë que la communauté scientifique a de l'importance déterminante des échanges entre laboratoires européens. Ces inflexions, soulignons-le, ne doivent pas être réalisées au détriment de nos relations avec les grandes puissances scientifiques et tout particulièrement avec les Etats-Unis, bien au contraire : le renforcement des liens avec la National Science Foundation et le National Institute of Health est en cours. La croissance importante du budget de la Direction des relations et de la coopération internationales du CNRS en 1986 doit nous permettre de mener cette politique avec discernement. Observons enfin, pour conclure, que la dynamique créée commence à porter ses fruits et ce n'est pas la moindre des mutations que connaît actuellement notre organisme.

Pierre Papon
Directeur général du CNRS



Distinction

LA MÉDAILLE D'OR DU CNRS

La médaille d'or du Centre national de la recherche scientifique a été attribuée pour l'année 1985 à Monsieur Piotr Slonimski.

Né le 9 Novembre 1922 à Varsovie, Piotr Slonimski fait ses études de médecine pendant la guerre à l'Université clandestine de Varsovie. Après avoir soutenu sa thèse à Cracovie, il s'installe en 1947 en France et entre au CNRS à l'Institut de biologie physico-chimique, au laboratoire de Boris Ephrussi, fondateur de la génétique en France. Docteur ès sciences en 1952, directeur de recherche au CNRS en 1962, il est depuis 1966 professeur de génétique à l'Université Pierre et Marie Curie. L'essentiel de son œuvre scientifique concerne la régulation de la respiration cellulaire et la génétique des mitochondries. Organites présents dans toutes les cellules évoluées (animaux, plantes, champignons, protistes), les mitochondries assurent une fonction essentielle : la production de l'énergie chimique nécessaire à l'ensemble du métabolisme cellulaire. Depuis près de quarante ans, les travaux de Piotr Slonimski ont conduit à une série de découvertes décisives sur le développement de la génétique moléculaire, qu'il s'agisse :

- de l'hérédité cytoplasmique,
- de la structure mosaïque des gènes,
- des mécanismes d'interaction entre molécules d'ADN, c'est-à-dire de l'évolution du matériel génétique,
- de la régulation de l'expression des gènes responsables d'un processus physiologique fondamental, l'adaptation respiratoire,
- des interactions entre noyau et cytoplasme.

Piotr Slonimski utilise, comme matériel d'étude, la levure de boulangerie, *Saccharomyces cerevisiae*. Il sait tirer parti, avec une extraordinaire efficacité, des particularités de cette espèce. Eucaryote et unicellulaire, la levure présente, en effet, les principales caractéristiques des organismes les plus évolués et offre les mêmes facilités d'analyse que les bactéries. Par ailleurs, dans le cas de mutations qui rendent la chaîne respiratoire inopérante, la cellule de levure, organisme aérobie facultatif, ne meurt pas contrairement aux autres organismes, pourvu qu'un substrat fermentescible soit disponible. C'est à ce matériel que Piotr Slonimski applique toutes les subtilités de la méthodologie génétique et biochimique. Il contribue ainsi très largement à faire de la levure l'un des quatre modèles, avec le colibacille, la drosophile et la

souris, qui ont rendu possibles les spectaculaires développements de notre connaissance du vivant, au cours de ces quarante dernières années. Dans un premier temps, Piotr Slonimski s'intéresse à une mutation particulière, appelée "petite colonie", dont l'hérédité n'est pas mendélienne mais cytoplasmique, comme venait de le démontrer B. Ephrussi. Il montre que l'absence de respiration cellulaire qui caractérise cette mutation, résulte d'un défaut de synthèse de toute une série d'enzymes de la chaîne respiratoire normalement liés aux mitochondries. De plus, la synthèse des enzymes respiratoires est induite par l'oxygène et réprimée par le métabolisme fermentaire. La seconde étape est la découverte des changements importants de l'ADN mitochondrial chez les mutants "petite colonie". L'étude de ces changements où des parties variées de la molécule d'ADN sont perdues ou amplifiées permet de montrer que l'ADN mitochondrial détermine la synthèse des enzymes de la chaîne respiratoire : il est donc dépositaire d'une partie du patrimoine génétique de l'organisme.

La sélection systématique de nouvelles mutations touchant l'ADN mitochondrial et l'étude de sa recombinaison permettent d'établir les règles originales de la parasexualité et du fonctionnement de ce matériel génétique. La valeur prédictive du modèle proposé est comparable à celle de la génétique classique, c'est-à-dire appliquée aux gènes chromosomiques du noyau.

En outre, grâce à ces mutations, il devient possible de construire la carte génétique de l'ADN mitochondrial de levure, la carte précise de cette molécule circulaire de 75 000 paires de bases, l'ordre et les distances moléculaires des gènes codant les ARN stables (ARN des ribosomes et ARN de transfert) et surtout les ARN messagers de quelques-uns des gènes qui codent les enzymes respiratoires, cytochrome oxydase et cytochrome b en particulier. Une nouvelle étape est franchie lorsqu'en 1977 Piotr Slonimski et ses collaborateurs émettent l'hypothèse d'un morcellement des gènes en unités fonctionnelles distinctes séparées par des séquences intercalaires ; il s'agit là d'une découverte majeure, celle des "gènes mosaïques". La fonction des séquences intercalaires - ou introns -

serait de réguler par l'intermédiaire des protéines spécifiques l'épissage de l'ARN messager d'un ou de plusieurs gènes, c'est-à-dire l'élimination des séquences intercalaires et réunion des différents segments transcrits :

P. Slonimski appelle ces protéines les ARN maturases.

Au même moment, et par une approche différente, plusieurs laboratoires arrivent à la même conclusion en étudiant des gènes nucléaires d'oiseau (Chambon) ou de mammifères (Flavell, Gilbert, Leder, Sharp) sans que, dans aucun de ces cas, une fonction spécifique puisse être attribuée aux séquences intercalaires.

Le bien fondé de l'hypothèse est ensuite démontré grâce au séquençage du gène du "cytochrome b". Mais l'ARN maturase de ce gène n'est présente qu'en très faible quantité, ce qui rend très difficile son isolement et son étude *in vitro*. Ces obstacles viennent cependant d'être surmontés dans le laboratoire de Gif.

D'après des résultats tout récents, certaines maturases ont des propriétés telles qu'il est possible de faire un rapprochement entre introns et éléments transposables et d'aborder ainsi la question de l'origine des gènes morcelés et de leur évolution.

Enfin si la mitochondrie dispose d'une certaine autonomie au sein de la cellule, la plupart des protéines mitochondriales sont codées par des gènes du noyau (plusieurs centaines de gènes seraient concernés) synthétisées dans le cytoplasme puis transportées dans l'organe. En étudiant une dizaine d'entre eux, le laboratoire de P. Slonimski apporte une contribution essentielle à l'étude des relations et des interactions entre les différents compartiments d'une cellule eucaryote.

Piotr Slonimski dirige depuis 1971 le Centre de génétique moléculaire du CNRS, à Gif-sur-Yvette, qui comprend cent quatre-vingts personnes travaillant au sein de quatre départements scientifiques : différenciation cellulaire, développement et morphogénèse, organisation et expression du génome, structures moléculaires biologiques. Professeur, il est depuis vingt ans le fondateur des enseignements de troisième cycle de génétique moléculaire et cellulaire (universités Pierre et Marie Curie - Paris VI - et Paris-Sud - Paris XI), viviers des jeunes généticiens français.

"A LA CITÉ, LA CULTURE EST ACCESSIBLE A TOUS"



Maurice Lévy, Président de la Cité des sciences et de l'industrie, est d'abord un chercheur. Il rêve de se remettre à la recherche dès que la Cité sera achevée. Docteur ès sciences physiques, il est depuis 1959, professeur titulaire de la chaire de physique théorique et des hautes énergies à l'université Paris VI. Maurice Lévy

Chercheurs et industriels, médiateurs et artistes, architectes et ingénieurs, au total 200 personnes, travaillent ensemble pour faire comprendre la recherche et ses enjeux, sur un espace de 120 000 m², à la Géode, au Planetarium, à la Grande Halle, nouveaux temples des temps modernes.

est un scientifique de notoriété internationale, dont la carrière s'est déroulée en France et aux Etats-Unis, en particulier à Princeton, à Stanford, à Columbia et au CALTECH ; il a été, plus récemment, directeur des programmes à l'université des Nations-Unies, au Japon. Maurice Lévy est aussi un initiateur : comme conseiller scientifique près l'Ambassade de France à Washington, il ouvre cette nouvelle mission et observe, au bénéfice du gouvernement et de la communauté scientifique de son pays, ce qui se fait dans la recherche et la technologie américaines. Commence alors l'aventure spatiale : membre en 1972, puis

président du Conseil d'administration du Centre national d'études spatiales, de 1974 à 1976, Maurice Lévy est ensuite porté à la présidence du Conseil de l'organisation européenne de recherches spatiales. Après l'espace, un autre champ neuf exige imagination, compétence, efficacité : la communication scientifique. Chargé par le président de la République du rapport sur le Musée national des sciences, des techniques et des industries (1978-1979), Maurice Lévy, nommé, à la fin de 1983, directeur du Musée se voit confier, le 21 mai 1985, la présidence de la Cité des sciences et de l'industrie. Un musée qu'il lance comme une fusée.

Monique Mounier-Kuhn – *Etes-vous un président heureux, au cœur de cette Cité des sciences et de l'industrie que l'on va inaugurer en mars, cinquante ans après la création du Palais de la Découverte, par Jean Perrin, en 1936 ?*

Maurice Lévy – La création du Palais de la Découverte en 1936 a eu une importance considérable. Si la Cité des sciences et de l'industrie, qui est très différente, a une influence aussi grande que celle du Palais de la Découverte, nous serons très satisfaits. Et je serai vraiment "un président heureux". Surtout après l'ouverture. Nous travaillons actuellement avec une telle tension !

M.M.-K. – *Le mot "Découverte" a sauté, le mot "Palais" aussi.*

M.L. – C'est normal : on venait d'une étable à vaches, de la carcasse d'une salle des ventes de la viande... Parler de "Palais" dans de telles conditions aurait

été pompeux et un peu ridicule, bien que l'architecture soit très originale et très impressionnante. Je tiens à rendre hommage à Adrien Fainsilber, qui a su tirer de cette carcasse un bâtiment aussi frappant que Beaubourg, quoique d'un tout autre style.

"Découverte", c'est autre chose : le mot est très beau, mais il a un sens un peu restrictif.

Le monde a changé, la conception de l'explication de la science a changé. Nous nous adressons à tous les publics, qu'ils aient une formation scientifique ou non, qu'ils aient reçu ou non une éducation universitaire ou même secondaire.

Notre mission consiste à mettre en œuvre un projet d'accompagnement de la modernisation scientifique, technique et industrielle que nous vivons. Cela ne peut se faire sans une modernisation des esprits et des comportements. Il s'agit davantage de sensibilisation que de découverte.

Mais nous espérons que nos visiteurs, après avoir parcouru la Cité, auront

l'impression d'avoir fait une découverte et surtout qu'ils auront envie, personnellement, de découvrir.

M.M.-K. – *Cité ? foire ? ou musée ? Quelle définition proposez-vous ? Quelle est la place de la Cité dans la société ?*

M.L. – La Cité des sciences et de l'industrie désigne un ensemble culturel unique en France, qui rassemble de façon originale et novatrice les sciences et les techniques, les arts plastiques et la musique.

Trois orientations principales sont à mettre en lumière :

- l'aventure humaine, à laquelle la Science et l'Industrie ont contribué de façon décisive et qui concerne absolument tout le monde ;
- le risque, inhérent à toute aventure, vis-à-vis duquel nous devons faire preuve de lucidité et de responsabilité ;
- la transition de la troisième révolution industrielle à laquelle nous devons nous préparer en comprenant bien les

enjeux, les contraintes et les conséquences, et en acquérant la souplesse d'esprit nécessaire pour faire face aux changements à venir.

Cité ? foire ? ou musée ? C'est un nouveau type de musée, avec des animations variées, des programmes sans cesse renouvelés, où le public devrait retrouver l'appétit de curiosité et la distraction qu'évoque une foire. La Cité est insérée dans la ville, dans la société, dans la vie.

Mais la Cité ne saurait être l'unique instrument qui permettra de faire évoluer la société contemporaine, de "décoincer" les Français par rapport à l'évolution et aux changements de profession et de formation qu'ils vivront. Nous devons occuper une position-charnière, en particulier en complément de l'école, qui ne peut pas tout faire. Les enfants, trouveront ici, dans un climat de grande liberté, l'occasion de comprendre ce à quoi va servir ce qu'ils apprennent. Les enseignants sont associés à notre action, notamment pour stimuler les vocations d'enseignants, de chercheurs, de créateurs d'entreprise. J'espère aussi que la présentation très originale de la science et de l'industrie, proposée ici, à La Villette, fera tâche d'huile, et que la Cité aura un grand rayonnement en France, en Europe et dans le monde.

M.M.-K. - Avez-vous ici une vocation parisienne ? régionale ? européenne ?

M.L. - Notre vocation n'est pas parisienne. Les besoins dont je parle, la sensibilisation nécessaire, et souhaitée, du public, à cette nouvelle révolution scientifique, technique, industrielle, sont partout. Quand ces besoins s'expriment dans diverses régions de France, nous devons y répondre. Depuis le début, nous tentons d'intégrer la dimension régionale dans toutes nos actions. Cette dimension régionale figurait au premier rang de mes préoccupations dès mon rapport de 1979.

Notre principal objectif, c'est d'aider l'ensemble de la population française, à Paris et dans toutes les régions. Nous faisons partie d'un ensemble, l'Europe, et cette évolution scientifique et technique dont nous parlons concerne les divers pays d'Europe : nous le voyons bien actuellement avec le programme EUREKA. Notre rôle, nous le jouerons dans ce contexte européen.

M.M.-K. - Pourquoi regrouper la science et l'industrie ?

M.L. - Il est indispensable de réconcilier les Français avec leur science et avec leur industrie. C'était vrai lors de la conception du projet, c'est toujours vrai aujourd'hui.

Il y a une problématique mal comprise, comme si le chaînon n'apparaissait pas clairement : comment la découverte conduit-elle aux applications et ensuite à l'utilisation industrielle ?

A partir de quelques exemples, les visiteurs de la Cité seront amenés à



comprendre ce mécanisme, qui n'est pas simple, qui n'est pas linéaire : l'innovation.

Nous avons refusé la division par disciplines : mathématiques, physique, chimie, biologie, qui dressent des barrières. Mieux vaut partir de ce que chacun, chacune pratique déjà et connaît par lui-même.

Les présentations ont été choisies à partir d'objets réels : la voiture, l'avion, le médicament, la vision. Autour de ces thèmes concrets, que le visiteur aborde facilement, nous pouvons parler de science, de technique, d'industrie, en les

situant dans une perspective socio-économique.

Nous ne faisons pas une présentation triomphale de la science et de la technologie. Pendant des années, on a cru qu'il suffisait de faire avancer la science et la technologie pour que le monde soit heureux. Or les gens s'interrogent, parce que la science apporte beaucoup de questions nouvelles.

Nous proposons une présentation honnête de cette situation, sans cacher que notre but, c'est de rendre la science attrayante et de montrer combien elle est utile.

Le CNRS et la Villette vibrent en phase

La convention entre le Centre national de la recherche scientifique et la Cité des sciences et de l'industrie de La Villette a été signée, le 21 juin 1985, par Monsieur Maurice Lévy, président de la Cité, et Monsieur Pierre Papon, directeur général du CNRS.

Cet accord-cadre prévoit entre les deux établissements une coopération et une coordination dans plusieurs domaines :

- l'information scientifique et technique ;
- la recherche en histoire des sciences, des techniques et des industries.

Parmi les modalités prévues figurent notamment :

- les échanges de personnels par des mises à disposition ;
- les prestations matérielles et les prestations intellectuelles pour la conception et la réalisation d'expositions, de maquettes, de documents audiovisuels, la fabrication et la commercialisation de livres, brochures, cassettes, cartes postales, jeux et autres produits de vulgarisation scientifique ;
- l'organisation d'actions de formation ;
- l'exécution des contrats de recherche, la

mise en commun des programmes de recherche par la création d'unités mixtes de recherche CNRS-Cité.

Le Comité de coordination CNRS-Cité assure l'orientation, la coordination et le suivi des relations entre les deux organismes et définit les domaines prioritaires.

Un contrat a été passé entre la Cité des sciences et de l'industrie et l'Atelier d'exploration de Meudon-Beaune, créé par le Directeur de l'information scientifique et technique.

L'Atelier d'exploration se voit ainsi confier le soin de concevoir et de réaliser des maquettes interactives et des formules nouvelles, d'information et d'animation, notamment pour les thèmes "Manipuler la lumière" et "Percevoir et agir". Une collaboration est engagée dans le domaine des relations du CNRS-Audiovisuel et dans celui de la phonothèque.

Plusieurs contrats ont également été signés entre la Cité et des laboratoires du CNRS.

M.M.-K. - Pourquoi réunir l'art et la science ?

ML. - Pour deux raisons. D'abord nous avons un objectif : sensibiliser tous les publics, en touchant différents niveaux de sensibilité, le niveau purement visuel, le niveau interactif, le niveau conceptuel.

L'un des accès privilégiés de la sensibilité visuelle, c'est l'art. Il faut rendre la science attrayante, frapper l'imagination des visiteurs en leur montrant que la science peut être belle, en tous cas provocante. L'idée de la beauté dépend des goûts, des réactions de chaque individu.

L'autre raison, c'est que l'art subit une évolution considérable et va vers l'utilisation des moyens technologiques actuels. La Cité doit innover dans ce domaine, en encourageant cet art à dimension technologique.

La science fait partie de la culture. La démarche créatrice de la science s'apparente, par certains côtés, à la démarche créatrice de l'art. Nous avions donc toutes les raisons de réunir la science et l'art. D'autant plus que le Parc de la Villette comprend la Grande Halle et la Cité de la musique qui ont une vocation artistique. Et il est facile, pour les scientifiques, de collaborer avec les peintres, les sculpteurs, les musiciens.

Il eût été anormal d'ignorer ces activités artistiques, de les côtoyer seulement. Nous tenons au contraire à réussir *in situ* cette union de l'art et de la science.

M. M.-K. - On s'intéresse beaucoup actuellement à la liaison entre l'art et la science. Mais la littérature ne sert guère la cause scientifique. Peut-on solliciter davantage les lettres au bénéfice des sciences ?

ML. - Vous avez tout-à-fait raison. Ce n'est pas un problème facile à résoudre. Les scientifiques écrivent mal, dans l'ensemble. Ainsi les textes, panneaux, fiches, notices, catalogues, publications... que nous élaborons à la Cité doivent être clairs et concis. Rien que cet aspect-là, qui n'a rien à voir avec la littérature, offre des difficultés. Un gros effort de style reste à faire.

La science et la littérature se rencontrent tout de même à la Cité. Le scénario du premier grand spectacle que nous allons présenter au Planetarium est dû à Michel Butor. Le commentaire d'un film projeté à la Géo de Jacques Lacarrière.

M.M.-K. - Les écrivains contemporains s'intéressent-ils à la science, qui est l'une des forces de création les plus marquantes de l'époque, avec toute leur curiosité, avec tout leur talent ?

ML. - Certes non. Cela vient sans doute du fossé qui sépare en France les littéraires des scientifiques, en particulier dans leur formation intellectuelle : ils vivent dans des univers opposés. Comme les écrivains sont sûrs de leur capacité créatrice, ils en concluent que

la science n'a aucune importance, même les philosophes, comme Jean-Paul Sartre, qui a dit : "La Science, c'est peur de balle" — et Simone de Beauvoir, qui affirme : "Je ne connais rien de plus bas qu'un ingénieur". Si la science avait à leurs yeux quelque importance, la plupart des grands écrivains s'y intéresseraient, de peur d'avoir une lacune dramatique dans leur approche du monde, dans leur culture. Je crois à un changement de tendance. Certains écrivains essaient actuellement d'intégrer le monde scientifique dans leur vie, mais à leur manière. Je pense à Michel Serres, à Michel Butor ; il y en aura d'autres et nous aimerions bien travailler avec eux.

M.M.-K. - Où en est La Villette à quelques semaines de l'ouverture ?

ML. - Nous allons ouvrir progressivement, en mars 1986, en gros la moitié de la Cité des sciences et de l'industrie, et ensuite, par tranches, jusqu'en septembre, date à laquelle l'ensemble doit être achevé. En janvier 1987, le Centre international de conférences sera prêt.

Nous avons donc en chantier des locaux et des activités de présentation et de formation.

Le Festival de l'industrie et de la technologie fait partie des préfigurations que nous mettons à l'affiche, depuis plusieurs mois comme Janus I, Janus II, l'exposition "Les écrans du réel" au Palais de la Découverte. Le FIT couvre un domaine important que nous n'avons pas encore traité, la technologie et l'industrie (1).

Ainsi les médiateurs et les équipes de maintenance, que nous avons mis à la disposition de l'ANVAR et des participants, ont reçu le baptême du feu. A chaque manifestation nouvelle, nous rodons les différentes manières d'exploiter la Cité.

M.M.-K. - Quel est votre plan de présentations scientifiques pour les cinq prochaines années ?

ML. - L'actualité aura sa place de même que les thèmes scientifiques prévus. Nous n'avons pas vraiment un plan.

Nous allons adapter l'exposition permanente, directement au contact du public, en voyant comment le public réagit, en observant ce qu'il ne comprend pas, ce qu'il souhaite voir.

Certaines des maquettes et certains des sujets, qui illustrent les expositions temporaires, viendront enrichir l'exposition permanente.

Nous espérons aussi avoir un budget d'investissement, pour créer de nouvelles présentations scientifiques. Un musée est une œuvre de création personnelle, où les choix restent arbitraires : on ne peut pas tout montrer. Mais nous avons, dans nos cartons, un grand nombre de projets

que nous pourrions réaliser, en collant le plus possible à la demande du public.

M.M.-K. - Selon quels critères, selon quelles méthodes les sujets sont-ils choisis, et les manifestations, programmées ?

ML. - Des "équipes-projets" ont pour mission de réfléchir aux moyens d'aborder les thèmes choisis - c'est le problème du contenu et des éléments de présentation. De nombreuses discussions ont eu lieu. Nous avons sollicité des conseils scientifiques extérieurs et nous avons bénéficié d'avis précieux, d'études bien menées. Pour les expositions temporaires, nos appels d'offres ont été suivis de nombreuses propositions et la commission de sélection a retenu les meilleures. Toutes nos expositions temporaires sont le fruit d'une collaboration entre un ou plusieurs partenaires extérieurs et la Cité. Parmi les sujets traités : l'or, ce qui permet de parler à la fois de la science, de la technique, du mythe, de l'économie, l'encyclopédie Diderot permettra d'avoir un projet étendu à l'ensemble des régions, l'exposition sur le sang des hommes, la mode, une industrie de pointe, le cinquantième anniversaire de la télévision.

Depuis mon arrivée, voici deux ans, j'ai consacré beaucoup de temps à la préparation de ces choix, puis aux décisions finales. Il faut un responsable. Le général Joffre a dit : "Je ne sais pas qui est responsable de la victoire de la Marne, mais je sais bien qui aurait été responsable si on avait perdu". On peut nous reprocher de ne pas avoir eu une démarche assez démocratique dans le choix des sujets. Mais si on veut avoir une cohérence, il faut trancher. Vous savez qu'un chameau est un cheval qui a été dessiné par un comité...

M.M.-K. - Croyez-vous pouvoir rendre la science vivante, dans un espace aussi immense, avec autant de projets ? Ce gigantisme ne fait peur, l'extrême diversité aussi.

ML. - Nous avons voulu utiliser, dès le départ, ce gigantisme qui vous inquiète et en tirer parti. Pour s'adresser à tous les publics, il faut un large éventail de formules et d'activités, ce qui est possible, justement, dans cet espace immense.

La Cité n'est pas seulement un musée. Il y a les expositions permanentes, mais il y a la Médiathèque, l'Espace Enfants, la Géo, le Planetarium.

En rassemblant tous ces lieux avec une carte fixe et un menu qui change, nous pourrions séduire les visiteurs. Les uns et les autres, selon l'âge, la formation, les goûts, s'intéresseront à tel ou tel thème, préféreront un style, une formule. Ainsi tentons-nous de rendre la science accessible et, par l'effet artistique, attrayante.

L'interactivité enfin montre que la science est vivante : les visiteurs, les jeunes surtout, manipulent des appareils, pratiquent des jeux, inter-

(1) Festival de l'industrie et des techniques (27 octobre 1985 - 26 janvier 1986). Le CNRS présente sur son stand l'œil et la vision et les nouveaux matériaux.



viennent dans le déroulement des tests et des expériences; et ils se mettent eux-mêmes à l'épreuve pour mesurer leur savoir, pour interroger, pour comprendre. La science sera-t-elle ici vraiment compréhensible? Certains sujets, certains lieux s'y prêtent mieux que d'autres. La diversité? Elle reflète celle du monde actuel. Ce serait éluder le problème que de ne pas affronter cette diversité. Nous ne disons pas: "Voilà ce que nous avons à vous montrer. Si ça vous intéresse, venez. Si ça ne vous intéresse pas, ne venez pas". Nous disons: "Venez, voyez et dites nous ce qui vous intéresse".

M.M.-K. - Qu'attendez-vous de la communauté scientifique? Et qu'attendent les scientifiques de La Villette?

M.L. - La communauté scientifique comprend tous ceux et toutes celles qui ont une formation scientifique: enseignants, chercheurs, ingénieurs intéressés par la recherche fondamentale et par les applications. Nous attendons de la communauté scientifique qu'elle commence à partager nos objectifs, ce qui est loin

d'être acquis. Beaucoup de scientifiques ne sont pas encore convaincus de la nécessité de faire savoir. Ils considèrent que faire, c'est bien, et que faire savoir, c'est inutile. Ceci explique le retard considérable de la France dans ce domaine: ceux qui ont demandé des crédits pour la recherche l'ont toujours emporté sur ceux qui demandaient des crédits pour expliquer la recherche. Le refus de faire savoir est une attitude suicidaire. Parce que le gouvernement, quel qu'il soit, ne va pas indéfiniment soutenir le développement de la recherche si on ne lui démontre pas, ainsi qu'à l'opinion publique, ce qu'est l'utilité de la science. Les grands organismes de recherche, à commencer par le CNRS, ont parfaitement compris cette nécessité. Le colloque national que Jean-Pierre Chevènement a organisé, a montré qu'à l'unanimité était reconnue la nécessité de présenter la science à l'ensemble de la population. Mais les chercheurs ont-ils changé en profondeur? J'en doute! Il y a eu, dans la communauté scientifique, des attitudes très réservées vis-à-vis de La Villette. Beaucoup considéraient que ce très gros effort financier aurait dû être destiné aux laboratoires. Sans la Cité, il est vrai que cet effort

financier n'aurait pas été décidé et que cet argent n'aurait donc pas profité aux laboratoires. Les scientifiques devraient considérer que c'est une chance: voilà un effort supplémentaire de l'Etat pour faire comprendre la science et une augmentation de l'enveloppe-recherche qui, une fois la Cité terminée, bénéficiera à l'ensemble des chercheurs. Nous voulons amener le public à comprendre ce qu'est la recherche. Nous voulons montrer que la recherche existe et progresse en France, qu'on y fait des découvertes. Les Français doivent le savoir et en être fiers. L'opinion croit trop souvent que ce qui se fait de bien en recherche se fait à l'étranger. On entend parfois cette phrase abominable: "En France on n'a que des chercheurs, on n'a pas de chercheurs". Comme à l'Espace Entreprise, où les industriels montrent leur capacité de conception de nouveaux produits, comme au FIT, nous voulons chaque année donner à des équipes de recherche françaises l'occasion de venir montrer ce qu'elles ont fait, au cours de quelques journées, en s'adressant directement au public. Nous voulons à la fois montrer que les

scientifiques sont des hommes comme les autres, qu'on peut parler avec eux, et leur faire sentir à quel point il est difficile de s'adresser au public. Les scientifiques s'imaginent souvent que c'est facile, qu'il suffit d'arriver devant un groupe et de parler comme lorsque l'on donne un cours.

Beaucoup de scientifiques que je connais ont été profondément traumatisés par quelques heures de contact avec le public. Ils ont eu l'impression de se trouver devant un fossé infranchissable, d'être condamnés à un dialogue de sourds. Nous voulons mettre au point une pédagogie de la présentation de la science au public.

Avec un événement, un sujet à l'affiche tous les deux mois, soit en gros six fois par an, on peut donner des coups de projecteur sur tel ou tel aspect de la recherche française, avec des films, des conférences, des discussions, et un contact direct entre chercheurs et visiteurs.

M.M.-K. - Comment se développe la collaboration entre le CNRS et La Villette ? La convention signée en juin dernier définit le cadre d'un ensemble d'actions communes.

M.L. - La collaboration entre le CNRS et La Villette promet d'être féconde. Le cadre en est tracé par la convention signée par Pierre Papon, le directeur général du CNRS et moi-même. Des contrats de réalisation ont également été passés avec plusieurs laboratoires du CNRS, ce qui est important pour le développement de la Cité.

Un certain nombre de chercheurs ont été mis à la disposition de la Cité, d'autres, je l'espère, viendront à leur tour. Les chercheurs doivent faire preuve d'une certaine mobilité et considérer que venir expliquer ce qu'ils savent, cela fait partie de leur carrière. Nous leur offrons les moyens de réaliser leur projet personnel. Nous souhaitons que les chercheurs qui travailleront ici ne quittent pas leur maison d'origine, le CNRS ou tout autre organisme de recherche.

Mais nous avons des projets précis : il y aura ici un centre de recherche en histoire des sciences, en muséologie scientifique.

Nous travaillons étroitement avec le CNRS dans divers domaines.

Nous avons aussi, grâce à la Direction des sciences de l'homme et de la société, une aide importante en sciences humaines, qui avaient été un peu oubliées au début.

Nous avons des préoccupations de recherche à long terme, dont je me suis entretenu avec Pierre Papon et Goëry Delacôte, directeur scientifique, chargé de la Direction de l'information scientifique et technique du CNRS. Plusieurs domaines de recherche sont essentiels pour la Cité, l'intelligence artificielle, ou les images de synthèse, par exemple. Il serait bon d'aboutir à un financement commun de ces recherches dans certains laboratoires, pour tirer profit,

ultérieurement, des découvertes qui pourront être utilisées dans la Cité. Le directeur général du CNRS s'est montré très favorable. Nos méthodes sont au reste familières au CNRS. Goëry Delacôte conduit une politique de communication très proche de celle de la Cité, qu'il a contribué à mettre en œuvre. Il a été ici mon premier coéquipier. Cette collaboration avec le CNRS va s'intensifier quand la Cité sera totalement ouverte. C'est un gage de succès pour l'avenir.

M.M.-K. - Comment les organismes de recherche peuvent-ils utiliser La Villette ?

M.L. - Nous souhaitons que les organismes de recherche utilisent la Cité comme un espace et un instrument à leur disposition. C'est un investissement de l'Etat, dont tous nos partenaires scientifiques doivent profiter ; ils le savent. Nous avons organisé la toute première visite des bâtiments de la Cité pour les directeurs d'organismes de recherche. En entrant ici, la réaction immédiate, c'est : "Je ne peux pas ne pas y être".

Chacun doit exploiter la Cité des sciences et de l'industrie comme un outil de communication, pour ses propres projets.

M.M.-K. - Est-ce qu'ici on ne joue pas un peu à "les scientifiques parlent aux scientifiques" ?

M.L. - Non. C'est exactement le contraire. Ils vont nous reprocher de ne pas être assez scientifiques. Nous avons fait un tel effort pour parler au grand public, qu'on va nous dire : "Tout ce que vous faites, c'est pour les gosses". Ou bien : "Vous présentez des choses beaucoup trop simplistes". Ils ont raison. Mais il faut choisir. Nous avons choisi de ne pas parler aux scientifiques. Ce qui ne veut pas dire qu'ils ne débattront pas entre eux ; le Centre international de conférences, les salles d'actualité, de réunion sont là pour ça. Toutes les équipes de la Cité comprennent des chercheurs, notamment parmi les animateurs. Les scientifiques jouent un rôle moteur dans la conception et dans l'animation. La Cité n'est pas faite pour les scientifiques, mais elle doit être faite par eux. Ici, ils s'adressent aux autres, comme médiateurs.

M.M.-K. - La muséologie a changé. Comment ces médiateurs d'aujourd'hui qui succèdent aux démonstrateurs de jadis, sont-ils formés ?

M.L. - Oui, il suffit de voir au Palais de la Découverte l'exposition "Les écrans du réel", pour constater que l'approche n'est plus la même. Cette muséologie nouvelle va faire école et le Palais de la Découverte, s'il le souhaite, s'en inspirera. Les médiateurs en effet succèdent aux démonstrateurs : le petit prof qui

s'adresse au public, moi, je n'en veux pas, surtout quand il met une blouse blanche. Entre le petit prof qui veut faire son cours, et le G.O. du Club Méditerranée, il nous faut trouver notre ton.

La médiation est une tâche très difficile. Il s'agit d'amener le visiteur à tirer parti au maximum de sa visite, où qu'il se trouve dans la Cité. En fonction de son niveau de compréhension, il doit aller plus loin. A nous de respecter sa personnalité et sa liberté.

Une instance d'évaluation de la médiation scientifique a été créée. Le résultat sera atteint par approximations successives. Les hommes et les femmes choisis comme médiateurs seront les artisans de la réussite.

M.M.-K. - A quelles réussites étranges la Cité pourra-t-elle se mesurer d'ici à l'an 2000 ?

M.L. - A toutes celles qui voudront bien nous copier ! Déjà, on demande à voir ce que nous faisons, on sollicite des conseils - ce qui nous réjouit. La Cité est le prototype d'une nouvelle génération de centres scientifiques et techniques. La première génération est celle du Conservatoire national des arts et métiers, à Paris, le Deutsches Museum, à Munich. La deuxième génération, c'est le Palais de la Découverte, et tous les musées scientifiques qui ont été créés un peu partout depuis un demi-siècle.

La Cité des sciences et de l'industrie doit évoluer avec dynamisme, sans se laisser dépasser par ceux qui s'en inspirent.

M.M.-K. - Quelles sont vos angoisses ? Et quel est votre espoir ?

M.L. - Mon angoisse, c'est la certitude que je serai critiqué, attaqué, par tout le monde !

Mon espoir, c'est qu'avec le recul nécessaire, on juge finalement que j'ai réussi, avec tous ceux et toutes celles qui, dans nos équipes de la Cité, ont vécu cette création des temps modernes.

Je souhaite surtout que la Cité contribue à rendre la culture scientifique accessible aux Français et aux Françaises, en particulier les jeunes.

M.M.-K. - Alors, ça vibre à La Villette ?

M.L. - Oui, ça vibre à La Villette. C'est le slogan de ce semestre de "décollage". Ça vibrera encore plus à mesure que nous nous rapprocherons de l'ouverture de notre Cité des sciences et de l'industrie.

Le personnel vibre, le public aussi. Nous avons déjà deux millions et demi de visiteurs sur le site. Nous espérons bien connaître un véritable succès populaire, à partir de l'ouverture, en mars 86, avec la nuit de la comète de Halley, et accueillir, très vite cinq à six millions de visiteurs par an.

Entretien réalisé par
Monique MOUNIER-KUHN

OÙ VA LA PHYSIQUE DES PARTICULES ?

PRÉSENTATION

Pierre LEHMANN

Au-delà de l'atome et du noyau, la physique des particules (appelée aussi physique des hautes énergies) a pour objectif de décrire la structure interne des protons et des neutrons, de mettre en évidence toutes les sous-structures que l'on y trouve et de comprendre les forces qui gouvernent leurs interactions. Depuis une trentaine d'années, ce domaine a considérablement évolué. De la découverte de la non-conservation de la parité dans les interactions faibles à celle des bosons intermédiaires W et Z, tout un monde nous a été révélé, de nouveaux concepts ont été forgés. Au foisonnement des nouvelles particules (si nombreuses qu'il était difficile de les appeler élémentaires) se substitue maintenant la vision d'un ordre régi par les quarks et les gluons. A la notion de quatre forces fondamentales indépendantes réglissant l'univers, se substitue maintenant l'espoir d'une théorie unifiée de ces interactions.

Dans le même temps, les progrès de la physique des particules et de la cosmologie ont abouti à une interrogation commune de l'univers, de son évolution depuis le Big Bang, de sa structure, de son futur lointain.

L'histoire de ces trente années montre une succession de percées théoriques, de découvertes expérimentales spectaculaires, rendues possibles par l'évolution, le perfectionnement des techniques employées tant dans la construction de nouveaux accélérateurs que dans les appareillages expérimentaux.

La physique des hautes énergies a été et reste un domaine moteur dans l'évolution de techniques telles que l'informatique, l'électronique, les nouveaux types de détecteurs. L'IN2P3, Institut du CNRS, par l'intermédiaire de dix de ses laboratoires et par les théoriciens qui leur sont associés, a joué un grand rôle dans cette évolution et la

France (par des recherches effectuées à l'IN2P3 et au CEA) s'est hissée à un niveau international de grande qualité.

Les articles suivants décriront en détail les points effleurés ci-dessus. Ils expliqueront au lecteur les progrès effectués et indiqueront les objectifs futurs visés par les physiciens. La nature des questions posées, la stratégie proposée pour les résoudre, la description des moyens à mettre en œuvre, montrent la vitalité de ce domaine de la science, ses perspectives enthousiasmantes, et la puissance évocatrice d'une discipline, située à la frontière de nos connaissances, qui se propose d'explorer dans un même mouvement l'infiniment petit et l'infiniment grand.

■ Pierre Lehmann est directeur scientifique pour le Département de physique nucléaire et corpusculaire du CNRS et directeur de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3).

PAUL MUSSET (1933-1985)

Les physiciens des particules ont appris avec beaucoup de tristesse la disparition de leur collègue Paul Musset, le 4 septembre dernier, victime d'un accident de montagne.



DR

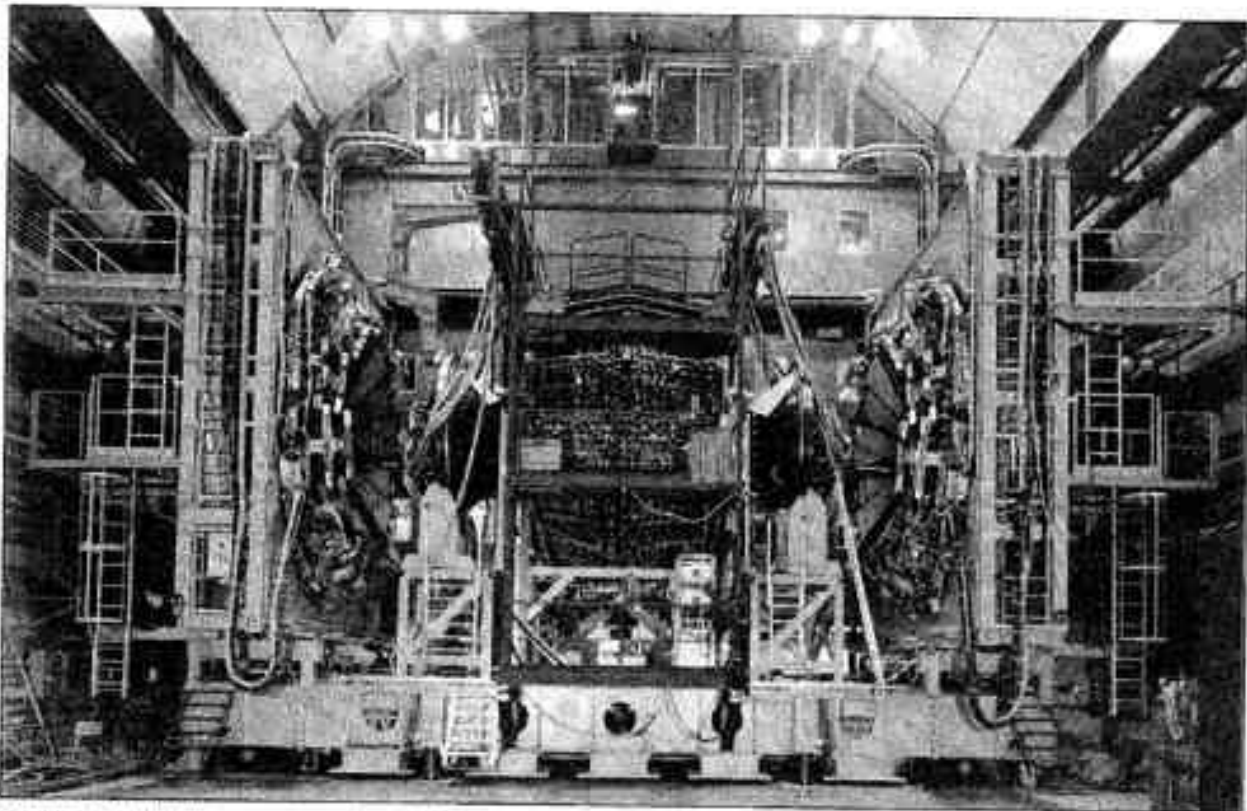
Paul Musset avait commencé sa carrière au CNRS, dans le Laboratoire de physique de l'Ecole polytechnique, dirigé par le professeur Louis Leprince-Ringuet, à jouer un rôle moteur, avec André Lagarrigue, dit-pard, lui aussi prématurément, dans la conception et la construction de la grande chambre à bulles Gargamelle, et dans la découverte, en 1973, des interactions de neutrino avec le «*neutrino neutre*». Il avait entre temps obtenu un poste de physicien au CERN. Esprit curieux, inventif, il s'était passionné pour la recherche des «*monopôles magnétiques*», particules énigmatiques prédites par les théories de grande unification.

Paul Musset était un physicien de grande valeur, et un homme de cœur dont tous les nombreux amis garderont le souvenir.

Introduction à la physique des particules : la matière et les forces

De quoi le monde est-il fait ? Quels sont ses mécanismes ? Ces questions ne sont pas nouvelles. Elles sont à la base d'une démarche scientifique dont la physique des particules (ou physique des hautes énergies) constitue l'avancée extrême.

Louis JAUNEAU



L'expérience UA2 du collisionneur proton-antiproton du CERN. - CERN

Quels sont les constituants de la matière ? Au siècle dernier, les découvertes des chimistes avaient imposé l'idée que la matière était formée de parties insécables appelées atomes. Au début du vingtième siècle, les physiciens constatèrent que chaque atome était en réalité un système complexe formé d'un noyau central entouré d'électrons. Puis, en 1932, le noyau apparut comme un agglomérat de particules de deux types : les protons et les neutrons. On dévoilait ainsi la simplicité cachée sous l'extraordinaire diversité du monde. Tout semblait bâti à partir de trois constituants élémentaires : le proton, le neutron et l'électron.

■ Louis Jauneau, directeur de recherche CNRS, travaille au Laboratoire de l'accélérateur linéaire - LAL - (IN2P3 - université de Paris-Sud), Centre d'Orsay, 91405 Orsay Cedex.

La constitution de la matière

On dut admettre par la suite que la simplicité ultime n'était pas encore atteinte. En 1964, des théoriciens, qui cherchaient à classer les nombreuses particules déjà observées, firent l'hypothèse de constituants plus élémentaires, appelés *quarks*. Quelques années plus tard, des physiciens "radiographièrent" (à l'aide de faisceaux d'électrons de très grande énergie) protons et neutrons et découvrirent que ceux-ci semblaient avoir une structure granulaire : les "grains" furent rapidement identifiés avec les quarks des théoriciens.

Dans l'état actuel des moyens d'observation, on pense que les constituants ultimes de la matière sont les quarks et les électrons. Il n'a pas été possible de leur attribuer une dimension : on peut seulement dire que leur taille est inférieure à 10^{-16} cm environ.

Il y a cependant, entre électrons et quarks, une énorme différence : les électrons peuvent être observés à l'état libre, tandis que les quarks n'ont jamais pu être arrachés aux protons et neutrons. Sans doute ne seront-ils jamais détectés directement. D'autre part, alors que les charges électriques portées par les particules sont égales à (ou multiples de) la charge de l'électron ou celle du proton, les quarks ont des charges fractionnaires.

Le monde de l'infiniment petit échappe à notre intuition. Il n'obéit pas aux lois de la mécanique classique, mais à celles d'une nouvelle mécanique incorporant la théorie de la relativité et la théorie des quanta. Il s'y passe des phénomènes surprenants : des particules peuvent apparaître ou bien disparaître. Il n'y a plus conservation de la matière, selon Lavoisier, mais conservation globale matière-énergie selon Einstein. Le bombardement d'une

cible par des particules de très grande énergie (produites par exemple par des accélérateurs) peut créer de nouvelles particules.

Autre fait surprenant : on a découvert ainsi beaucoup de particules qui n'existent pas à l'état naturel, et qui semblent ne jouer aucun rôle majeur dans l'économie de l'Univers. On a démontré l'existence de six espèces différentes de quarks*, alors que deux sont suffisantes pour construire protons et neutrons. Les autres quarks entrent dans la composition de particules éphémères que les physiciens découvrent et étudient depuis 1947 (particules "étranges", "charmées"...). L'électron est associé à un neutrino, particule de charge électrique nulle, de masse nulle ou très faible : tous deux jouent un rôle dans notre univers. Mais l'électron a deux frères, le muon et le tau, plus lourds que lui, chacun associé à un neutrino différent. Ces six particules sont appelées *leptons*. On peut alors se demander si les six quarks et les six leptons sont bien les vraies particules élémentaires et s'il en existe d'autres espèces.

Par ailleurs, les physiciens ont encore découvert d'autres particules, qui ressemblaient beaucoup aux particules déjà connues, mais qui possédaient une charge électrique de signe opposé. Ils les ont appelées *antiparticules*. L'antiparticule de l'électron (négatif) est un électron positif ou positon. Celle du proton (positif) est un proton négatif, ou antiproton. Dès qu'une particule et une antiparticule de même nature, par exemple un proton et un antiproton, entrent en contact, elles s'annihilent mutuellement, pour donner de l'énergie ou d'autres particules. D'autre part, de violentes collisions entre particules peuvent créer des paires proton-antiproton (mais aussi d'autres particules).

Les forces

Dans notre monde apparaissent des forces de nature très variée. Les physiciens les ont réduites à quatre forces fondamentales. La plus anciennement connue, mais encore la plus mal comprise, est la force de *gravitation*, responsable, sur notre Terre, de la pesanteur, et, dans l'espace, du mouvement des corps célestes. La force *électromagnétique* assure la cohésion des atomes (attraction du noyau positif et des électrons négatifs). Elle est à la base de toute notre civilisation technique. La force *nucléaire* ou *forte* maintient ensemble protons et neutrons dans le noyau. Elle est très puissante. Les leptons sont insensibles à la force nucléaire, qui, par contre, s'exerce entre toutes les particules composées de quarks (les *hadrons*).

Il existe un quatrième type de force, d'intensité très faible, appelée pour cela *force faible*. Elle est trop faible pour assurer la cohésion de quoi que ce soit, mais elle se manifeste, par exemple, dans la radioactivité β du neutron.

Les quatre forces fondamentales diffèrent par leur intensité mais aussi par une

* En réalité, l'existence du système quark (le quark) n'est encore à confirmer.

Table

Les particules "élémentaires" (en 1985)

		Charge électrique (unité : charge du proton)			
LEPTONS	Neutrinos	ν_e	ν_μ	ν_τ	0
	Leptons chargés	e^-	μ^-	τ^-	-1
			(muon)	(tau)	
QUARKS		u	c	t	$\frac{2}{3}$
		d	s	b	$\frac{1}{3}$

(auxquels il faut ajouter leurs antiparticules : antileptons et antiquarks).
Leptons et quarks sont regroupés en trois familles, dont la première suffit pour expliquer notre monde ordinaire.

Les particules composées (hadrons)

Les *hadrons* sont des systèmes de quarks. Il en existe deux sortes :
• les *baryons* (dont le proton et le neutron, rassemblés sous le nom de *nucleons*, sont les chefs de file) sont composés de trois quarks, par exemple : proton = uud, neutron = udd ;
• les *mésos* (comme le méson π) sont composés d'un quark et d'un antiquark, par exemple : π^+ = ud (d = antiparticule du d).
Le quark étrange s , le quark charmé c , entrent dans la composition des particules étranges, charmées.

Note sur les symboles des quarks : u pour "up" (en haut), d pour "down" (en bas), s pour "strange" (étrange), c pour "charm" (bas ou "beauty", haut ou "truth" (vérité)).

L'organisation de la recherche en physique des particules

La recherche expérimentale en physique des particules nécessite des moyens très lourds et très complexes (accélérateurs et dispositifs de détection) qui dépassent largement les possibilités d'un seul laboratoire (et même, très souvent, d'un seul pays).

Les accélérateurs sont maintenant concentrés dans quelques grands centres nationaux ou internationaux, et sont utilisés par des équipes provenant de nombreux laboratoires différents. L'Europe dispose d'un grand centre, le CERN (Centre européen de recherches nucléaires), créé en 1952 à l'initiative des physiciens, et construit près de Genève de part et d'autre de la frontière franco-suisse. Le CERN est actuellement, dans le monde, l'un des deux centres les plus importants dans le domaine de la physique des particules (l'autre est le Laboratoire Fermi aux États-Unis). Le laboratoire allemand DESY, à Hambourg, joue également le rôle d'un centre européen (voir carte page 42).

Le travail expérimental s'effectue au sein de vastes collaborations internationales, formées d'équipes qui s'associent pour construire les détecteurs. Les systèmes expérimentaux sont coûteux et longs à construire (au minimum deux à trois ans) et les programmes sont donc soumis à une planification très stricte. La collaboration UA1, au CERN, regroupe plus d'une centaine de physiciens. La construction des grands détecteurs pour l'anneau de collision LEP, dont les projets ont été approuvés en 1982, rassemble, pour chacun, plusieurs centaines de physiciens, ingénieurs et techniciens, provenant de plusieurs dizaines de laboratoires différents. Ces détecteurs n'entreront en service qu'en 1989.

Le mode de vie des physiciens a été

affecté par la lourdeur des moyens mis en jeu. Les accélérateurs fonctionnent jour et nuit et ne s'arrêtent que pour des périodes d'entretien et de développement. La concentration des installations expérimentales implique de fréquents déplacements pour les personnes qui doivent aller travailler "sur le terrain". Un même laboratoire, pour utiliser de façon optimale son potentiel technique, doit s'engager simultanément dans plusieurs expériences qui se trouvent à des stades de développement différents (construction, prise de données, analyse).

La physique des particules n'aurait pas connu un tel essor de ses moyens sans les progrès réalisés par ailleurs dans les domaines de l'électronique rapide miniaturisée et de l'informatique. Mais, par ses exigences technologiques constantes, elle a incité les possibilités, elle a inévitablement favorisé les progrès.

La physique expérimentale des particules s'effectue en France dans les laboratoires de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (INP3-CNRS) (laboratoires propres d'Annecy et de Strasbourg, laboratoires associés de Paris VI et VII, du Collège de France, de l'École polytechnique, du Laboratoire de l'accélérateur linéaire (LAL) à Orsay, de Lyon, de Clermont, de Grenoble et de Marseille) et dans le Département de physique des particules élémentaires (DPEP) du Centre d'études nucléaires de Saclay.

La physique théorique des particules s'effectue dans des laboratoires propres du CNRS ou qui lui sont associés (École normale supérieure, Paris VI et VII, Collège de France, École polytechnique, Orsay, Annecy, Bordeaux, Marseille, Montpellier, Nice et Strasbourg) et au Centre d'études nucléaires de Saclay.

autre caractéristique qu'on appelle leur *portée*. La force électromagnétique et la force gravitationnelle peuvent s'exercer à très grande distance (théoriquement infinie). La force nucléaire se fait sentir seulement à très petite distance (de l'ordre de 10^{-13} cm) et la force faible à une distance environ mille fois plus courte.

Comment une force peut-elle s'exercer à distance entre deux particules ? Selon la théorie quantique, les deux particules échangent des grains d'énergie appelés *quanta*. Dans le cas de la force électromagnétique, ce sont les *photons*, ou grains de lumière, des ondes électromagnétiques : ondes hertziennes, lumière, rayonnements X et γ . Aux autres forces sont aussi associés des quanta, particules qui peuvent être massives. Dans le cas de la force faible, on suspectait depuis longtemps l'existence de quanta faibles appelés *bosons intermédiaires faibles*. Pour la force gravitationnelle, on parle de *gravitons*, bien que, jusqu'à présent, la gravitation ait refusé de se couler dans le moule de la théorie quantique.

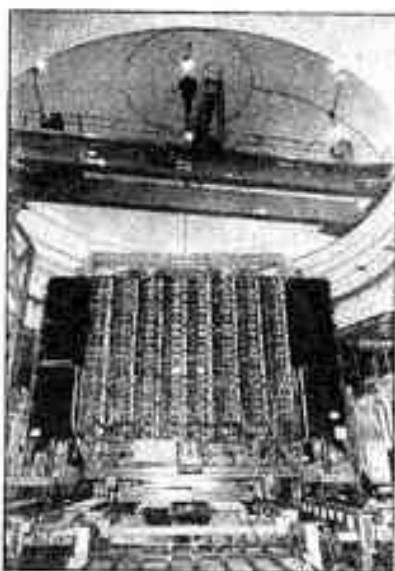
Par contre, on a compris il y a une dizaine d'années que la force nucléaire qui s'exerce entre les hadrons n'est qu'une manifestation d'une force forte plus fondamentale qui s'exerce entre quarks et les maintient liés dans les hadrons. Les quanta correspondants ont été nommés *gluons*.

Vers l'unification des forces

Les physiciens ont recherché du côté des forces l'unité et la simplicité qui semblaient s'évanouir du côté des particules. Déjà Maxwell, au dix-neuvième siècle, avait unifié la description des phénomènes électriques et magnétiques. Einstein et quelques autres physiciens de son époque avaient cherché à rassembler en une seule théorie la force gravitationnelle et la force électromagnétique, les deux seules alors connues, mais la démarche était prématurée.

Plus récemment, les physiciens ont réussi l'unification de la force électromagnétique et de la force faible. La théorie "électrofaible" prédisait l'existence de "bosons intermédiaires faibles" de grande masse (de l'ordre de cent fois la masse du proton). La découverte des W^+ , W^- et Z^0 (1983) au grand collisionneur proton-antiproton du CERN apporta une confirmation éclatante et renforça la confiance des théoriciens dans les nouveaux concepts. L'importance de ces développements a été marquée par deux Prix Nobel, accordés, l'un aux théoriciens en 1979, l'autre aux expérimentateurs en 1984.

Si l'on oublie la force gravitationnelle, tout-a-fait négligeable au niveau des interactions entre particules, les physiciens disposaient alors, pour décrire le monde des particules, d'un ensemble de deux théories : la *théorie électrofaible* d'une part, et, de l'autre, la théorie décrivant les interactions des quarks et des gluons (appelée *chromodynamique quantique*). L'ensemble de ces deux théories constitue le *modèle standard* de la physique des particules, modèle qui décrit tous les faits connus et n'a encore jamais été mis en défaut.



L'expérience UA1 du collisionneur proton-antiproton du CERN. © CERN.

Au-delà du modèle standard

Mais, pour les théoriciens, le modèle standard ne constituait qu'une étape sur la

voie de l'unification. Il y a une dizaine d'années, certains entreprirent donc de rassembler la théorie électrofaible et la chromodynamique en une nouvelle théorie dite de *grande unification*. La force électrofaible et la force entre quarks y sont considérées comme des facettes d'une force unique, mais celle-ci n'apparaîtrait comme telle qu'à des énergies fantastiques, irréalisables au laboratoire. Et c'est ici que la physique des particules rejoint la cosmologie : on pense, en effet, que ces énergies énormes peuvent avoir existé dans les tous premiers instants de l'Univers (théorie du "Big Bang").

Aux énergies plus basses, la force électrofaible et la force entre quarks reprennent leur individualité. A une énergie encore plus basse, de l'ordre de l'énergie de masse des bosons intermédiaires faibles, la force électrofaible se décompose en force électromagnétique et force faible.

Dans l'Univers actuel, une trace pourrait subsister de la grande unification : le proton serait instable, susceptible de se désintégrer, mais avec une durée de vie moyenne de l'ordre de 10^{31} ans ou peut-être plus encore ! Plusieurs expériences tentent actuellement de détecter ce phénomène.

Dans le cadre strict de la théorie de

Quelques définitions

Energie

L'unité d'énergie utilisée en physique des particules est l'électron-volt. C'est l'énergie acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel électrique d'un volt. Un eV vaut $1,6 \times 10^{-19}$ joule. Les multiples sont le KeV (10^3 eV), le MeV (10^6), le GeV (10^9), le TeV (10^{12}). Selon la théorie de la relativité, il y a une certaine équivalence entre masse et énergie (cette équivalence s'exprime par la célèbre relation $E = mc^2$, où c est la vitesse de la lumière). En accord avec cette théorie, des transformations masse-énergie s'effectuent dans les réactions entre particules.

mc^2 est appelé l'énergie de masse d'une particule de masse m . L'énergie de masse de l'électron est d'environ un demi-MeV, celle du proton d'environ un GeV. On dira que leurs masses sont respectivement de l'ordre d'un demi-MeV/c² et d'un GeV/c².

Le spin des particules

Les particules possèdent des propriétés de rotation interne et sont caractérisées, en plus de leur masse et de leur charge électrique, par leur moment cinétique intrinsèque ou spin. Mais l'image classique d'une toupie en rotation est trompeuse. La mécanique classique n'impose pas de restrictions au mouvement de rotation d'un corps, et son moment cinétique peut prendre n'importe quelle valeur. Par contre, le moment cinétique d'une particule possède une valeur bien définie. Evalué en unité de spin (dénotee \hbar égale à la constante de Planck divisée par 2π), il est déterminé par un nombre qui ne peut être qu'entier ou demi-entier (on parle alors de spin entier ou demi-entier). Il n'y a aucune analogie classique à cette propriété quantique du moment cinétique. De plus, les particules de spin entier et celles de spin demi-entier ont des pro-

priétés très différentes. Celles de spin entier s'appellent des bosons (du nom du physicien indien Bose), celles de spin demi-entier des fermions (du nom du physicien italien Fermi). Les particules de matière (leptons et quarks) ont un spin 1/2 (ainsi que protons et neutrons), les quanta des forces (photons, bosons intermédiaires faibles, gluons) ont un spin 1. Les bosons de Higgs ont un spin 0. Les symétries internes s'appliquent à des particules de même spin. Par contre, les supersymétries établissent des relations entre particules de spins différents.

Accélérateurs et collisionneurs

Les accélérateurs accélèrent, à l'aide de champs électriques, des particules chargées et stables : électrons ou protons. Ces particules sont ensuite projetées sur une cible. Les chocs entre, par exemple, les protons extraits de la machine et les noyaux atomiques de la cible sont sources de nouvelles particules qui sont recueillies, localisées, triées et transportées, par des systèmes électromagnétiques, jusqu'aux zones expérimentales où sont placés les détecteurs. Les collisionneurs réalisent des collisions entre les particules de deux faisceaux circulant en sens inverse. Ces faisceaux se croisent dans plusieurs zones d'intersection autour desquelles sont placés des appareils expérimentaux. Les machines actuellement en fonctionnement sont des collisionneurs e^+e^- ou proton-antiproton.

La collision d'un électron et d'un positron de chacun 20 GeV, par exemple, réalise une énergie totale de 40 GeV à partir de laquelle se créent des particules : il est alors possible d'y rechercher des particules dont la masse peut être comprise entre 0 et 40 GeV/c².

grande unification, il n'y aurait (presque) plus rien de nouveau à découvrir en physique des particules : la montée en énergie déboucherait sur un "désert", puisque l'énergie d'unification est inaccessible. Pourtant, on est loin de tout comprendre dans le modèle standard et la grande unification. De nouvelles théories proposent des réponses qui, pour des raisons fondamentales, prédisent beaucoup de nouvelles particules, et laissent espérer que le désert pourrait fleurir.

L'observation de ces particules ou de

nouveaux effets exige des énergies plus élevées que celles actuellement disponibles. De nouvelles machines sont en construction, d'autres en projet. Pour aller beaucoup plus loin, il apparaît maintenant nécessaire de révolutionner les techniques d'accélération.

La physique des particules n'est pas achevée. Il est difficile de prévoir ce qui subsistera du bouillonnement actuel des idées théoriques. Seule l'expérience peut trancher et la réponse viendra des futurs accélérateurs de particules. ■

Particules et symétries

Dire qu'un objet possède une symétrie signifie qu'il ne change pas - c'est-à-dire qu'il reste invariant - dans une certaine transformation, par exemple une sphère parfaite est invariante par rotation. De même, les lois de la physique possèdent des propriétés d'invariance, ou symétries. Ce concept de symétrie joue un rôle considérable dans de nombreuses disciplines scientifiques, notamment en physique des particules.

Les lois de la physique doivent être indépendantes du lieu et du moment de l'expérience, aussi bien que de l'orientation de l'appareil d'observation (tout au moins tant que l'expérience n'est pas influencée par l'orientation privilégiée introduite par la désintégration). Ceci veut dire qu'elles sont invariantes dans les translations d'espace et de temps et dans les rotations. Ces symétries, dites externes, impliquent que certaines grandeurs physiques sont conservées : quantité de mouvement (produit de la masse par la vitesse) et énergie pour les translations d'espace et de temps, moment angulaire intrinsèque pour les rotations.

Il existe d'autres quantités conservées qui caractérisent les particules, par exemple la charge électrique. Il est tentant de les associer à des symétries (c'est-à-dire des invariances) qui, elles, ne concernent plus l'espace-temps et sont dites internes. Prenons un exemple. Les noyaux atomiques sont constitués de protons et de neutrons, maintenus ensemble par la force nucléaire. Ces protons ont une charge électrique positive, les neutrons sont neutres, et ils diffèrent très légèrement par leur masse. Si l'on pouvait "éteindre" la force électromagnétique, la force nucléaire ne verrait plus aucune différence entre eux : un proton et un neutron seraient "bonnet blanc et blanc bonnet" et pourraient être échangés sans que la force nucléaire ne s'en aperçoive. Ceci est une symétrie simple (connue sous le nom de "symétrie de spin isospin"), mais aux conséquences très profondes. On peut considérer qu'elle est un reflet de la symétrie entre les deux quarks "ordinaires" (u et d) qui entrent dans la constitution du proton et du neutron.

Souvent, une symétrie n'est qu'apparente : on dit qu'elle est brisée. C'est ainsi que la force électromagnétique, dans les noyaux atomiques, brise la symétrie sous-jacente de la force nucléaire : proton et neutron possèdent alors des propriétés différentes.

Dans cet exemple très particulier, la

symétrie est brisée par une cause extérieure. Mais elle peut aussi se briser spontanément : la loi (les équations) est symétrique, mais l'état fondamental, c'est-à-dire la solution d'énergie minimum, ne l'est plus. Des exemples de symétries spontanément brisées se rencontrent dans de nombreux domaines de la physique. C'est le cas du phénomène d'aimantation spontanée d'un corps ferromagnétique. En l'absence d'un champ magnétique extérieur, il n'y a pas de direction privilégiée dans l'espace. Cependant, si la température est inférieure à une température critique, il apparaît une aimantation spontanée, qui brise la symétrie de rotation dans l'espace à trois dimensions en introduisant une direction privilégiée, celle de l'aimantation.

Puis les physiciens ont distingué soigneusement symétries globales et symétries locales. Par exemple, une symétrie locale de rotation signifierait une invariance dans une rotation dont l'angle pourrait être différent en chaque point de l'espace (et à chaque instant). Il est évident qu'un corps solide apprécierait peu un tel traitement et que des tensions internes s'y manifesteraient. Ceci n'est, bien sûr, qu'une analogie à ne pas prendre au pied de la lettre, mais c'est un effet de ce genre que recherchent les physiciens : lier les forces, et donc les quanta qui les portent, à des symétries locales. Le concept de symétrie locale est apparu d'abord dans la théorie de la force électromagnétique et a reçu le nom de "symétrie de jauge". Les théories de ce type sont pour ce qu'on appelle théories de jauge. Mais quel est donc leur intérêt ?

Le problème des infinis

Quand les théoriciens, dans les années 40, cherchèrent à construire une théorie quantique du champ électromagnétique pour décrire les interactions des photons avec les particules chargées, ils se heurtèrent à un terrible problème : les calculs conduisaient le plus souvent à des résultats infinis !

Il apparut finalement possible de résorber, de masquer en quelque sorte, ces infinis à condition de renoncer (au moins provisoirement) à prédire par la théorie certaines quantités (par exemple la charge et la masse de l'électron). Des théories dans lesquelles un tel traitement des infinis est possible sont dites renormalisables. C'est le cas de l'électrodynamique quantique qui, soumise à des tests

de plus en plus poussés, n'a jamais démenti son accord avec l'expérience. Le succès de l'électrodynamique quantique est relié au fait qu'elle est une théorie de jauge. L'idée s'imposa donc peu à peu que les théories de jauge étaient le moule dans lequel devaient se couler les théories des autres forces.

La première à subir ce traitement fut la théorie de la force faible. Cette théorie (construite par Fermi en 1933, perfectionnée par Feynman et Gell-Mann en 1957) donnait de bons résultats à condition qu'on ne lui en demande pas trop (elle n'était pas renormalisable). La force faible pouvait être transportée par des quanta (les bosons W) qui, d'après l'expérience, devaient avoir une grande masse. Or, dans une bonne théorie de jauge, renormalisable, les quanta étaient dépourvus de masse (cas des photons).

La solution fut trouvée ultérieurement, en faisant appel à un mécanisme, proposé par Englert, Brout et Higgs, qui permet d'avoir une théorie renormalisable même si les quanta n'ont pas une masse nulle : elle s'appelle symétrie de jauge spontanément brisée. Les équations de base restent irréprochablement symétriques et la masse des quanta n'y apparaît pas, mais la solution perd "spontanément" cette symétrie et les quanta y deviennent massifs.

Comment ce quasi miracle s'accomplit-il ? Il faut tout de même y mettre le prix en introduisant dans la théorie un nouveau champ appelé, du nom de son inventeur, "champ de Higgs". Cet ingrédient est indispensable pour donner une masse aux quanta faibles. Mais, en théorie quantique, champ veut dire particule. Et du champ, ou plutôt des champs de Higgs, il reste quelque chose qui correspond à une ou plusieurs particules.

La théorie la plus simple laisse un seul boson de Higgs, qui est neutre. Dans des théories plus compliquées, il y a presque toujours plusieurs bosons de Higgs. Malheureusement, la théorie nous fournit très peu de renseignements sur leurs masses et la manière dont ils interagissent, et ils soulèvent divers problèmes. La recherche du ou des bosons de Higgs est un objectif majeur des programmes expérimentaux actuels.

La formalisme des théories de jauge fut ensuite appliqué à l'interaction forte entre quarks et gluons (ici, les gluons n'ont pas de masse), puis aux diverses tentatives de grande unification.

Le modèle standard des particules élémentaires, ses succès et ses lacunes

Le modèle standard de la physique des particules est-il le "Sésame, ouvre-toi" des portes de l'Univers ?

Pierre DARRIULAT

Le modèle standard des particules élémentaires est la première ébauche sérieuse d'une description unifiée des lois de la nature depuis les grandes découvertes du début du siècle (radioactivité, forces intranucléaires, mécanique quantique, relativité).

Notre connaissance des phénomènes naturels, que la physique s'emploie à parfaire, progresse par étapes. Chaque étape débute par la découverte de phénomènes nouveaux, jusqu'alors insoupçonnés, qui défient les lois connues de la nature. Puis, au gré des progrès techniques, ces phénomènes sont étudiés, classifiés, catalogués, enfermés dans des descriptions de plus en plus quantitatives, détaillées et précises. Enfin surgit une théorie qui donne de ces phénomènes apparemment disparates une image à la fois simple, unique et exacte. Le progrès est d'autant plus grand que les concepts fondamentaux, inhérents à la théorie nouvelle, sont moins nombreux, que son expression mathématique est plus simple, et que le spectre des phénomènes expliqués est plus complet.

C'est ainsi qu'à la fin du XVII^e siècle, Newton, énonçant les lois de l'attraction universelle, donnait une description unifiée du mouvement des planètes et des phénomènes liés à la gravitation terrestre. Plus proche de nous, Maxwell, en 1864, publiait sa théorie dynamique du champ électromagnétique qui semblait expliquer, ou être capable d'expliquer, la totalité des phénomènes optiques, électrostatiques, électrochimiques, électromagnétiques et magnétiques connus à cette époque. À peine ce succès était-il acquis que le XX^e siècle s'ouvrait sur la découverte de nouveaux phénomènes entièrement étrangers à l'électromagnétisme, manifestations de deux nouvelles interactions, l'interaction forte et l'interaction faible. En même temps, les bases de la mécanique newtonienne s'effondraient devant l'avènement des mécaniques relativiste et quantique. Pendant plus d'un demi-siècle une activité expérimentale sans précédent permettait de sonder la matière de plus en plus profondément et d'en mettre en évidence les constituants élémentaires. Ce n'est qu'au cours des vingt dernières années qu'il a pu s'ébaucher, dans le cadre des théories dites de jauge, une description unifiée de l'ensemble des nouveaux phénomènes. Le modèle standard des particules

élémentaires réalise cette unification formelle. Mais alors que l'interaction faible et l'interaction électromagnétique apparaissent aujourd'hui comme deux manifestations d'une même force, leur unification explicite avec l'interaction forte et la gravitation reste à faire. Je m'efforcerai donc dans ce qui suit, tout en donnant une description très simplifiée du modèle standard et de ses succès, d'en faire remarquer les insuffisances. C'est à les réduire qu'est actuellement consacré l'effort des physiciens, expérimentateurs et théoriciens.

Particules et interactions, l'interaction électromagnétique

La formulation des équations de Maxwell dans le langage de la relativité et de la mécanique quantique (R.P. Feynman, 1949) a servi de modèle à l'effort ultérieur d'édification de théories nouvelles. Les images qu'elle implique des notions de particule et d'interaction méritent donc quelque attention.

Les particules élémentaires, par définition dénuées de structure interne, sont des objets ponctuels. Ceci ne les empêche pas, contrairement à ce que voudrait notre intuition, de transporter avec elles un certain nombre d'étiquettes qui les caractérisent, telles que leur masse, leur spin et leur charge électrique. En fait, c'est l'étude des interactions entre particules et des règles auxquelles elles obéissent qui permet d'associer à chaque particule l'étiquette qui caractérise son comportement. Ces étiquettes, que les particules peuvent en quelque sorte échanger lors de leurs interactions, sont associées à des quantités invariantes par rapport à certaines transformations. C'est ainsi que la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement est associée à l'invariance par rapport aux translations de l'espace-temps, et celle du moment cinétique à l'invariance par rapport aux rotations.

L'interaction entre deux particules élémentaires résulte de l'échange d'une troisième particule, caractéristique de cette interaction. Dans le cas de l'électromagnétisme, la particule échangée est le photon, (diagramme 1a), le quantum associé à l'onde électromagnétique, doué d'une masse nulle et d'une charge électrique nulle et d'un spin

■ Pierre Darriulat, physicien au Centre européen de recherches nucléaires (CERN), Division EP, CH - 1211, Genève 23, Suisse. Il est le porte-parole de l'expérience UA2.

Le cadre permettant l'unification des lois de la nature est celui de théories voisines de l'électromagnétisme mais plus générales, les théories de jauge. Les interactions entre particules ponctuelles y sont décrites par l'échange d'autres particules. Les invariances et symétries dont jouissent ces échanges sont essentielles pour assurer la viabilité de la théorie.

unité. Cette notion d'échange entre particules ponctuelles est tout à fait contraire à notre intuition (voir encadré 1).

Les forces : des échanges de particules

L'échange d'un photon entre un électron et un positron implique pour chacun d'eux la faculté d'émettre ou d'absorber un photon.

Mais l'émission d'un photon par un électron augmente l'énergie de ce dernier d'une certaine quantité ΔE et viole donc la loi de conservation de l'énergie (il suffit pour s'en convaincre, de se placer dans le système de référence où l'électron est au repos).

Cependant, la mécanique quantique permet une telle violation pourvu qu'elle soit suffisamment éphémère pour insérer qu'on puisse l'observer. C'est le cas si le photon est presque immédiatement réabsorbé, son escapade ne durant pas plus que le temps Δt relié à ΔE par la relation d'incertitude $\Delta t \Delta E = h$ la constante de Planck, divisée par 2π . Plus la particule échangée est massive, plus ΔE est grand, donc plus Δt et par conséquent la portée de la force sont petits.

En effet $\Delta E \gg Mc^2$ entraîne $\Delta t \ll h/Mc^2$, ce qui conduit à une portée de l'ordre de h/Mc .

L'interaction élémentaire est définie par le diagramme 1b et son intensité est spécifiée par une constante appelée constante de couplage, qui est reliée à la probabilité d'émission ou d'absorption de la particule échangée. Dans le cas de l'électromagnétisme, cette constante n'est autre que la charge électrique de la particule qui émet ou absorbe un photon.

La connaissance de l'interaction élémentaire permet en principe de calculer toutes les grandeurs physiques attachées à un processus donné.

L'interaction élémentaire peut intervenir plusieurs fois dans ce processus. Par exemple, la diffusion e^+e^- peut être décrite par la, mais aussi par des diagrammes tels que 1c et 1d.

Pour que la théorie soit viable (on dit renormalisable), il faut que le résultat du calcul soit un nombre fini. Ce n'est en général pas le cas. Le fait que la théorie de l'interaction électromagnétique soit renormalisable est lié à son invariance par rapport à une certaine transformation dite transformation de jauge (dans le cas de l'électrostatique, cette invariance correspond tout simplement à l'arbitraire de la définition du zéro du potentiel).

Les expériences de diffusion d'électrons par les noyaux d'atomes et d'annihilation de paires e^+e^- en paires quark-antiquark ont montré que les quarks obéissent aux lois de l'électromagnétisme telles qu'elles sont exprimées par le diagramme 1b, et que leurs charges électriques sont respectivement $+2/3$ et $-1/3$ fois celle du proton.

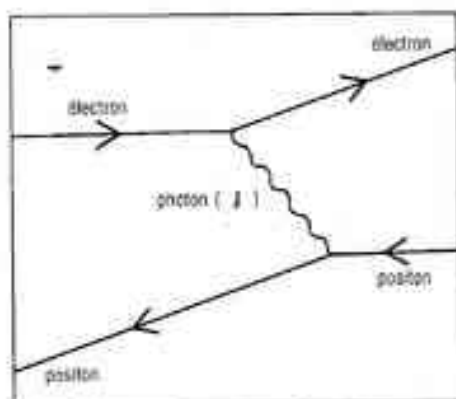


FIG. 1a. Interaction d'un électron et d'un positron par échange d'un photon.

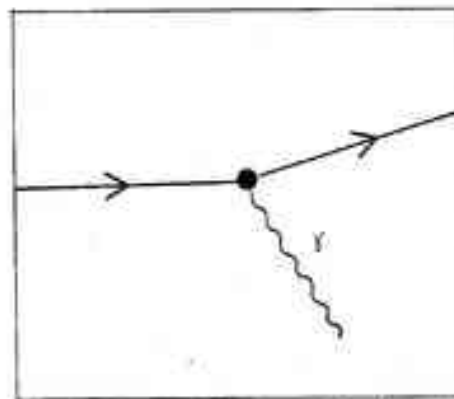


FIG. 1b. Diagramme de base à partir duquel tous les autres sont construits.

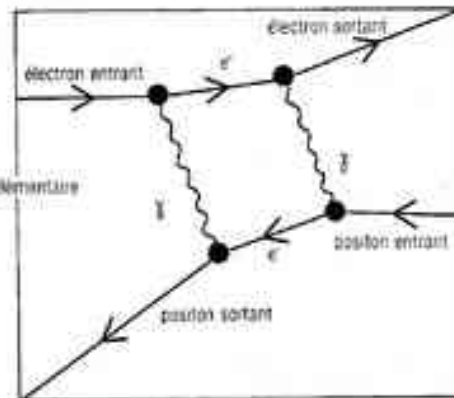
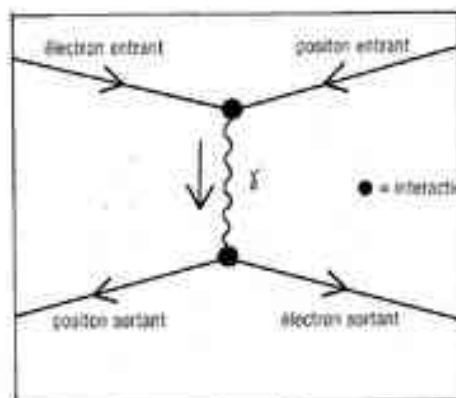


FIG. 1c. et 1d. Exemples de diagrammes contribuant à l'interaction d'un électron et d'un positron.

L'interaction faible et son unification à l'électromagnétisme

La radioactivité β , née avec le siècle (Becquerel 1896, Rutherford 1902), est un phénomène dont l'image simple de l'atome ne sait rendre compte. Elle consiste en la transmutation en proton d'un neutron du noyau et en l'émission simultanée d'un électron. Une partie du mystère attaché à ce nouveau phénomène fut levée dans les années 30 lorsque Pauli et Fermi comprirent qu'il s'accompagnait de l'émission d'une nouvelle particule, dont l'interaction avec la matière était trop faible pour qu'on puisse l'observer, le neutrino (ν). Comme l'électron et les quarks, le neutrino a un spin $1/2$, mais, comme le photon, il a une charge électrique nulle ; sa masse est nulle ou très faible.

L'interaction électromagnétique et l'interaction faible ont des propriétés physiques bien différentes. La portée de la première est théoriquement infinie, tandis que l'interaction faible a une portée très courte et une intensité beaucoup plus petite. D'autre part, une propriété de symétrie, appelée symétrie-miroir ou parité, est violée par l'interaction faible, et conservée par l'interaction électromagnétique (voir encadré 2).

De la même façon que l'interaction électromagnétique entre particules chargées implique l'échange d'un photon (la particule de lumière), l'interaction faible, responsable de la radioactivité β , implique l'échange de particules nouvelles, W^+ et W^- . Leur découverte récente est un succès éclatant de la théorie électrofaible qui unifie les deux interactions.

2 La violation de la parité par l'interaction faible

Un système possède la symétrie-miroir, ou symétrie droite-gauche, si son image dans un miroir lui est identique. Ceci n'est pas toujours le cas dans la nature : par exemple, certaines molécules sont asymétriques et existent sous deux formes. Au début des années 50, on pensait que toutes les interactions des particules possédaient cette symétrie-miroir, c'est-à-dire qu'il était impossible de distinguer la gauche de la droite, ou une particule de son image dans un miroir, par une expérience de physique des particules. En 1956, analysant des résultats mal compris, Lee et Yang suggérèrent que l'interaction faible "violait la parité". Ceci fut confirmé la même année par l'expérience de Wu et al. Cette expérience montra une asymétrie de l'émission de l'électron par des noyaux de cobalt ^{60}Co radioactifs β dont les spins nucléaires étaient "guidés" à très basse température et orientés par un champ magnétique.

Cependant, les deux interactions exhibaient des similitudes mathématiques déjà remarquées par Fermi en 1933. D'autre part, on ne possédait pas de théorie satisfaisante de l'interaction faible (la théorie de Fermi n'était pas renormalisable) alors que la théorie électromagnétique avait un pouvoir prédictif remarquable. Il semblait donc important de tenter de donner de l'interaction faible une image calquée sur l'interaction électromagnétique en invoquant l'échange d'un nouveau "photon" W (pour weak, faible). La distribution angulaire observée de l'électron de l'émission β demande que W ait un spin unité, comme le photon. Le diagramme 2a

décrivant la désintégration β d'un quark d en un quark u , un électron et un (anti)neutrino montre que W doit transporter ± 1 unité de charge électrique. Quant à la faiblesse de l'interaction (la rareté des désintégrations), elle implique, ou bien que la masse du W soit très élevée, ou que la constante de couplage soit très faible. La validité de cette image fut par la suite confirmée par l'observation et l'étude du processus inverse : l'interaction de neutrinos avec les électrons et les quarks contenus dans les atomes (diagramme 2b).

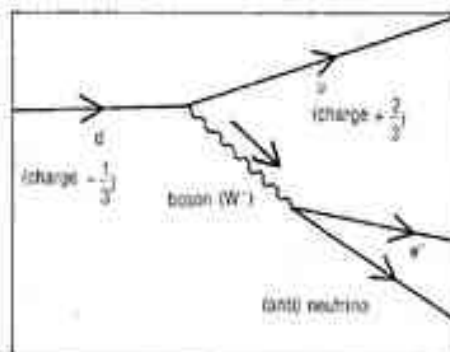


FIG. 2a. Désintégration β d'un quark d en un quark u , un électron et un anti-neutrino.

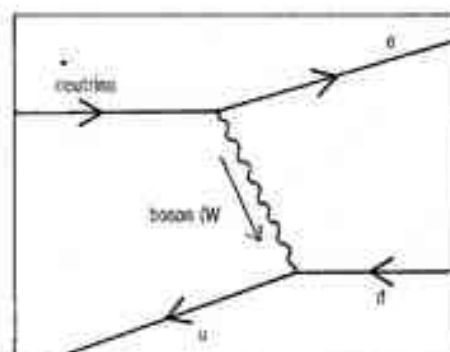


FIG. 2b. Interaction d'un neutrino avec un quark d , produisant un électron et un quark u .

Pour que la nouvelle théorie ait une chance d'être renormalisable, il fallait qu'elle possède une symétrie de jauge, analogue à celle de la théorie électromagnétique. Mais, alors qu'il existe un seul photon, neutre et sans masse, il devait y avoir au moins deux nouveaux "photons" W^+ et W^- (appelés bosons faibles). Au début des années 70, plusieurs théories furent proposées, aux implications expérimentales différentes. L'une d'elles, parmi les plus simples, prévoyait l'existence d'un boson intermédiaire neutre, appelé Z^0 .

En 1973, des expériences, réalisées dans la chambre à bulles Gargamelle sur le faisceau de neutrinos du CERN, montrèrent la présence de diffusions de neutrinos sur des électrons et des noyaux dans lesquelles le neutrino gardait son individualité (interaction dite à courants faibles neutres). De telles diffusions devaient être dues à l'échange d'un boson intermédiaire neutre. Jusqu'alors, on pensait que, dans la diffusion, le neutrino se changeait toujours en lepton chargé, par exemple ν_e en e^- , ce qui correspondait à l'échange d'un boson chargé.

La théorie électrofaible englobe l'interaction électromagnétique, réalisant l'unifica-



Fig. 3 : Photographie d'une collision proton-antiproton (expérience UA5). Une collision par dizaines de millions produit un W ou un Z dont les produits de désintégration doivent être identifiés parmi toutes les particules produites. © CERN.

tion de celle-ci avec l'interaction faible. La symétrie en jeu est celle qui relie l'électron et son neutrino, ainsi que les quarks u et d impliqués dans l'interaction faible, mais sous la forme d'une symétrie locale, c'est-à-dire de jauge (ce qui ne peut se concevoir que dans le formalisme de la mécanique quantique). D'autres tests importants de la théorie électrofaible de Glashow, Weinberg et Salam consistent en la mise en évidence, par l'observation d'une petite "violation de la parité", de certains processus physiques faisant intervenir simultanément l'interaction faible et l'interaction électromagnétique.

Il restait alors à vérifier la prédiction la plus spectaculaire de la théorie : l'existence des bosons intermédiaires W^+ , W^- et Z^0 . L'analyse des expériences de diffusion de neutrinos indiquait que leurs masses devaient être près de cent fois supérieures à celle du proton et, vers la fin des années 70, aucun accélérateur au monde ne permettait de produire des particules aussi massives.

C'est dans ce contexte que C. Rubbia proposa de transformer l'accélérateur de protons du CERN (le SPS) en un collisionneur permettant d'y faire tourner en sens inverse des protons et des antiprotons qui, entrant en collision frontale, dégageraient l'énergie nécessaire à la production de W^+ et Z^0 . La difficulté consistait à accumuler un faisceau suffisamment dense d'antiprotons qui, n'existant pas à l'état naturel, doivent être préalablement produits. En effet les collisions proton-antiproton susceptibles de produire un W^+ ou un Z^0 (par fusion d'un quark du proton avec un antiquark de l'antiproton) sont extrêmement rares, de l'ordre d'une par dizaines de millions (voir figure 3). Cette difficulté fut surmontée grâce aux travaux de S. Van der Meer et, très rapidement, deux équipes, UA1 et UA2, chacune dotée d'un fort contingent de chercheurs du CNRS* mettaient en évidence l'existence du W^+ par sa désintégration en $e^+ \nu_e$ et du Z^0 par sa désintégration en $e^+ e^-$ (voir figure 4). Aujourd'hui près de 350 W^+ et 40 Z^0 ont été détectés et nombre de leurs propriétés ont été étudiées. En particulier les masses du W^+ et du Z^0 ont été mesurées et leurs valeurs sont en parfait accord avec les prédictions de la théorie. Les mesures ont confirmé le spin unité du W^+ et, d'une manière générale, aucune prédiction de la théorie électrofaible n'a pu encore être mise en défaut.

L'interaction forte

La force qui tient ensemble les quarks dans les noyaux d'atomes, appelée l'interaction forte, a des propriétés très particulières qui ont longtemps semblé impliquer une structure profondément différente de celle de l'électromagnétisme. On sait pourtant aujourd'hui en donner une description pratiquement identique, où le rôle du photon est joué par un ensemble de huit particules qui, comme lui, ont un spin unité et une masse et une charge électrique nulles. On les appelle les gluons. Les quarks u et d sont également affectés par l'interaction forte mais les autres particules élémentaires (e , ν , γ , W^+ , Z^0) l'ignorent.

Les forces intranucléaires entre quarks, les constituants élémentaires des noyaux d'atomes, impliquent elles aussi l'échange de particules nouvelles : les gluons. La symétrie ternaire de la charge associée à cette interaction explique les propriétés très surprenantes dont elle jouit.

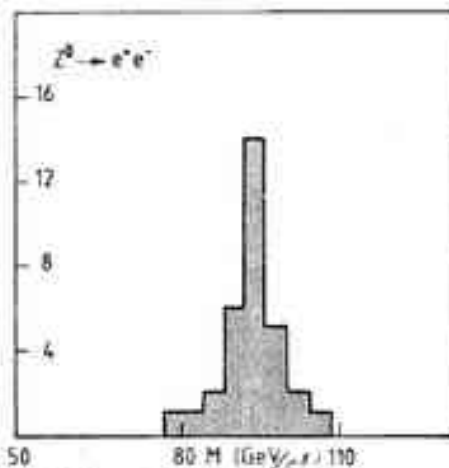


Fig. 4 : Démonstration de l'existence du Z^0 . La distribution observée de la masse M des paires $e^+ e^-$ produites dans les collisions proton-antiproton présente une accumulation autour de la masse du Z^0 .

Pour expliquer les phénomènes observés, on a été amené à faire l'hypothèse que chaque quark (u, d...) peut exister dans trois états différents. Pour distinguer ces états, on donne à chacun d'eux le nom d'une couleur, par exemple bleu, jaune et rouge (c'est, pour l'interaction forte, l'équivalent de la charge électrique). L'émission (ou l'absorption) d'un gluon induit des transitions d'un état dans un autre : par exemple, un quark "bleu" peut devenir un quark "rouge" en émettant un gluon "bleu-antirouge". On suppose de plus que l'interaction forte est invariante par rapport aux changements de couleur (symétrie de couleur). Les hadrons (c'est-à-dire les particules composées de quarks) observés sont "blancs" : ceci impose qu'ils soient ou des triplets de quarks (protons, neutrons...) ou des états quark-antiquark (mésons).

Pour que la théorie soit renormalisable, il est nécessaire qu'elle soit une théorie de jauge, c'est-à-dire que la symétrie de couleur soit une symétrie locale.

L'interaction forte entre quarks et l'interaction électromagnétique présentent, cependant, des aspects différents. Il est apparemment impossible d'observer un quark ou un gluon à l'état libre ; quand on cherche à extraire un quark d'un noyau, par collision très violente avec une autre particule, on ne parvient à en sortir qu'un jet très serré de particules, mais jamais un quark isolé. On pense que cette impossibilité d'extraire une particule dont la couleur n'est pas neutralisée, telle un quark ou un gluon, découle de l'hypothèse de l'invariance par rapport à la couleur. On interprète ceci en imaginant qu'un quark qui cherche à s'échapper est soumis à une force de rappel (confinement). Par contre, on démontre que si des quarks se rapprochent l'un de l'autre, la force qui s'exerce entre eux tend à diminuer et ils se comportent alors

* Voir l'article du *Croniqueur du CNRS* n° 45, mai 1982 : "Les collisions proton-antiproton" de Bernard Aubert et l'article du *Croniqueur du CNRS* n° 49, janvier 1983 : "Les premiers conflits bosons intermédiaires".

** Laboratoire de physique corpusculaire du Collège de France, et Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules pour UA1. Laboratoire de l'accélérateur linéaire d'Orsay pour UA2. Des équipes du Département de physique des particules élémentaires (DPhPE) de Sorbus participent également à ces deux expériences.

Les lacunes du modèle standard sont nombreuses, l'effort des physiciens est consacré à les réduire.

comme s'ils étaient libres (ceci est vérifié par l'expérience). Il en résulte que, dans le domaine des grandes énergies de collisions, il est possible de faire des calculs en "chromodynamique quantique" (QCD) comme en électrodynamique quantique, mais ceux-ci sont beaucoup plus difficiles (les gluons ont une "charge de couleur" et interagissent entre eux, alors que le photon n'a pas de charge électrique).

C'est à travers l'étude des jets, menée à la fois dans le cadre de collisions $e^+ + e^- \rightarrow$ quark + antiquark, $e^+ +$ quark \rightarrow quark + neutrino, quark + quark \rightarrow quark + quark (un quark ou un antiquark produit apparaissant comme un jet de particules), qu'on a pu vérifier la validité de la théorie que je viens d'ébaucher.

Les lacunes et les objectifs poursuivis

Malheureusement les choses ne sont pas tout à fait aussi simples que j'ai bien voulu le laisser croire. Tout d'abord, ce ne sont pas quatre particules de spin 1/2 dont nous con-

naissions l'existence, mais douze : il existe en effet deux autres familles tout à fait semblables à celle qui rassemble les leptons e, μ, τ et les quarks u et d . Sans doute existe-t-il une raison à ce bégaiement apparent de la nature, mais elle nous échappe complètement. Par ailleurs, pour obtenir des bosons W et Z massifs, alors que le photon est de masse nulle, tout en préservant le caractère renormalisable de la théorie, il a fallu invoquer l'existence d'une nouvelle particule neutre, massive, de spin nul, douée d'interactions très particulières. Cette nouvelle particule, le boson de Higgs, n'a pas encore été observée, et il reste beaucoup d'incertitudes sur ses propriétés. On ignore sa masse. D'autre part, il peut exister (suivant les théories) plusieurs bosons de Higgs, même si la théorie "minimale" (le modèle standard) en prévoit un seul.

Enfin, si nous avons toutes raisons d'espérer que le cadre des théories de jauge permettra un jour l'unification des quatre interactions connues, nous ne savons actuellement la réaliser que dans le secteur électrofaible. Le modèle standard n'est pas encore une théorie unifiée. La "grande unification" avec l'interaction forte semble en bonne voie. Par contre, l'unification complète avec l'interaction gravitationnelle pose un problème d'une toute autre ampleur.

Pour avancer, nous devons, d'une part, tenter de déceler, grâce à des mesures de haute précision, d'éventuelles déviations par rapport au modèle standard, révélatrices de phénomènes nouveaux. Les accélérateurs LEP et SLC, actuellement en construction, seront des outils particulièrement bien adaptés à cette tâche. D'autre part, tant en Europe qu'aux États-Unis, la réalisation d'accélérateurs permettant d'explorer de nouveaux domaines d'énergie, où les signes d'une unification plus large devraient se manifester, est déjà à l'étude.

Le détecteur CELLO.

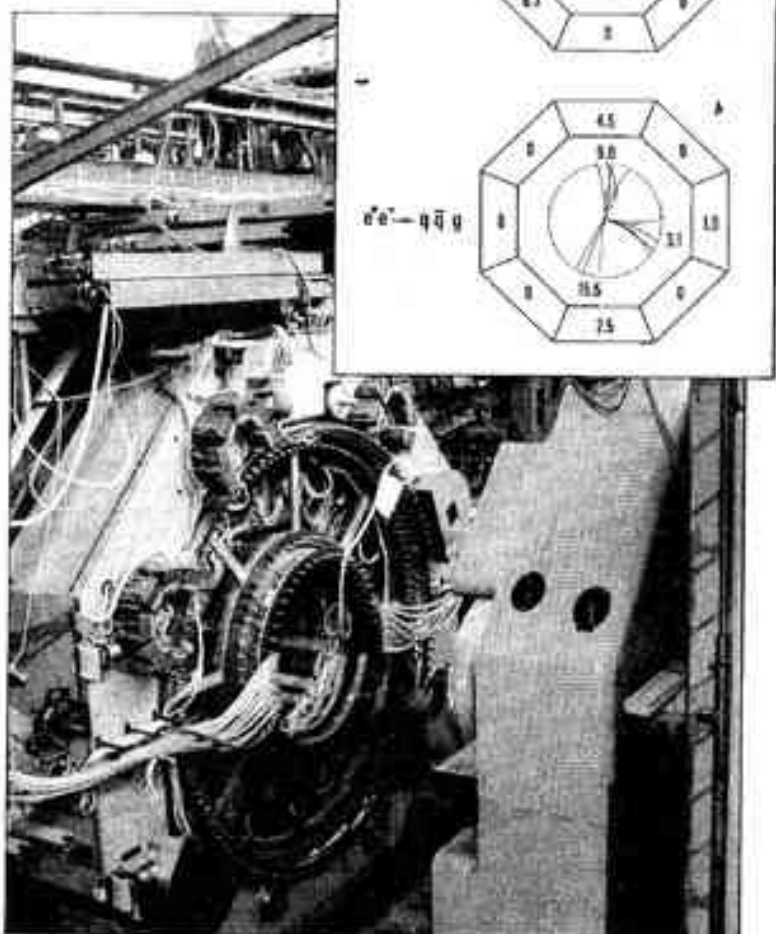
Ce détecteur est installé sur l'anneau de collisions électron-positon PETRA à Hambourg. La photographie le montre ouvert pour des opérations de montage. Les faisceaux d'électrons et de positons circulent selon son axe. Un champ magnétique (1,3 teslas) est créé par une bobine supraconductrice. Le retour du flux magnétique se fait dans le fer des pièces octogonales. La partie centrale est un détecteur de traces. La couronne circulaire ouverte contient les calorimètres (plaques de plomb baignant dans l'argon liquide) utilisés pour la détection des photons. Le poids total de l'appareil est de 100 tonnes. (Cliché DESY).

Quarks et gluons dans les annihilations $e^+ e^-$.

L'annihilation $e^+ e^-$ produit des hadrons groupés ici en 2 ou 3 jets. Les événements enregistrés dans le détecteur franco-allemand CELLO (anneau de collision PETRA à Hambourg) sont présentés en projection sur un plan perpendiculaire à la ligne des faisceaux incidents d'électrons et de positons. Un détecteur central (zone du cercle pointillé) permet de reconstruire les traces, courbées par un champ magnétique parallèle à la ligne des faisceaux. L'énergie (en GeV) de chaque jet est indiquée à l'extérieur du pointillé. Huit détecteurs, à la périphérie, déterminent l'énergie emportée par les photons produits en même temps que les particules chargées. Cette énergie est indiquée dans chaque secteur. On peut voir que la flux d'énergie totale (particules chargées + photons) se concentre dans les directions des jets.

L'événement a, comportant 2 jets opposés, est interprété comme dû au processus $e^+ e^- \rightarrow$ quark + antiquark. Le quark et l'antiquark ne peuvent s'arracher l'un à l'autre (confinement) et se transforment chacun en un jet de particules.

Dans l'événement b, deux des jets proviennent comme précédemment d'un quark et d'un antiquark, le troisième (on ne peut dire lequel) est attribué à un gluon rayonné par le quark ou l'antiquark. Ce sont des événements de ce type qui ont apporté la première démonstration de l'existence des gluons.



Le bouillonnement des idées théoriques : vers une unification de toutes les interactions

Quand l'espace acquiert de nouvelles dimensions...

Pierre FAYET



Gâce au travail effectué par les physiciens depuis de nombreuses années, notre connaissance de la structure de la matière a fait des progrès tout à fait considérables. Nous avons appris que les atomes étaient constitués d'électrons tournant autour d'un noyau formé de protons et de neutrons. Puis protons et neutrons nous sont apparus comme formés de constituants élémentaires appelés quarks. Enfin, grâce à la mise en service de nouveaux accélérateurs, toujours plus puissants, nous avons découvert l'existence d'un certain nombre de nouvelles particules élémentaires, les dernières étant les bosons W^+ , W^- et Z observés il y a deux ans (voir l'article précédent de P. Darriulat). Tout ceci risque d'apparaître au non-spécialiste comme une prolifération de nouvelles particules sans grand intérêt. Aussi est-il légitime de s'interroger sur la signification de ces découvertes, vis-à-vis des lois fondamentales qui gouvernent la matière. Au-delà de cette question, nous allons essayer de décrire les idées développées par les physiciens théoriciens, lorsqu'ils tentent d'imaginer, dans un cadre plus vaste que ceux de la mécanique quantique et de la relativité générale, ce que peuvent être ces lois fondamentales. Nous parlerons ainsi successivement de la grande unification, de la supersymétrie et de la supergravité, et des théories où l'espace a plus de trois dimensions, pour finir par celles où les particules élémentaires apparaissent comme des cordes plutôt que des points – toutes ces idées étant non pas contradictoi-

res, mais complémentaires les unes des autres.

S'il y a eu croissance du nombre des particules élémentaires, il y a eu fort heureusement, et de façon simultanée, organisation de celles-ci en familles, et compréhension du mécanisme des forces.

Les constituants de la matière, au sens large, sont ainsi organisés en trois familles de deux quarks et de deux leptons (parmi ces derniers se trouvent l'électron et son neutrino). De plus, la découverte des bosons intermédiaires W^+ , W^- et Z , et des gluons, constitue la mise en évidence des agents responsables des interactions faibles et fortes, de la même manière que le photon (γ) est responsable des interactions électromagnétiques.

Les interactions faibles, électromagnétiques et fortes et leurs symétries

L'unification de la description des interactions faibles et électromagnétiques s'est fondée sur la reconnaissance de certaines simili-

■ Pierre Fayet, maître de recherche CNRS et maître de conférences à l'Ecole polytechnique, travaille au Laboratoire de physique théorique de l'Ecole normale supérieure, 24, rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05. Il étudie les théories de grande unification supersymétriques, formulées dans un espace-temps à plus de quatre dimensions.

■ Dessins de Jean-Pierre Petit.

Les agents responsables des interactions faibles, électromagnétiques et fortes ont été identifiés. La théorie de l'unification électrofaible est confirmée dans ses lignes essentielles.

tudes entre les deux types d'interactions. Ceci a conduit à formuler l'hypothèse de l'existence de nouvelles particules, les bosons intermédiaires chargés W^+ et W^- , responsables des interactions faibles (comme, par exemple, la radioactivité du neutron), au même titre que le photon γ est responsable des interactions électromagnétiques. Puis on a cherché une symétrie, appelée *symétrie électrofaible*, reliant le photon aux bosons W^+ . Cette symétrie a été construite au cours des années 1960, et implique l'existence d'un autre boson intermédiaire, sans charge électrique, le Z . Celui-ci doit être responsable d'un type particulier d'interactions faibles dites "par courants neutres", observées au CERN à Genève, en 1973. Enfin, le W^+ et le W^- , qui sont des particules très lourdes - près de cent fois la masse d'un proton - ont été produits directement par annihilations entre protons et antiprotons, au CERN, en 1983.

Par ailleurs, les interactions fortes (responsables de la cohésion des noyaux) sont aussi interprétées comme dues à l'échange d'autres bosons intermédiaires, que l'on appelle les *gluons*. Ces gluons, au nombre de huit, sont continuellement échangés entre les quarks, qui sont les constituants élémentaires des protons et des neutrons. Les huit gluons jouent pratiquement le même rôle. Là aussi intervient une symétrie - celle de la théorie des interactions fortes - qui a reçu le nom de *symétrie de couleur* (rien à voir, bien sûr, avec la couleur des objets).

On peut alors tenter d'élargir le champ d'application des symétries précédentes : symétrie électrofaible d'une part, symétrie de couleur d'autre part, en en recherchant une nouvelle, incluant et reliant les précédentes. C'est la recherche d'une telle synthèse, c'est-à-dire d'une symétrie commune aux trois interactions, faibles, électromagnétiques et fortes, que l'on appelle la *grande unification*. Ces trois interactions apparaîtraient alors comme trois aspects différents d'un phénomène unique.

Malgré leurs similitudes, toutes ces interactions sont fort différentes dans leurs manifestations physiques. Aussi ne peuvent-elles être reliées par une symétrie que si celle-ci est *brisée*, de manière à prendre en compte ces différences. (Ce n'est qu'à des énergies tout à fait considérables que ces différences entre interactions s'estompent pour finalement disparaître). Avant d'aborder dans la partie suivante la grande unification, nous allons dire quelques mots sur ce qui distingue ces interactions.

Alors que le photon est de masse nulle, les bosons intermédiaires W^+ et Z ont de grandes masses (voisines de 80 ou 90 GeV/c², soit près de cent fois la masse d'un proton). Ceci est à la base de la différence entre interactions électromagnétiques - dues à des échanges de photons - et interactions faibles - dues à des échanges de W^+ et Z (voir figure 1). Les grandes masses de ces derniers sont responsables de leur difficulté à apparaître comme médiateurs au cours d'interactions entre particules. Les probabilités d'interactions par échanges de bosons intermédiaires W^+ ou Z sont donc extrêmement petites. C'est ce qui justifie la dénomination d'"interactions faibles" par opposition aux interactions électromagnétiques et fortes. Ces dernières sont dues à des échanges de photons ou de gluons de masse nulle, qui apparaissent beaucoup plus facilement.

Toutes ces interactions sont décrites dans le cadre des théories à *symétrie de jauge brisée spontanément*. Ce n'est que dans le cadre de ces théories (qui sont dites "renormalisables") que les difficultés liées à l'apparition de quantités infinies dans les calculs de probabilités d'interactions entre particules ont pu recevoir une solution satisfaisante :

- la *symétrie* est celle qui existe entre les diverses interactions, donc aussi entre les agents vecteurs (W^+ , Z , photon et gluons) qui en sont responsables ; ou encore entre les particules (quarks, électrons et neutrinos,...) sujettes à ces interactions ;

- le terme de *symétrie de jauge* implique la possibilité d'une *transmutation* entre deux particules reliées par la symétrie ; ainsi un électron peut-il se transformer en neutrino par émission ou absorption d'un W^- , etc ; ces processus élémentaires sont responsables de l'existence des diverses interactions (voir figure 1) ;

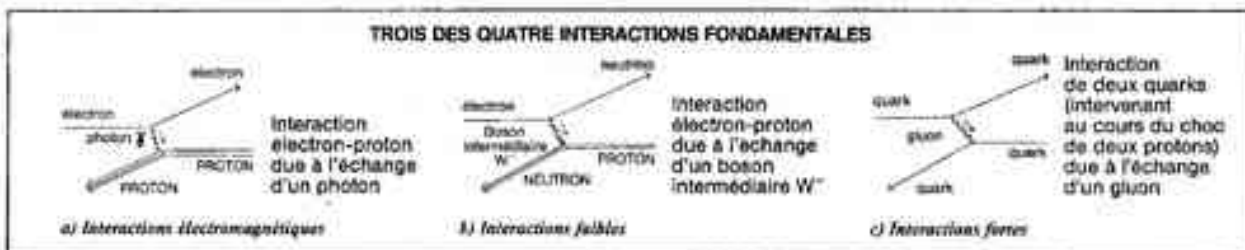
- enfin la symétrie, tout en demeurant parfaite au niveau des équations fondamentales, n'apparaît plus de manière évidente dans les manifestations physiques observées. Ce phénomène de *symétrie cachée*, ou encore *brisée spontanément*, est assez général en physique. Il permet à des particules reliées par une symétrie, comme par exemple le photon et le W^+ , d'acquiescer des masses différentes.

FIG. 1. Exemples d'interactions électromagnétiques, faibles et fortes (choisis de manière à en illustrer les ressemblances).

Un électron et un proton peuvent interagir par échange d'un photon (interactions électromagnétiques, fig. 1a), ou d'un boson intermédiaire W^- (interactions faibles, fig. 1b). A cause de la grande masse du W^- , ces derniers événements, où le proton se transforme en un neutron et l'électron en neutrino, sont beaucoup plus rares. (C'est un diagramme analogue à celui de la fig. 1b, où intervient aussi un boson W^+ , qui décrit la désintégration radioactive du neutron par interactions faibles, $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$).

La figure 1c représente la diffusion de deux quarks par échange d'un gluon (interactions fortes). C'est l'un des processus élémentaires qui interviennent au cours du choc de deux protons, chacun d'eux étant constitué de trois quarks.

La théorie de la grande unification s'appuie sur les ressemblances entre interactions électromagnétiques, faibles et fortes. Elle permet de relier, par une symétrie, les leptons (comme l'électron et le neutrino), et les quarks ; ainsi que les divers bosons intermédiaires (photons γ , W^+ , Z et gluons) responsables de l'existence de ces interactions. (Voir plus loin la figure 2.)





Malgré leurs différences, les interactions faibles, électromagnétiques et fortes pourraient apparaître comme trois facettes distinctes d'une même interaction fondamentale. Le proton est-il alors instable ?

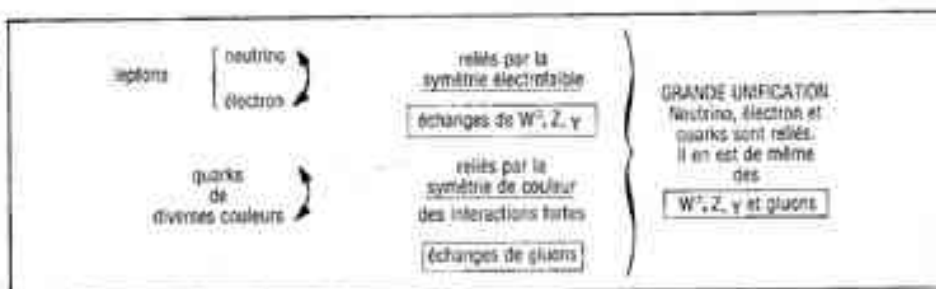


FIG. 2. La grande unification des interactions faibles, électromagnétiques et fortes.

La grande unification

Revenons à la grande unification. La symétrie électrofaible permet de relier le W^+ au photon et au Z , et le neutrino à l'électron. Si l'on étend cette symétrie aux interactions fortes, on obtient une théorie où il n'y a plus de différence fondamentale entre les W^+ , Z , photon, et gluons ; ou encore entre l'électron et le neutrino (collectivement appelés leptons) et les quarks. D'où le schéma simplifié de la figure 2.

Une conséquence essentielle de la grande unification est l'existence, à côté des bosons intermédiaires W^+ , Z , γ et gluons responsables des forces déjà connues, de nouveaux bosons intermédiaires – appelés X et Y dans le modèle le plus simple. L'émission ou l'absorption de l'un d'eux permet la transformation directe d'un quark en un lepton – ceci traduit le fait que, dans une théorie de grande unification, il n'y a plus de différence fondamentale entre ces particules. De là résulte l'éventualité d'une *instabilité du proton*, par disparition d'un ou plusieurs de ses quarks constituants. Le proton se désintégrerait alors, par exemple, en un méson π^+ accompagné d'un antiélectron e^- .

Doit-on s'attendre à ce que nos propres protons disparaissent sous l'effet d'une désintégration très rapide ? Si c'était le cas nous ne serions pas là pour en discuter. De fait, on prévoit que les nouveaux bosons intermédiaires éventuellement responsables d'une instabilité du proton doivent avoir des masses gigantesques, de 10^4 ou 10^5 fois supérieures à celle du proton, ou même plus. Aussi la désintégration d'un proton est-elle extrêmement improbable, la durée de vie attendue étant au moins de l'ordre de 10^{30} années, voire beaucoup plus. Même si ceci est considérablement supérieur à l'âge de l'Univers (de l'ordre de 10^9 années) le phénomène n'est pas nécessairement indétectable, si l'on parvient à observer un très grand nombre de protons, tels ceux contenus dans des tonnes de fer, ou d'eau, durant une année ou plus. Ces expériences, très délicates, se font dans des tunnels (comme ceux du Mont-Blanc et du Fréjus à la frontière franco-italienne) ou dans des mines très profondes, de manière à éviter les bruits de fond parasites dus au rayonnement cosmique.

On n'a pas encore observé d'événements que l'on puisse attribuer avec certitude à la désintégration d'un proton, et l'on sait maintenant que cette particule a une durée de vie supérieure à 10^{31} ou à 10^{32} années environ. L'observation directe d'une instabilité du

proton serait d'une très grande importance, en confirmant la validité des idées précédentes sur l'unification de trois des quatre interactions fondamentales.

Il existe néanmoins une limite à la sensibilité de ce type d'expériences : à cause des bruits de fond, une instabilité du proton ne pourrait être détectée, si sa durée de vie était supérieure à 10^{32} ou 10^{33} années environ. Etant donné les incertitudes existant dans les divers modèles théoriques, une non-observation de ce phénomène ne permettrait pas d'invalidier, de manière générale, l'idée de grande unification.

A défaut de la confirmation expérimentale, l'intérêt pour la grande unification repose sur des considérations théoriques : possibilité de relier les intensités des trois interactions, et de calculer l'un des paramètres essentiels de la théorie électrofaible ; interprétation élégante des valeurs des charges électriques fractionnaires des quarks et entières des leptons, qui autrement resteraient incompréhensibles. La grande unification permet aussi d'aborder en position plus favorable certaines questions relatives à l'évolution de l'Univers et à l'existence même de la matière qui le constitue (voir ci-après l'article de P. Salati). Aussi continuera-t-on de s'y intéresser, même si les expériences destinées à détecter une instabilité du proton devaient persister à fournir des résultats négatifs.

On pourrait imaginer que le dernier grand problème à résoudre consiste à "unifier" la quatrième interaction, c'est-à-dire la gravitation, avec les trois précédentes. Mais, bien avant cela, de très nombreux problèmes demeurent dans le cadre des théories unifiées des interactions faibles, électromagnétiques et fortes. Ce sont, en particulier :

- les problèmes associés à la brisure de la symétrie entre les interactions, et qui font intervenir une nouvelle classe de particules hypothétiques, les *bosons de Higgs* ;
- les problèmes posés par l'existence de trois familles distinctes de quarks et de leptons, et l'origine de leurs masses.

Ceci amène les physiciens à rechercher de nouveaux principes, complémentaires des idées d'unification électrofaible et de grande unification.

Les particules "élémentaires" sont-elles composées ?

Il est concevable que les bosons de Higgs, les quarks et les leptons, et même les bosons intermédiaires, ne soient pas des objets fondamentaux, mais des états liés formés de constituants élémentaires. C'est l'approche des *modèles composés*. L'idée en vient naturellement lorsque l'on considère le nombre déjà grand de particules connues réputées

* Les mésons sont des particules composées d'un quark et d'un antiquark.

Les théories supersymétriques prévoient qu'à chaque particule est associée une particule sœur, ayant un mouvement de rotation interne différent. Elles permettent à la gravitation de s'introduire naturellement en physique des particules.

"élémentaires", et plus spécialement de quarks et de leptons.

Il est malheureusement très difficile de construire des modèles composés satisfaisants. Aussi continuera-t-on le plus souvent à considérer les particules citées plus haut comme élémentaires, du moins à l'échelle de nos moyens d'investigation actuels (sans exclure la possibilité que certaines apparaissent ultérieurement comme composées).

Comment alors peut-on tenter de répondre aux nombreuses questions qui continuent à se poser, même une fois acceptée l'idée de grande unification, pourtant non encore confirmée ? L'une des approches les plus prometteuses semble être celle de la supersymétrie.

La supersymétrie et la supergravité

La supersymétrie est une symétrie d'un type spécial : elle relie des particules ayant des propriétés de rotation interne - ce que les physiciens appellent le *spin* - différentes, au contraire des autres symétries qui ne relient que des particules "tournant sur elles-mêmes" de la même manière.

La supersymétrie ouvre au physicien (ainsi d'ailleurs qu'au mathématicien, mais ce n'est pas notre propos) un nouveau domaine d'investigation. On peut essayer de l'utiliser pour relier les bosons intermédiaires (W^{\pm} , Z , photon et gluons) responsables de l'existence des forces, aux constituants de la matière (quarks et leptons) soumis à ces mêmes forces. Sans que cette idée soit mise en défaut sur le fond, on n'a trouvé aucune paire de particules connues qui soient directement images l'une de l'autre par supersymétrie. Le monde, tel que nous le voyons, n'est pas supersymétrique. Faut-il donc abandonner l'idée de supersymétrie ? Ou bien, peut-on imaginer que, malgré des apparences contraires, chaque particule ait sa propre image par supersymétrie, qui nous serait actuellement inconnue ? On attendrait alors l'existence d'une nouvelle famille de particules, telles que le *photino*, les *winos* et les *gluinos* (respectivement images du photon, des W^{\pm} , et des gluons) ; et bien d'autres encore, comme les *sélectrons*, semblables aux électrons, mais très lourds et sans mouvement de rotation interne (voir figure 3).

A ce stade, il semble s'agir d'une sugges-

tion gratuite. Au contraire, c'est un ensemble de raisons essentielles qui a conduit les physiciens théoriciens à s'engager dans cette voie.

La supersymétrie permet par exemple d'établir un lien entre les bosons intermédiaires, responsables de l'existence des interactions, et les bosons de Higgs, associés à la brisure de la symétrie entre ces interactions, et donc de préciser les propriétés attendues de ces dernières particules. Un boson de Higgs apparaît alors, dans la plupart des cas, comme un boson intermédiaire dont on aurait stoppé le mouvement de rotation interne.

Il y a, de plus, un lien tout à fait remarquable entre la supersymétrie et la structure de l'espace-temps. Essayons d'en donner une idée, en utilisant un langage simplifié à l'excès. Une transformation de supersymétrie associe à chaque particule une particule image. Si l'on prend une nouvelle fois l'image de cette particule image, on retrouve la particule initiale, mais déplacée dans l'espace ou le temps. La supersymétrie apparaît comme plus fondamentale que les simples déplacements. Sa formulation mathématique est néanmoins beaucoup plus complexe. On représente alors la supersymétrie comme une symétrie qui opère dans une extension abstraite de l'espace-temps ordinaire, que l'on appelle le *superspace*.

Ceci nous amène naturellement à parler de la gravitation. On sait depuis Galilée et Einstein que l'expression des lois physiques doit être toujours la même, quel que soit le système de coordonnées utilisé pour repérer les événements dans l'espace-temps. C'est ce qui a mené à la théorie de la *relativité générale*. La gravitation apparaît alors localement comme une force d'inertie, résultant de cette invariance par changements de repère.

Le lien mentionné plus haut entre supersymétrie et translations dans l'espace-temps conduit à considérer, de manière plus générale, les changements de repère dans le superspace. Ceci mène alors, de façon quasi-automatique, à l'apparition de la relativité générale, et donc de la quatrième interaction, la gravitation, dans les théories supersymétriques. On parle alors de *supergravité*.

Les nouvelles particules dont l'existence est prévue par la supersymétrie, comme le *photino*, les *gluinos* et les *sélectrons*, ont été recherchées expérimentalement auprès des grands accélérateurs, comme les anneaux de

Particules ordinaires				Images (hypothétiques) de ces particules par supersymétrie	
Particules responsables de l'existence des interactions	types : électromagnétiques faibles gravitationnelles	gluons	spin 1 spin 2	gluinos	spin 1/2 spin 3/2
		photon γ		photino	
		W^{\pm} , Z		winos et zinos	
		graviton		gravitino	
Constituants de la matière	leptons	électron	spin 1/2	sélectrons	spin 0
	quarks	neutrino		"sneutrinos" "squarks"	

FIG. 3. Les particules et leurs images par supersymétrie.

Les théories supersymétriques prévoient que, pour chaque particule connue (colonne de gauche), il doit exister une nouvelle particule qui lui est associée, et que l'on appelle son image par supersymétrie (colonne de droite). Une particule et son image ont même charge électrique, même couleur, mais diffèrent par leurs propriétés de rotation interne (*spin*) et par leurs masses. La plupart de ces nouvelles particules doivent avoir des masses de plusieurs dizaines de GeV/c^2 , au moins. En outre, la supersymétrie permet d'établir un lien, non mentionné dans le tableau ci-dessus, entre les bosons intermédiaires (tels que les W^{\pm} et Z) et les bosons de Higgs associés à la brisure de la symétrie entre les interactions.

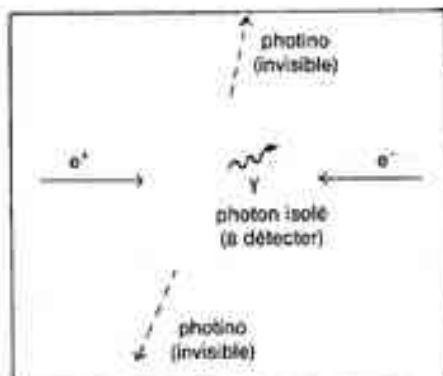


FIG. 4. Une des manifestations possibles de la supersymétrie : la production d'une paire de photinos (hypothétiques) par annihilation $e^+ e^-$.
Un électron (e^-) et un positron (e^+) peuvent en principe s'annihiler pour donner une paire de photinos. Mais ceux-ci sont probablement pratiquement invisibles, comme les neutrinos, si bien que la réaction $e^+ e^- \rightarrow 2 \text{ photinos}$ resterait inaperçue. Aussi est-ce une réaction voisine, $e^+ e^- \rightarrow \text{photon} + 2 \text{ photinos}$, que l'on cherche à mettre en évidence. L'état final, qui comprend un photon mais pas d'autre particule visible, est maintenant détectable. Ces expériences sont actuellement effectuées auprès des anneaux de collision PEP (Stanford, Californie) et PETRA (Hambourg). Aucun signe de l'existence des photinos n'est encore apparu. Des expériences analogues sont en cours auprès du collisionneur proton-antiproton du CERN.

L'espace où nous vivons pourrait avoir plus de trois dimensions supplémentaires - extrêmement petites - échappant à notre observation directe.

collision $e^+ e^-$ ou proton-antiproton (voir par exemple la figure 4). En admettant que ces particules existent, il semble que l'énergie des accélérateurs actuels soit insuffisante pour les mettre en évidence. On a espoir que la prochaine génération d'accélérateurs permettra leur détection, découvrant ainsi un nouveau principe auquel doivent satisfaire toutes les lois physiques, aussi fondamental que l'invariance par relativité, restreinte ou générale.

Un espace à plus de trois dimensions

En attendant la découverte de ces nouvelles particules, les physiciens ont continué à

définir d'autres symétries, encore plus puissantes, comme la supersymétrie étendue. Ces théories s'expriment naturellement dans un espace-temps à plus de quatre dimensions physiques - par exemple, six, dix ou onze. Mais l'espace-temps ordinaire, où nous avons l'habitude de voir les événements se dérouler, n'a, lui, que quatre dimensions : trois dimensions d'espace, et une dimension de temps. Où sont alors les dimensions supplémentaires, qui échappent à notre expérience ?

Pour en avoir une idée, imaginons une immense feuille de papier, constituant un espace à deux dimensions, que l'on roule sur elle-même de manière à former un tube. Sa section est un cercle de circonférence L , pouvant être très petite, tandis que sa longueur, au contraire, peut être infinie. Nous avons là un exemple très simple d'espace à deux dimensions dont l'une - celle qui a été roulée sur elle-même - est appelée compacte. Imaginons maintenant que la longueur L de cette dimension compacte soit extrêmement petite. L'espace précédent, bien qu'intrinsèquement à deux dimensions, apparaîtra en pratique comme un espace à une seule dimension, c'est-à-dire une simple ligne.

De même, un espace à plus de trois dimensions pourrait nous apparaître comme n'ayant que trois dimensions seulement, les dimensions d'espace supplémentaires, compactes, étant roulées sur elles-mêmes pour former des sphères, des anneaux, ou d'autres structures extrêmement petites (voir figure 5).

Dans quelles circonstances ces dimensions supplémentaires pourraient-elles se manifester ? On sait que pour sonder les propriétés de la matière à des distances de plus en plus petites, il a fallu disposer d'énergies de plus en plus élevées. Ceci est dû à une propriété générale de la physique quantique : à toute échelle de longueur est associée une échelle d'énergie. Plus la longueur est petite, plus l'énergie correspondante est grande. Ainsi, à la taille L - extrêmement petite - des dimensions supplémentaires correspond une

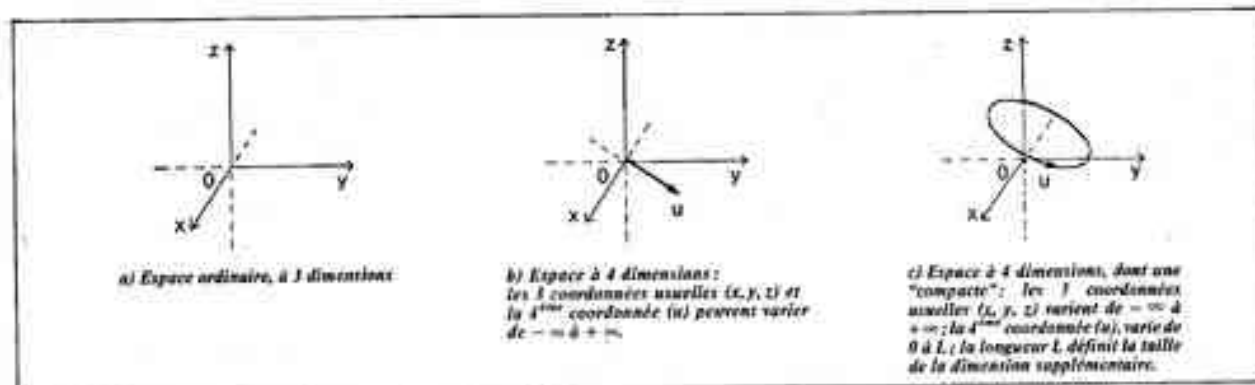


FIG. 5. Comment se représenter un espace à plus de 3 dimensions.

Nous vivons dans un espace à trois dimensions, et nous sommes habitués à en donner des représentations planes, notre œil et notre cerveau étant entraînés à reconnaître les images des objets en trois dimensions. Sur la figure 5a, on voit facilement que le demi-axe Ox est situé en avant du plan yOz . De même, on peut utiliser des représentations planes d'espaces à quatre dimensions (ou plus). C'est ce que nous avons fait dans la figure 5b. Il faut alors imaginer que le demi-axe Ox est situé en avant du plan yOz , tandis que Ou pointe dans une quatrième direction, orthogonale aux trois précédentes. Dans la figure 5c, la quatrième coordonnée, u , varie de moins l'infini à plus l'infini. Au contraire dans la figure 5c, la quatrième dimension est compacte, la coordonnée u variant seulement de 0 à L . Les dimensions d'espace supplémentaires sont en général un nombre de deux, six ou sept, selon la théorie considérée (l'espace-temps a alors six, dix ou onze dimensions, au total). Ces dimensions sont roulées sur elles-mêmes pour former des sphères, des anneaux ou d'autres structures extrêmement petites. Elles doivent être inférieures à 10^{-17} cm environ, sans quoi elles auraient déjà été observées ; non pas au microscope, même électronique, mais grâce à ce qui en tient lieu pour des distances aussi faibles : les accélérateurs de particules à très haute énergie.

Ce n'est probablement que dans un tel espace que l'on peut vraiment comprendre la grande unification des interactions. L'échelle d'énergie à laquelle elle se produit est alors fixée par la taille L des dimensions supplémentaires (à. e. $m_2 = \hbar/L$) : à une taille $\leq 10^{-18}$ cm correspond ainsi une énergie d'unification $\geq 10^{16}$ GeV. Par ailleurs, les effets quantiques de la gravitation deviennent importants à des distances de l'ordre de 10^{-33} cm, ou à des énergies de l'ordre de 10^{19} GeV. C'est en fait à de telles énergies, où les quatre interactions ont des intensités comparables, que l'on peut espérer obtenir une théorie unifiée des interactions fortes, électromagnétiques, faibles et gravitationnelles.

Les intensités des quatre types d'interactions - fortes, électromagnétiques, faibles et gravitationnelles - deviennent comparables à des énergies gigantesques, de l'ordre de 10^{19} GeV. Ce n'est qu'à de telles énergies que l'on envisage d'obtenir une réelle unification de toutes ces interactions.

A des énergies gigantesques ou à des distances extrêmement petites, les particules élémentaires pourraient apparaître comme des cordes vibrantes.

La recherche de nouvelles particules, à des énergies accessibles expérimentalement, est indispensable pour mettre nos idées à l'épreuve et dévoiler les principes fondamentaux auxquels obéit l'Univers.

Quand on fait des expériences c'est qu'on est pas vraiment sûr de soi

nouvelle échelle d'énergie ($E \sim \hbar c/L$). Ceci représente l'ordre de grandeur des énergies à atteindre, si l'on veut percevoir directement l'existence de ces nouvelles dimensions. Mais de quelles valeurs de l'énergie peut-il bien s'agir ?

Fait remarquable, l'échelle d'énergie précédente ($E \sim \hbar c/L$) peut vraisemblablement être aussi identifiée à l'énergie d'unification - gigantesque - à laquelle les trois interactions, faibles, électromagnétiques et fortes, deviennent indiscernables. Pour une énergie d'unification $\geq 10^{16}$ GeV, on trouve alors que la taille L des dimensions supplémentaires doit être $\leq 10^{-12}$ cm. Des dimensions aussi minuscules échappent nécessairement à notre expérience directe. Néanmoins, l'énergie de masse de nombreuses particules, au repos dans l'espace ordinaire, aurait alors pour origine (au moins en partie) leur mouvement - non directement observable - le long de ces dimensions supplémentaires. De plus, la brisure de la symétrie entre les interactions se trouverait reliée à la structure, aux très courtes distances, d'un espace-temps à plus de quatre (trois plus une) dimensions.

Mais quel phénomène physique détermine la forme géométrique et la taille de l'espace formé par les dimensions supplémentaires ? La gravitation doit ici jouer un rôle essentiel. On voit alors apparaître une nouvelle échelle d'énergie, caractéristique de cette dernière interaction : c'est l'énergie à laquelle les interactions gravitationnelles (très faibles aux énergies usuelles, mais dont l'intensité effective augmente rapidement avec l'énergie) deviennent des interactions de forte intensité. Les effets quantiques dus à la gravitation sont alors importants. Ceci se produit à une énergie appelée énergie de Planck E_P , fixée par la constante de Newton de la gravitation universelle ($E_P = (\hbar c^3/G_{\text{Newton}})^{1/2}$), et voisine de 10^{19} GeV. La longueur associée, appelée longueur de Planck, est voisine de 10^{-33} cm. Si les dimensions supplémentaires ont des tailles de cet ordre, l'énergie à laquelle se produit l'unification des interactions faibles, électromagnétiques et fortes est aussi celle à laquelle la gravitation devient elle-même d'une intensité comparable à celle des autres interactions.

Les particules élémentaires sont-elles des cordes plutôt que des points ?

Comme nous l'avons déjà dit, à des énergies aussi énormes, ou à des distances aussi faibles, les effets-quantiques dus à la gravitation sont essentiels. Ceci pose, depuis fort longtemps, un très grave problème : dans les calculs apparaissent des quantités infinies, que l'on ne sait pas traiter de manière satisfaisante (on dit en termes techniques que la théorie de la gravitation n'est pas "renormalisable", contrairement aux théories des trois autres interactions). Dans le cadre usuel de la théorie des champs, où les particules élémentaires sont considérées comme ponctuelles, aucune théorie quantique satisfaisante de la gravitation n'a pu être trouvée, malgré des espoirs suscités par l'apparition des théories de supergravité.

Pour résoudre ce problème, et pour étudier les interactions entre particules à des distances $\leq 10^{-33}$ cm, ou à des énergies $\geq 10^{19}$ GeV

(rappelons que la taille d'un proton est d'environ 10^{-14} cm, et l'énergie de masse d'un W^0 d'environ 80 GeV), les espoirs reposent actuellement sur les théories des supercordes. Il s'agit de théories supersymétriques, où l'on ne se représente plus une particule élémentaire comme étant un objet ponctuel, mais au contraire comme une corde - ouverte ou fermée - animée d'un certain mouvement de vibration, dans un espace comportant en général des dimensions supplémentaires. Deux cordes peuvent se mettre bout à bout pour se joindre et former une corde unique. Inversement, une corde peut se couper en deux. Ce sont de tels mécanismes qui sont alors responsables des interactions entre particules. On peut aussi penser à utiliser, au lieu de cordes, des surfaces...

Vers une théorie unifiée de toutes les interactions

On espère que de telles théories vont permettre un traitement correct des interactions gravitationnelles au niveau quantique, et conduire à une réelle unification des quatre types d'interactions fondamentales. On a donc parcouru un long chemin depuis l'unification électrofaible, en passant par les idées de grande unification, de supersymétrie et de dimensions spatiales supplémentaires, pour peut-être arriver à une vision où les particules apparaîtraient, à de très courtes distances, comme des cordes plutôt que des points.

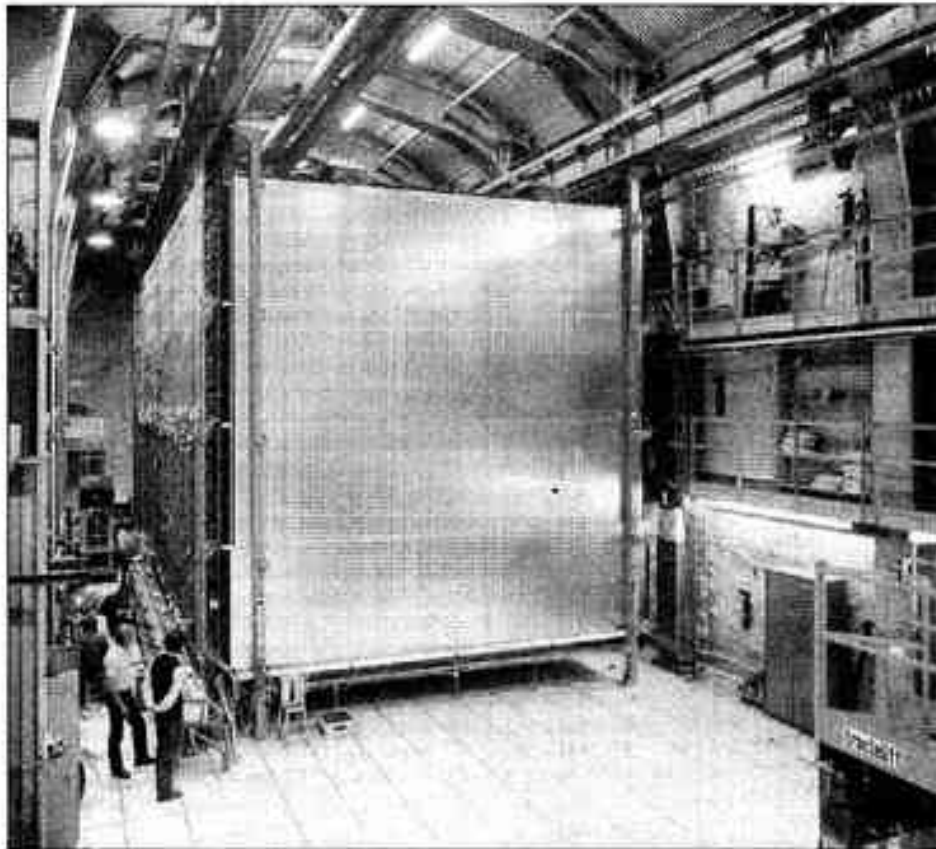
Une réelle unification des quatre types d'interactions fondamentales n'est attendue que pour des distances très courtes, ou des énergies gigantesques, qu'il est hors de question d'atteindre directement dans un avenir prévisible. Une telle théorie doit pouvoir, un jour sans doute encore lointain, expliquer l'existence des interactions fondamentales, de leurs symétries et de la brisure de celles-ci, et des diverses familles de quarks et de leptons. Elle doit aussi permettre de calculer des nombres, comme les rapports de masse des diverses particules, ou encore la constante α , numériquement voisine de $1/137$, qui détermine la valeur de la charge de l'électron : un but fort ambitieux...

En attendant, les physiciens sont à l'affût de tout indice expérimental permettant de confirmer, d'infirmer ou de modifier chacune de leurs idées. Pour cela, l'étude détaillée des propriétés des particules connues, et la recherche de nouvelles particules, comme les bosons de Higgs et les nouvelles particules prévues par la supersymétrie, constituent des outils absolument indispensables. Même si l'unification de toutes les interactions n'est attendue qu'à des énergies gigantesques de l'ordre de 10^{19} GeV, les idées précédentes ont des conséquences testables à des énergies qui sont - comparativement bien sûr - relativement basses : de l'ordre de 10^3 à 10^4 GeV environ. Aussi est-il crucial de pouvoir disposer, au-delà des accélérateurs actuellement en construction à Stanford (SLC), Genève (LEP) et Hambourg (HERA), d'une nouvelle génération d'accélérateurs, donnant accès à un domaine d'énergies plus élevées, comme les collisionneurs proton-proton ou proton-anti-proton en projet aux États-Unis (SSC) ou en Europe (dans le tunnel du LEP à Genève). La compréhension des principes fondamentaux dont découlent les lois qui régissent l'Univers est à ce prix.

La réponse des expérimentateurs

Les expérimentateurs, à l'instar des anciens navigateurs, partent dans l'infiniment petit à la découverte d'une particule... et en découvrent parfois une autre.

Michel DAVIER



Le détecteur du Fermilab se présente comme un parallélépipède de section carrée 6,2 m x 6,2 m et de longueur 12 m, constitué de modules formés de plaques de fer, d'épaisseur 3 mm, et de plans de tubes de détection alternativement verticaux et horizontaux. Son poids total est de 910 tonnes. Il comprend 996 000 "tubes à plasma" qui, n'étant pas sensibles de manière permanente, doivent être déclenchés par des tubes Geiger, au nombre de 55 000. Le passage d'une particule dans le détecteur est déterminé par l'ensemble des tubes verticaux et horizontaux touchés simultanément. © CERN / Saclay.

La description des phénomènes sub-nucléaires par la théorie est encore très incomplète. Mais la voie dans laquelle il faudra s'engager dépend des découvertes expérimentales à venir.

Le programme expérimental actuel en physique des particules est centré sur deux tâches prioritaires. D'une part, il reste à découvrir les éléments encore manquants prédits par le "modèle standard", qui rend jusqu'à présent très bien compte des phénomènes observés. D'autre part, nous savons que cette description est encore très incomplète et la voie vers laquelle la théorie doit s'engager ne pourra que s'appuyer sur le premier indice expérimental non prévu par le modèle standard. Sans prétendre épuiser la description des expériences en cours, nous allons illustrer ces préoccupations par les exemples qui nous semblent les plus fascinants.

■ Michel Davier est professeur à l'université de Paris-Sud, directeur du Laboratoire de l'accélérateur linéaire - LAL - (IN2P3 - université de Paris-Sud), Centre d'Orsay, 91405 Orsay Cedex. Il est engagé dans un programme d'expériences à Hambourg et au CERN.

La recherche des bosons de Higgs

L'aspect le moins établi de la théorie électrofaible est la manière dont la symétrie sous-jacente est brisée : en effet, les bosons W et Z qui propagent l'interaction faible sont très lourds (environ cent fois la masse du proton), alors que le photon de l'interaction électromagnétique a une masse nulle. Cette brisure de symétrie est réalisée par le mécanisme de Higgs qui nécessite l'introduction de particules de spin 0, appelées bosons de Higgs. A ce jour, tous les résultats expérimentaux dans le domaine de l'interaction électrofaible sont en accord avec la théorie et certains résultats, comme la valeur des masses des bosons W et Z, dépendent cruciallement du mécanisme de brisure. Seulement, la théorie ne nous dit rien sur la masse de ces bosons de Higgs ! Enfin, presque rien : ils ne peuvent être très légers, ni très lourds, ce qui

Des nouvelles particules, les bosons de Higgs, sont nécessaires dans la théorie pour donner des masses aux bosons faibles W et Z. La recherche de ces bosons est difficile et n'a qu'à peine commencé. De plus hautes énergies sont nécessaires.

Les théories de grande unification, qui rassemblent les interactions faible, électromagnétique et forte dans un même cadre, prévoient que le proton pourrait être instable. La désintégration possible du proton est recherchée activement dans des expériences souterraines afin de se protéger du rayonnement cosmique.

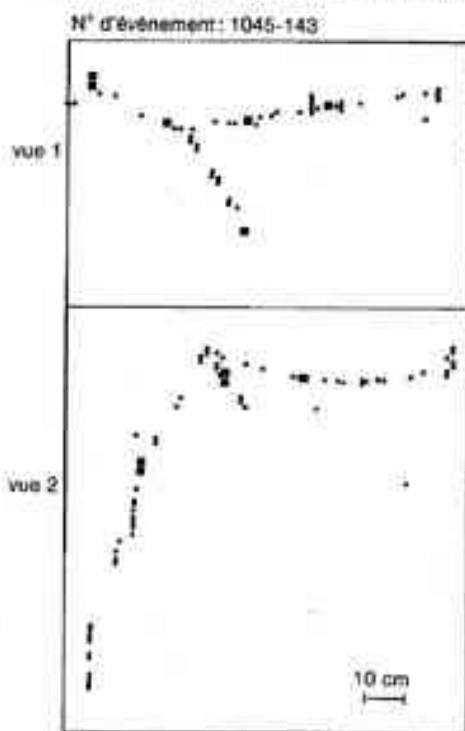
Les théories supersymétriques, qui ont l'ambition d'unifier les interactions, y compris la gravitation, sont particulièrement élégantes, mais prédisent une certaine prolifération de particules nouvelles. Aucune de ces particules n'a été découverte, mais la région explorée est encore modeste.

laisse ouvert un vaste domaine, de quelques GeV/c^2 à quelques TeV/c^2 . On voit donc la difficulté du problème.

En fait, la recherche des bosons de Higgs n'a qu'à peine commencé car les processus capables de les produire de manière univoque sont rares et limitent actuellement l'exploration aux basses masses. Deux alertes cependant : l'observation au SLAC (Stanford) d'un état à $2,2 \text{ GeV}/c^2$ dans les désintégrations de la particule $\Psi(1)$ a été en fait contredite par les résultats de l'expérience DM2 à Orsay, et un état vers $9 \text{ GeV}/c^2$ annoncé par l'expérience Crystal Ball (Boule de cristal) à Hambourg n'a pas résisté à une augmentation de statistique. Des bosons de Higgs chargés, plus faciles à produire, sont exclus si leur masse est inférieure à $15 \text{ GeV}/c^2$: de telles recherches ont été menées avec l'anneau de collision PETRA à Hambourg sur lequel sont installés quatre détecteurs dont le détecteur franco-allemand CELLO (2).

Le proton est-il instable ?

Si les interactions électromagnétique et faible deviennent d'intensité comparable vers 100 GeV , on s'attend à une échelle d'énergie beaucoup plus élevée pour l'unification avec l'interaction forte. Si cette grande unification se produit, on peut estimer que ce sera à plus de 10^{16} GeV ! A cette énergie, les leptons (comme l'électron) et les quarks (constituants du proton et plus généralement des hadrons) joueront des rôles symétriques et on pourra s'attendre à des transitions directes entre eux. Ceci peut avoir des conséquences observables, même à basse énergie, et entraîner l'instabilité du proton.



Un événement enregistré dans le détecteur du Fréjus. Les deux dessins représentent le même événement dans les vues verticale (1) et horizontale (2). Les points représentent les impacts enregistrés par les tubes à plasma, les canaux, ceux enregistrés par les tubes Geiger. Dans cet événement, l'énergie totale des particules observées est de l'ordre du GeV , ce que l'on attendrait de la désintégration d'un proton ou d'un neutron. Mais une étude plus précise montre que cet événement a été produit par un neutrino cosmique.

Ainsi, le responsable, avec le neutron, de la masse de la matière pourrait très bien ne pas être stable. Sa vie moyenne a été prédite par les théoriciens vers 10^{31} à 10^{32} années, dans le cadre d'un modèle particulier. Cette valeur énorme (rappelons que l'âge de l'univers est estimé à environ 10^{10} années) est en fait accessible à l'expérience et peut donc être testée. Il suffit pour cela de remarquer que 1000 tonnes de matière contiennent 6×10^{27} protons et neutrons, et donc, si on observe cette masse pendant un an, il devrait être possible de détecter quelques désintégrations.

En pratique, les choses se compliquent un peu. Il ne suffit pas de disposer d'une grande quantité de matière, il faut aussi l'instrumenter : la désintégration d'un proton ne libère qu'une énergie assez faible et le parcours dans la matière des particules qui seraient émises est limité. L'ingéniosité des physiciens y a remédié : une technique consiste à utiliser une grande cuve remplie d'eau comme réservoir de protons et d'observer, à la périphérie de la cuve, la lumière Cerenkov (3) émise par les produits de désintégration. Une autre approche, celle de l'expérience franco-allemande du Fréjus (4), est plus redondante et moins dépendante des modes possibles de désintégration : elle utilise des détecteurs finement divisés qui permettent de suivre localement les trajectoires des particules. Enfin, il faut se protéger du rayonnement cosmique qui pourrait simuler, en interagissant dans le détecteur, l'effet que l'on recherche : la solution est de s'enterrer, sous une montagne, dans un tunnel par exemple, comme au Fréjus.

Malgré deux années d'observation pour les premières grosses expériences, aucun signal convaincant n'a encore été observé. La méthode Cerenkov a déjà permis de montrer que le mode $p \rightarrow e^+ \pi^0$ prédit par la théorie unifiée la plus simple n'était pas présent au niveau attendu. Cette théorie ne peut donc être la bonne. La recherche continue, avec un avantage aux détecteurs les mieux armés pour la réjection du bruit de fond cosmique.

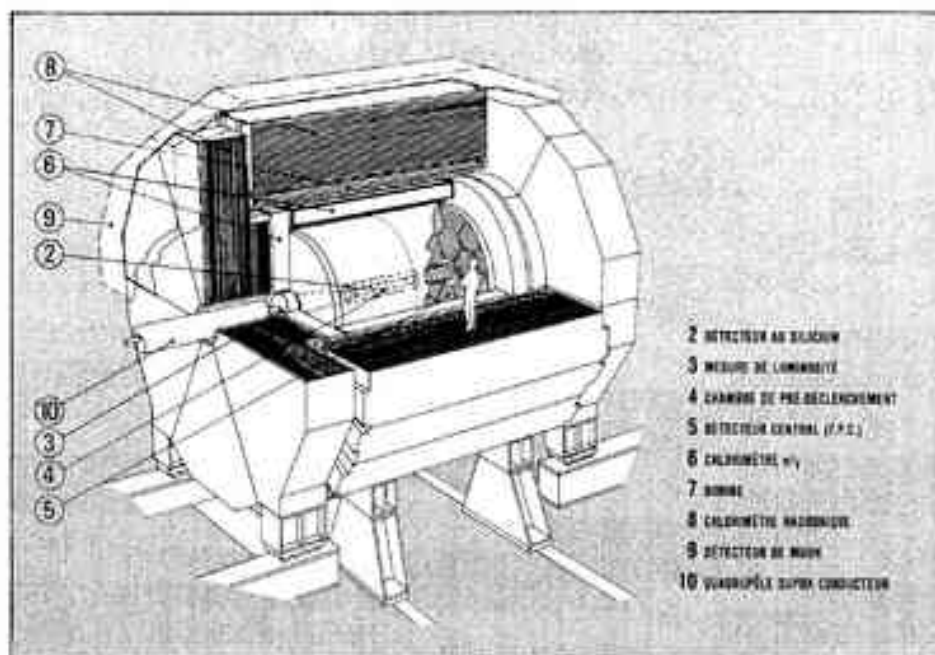
L'espoir supersymétrique

Les théories supersymétriques fournissent un cadre naturel pour unifier toutes les interactions, y compris la gravitation. Elles prédisent des partenaires aux particules déjà connues : à l'électron e de spin $1/2$ doit correspondre un électron \tilde{e} de spin 0 (appelé sélectron), au photon γ de spin 1 un photon $\tilde{\gamma}$ de spin $1/2$ (appelé photino), etc. L'élégance de la supersymétrie est un peu troublée par une telle prolifération, mais l'enjeu est tel que la recherche de ces nouvelles particules a été entreprise avec vigueur.

En fait, il y a plusieurs façons de briser la supersymétrie et la prédiction des masses des particules associées n'est pas unique. Si bien que leur recherche expérimentale en est compliquée : selon tel scénario, l'électron \tilde{e} est instable, le photino $\tilde{\gamma}$ stable ; selon tel autre scénario, c'est l'inverse ! Des analyses détaillées ont été effectuées à PETRA, en particulier avec le détecteur CELLO. Aucune indication de supersymétrie n'a été trouvée : par exemple, on sait maintenant que l'électron \tilde{e} a une masse supérieure à $22 \text{ GeV}/c^2$, ou bien qu'il n'existe pas. Si la supersymétrie est une symétrie de la nature, elle doit donc être très fortement brisée. Il serait cependant bizarre qu'aucune de ces nouvelles particules ne soit de basse masse.

Récemment, des rumeurs concernant la découverte de particules supersymétriques ont

Vue schématique du détecteur ALPHI destiné au collisionneur LEP.



La communauté des physiciens des particules place beaucoup d'espoir dans le programme expérimental de l'anneau électron-positon LEP, de 27 km de circonférence, en construction au CERN. De plus hautes énergies pourront être atteintes avec un collisionneur proton-proton ou proton-antiproton.

circulé à partir de l'expérience UA1 au CERN. Il semble, cependant, que de nouvelles analyses ne confirment pas ces rumeurs.

Les promesses des nouvelles machines

Comme nous l'avons vu, la recherche de nouveaux types de particules, bosons de Higgs ou particules supersymétriques, n'a été en fait qu'amorcée. Une échelle de masse naturelle pour ces phénomènes est donnée par la brisure de la symétrie électrofaible, c'est-à-dire de l'ordre de 100 GeV/c². Jusqu'à maintenant, seules les expériences UA1 et UA2 sur le collisionneur proton-antiproton du CERN ont été en mesure d'aborder ce domaine, mais avec plus de difficulté que sur un anneau e⁺e⁻, parce que le bruit de fond des réactions hadroniques y est farouche.

La communauté des physiciens des particules place donc beaucoup d'espoir dans le programme expérimental de l'anneau e⁺e⁻ LEP, en construction au CERN (5). Cette machine souterraine, de 27 km de circonférence, fournira des collisions jusqu'à une énergie totale de 200 GeV, permettant d'explorer la production de paires de particules ayant une masse jusqu'à 100 GeV/c². En effet, bien que les bosons W et Z aient été découverts, cette région de masse est inexplorée pour les autres types de particules. Les mesures systématiques qui y seront entreprises, en particulier la détermination précise des masses des bosons W et Z et des paramètres de la théorie électrofaible, sont aussi un moyen d'investigation d'effets nouveaux, non prédits par la théorie standard, et toute déviation sera scrutée. Alors que quelques dizaines de Z⁰ ont été observés jusqu'ici, le LEP en produira plus d'un million par an, et l'observation de ces Z⁰ sera beaucoup plus facile qu'avec un collisionneur proton-antiproton.

Au-delà de LEP, il faudra atteindre de plus hautes énergies, ce qui n'est possible pour l'instant qu'avec des collisionneurs proton-proton ou proton-antiproton. Des études sont en cours aux États-Unis pour une machine de 20 TeV

par faisceau. Il serait aussi possible de construire un anneau de ce type (seulement 9 TeV) dans le tunnel du LEP, économisant ainsi la majeure partie des travaux de génie civil. Une autre possibilité pour atteindre de très hautes masses, avec l'avantage de la propreté des annihilations e⁺e⁻, consiste à faire entrer en collision les faisceaux de deux accélérateurs linéaires ; des énergies de l'ordre du TeV pourraient être réalisées. A cette échelle, le domaine de masse possible du boson de Higgs serait exploré et une structure interne des leptons et des quarks serait peut-être révélée. Dans ce dernier domaine, le collisionneur électron-proton HERA en construction à Hambourg portera notre pouvoir de résolution dans l'étude du proton de 10⁻¹³ à 10⁻¹⁴ fermi (6).

Les idées existent donc pour répondre aux questions posées par les théoriciens. De ces résultats surgira peut-être la clé de la théorie future, sans doute unifiée, des particules. Ou alors, comme cela s'est quelquefois produit, la réponse surprendra tout le monde. ■

(1) La particule Ψ , découverte en 1974, est un état lié de quarks charmés cc.

(2) Participent à cette expérience : pour le CNRS d'une part, le Laboratoire de l'accélérateur linéaire à Orsay et le Laboratoire de physique nucléaire et des hautes énergies à Paris VI et VII et, d'autre part, le CEA à Saclay.

(3) Une particule chargée de vitesse supérieure à la vitesse de la lumière dans un milieu d'indice n (c/n) émet de la lumière par un phénomène assez analogue au bang produit par un avion supersonique.

(4) Participent à cette expérience : pour le CNRS, d'une part, le Laboratoire de l'accélérateur linéaire à Orsay et le Laboratoire de physique nucléaire et des hautes énergies à l'École polytechnique et, d'autre part, le CEA à Saclay.

(5) Voir l'article du Courrier du CNRS, n° 47, septembre 1982 : "Préparation des expériences pour le LEP" de Paul Talle-Vairant.

(6) 1 fermi = 10⁻¹⁵ m, ordre de grandeur de la taille du proton.

La physique des particules interroge l'Univers

Entre le Big Bang d'hier, le Big Bang de demain ou le grand froid de l'éternité, notre Univers a-t-il une chance ?

Pierre SALATI

Les observations effectuées grâce aux grands télescopes révèlent une structure homogène de l'Univers, à grande échelle. En effet, à l'échelle du super-amas galactique*, la matière est distribuée uniformément et se comporte comme un fluide cosmologique de densité constante. De même, les galaxies sont réparties de façon isotrope, aucune direction n'étant privilégiée. Ainsi, les observations confirment le principe cosmologique selon lequel l'Univers est homogène et isotrope en chaque point. L'aspect qu'il nous offre est alors indépendant du lieu de l'observation. De plus, les échelles typiques de distance sont décrites par la donnée d'un nombre unique $R(t)$. Si l'Univers était refermé sur lui-même, il serait alors sphérique et son rayon serait justement $R(t)$. L'éventuelle augmentation (diminution) de R avec le temps t rend compte d'une expansion (contraction) de l'espace.

Le modèle standard du Big Bang

Deux grandes dates ont marqué l'histoire de la cosmologie au XX^e siècle. Tout d'abord, en 1929, Hubble découvrait une relation de simple linéarité entre la vitesse d'éloignement des galaxies et leur distance à la terre (voir figure). L'expansion de l'Univers était découverte et n'a jamais cessé d'être confirmée depuis. Les galaxies s'éloignent de nous avec une vitesse évaluée entre 50 et 100 km/s pour chaque mégaparsec d'éloignement. Ainsi $R(t)$ augmente avec le temps et sa variation relative permet d'estimer l'âge de l'Univers à environ 10 à 20 milliards d'années. Plus tard, en 1965, Penzias et Wilson détectèrent un rayonnement du fond du ciel correspondant à un gaz de lumière de température 3 Kelvins. La remarquable isotropie de ce rayonnement prouve son origine cosmique. Son spectre est caractéristique d'un rayonnement thermique*. Ce fait est capital car il implique que, même si aujourd'hui le fond de rayonnement cosmologique est une assemblée de photons fossiles sans interaction, dans le passé ce gaz devait être en équilibre thermique avec la matière.

Ces deux découvertes constituent l'assise observationnelle du modèle standard du Big

Bang, théorie formulée pour la première fois par A. Friedmann et G. Lemaître. Puisque les galaxies ne cessent de s'éloigner les unes des autres, dans le passé la matière devait être plus dense que maintenant. En utilisant les équations de la relativité générale, on découvre que la température de l'Univers n'a cessé de décroître au cours de son expansion. Dans un passé très lointain, l'Univers était donc beaucoup plus dense et chaud qu'à l'heure actuelle et il a évolué à partir d'un état où la température et la densité étaient virtuellement infinies : la singularité cosmique (voir encadré sur l'approche de l'instant initial). L'Univers est né du feu originel et le fond de rayonnement détecté en 1965 en est un vestige. Voilà pourquoi cette découverte a été si décisive pour l'adoption du Big Bang.

Un autre grand succès de la théorie concerne l'abondance cosmique des éléments légers. L'hélium 4 contribue pour 25 % à la masse baryonique* de l'Univers et une telle quantité ne peut être produite dans les étoiles. Or, les calculs de nucléosynthèse cosmologique sont en bon accord avec l'abondance observée. Physique des particules et cosmologie s'unissent ici pour donner une limite sur le nombre de neutrinos légers (masse inférieure à 100 KeV). Si ce nombre est supérieur à 3, l'expansion de l'Univers au moment de la nucléosynthèse est trop rapide et l'abondance cosmique de l'hélium 4 excède la limite supérieure observationnelle de 25 %.

Si les succès du modèle standard de cosmologie sont indéniables, deux questions restaient cependant sans réponse il y a à peine dix ans. La première concerne l'abondance des baryons dans l'Univers. La seconde est structurelle : l'homogénéité de l'espace, dont les preuves ne cessent d'être apportées, est difficilement explicable.

La grande unification et l'asymétrie baryonique

La température (3 Kelvins) du fond de rayonnement micro-onde permet d'évaluer la densité des photons (n_γ) à 400 par cm³. L'observation des galaxies et de leur distribution conduit à une estimation de la densité baryonique (n_b) d'environ 1 baryon par m³. Pendant longtemps, la valeur de 10^{-10} pour le rapport n_b/n_γ est restée un mystère.

Vers 1969, R. Omnes suggéra que notre Univers devait contenir autant de matière que d'anti-matière. Cette théorie était fort élégante car elle supposait un Univers symétrique quant à son contenu baryonique. Elle nécessitait tou-

La théorie du Big Bang n'a été acceptée qu'en 1965, et elle est à l'heure actuelle communément admise, à telle enseigne qu'on la nomme : modèle standard de la cosmologie. Si de nombreux physiciens souscrivent à ce modèle, ce n'est pas par dogmatisme. Cette théorie fort simple est en effet remarquablement en accord avec les observations. Elle explique en particulier l'origine du fond de rayonnement micro-onde découvert il y a vingt ans par Penzias et Wilson. Elle est également en accord avec l'abondance cosmique de l'hélium 4.

* Les termes marqués d'une astérisque sont définis dans le glossaire.

■ Pierre Salati est maître-assistant à l'université de Savoie et effectue ses recherches dans le Groupe de physique théorique du Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules (LAPP-IN2P3), BP 909, 74019 Annecy-le-Vieux Cedex.

M51 et NGC 3194-95 "Le coussillon" : galaxies spirales dans les débris de l'anneau. © CNRS/phot. OHP

La gravitation quantique et l'approche de l'instant initial de l'Univers. Le futur de l'Univers.

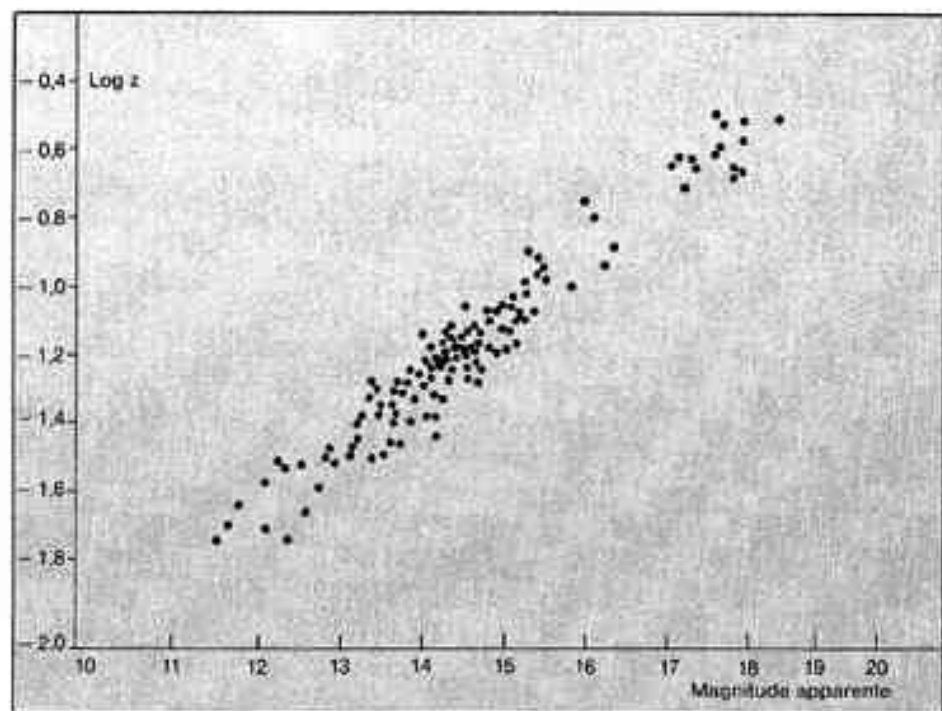
Quand on remonte dans le passé, la température de l'Univers augmente, l'énergie d'agitation thermique croît et les particules élémentaires qui constituent le magma primordial sont de plus en plus nombreuses. Peut-on dès lors atteindre, du moins par la pensée, le singulier cosmique, l'instant originel ou $t=0$? Une barrière empêche pour l'instant toute progression vers le passé. C'est l'époque de Planck. Elle correspond au régime de la gravitation quantique. Notre description d'un Univers homogène et isotrope, fondée sur la relativité générale qui est une théorie classique de la gravité, est insuffisante pour appréhender l'époque de Planck. Des phénomènes étonnants s'y déroulent. Ainsi, la géométrie de l'espace-temps, qui est l'essence des phénomènes gravitationnels, devient floue. La notion même de causalité subit également l'indétermination quantique. La relation de cause à effet entre deux événements est alors de nature probabiliste. Il se pourrait d'ailleurs fort bien que les lois encore inconnues qui régissent l'époque de Planck soient suffisantes à elles seules pour expliquer l'homogénéité et l'isotropie de notre Univers. L'inflation ne serait plus alors nécessaire. En définitive, l'Univers, à l'époque de Planck, se perd dans les nimbées de la gravitation quantique. En effet, il n'existe pas, à l'heure actuelle, de théorie quantique de la gravité satisfaisante. Les forces gravitationnelles sont probablement transmises par le graviton à l'instar des interactions électromagnétiques dont le vecteur est le photon. Plusieurs voies sont en cours d'exploration et la théorie de la gravitation quantique pourrait prochainement voir le jour. Trois possibilités, complémentaires les unes des autres, existent :

- la supergravité unifie la gravitation classique (relativité générale) et la supersymétrie ;
- les théories de Kaluza-Klein supposent que l'espace-temps a plus de quatre dimensions et que les dimensions supplémentaires se replient sur elles-mêmes (compactification dimensionnelle) pour engendrer les interactions connues ;

- les théories de corde imaginent que les excitations d'une corde dans un espace à 10 ou 26 dimensions associées à une compactification dimensionnelle engendrent la physique habituelle.

À l'heure actuelle, l'effervescence règne et la gravitation quantique est un domaine de recherche très actif et en plein développement.

Si l'on ne peut remonter dans le passé jusqu'à la singularité originelle, on peut du moins essayer de prévoir le futur de l'Univers. Tout dépend de sa densité moyenne de matière. Si l'Univers est trop massif, il se recontractera, l'attraction gravitationnelle entre les galaxies l'emportant sur l'énergie cinétique due aux processus d'expansion. Les galaxies cesseront alors de se fur mutuellement et commenceront à tomber les unes vers les autres. Le fin du Big Bang se découvrira à l'envers. La température augmentera et l'Univers finira dans le brasier d'une nouvelle époque de Planck. Au contraire, si l'Univers est "léger", le processus d'expansion se ralentira peu à peu mais sera éternel. Si de plus le nucléon est vraiment instable, dans 10^{31} années ou plus, les structures actuelles se feront désagréger et l'espace ne sera plus rempli que par un océan peuplé de photons et de neutrinos. L'Univers a donc le choix entre deux destins très différents. La densité critique dont dépend ce choix est comprise en 5×10^{-27} et 2×10^{-27} g/cm³ (cette valeur est peu précise car la constante de Hubble n'est connue qu'à un facteur 2 près). La matière visible a une densité moyenne d'environ 3×10^{-27} g/cm³. Gardons-nous cependant de conclure. Il suffirait que le neutrino ait une masse de quelques dizaines d'éV pour que le choix critique soit décisif et que notre Univers soit condamné à se recontracter. Il est difficile de prédire le futur de l'Univers tant que nous ne coordonnons pas sa densité moyenne de matière. La réponse nous permettra de voir si paradoxalement de la physique de l'infiniment petit se dégage une mesure avec précision de la masse éventuelle du cosmos.



C'est ce genre de diagramme qui a permis à Hubble de mettre en évidence une relation de simple proportionnalité entre la vitesse de récession des galaxies et leur distance à la terre. Chaque point figure une galaxie lointaine. Sur l'axe horizontal, la magnitude apparente équivaut à la distance (la magnitude apparente est proportionnelle au logarithme de la distance). Sur l'axe vertical, z mesure la vitesse de récession ($z = v/c$ où c est la vitesse de la lumière). L'échantillon montré ci-dessus est celui de J.G. Hoessel, J.E. Gunn et T.X. Thuan (Ap. J. 241, 488, 1980). On constate que les points se regroupent au voisinage d'une droite. Une analyse plus fine montre que vitesse de récession et éloignement sont bien proportionnels et met ainsi en évidence l'expansion de l'Univers. (Extrait de l'article "Le Big Bang aujourd'hui" de Trinh X. Thuan, La Recherche, n° 151, janvier 1984, p. 37.)

L'Univers contient aujourd'hui 1 nucléon pour 1 milliard de photons. Cette concentration baryonique est longtemps restée un mystère. Le modèle d'un Univers contenant autant de baryons que d'antibaryons a dû être abandonné. Il nécessitait un mécanisme de séparation matière-antimatière qui n'a jamais pu être proposé. L'Univers, au moment de l'annihilation nucléon-antinucléon, était donc dissymétrique et devait contenir plus de baryons que d'antibaryons. Les théories grand-unifiées sont venues à la rescousse de la cosmologie en esquissant une solution au problème de l'asymétrie baryonique. Cette dernière aurait été générée au moment où régnaient les forces grand-unifiées, vers une température de l'ordre de 10^{16} GeV.

tefois un mécanisme microscopique de répulsion matière antimatière qui aurait permis à suffisamment de nucléons et d'antinucléons de se séparer au moment de l'annihilation (température inférieure à 1 GeV), pour que les survivants soient au nombre de 1 nucléon par milliard de photons. L'Univers aurait ainsi été constitué d'îlots séparés de pure matière et de pure antimatière. Malheureusement, un tel mécanisme n'a jamais été inventé, et les chercheurs ont dû admettre qu'un surplus de nucléons devait déjà préexister au moment de leur annihilation avec l'antimatière. Cette disgracieuse asymétrie baryonique était problématique. Faisait-elle partie des conditions initiales préparées par le Grand Architecte ou avait-elle été générée à partir d'un état symétrique ? Si oui, alors comment ?

À la même époque (1968), A. Sakharov fournit un embryon de solution en énonçant les quatre conditions que doivent vérifier les forces microscopiques source d'une asymétrie baryonique. Ces forces doivent violer la symétrie matière/antimatière. Elles doivent également violer la conservation du nombre baryonique (le nombre de baryons moins le nombre d'antibaryons) ; en effet, une génération d'asymétrie baryonique implique une variation (ici une augmentation) de ce nombre. Elles doivent de plus savoir que le temps s'écoule. Si elles sont incapables de distinguer le sens d'écoulement du temps, aucune création d'asymétrie ne peut avoir lieu, ce processus étant par essence profondément dissymétrique d'un point de vue temporel. Finalement, puisque aucun équilibre thermodynamique n'est sensible à l'écoulement du temps (état statique et non dynamique), le phénomène qui génère l'asymétrie

baryonique doit intervenir en dehors de l'équilibre thermodynamique.

À la fin des années 70, avec l'avènement de la grande unification, des forces remplissant les conditions de Sakharov furent proposées ; il s'agissait des interactions grand-unifiées, transmises par les bosons de jauge X et Y. En particulier, ces forces ne distinguant pas les leptons des baryons, elles ne conservent pas le nombre baryonique. On pense maintenant qu'à l'origine, ($T > 10^{16}$ GeV), l'Univers contenait autant de baryons que d'antibaryons. Vers une température de l'ordre de 10^{16} GeV ou supérieure, les bosons super-lourds de jauge (ces bosons transmettent l'interaction grand-unifiée) et les bosons super-lourds de Higgs (ces bosons sont responsables de la brisure de la symétrie grand-unifiée) ont cessé leurs interactions avec le reste de l'Univers. N'étant plus en équilibre thermodynamique, ils se sont alors désintégrés en baryons et antibaryons, avec toutefois une légère préférence pour les premiers ! Les calculs effectués dans le cadre de ce scénario prévoient un large éventail de valeurs pour le rapport $n_b/n_{\bar{b}}$, incluant 10^{-10} .

L'homogénéité de l'espace et l'inflation

Si l'on se fonde sur le modèle standard de la cosmologie, l'Univers observable qui apparaît à l'heure actuelle si homogène, était composé, à l'époque de Planck, d'environ 10^{80} domaines sans contact causal les uns avec les autres, aucune interaction n'ayant pu voyager d'un domaine à un autre. En effet, la distance typique les séparant dépassait la longueur parcourue par la lumière depuis l'instant origine $t=0$. Aucune

L'homogénéité de l'espace à grande échelle est la pierre angulaire de la théorie du Big Bang. Paradoxalement, dans le cadre même du modèle standard de la cosmologie, cette homogénéité s'avère accidentelle. La grande unification nous a permis une fois encore d'entrevoir la solution. Au cours de la brisure de la symétrie grand-unifiée, une transition de phase s'est opérée, des gouttes de symétrie brisée apparaissant alors spontanément au sein de la phase symétrique. En même temps, l'Univers subissait une expansion exponentielle formidable et se dilatait d'un facteur d'environ 10^{26} . Cette inflation spatiale constitue notamment l'explication de l'étonnante homogénéité de l'Univers observable.

Depuis une dizaine d'années, de nouveaux développements ont conduit à une interférence entre astrophysique, cosmologie et physique des particules au profit de chacune de ces trois disciplines. En particulier, le Big Bang constitue un laboratoire exceptionnel où de fabuleuses températures et concentrations de particules sont courantes. Les théories de microphysique sont donc mises à l'épreuve du modèle standard du Big Bang et la cosmologie fournit de précieux renseignements concernant, par exemple, la masse et la durée de vie des particules supersymétriques prédites par la théorie.

information n'avait donc pu s'échanger entre deux domaines quelconques. Comment l'Univers, aujourd'hui si homogène à grande échelle, pouvait-il avoir, à l'époque de Planck, l'aspect d'un puzzle à 10^{26} pièces différentes ? Le problème de l'homogénéité était posé.

C'est en 1980, et toujours grâce à la grande unification, que A. Guth proposa une solution. A l'époque de Planck, l'Univers était fortement inhomogène. La température étant très élevée ($T = 10^{32}$ GeV) les forces électro-faibles et fortes étaient identiques et se fondaient pour ne constituer qu'une seule interaction : la force grand-unifiée. Vers 10^{16} GeV, cette harmonieuse symétrie se brisa, les forces électro-faibles et fortes se comportant désormais différemment. Cette brisure de symétrie s'accompagna d'une transition de phase. De même que la vapeur d'eau se condense en gouttelettes de liquide en se refroidissant (transition de la phase vapeur vers la phase liquide), des gouttelettes de symétrie brisée apparaissaient spontanément, vers 10^{16} GeV, au sein de la phase symétrique. Guth montra que si l'on choisissait judicieusement le potentiel associé au champ des bosons de Higgs (ce potentiel est responsable de la brisure de la symétrie grand-unifiée), ce changement d'état s'accompagnait alors d'une expansion fabuleuse de l'Univers, $R(t)$ croissant exponentiellement, par exemple, d'un facteur 10^{26} . Grâce à cette inflation spatiale, le problème de l'homogénéité était résolu : ce que nous observons aujourd'hui n'est en fait qu'une portion d'un domaine causal bien homogène qui s'est enflé jusqu'à occuper le volume que le modèle stan-

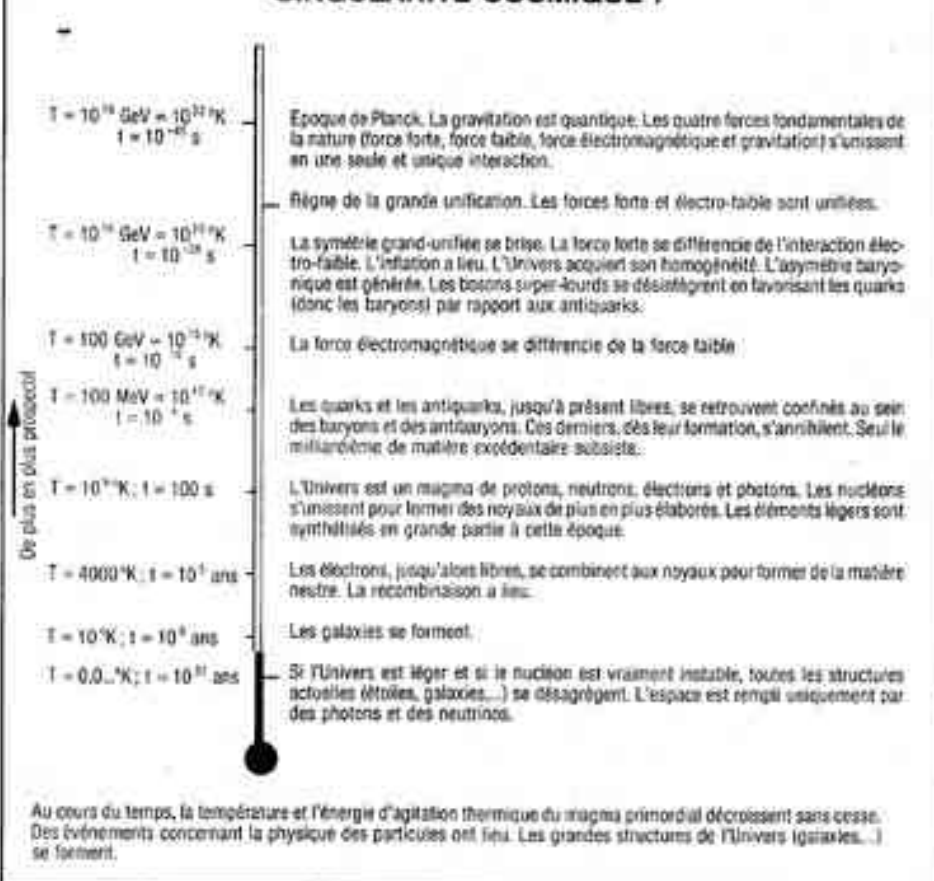
dard de la cosmologie attribuait auparavant à l'ensemble de ses 10^{26} collègues !

A l'heure actuelle, l'inflation est un domaine de recherche toujours très actif car le potentiel associé aux bosons de Higgs doit être finement ajusté si l'on veut qu'une expansion exponentielle apparaisse. Un tel ajustement n'est malheureusement guère naturel et l'on aimerait bien pouvoir le justifier en s'aidant de la supersymétrie ou de la supergravité.

La cosmologie supersymétrique

Depuis peu, de nouveaux développements ont vu le jour, qui essaient de relier cosmologie et physique des particules. Pendant le Big Bang, la matière se trouve sous forme d'un gaz totalement dissocié en particules élémentaires et constitue un magma primordial en équilibre thermodynamique. Tout le panthéon de l'infiniment petit se trouve présent pendant les premières minutes de l'Univers. Même les particules instables et fugaces produites par nos accélérateurs abondent, la température étant supérieure à leur énergie de masse. L'histoire du commencement peut se concevoir comme un spectacle où les acteurs, tous présents au début de la pièce, quittent un à un la scène. En effet, pendant le Big Bang, les particules évoluent de l'équilibre vers l'absence d'équilibre thermodynamique, en subissant un gel-fossilisation associé à une forte annihilation de l'espèce concernée si la température devient inférieure à son énergie de masse. L'Univers étant en expansion, les divers réactifs en pré-

SINGULARITÉ COSMIQUE ?



seuse subissent une formidable dilution ainsi qu'un refroidissement important, la dilatation de l'espace s'accompagnant d'une violente chute de température. Les particules élémentaires subissent une véritable trempé chimique à l'échelle cosmique et les diverses réactions nucléaires et corpusculaires se talentissent, puis cessent. L'étude de la fossilisation d'une population de particules est fructueuse. En prenant des particules connues, on peut tester le modèle standard en confrontant les observations aux prédictions théoriques portant sur les abondances fossiles. Ainsi, l'étude du comportement du photon pendant le Big Bang conduit à la prédiction du fond de rayonnement micro-onde découvert il y a vingt ans par Penzias et Wilson. Inversement, il est devenu courant de mettre les théories de physique des particules, comme la supersymétrie, à l'épreuve du modèle standard de la cosmologie. La prédiction du comportement cosmologique des particules hypothétiques comme le photino (partenaire supersymétrique du photon) permet d'apporter quelques précieuses indications concernant, par exemple, leur masse ou leur durée de vie. Chaque particule a un rôle à jouer pendant les trois premières minutes et le scénario du Big Bang s'enrichit à chaque nouvelle particule prédite. Il appartient bien sûr aux expériences de physique des hautes énergies de donner le verdict définitif. En attendant ce dernier, la cosmologie favoriserait le photino

ou le sneutrino (partenaire supersymétrique du neutrino) en tant que particule supersymétrique la plus légère. Si le photino est stable, sa masse serait alors soit supérieure à 500 MeV, soit inférieure à une centaine d'eV.

En définitive, les rapports entre des domaines aussi éloignés a priori que physique des particules — étude de l'infiniment petit — et astrophysique-cosmologie — étude de l'infiniment grand — sont très intéressants*. Ils ne peuvent qu'enrichir ces trois disciplines. Il est probable que la théorie du Big Bang sera un jour périnée et remplacée. Cependant, elle aura joué un rôle majeur dans notre conception de l'Univers au XX^e siècle. ■

* Voir l'article du Courrier du CNRS, n° 58, nov.-déc. 1984: "L'infiniment petit et l'infiniment grand" de J. Audouze.

BIBLIOGRAPHIE

- Audouze (J.), *Aujourd'hui l'univers*, Paris, Belfond, 1983.
Reeves (H.), *Patience dans l'azur, l'évolution cosmique*, Paris, Le Seuil, 1981.
Sciama (D.W.), *Modern cosmology*, Cambridge, Cambridge University Press, 1971.
Silk (J.), *The Big Bang*, San Francisco, Freeman, 1980.
Weisberg (S.), *Les trois premières minutes de l'univers*, Paris, Le Seuil, 1978.
Weisberg (S.), *Gravitation and cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1972.
Cours de Gif-sur-Yvette de physique des particules de septembre 1984.

Glossaire

Baryon : il s'agit de la famille des particules à laquelle appartiennent les nucléons (neutron et proton). L'antimatière associée est constituée par les antibaryons. A l'heure actuelle, seuls les baryons légers subsistent : le neutron et le proton.

Constante de Hubble : la vitesse d'éloignement (appelée vitesse de récession) des galaxies est proportionnelle à leur éloignement de la terre. La constante de proportionnalité s'appelle constante de Hubble et vaut de 50 à 100 km/s/Mpc. Ainsi, une galaxie distante de la terre de 1 mégaparsec (environ 3×10^{22} km) s'en éloigne avec une vitesse d'environ 50 à 100 km/s. Le rapport entre sa distance à la terre et la vitesse de récession permet d'estimer très approximativement l'instant où cette galaxie était dans nos parages immédiats, c'est-à-dire l'instant initial où l'Univers a commencé à se dilater. Cet instant originel remonte à environ 10 à 20 milliards d'années (3×10^{10} km : 100 km/s = 3×10^{11} s = 9,5 milliards d'années).

Epoque de Planck : à partir de la constante de gravitation universelle de Newton G_N , on peut construire, en utilisant une judicieuse combinaison de h et de c , une masse que l'on appelle masse de Planck (on peut traduire cette masse en énergie à partir de la relation d'équivalence masse-énergie $E = mc^2$)
 $M_P = (h c / G_N)^{1/2} = 2,17 \times 10^{-8}$ kg = $1,22 \times 10^9$ GeV/c².

Si deux particules chargées ont chacune cette masse et interagissent, les forces électromagnétiques et gravitationnelles en jeu sont du même ordre de grandeur et il convient alors de les traiter avec la mécanique quantique. Il est possible également de construire, toujours à partir de G_N , une longueur l_P qui vaut $1,6 \times 10^{-33}$ cm. Cette longueur caractérise l'échelle au-dessous de laquelle les interactions gravitationnelles deviennent quantiques. $1,22 \times 10^9$ GeV (énergie) et $1,6 \times 10^{-33}$ cm (longueur) définissent les conditions naturelles dans lesquelles la gravitation subit le fou

quantique et cesse d'être classique. Ces conditions règnent vers $t = 10^{-43}$ s, au moment où l'Univers a une température de 10^{32} K, où l'énergie moyenne des particules élémentaires est de l'ordre des 10^9 GeV de la masse de Planck et où la taille de chaque domaine causal (vitesse maximum de propagation de la causalité multipliée par l'âge de l'Univers t) devient comparable à l_P . Cette période qui suit de peu la naissance de l'Univers est appelée époque de Planck.

Mégaparsec (abréviation MPC) : le mégaparsec vaut un million de parsec. Le parsec est une unité de distance astronomique et vaut 3,26 années-lumière.

Super-amas galactiques : les galaxies ne sont pas dispersées au hasard mais se regroupent au sein d'amas galactiques. Ceux-ci forment à leur tour les super-amas galactiques qui apparemment constituent le dernier échelon de la hiérarchie.

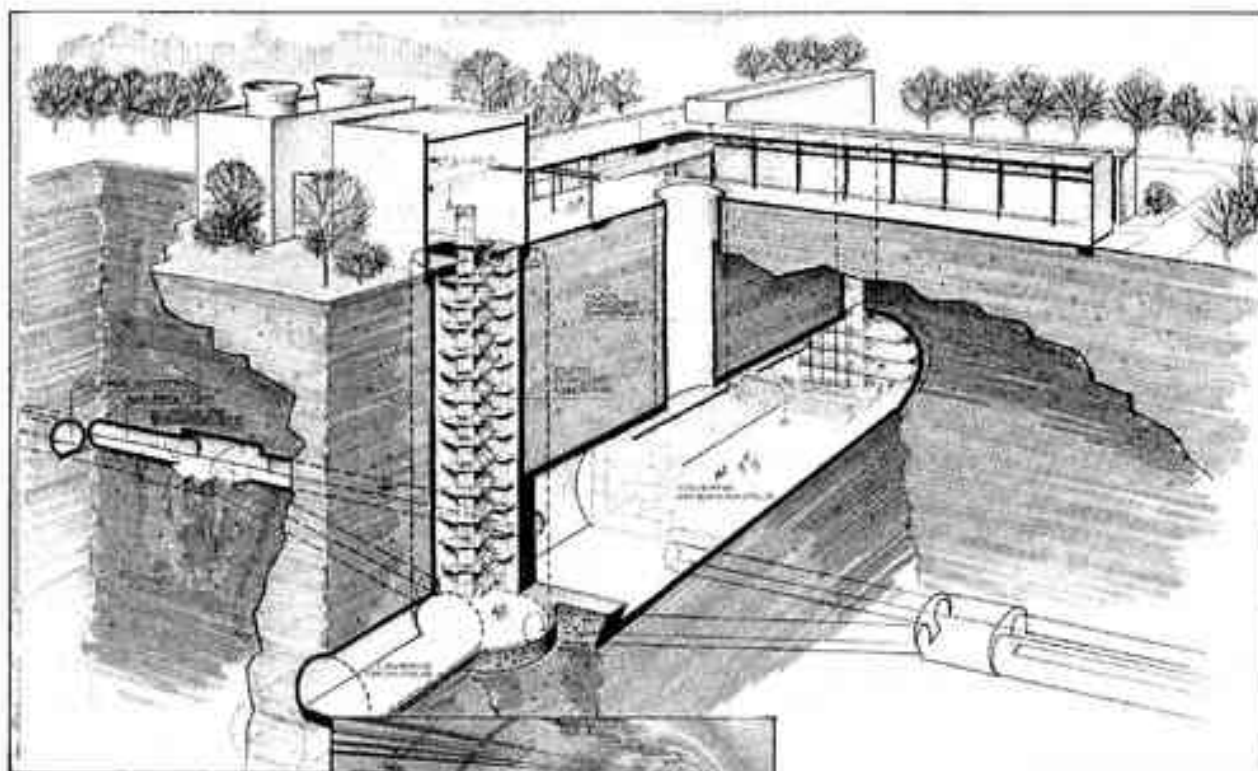
Température : la température est mesurée en degrés Kelvin. A toute température T , on peut associer l'énergie kT où k est la constante de Boltzmann ($k = 1,38 \times 10^{-23}$ J °K⁻¹). C'est pourquoi on mesure souvent en cosmologie la température en terme d'énergie, sachant que 1 MeV vaut $1,6 \times 10^{-13}$ joule, soit encore $1,16 \times 10^{10}$ K.

Rayonnement thermique : lorsque l'on chauffe un four à une température T , sa cavité, si elle est bien hermétique, abrite un "gaz de photons" (les physiciens appellent ce four "corps noir"). Ce gaz est en équilibre thermodynamique avec les parois et a la même température T . Le rayonnement associé, appelé rayonnement thermique, a un spectre caractéristique qui ne dépend que de T . Or l'Univers peut justement se concevoir comme un four à l'échelle cosmique. Il abrite encore à l'heure actuelle un rayonnement thermique de $2,7$ K, que Penzias et Wilson ont observé dans la bande radio. En outre, température T et densité n des photons sont reliées par
 $n / T^3 = 20 \text{ cm}^{-3} \times \text{K}^{-3}$.

Le retour sur terre : le développement des accélérateurs de particules

*De l'accélérateur première époque au Désértron futur :
ou comment, à l'aide de machines de plus en plus
énormes, observer des particules de plus en plus petites.*

Guy COIGNET



Des champs électriques sont utilisés pour accélérer les particules ; des champs magnétiques dévient leur trajectoire.

Dans un accélérateur, les particules acquièrent de l'énergie lors de chaque passage dans un espace où est appliqué un champ radiofréquence. Des aimants de focalisation concentrent ces particules en faisceaux intenses. Avec les champs électriques* que l'on sait actuellement réaliser (quelques dizaines de MV/m), les accélérateurs linéaires comportent une limitation en énergie liée à leur longueur. En appliquant, perpendiculaire-

* Les termes marqués d'une astérisque sont définis dans le glossaire.

▲ Vue d'artiste d'une cavité d'expérimentation (au centre) perpendiculaire au tunnel de 3m76 de diamètre du collisionneur LEP (de gauche à droite). © CERN.

◀ Un tronçon du tunnel magnétique de 7 km du super synchrotron à protons de 400 GeV. © CERN.

ment à la trajectoire des particules, un champ magnétique* dont la valeur croît en synchronisme avec leur énergie, il devient possible de les maintenir sur une orbite fermée, dans une enceinte où règne un vide poussé (10^{-10} mm de mercure). C'est sur ce principe que fonctionnent les accélérateurs circulaires, les plus courants de nos jours.

■ Guy Coignet, maître de recherche CNRS, travaille au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules (LAPP-IN2P3), BP 909, 74019 Annecy-le-Vieux Cedex. Il est engagé dans un programme d'expériences au CERN. Depuis 1982, il est le représentant français au Comité européen pour les futurs accélérateurs (ECFA).

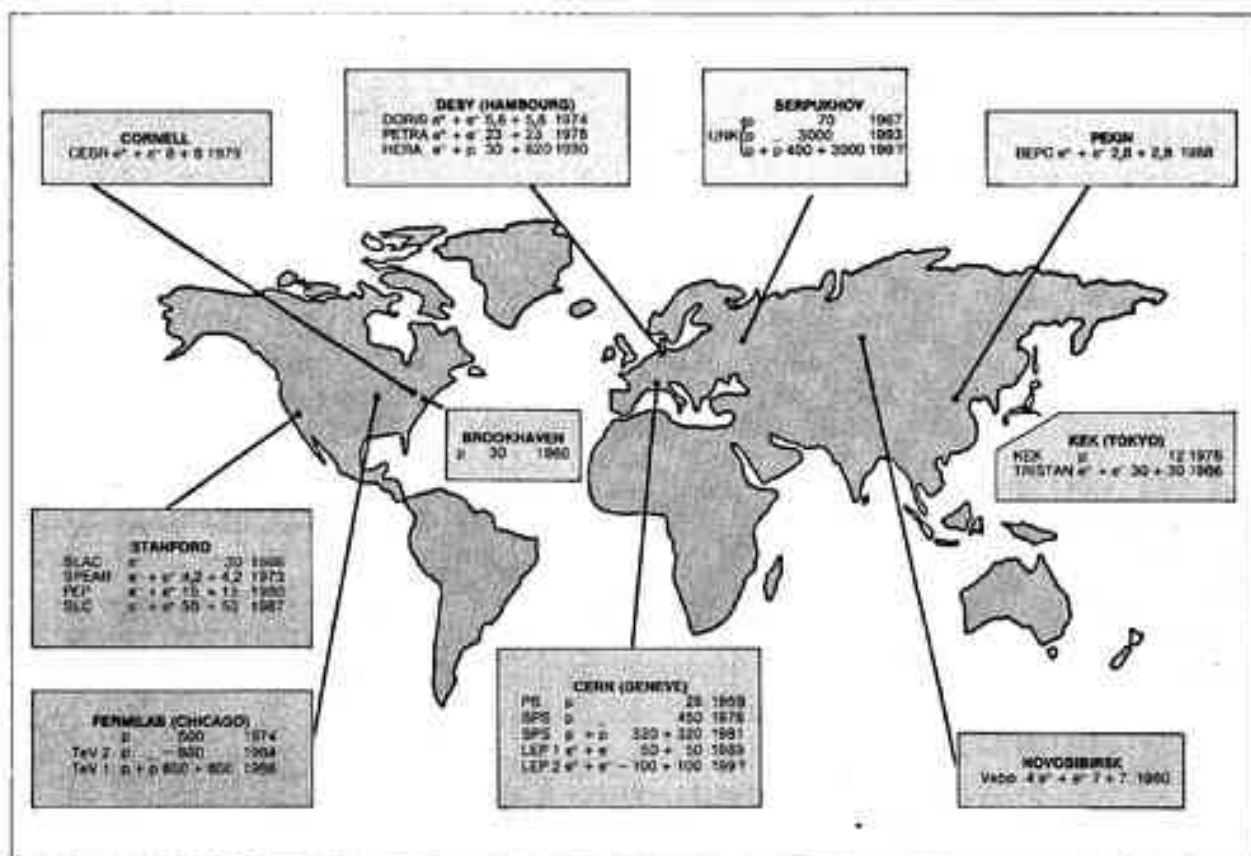


FIG. 1. Accélérateurs de particules disponibles ou en construction pour la physique des hautes énergies. Le type de particules, l'énergie en GeV de chaque faisceau ainsi que la date de mise en service ou celle prévue, sont indiqués pour chaque accélérateur. (e⁺ = électron, e⁻ = positron, p = proton, \bar{p} = antiproton.)

Sigles

SPS : Super Proton Synchrotron (CERN)
LEP : Large Electron Positron Collider (CERN)
SLAC : Stanford Linear Accelerator Center
SLC : SLAC Linear Collider (Stanford)
SNC : Superconducting Super Collider (Desertron)
LHC : Large Hadron Collider (CERN)
CESR : Cornell Electron Storage Ring
DESY : Deutsches Elektronen-Synchrotron

La situation actuelle et le proche avenir

On accélère des électrons (e) ou des protons (p) dans deux types de machines :

- les accélérateurs "à cibles fixes" dans lesquels les particules sont accélérées à une énergie E avant d'interagir avec une cible ; l'énergie utile est celle qui peut servir à créer des particules : c'est l'énergie E_{cm} dans le système du centre de masse de la particule cible et du projectile ; elle est proportionnelle à la racine carrée de E ; une énergie maximale de $E = 800$ GeV ($E_{cm} = 40$ GeV) a été obtenue avec le synchrotron à protons de Fermilab (Chicago) grâce à l'emploi d'aimants supraconducteurs ;
- les "collisionneurs" dans lesquels des paquets de particules circulent en sens opposé dans un anneau et interagissent frontalement dans des zones spécialement conçues ; l'énergie dans le centre de masse est alors égale à la somme des énergies des deux faisceaux ; la transformation du SPS du CERN en collisionneur p + \bar{p} (\bar{p} = antiproton) permet d'atteindre $E_{cm} = 640$ GeV.

La limitation des machines circulaires provient essentiellement de la perte d'énergie, émise sous forme de photons (rayonnement synchrotronique), que subit une particule chargée soumise à un champ magnétique.

La perte d'énergie par tour varie comme la quatrième puissance de E/m, où m est la masse de la particule accélérée, et comme l'inverse du rayon de l'orbite circulaire. Elle est déjà importante pour les énergies actuellement atteintes avec les électrons, particules de faible masse m. Elle justifie le choix du rayon (R = 4,25 km) du LEP. Elle explique également le développement et l'utilisation des cavités d'accélération supraconductrices qui permettront de maintenir la consommation électrique à un niveau acceptable lors de l'utilisation du LEP à $E_{cm} > 100$ GeV.

D'autre part, HERA, en construction à Hambourg, sera le premier collisionneur e⁺ + p. Ce sera également la première machine à protons de grande échelle (R = 6,3 km) réalisée avec des aimants supraconducteurs (champ magnétique de 4,5 Tesla) produits en Europe.

Enfin, le collisionneur linéaire e⁺ + e⁻ de Stanford, SLC, constitue un prototype pour les futurs collisionneurs, les paquets d'électrons et de positons devant être focalisés pour atteindre des dimensions transverses de l'ordre du micron avant la collision.

Le Désertron et le Juratron

L'étape suivante devra permettre d'étudier la région des masses voisines du TeV/c². Or, dans les collisions p + p (ou p + \bar{p}), seulement

Les accélérateurs "à cibles fixes" cèdent le pas aux "collisionneurs" de particules. L'utilisation des matériaux supraconducteurs dans les aimants et les cavités accélératrices se généralise.

Aux Etats-Unis, les physiciens étudient le projet d'un collisionneur proton-proton de 100 km ou plus de circonférence : le Déserttron. Un projet similaire consisterait en l'installation d'aimants à champs intenses dans le tunnel du LEP : le Juratron.

Les machines du début du siècle prochain imposent de nouvelles exigences. Pour relever le défi, il faut effectuer des études basées sur de nouvelles idées. Certaines nécessitent une approche pluridisciplinaire.

environ un dixième de l'énergie totale est disponible pour l'interaction entre constituants (quarks ou gluons). De plus, les processus recherchés étant supposés rares, le collisionneur devra avoir une luminosité élevée.

Ces considérations ont amené les physiciens américains à recommander l'étude du projet d'un collisionneur $p + p$ de 20 TeV + 20 TeV ayant une luminosité susceptible d'atteindre $10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, soit environ dix fois supérieure à celles obtenues précédemment.

Deux solutions basées sur des aimants supraconducteurs capables de produire des champs de 3 et 6 Teslas sont considérées. Les conférences respectives de l'accélérateur seraient de 165 et 95 km ; certains en ont déduit qu'il ne pourrait être construit que dans un désert, d'où le nom de Déserttron. Le coût de ce projet, rebaptisé SSC, est estimé à plus de trois milliards de dollars. En cas d'acceptation, il pourrait produire ses premières collisions en 1995-1996.

D'autre part, les physiciens européens ont considéré les possibilités offertes pour l'avenir par l'infrastructure du CERN. En ajoutant des aimants supraconducteurs dans le tunnel du LEP, il serait possible de construire un collisionneur $p + p$ (ou $p + \bar{p}$). Ce projet, d'abord appelé Juratron, est maintenant connu sous le sigle LHC. Le rayon de la machine étant fixé, on pourrait obtenir des collisions de 5 TeV + 5 TeV avec un champ magnétique de 5,5 Teslas ou de 9 TeV + 9 TeV avec 10 Teslas. Un groupe de travail, rassemblant des physiciens et des industriels européens, a été formé pour étudier les possibilités de produire des champs magnétiques très élevés et de réaliser les systèmes cryogéniques associés. On estime que le coût de ce projet serait bien inférieur à celui du Déserttron. Il permettrait, en outre, l'étude des interactions $e(100 \text{ GeV}) + p(5-9 \text{ TeV})$.

Vers de nouvelles techniques d'accélération

Pour produire des masses de plusieurs TeV/c², on pense qu'il faudra utiliser des collisionneurs linéaires $e^+ + e^-$ (le positon et l'électron sont des particules élémentaires) alors que, dans un collisionneur $p + p$ ou $p + \bar{p}$, l'énergie se répartit entre les constituants élémentaires. En contrepartie, la probabilité d'interaction décroissant comme le carré de l'énergie, des luminosités très élevées ($10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) seront nécessaires. Afin de relever ce défi, il faut effectuer des recherches sur les sources de particules, les sources de puissance, les systèmes de focalisation des faisceaux, les nouvelles techniques d'accélération plus efficaces et plus économiques à l'usage. En effet, l'expérience nous a montré qu'un accroissement exponentiel de l'énergie des machines avec le temps avait été obtenu en développant les technologies existantes, mais surtout en faisant appel à de nouveaux concepts plus efficaces et plus économiques que les précédents.

De nombreuses idées ont déjà été avancées. On peut les classer en deux catégories :

- celles qui n'emploient pas les lasers : par exemple, le champ électrique créé par un faisceau intense de basse énergie servirait à accélérer à haute énergie un second faisceau d'intensité plus faible ;
- celles qui emploient les lasers : les lasers, bien qu'ayant de faibles rendements, sont capables de produire de très grandes puissances instantanées et par conséquent des champs électriques très élevés. Leurs caractéristiques (durée

Glossaire

Champ électrique : il s'exprime en MV/m (million de volts par mètre) ou en GV/m (milliards de volts par mètre).

Champ magnétique : il s'exprime en Teslas (T) ;

1 Tesla = 10 kilogauss.

Luminosité L : c'est une quantité caractéristique du collisionneur, qui permet de calculer le taux d'interaction (nombre d'interactions par seconde). Elle est proportionnelle à l'intensité de chacun des faisceaux ainsi qu'à la fréquence de leurs collisions. Elle est inversement proportionnelle à la surface d'interaction des deux faisceaux. Elle s'exprime en $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Le taux d'interaction est le produit de la luminosité par la section efficace σ , exprimée en cm^2 .

— La section efficace σ : c'est une mesure de la probabilité qu'une réaction se produise. Pour une réaction donnée, σ représente la section apparente de la particule cible telle que la réaction se produise si le projectile touche cette surface σ . L'unité est le barn = 10^{-28} cm^2 et ses sous-multiples : 1 millibarn = 10^{-32} cm^2 , 1 nanobarn = 10^{-35} cm^2 .

La section efficace de la réaction (forte) proton-proton est de quelques dizaines de millibarns, celle de la réaction (faible) neutrino-nucléon de 10^{-36} cm^2 (pour des neutrinos d'une énergie de 1 GeV).

des impulsions, taux de répétition, etc.) devraient évidemment être adaptées. Par irradiation, avec un laser, de photocathodes (électrodes émettant des électrons sous l'action de la lumière), il serait possible de produire des paquets d'électrons intenses, eux-mêmes utilisés pour générer le champ accélérateur. Les champs les plus élevés (quelques dizaines de GV/m) semblent pouvoir être atteints dans les plasmas, milieux ionisés et donc exempts de chocs. Par exemple, le battiment de deux ondes (laser) électromagnétiques intenses pourrait être utilisé pour exciter une onde plasma électronique génératrice du champ accélérateur.

Ces propositions, dont la liste est incomplète, sont encore, pour la plupart, au niveau des concepts et nécessitent des études détaillées tant expérimentales que théoriques. On se rend également compte que ces études requièrent une approche pluridisciplinaire pour laquelle le CNRS a une position privilégiée. Il est important que ces recherches, afin d'être diversifiées, soient effectuées dans plusieurs centres européens, car l'avenir à long terme de la physique des particules dépend de leurs résultats. ■

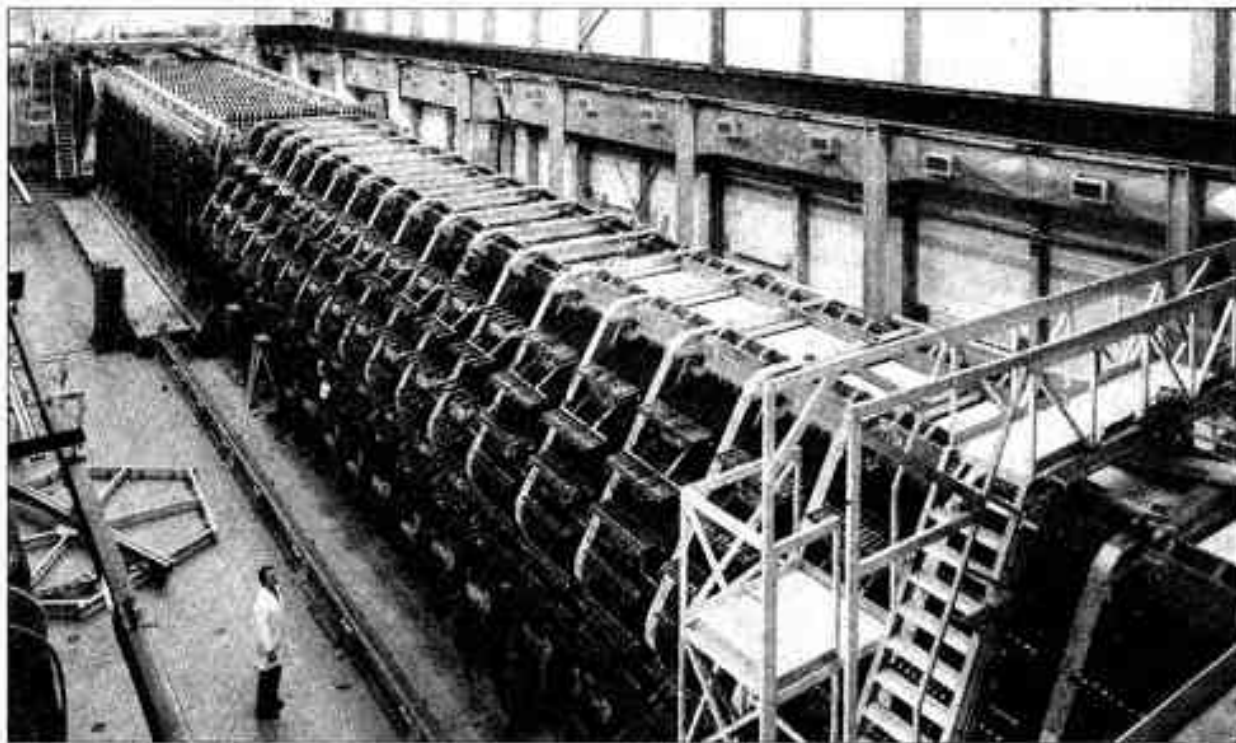
BIBLIOGRAPHIE

- Colinet (G.), "High energy accelerators: what next?". Tiré à part LAPP-EXP-84001 (et références citées dans cet article).
- The 1984 DPF summer study on the design and utilization of the SSC, Snowmass (Hites-Unis), 1984. Comptes rendus.
- Large Hadron Collider in the LEP tunnel, ECFA-CERN Workshop, ECFA 84/85 : CERN 84-10, Lausanne, 1984. Comptes rendus.
- The challenge of ultra-high energies, ECFA-RAL Meeting, ECFA 83/88, Oxford, 1982. Comptes rendus.
- The generation of high fields, CAS-ECFA-INFN Workshop, ECFA 85/91 : CERN 85-07, Frascati, 1984. Comptes rendus.

Le rôle insolite du neutrino

Le neutrino, un passe-muraille qui risque de faire s'effondrer l'Univers.

François VANNUCCI



Deux détecteurs dans le faisceau neutrino du SPS du CERN. Collaborations CDHS (CERN - Dortmund - Heidelberg - Saclay) et CHARM (CERN - Hambourg - Amsterdam - Rome - Moscou). Ces deux installations enregistrent les interactions des neutrinos avec la matière. Elles permettent d'étudier la structure du proton et du neutron, de déterminer les paramètres de la théorie électrofaible et de rechercher de nouvelles particules. Le premier détecteur (CDHS) a une masse de 1400 tonnes © CERN.

On ne sait encore si les neutrinos sont des particules avec ou sans masse.

Le monde baigne dans un véritable océan de neutrinos.

Les neutrinos (symbole ν) peuvent traverser toute la terre, et en ressortir indemnes. Cette propriété, en contradiction si flagrante avec notre intuition, leur donne un caractère un peu magique. Pourtant les physiciens ont appris à maîtriser ces particules. En fait, ces dix dernières années les neutrinos ont été utilisés de manière intensive pour vérifier le "modèle standard" et sonder la structure de la matière. On pense comprendre parfaitement leurs interactions, pourtant il reste une grande question encore en suspens : les neutrinos ont-ils une masse ?

L'invasion des neutrinos

L'existence des neutrinos fut suggérée vers 1930 par Pauli, à la suite d'arguments de nature théorique. En raison de la difficulté de

sa détection, le neutrino resta longtemps une particule "théorique" et il fallut attendre l'après-guerre pour que Reines et Cowan mettent en évidence quelques interactions dans un détecteur situé auprès d'un réacteur nucléaire. Et, pourtant, les neutrinos ne manquent pas. Ce sont, avec les photons, les particules les plus abondantes de l'univers, dix milliards de fois plus nombreuses que les protons. En effet, ils sont créés en fin de phénomènes de désintégration ou de fission, et sont *a priori* stables, donc leur nombre augmente sans cesse. Ainsi le soleil envoie sur terre quelques 10^{14} neutrinos par seconde et par m^2 , et le moindre réacteur nucléaire produit de l'ordre de 10^{19} neutrinos chaque seconde. Quant à la théorie du "Big Bang", l'explosion initiale de l'univers, elle imagine un océan de neutrinos dans l'espace qui nous environne.

Les trois neutrinos

Tous les neutrinos ne sont pas identiques. On en connaît au moins deux types, probablement trois et il en existe peut-être davantage. Il faut d'ailleurs doubler ce nombre

■ François Vannucci, professeur à l'université Paris VII, laboratoire de physique nucléaire et des hautes énergies, IN2P3 - université de Paris VI et de Paris VII, 4, place Jussieu, tour 32, 75230 Paris Cedex 05. Il est actuellement engagé dans une expérience qui cherche à mettre en évidence une éventuelle masse du neutrino.

On connaît trois espèces distinctes de neutrinos :

ν_e , ν_μ , ν_τ

Des faisceaux de neutrinos de haute énergie sont disponibles auprès des accélérateurs. Les réacteurs nucléaires sont aussi de puissantes sources de neutrinos.

Plusieurs effets nouveaux deviennent possibles si les neutrinos ont une masse. Des indications existent mais aucune n'est absolument convaincante.

Si les neutrinos avaient une masse non nulle, la masse totale de l'Univers en serait affectée, ce qui changerait complètement son devenir.

d'espèces puisqu'à chaque neutrino correspond un antineutrino. Chaque type de neutrino est associé à l'un des leptons chargés que nous connaissons : électron, muon, tau (e , μ , τ). Ainsi on aura ν_e , $\bar{\nu}_e$ et ν_μ , et $\bar{\nu}_\mu$ sera toujours produit avec e , \bar{e} , avec μ . Inversement, dans ses interactions, ν_e créera un e et non un μ , tandis que $\bar{\nu}_e$ créera un \bar{e} . Cette règle fut le résultat d'une fameuse expérience prouvant qu'il existe au moins deux neutrinos distincts : on vérifia que les neutrinos produits en même temps qu'un muon redonnent toujours un muon quand ils interagissent. Quand, en 1976, le τ fut découvert, on généralisa cette règle d'association, et très logiquement on fit l'hypothèse d'un troisième neutrino ν_τ . Ce dernier neutrino est beaucoup plus difficile à produire que ν_e ou ν_μ , et, comme il n'interagit pas davantage, il n'a pas encore été détecté mais personne ne met en doute son existence.

Les expériences neutrino

La probabilité d'interaction des neutrinos est très faible, mais elle augmente avec leur énergie. Ceci explique que la physique du neutrino soit entrée dans l'âge des mesures précises seulement depuis une dizaine d'années, grâce à l'avènement de faisceaux à la fois intenses et de haute énergie. La fabrication de neutrinos est simple dans son principe : des protons sortant d'un accélérateur sont dirigés sur une cible de matière. Leurs interactions y donnent naissance à de nombreuses particules qui très rapidement se désintègrent en émettant des neutrinos. Le problème est d'éliminer toutes les particules environnantes pour ne laisser subsister que les neutrinos. Pour ceci il suffit d'utiliser un blindage suffisamment épais que seuls les neutrinos traverseront. Par exemple, au CERN, 10^{11} protons sont projetés sur une cible toutes les 10 secondes. Les particules produites disposent de 400 m pour se désintégrer, et 400 m de blindage de fer, béton et terre, filtrent les 10^{18} neutrinos utilisables. Pour "voir" ces neutrinos, il faut ensuite des détecteurs très massifs, et dans ce faisceau sont disposés, un kilomètre après la cible, deux énormes pièges à neutrinos représentant près de 2000 t de matière instrumentée. Ainsi des dizaines de millions d'interactions ont été emmagasinées. Il s'agit ici de neutrinos du type ν_μ . Les réacteurs nucléaires sont de puissantes sources de ν_e , mais d'énergie beaucoup plus faible et la statistique mondiale d'événements est ici de quelques dizaines de milliers. Les neutrinos solaires, d'énergie encore plus basse, n'ont été détectés que dans quelques dizaines d'événements dans une expérience qui cherche à les observer depuis plus de dix ans. Quant aux neutrinos qui pourraient subsister du "Big Bang", leur énergie est si faible que personne n'a encore imaginé le moyen de les mettre en évidence.

Les neutrinos ont-ils une masse ?

Les neutrinos interagissent comme prédit par la théorie. Ils auraient dévoilé tous leurs secrets s'il ne restait celui, fondamental, de leur masse. Par simplicité, et manque de preuves contraires, les physiciens vivent avec des neutrinos sans masse. Les photons non plus n'ont pas de masse, mais si, pour les

photons, ceci est une propriété essentielle et même obligatoire, il n'y a pas de nécessité d'imposer une masse strictement nulle aux neutrinos. Dans ce domaine, il n'y a aucune prédiction ferme et les preuves expérimentales en faveur d'une masse n'existent pas encore de manière absolument convaincante. Pourtant, plusieurs phénomènes deviennent possibles dès qu'on assigne une masse non nulle : certaines désintégrations de particules ou d'atomes autrement interdites deviennent permises ; les neutrinos eux-mêmes ne sont plus stables et surtout ils "oscillent". L'oscillation est une transition directe entre un neutrino d'une espèce et un neutrino d'une autre espèce. Par exemple dans un faisceau de ν_μ , on recherche, à une certaine distance du point où les ν_μ sont créés, l'apparition de neutrinos de type ν_e ou ν_τ . Deux expériences* donnent des indications allant dans ce sens, mais elles sont limitées statistiquement et à la frontière de la compatibilité avec d'autres expériences qui ne décèlent rien d'anormal. Les deux expériences vont être prochainement répétées dans des conditions améliorées. Un autre signe de neutrino massif vient d'une mesure précise de la désintégration β du tritium. Cette expérience donne une masse de $30 \text{ eV}/c^2$ pour le neutrino ν_e . Ce résultat reste controversé et d'autres expériences s'installent pour vérifier cette conclusion extraordinaire si elle est confirmée.

Les neutrinos en cosmologie

Les neutrinos ont-ils une masse ? La réponse n'est pas encore connue des physiciens, pourtant cela ne les empêche pas d'imaginer les conséquences de neutrinos massifs, et c'est l'astrophysique qui en serait la plus affectée. En effet, les neutrinos étant présents dans l'Univers de manière tellement plus abondante que les autres particules (photons exceptés mais ceux-ci n'ont pas de masse), leur masse éventuelle, même très petite, en bouleverserait fondamentalement le bilan global. Car ils ajouteraient, à la masse de l'Univers visible, une masse invisible non négligeable et peut-être prépondérante. Et si la masse totale est sensiblement plus grande que celle mesurée jusqu'à présent, l'expansion actuelle, caractérisée par un éloignement de tous les corps de l'espace les uns par rapport aux autres, s'arrêtera un jour pour être suivie d'une phase de contraction. Dans ce scénario, l'Univers s'écroulera inéluctablement sur lui-même et tendra vers un état identique au chaos initial d'où nous sommes issus. A partir de cette nouvelle "boule de feu" pourrait recommencer une expansion et ainsi de suite, en un mouvement répété sans fin.

Le proche avenir devrait dire si les indications actuelles de neutrinos massifs se révèlent exactes. Sinon, de nouvelles expériences démarreront pour pousser plus avant la recherche, car le neutrino reste une particule énigmatique, fascinante par le lien qu'elle constitue entre l'infiniment petit et l'infiniment grand du devenir de l'Univers. ■

* L'une de ces expériences a été effectuée sous un réacteur de puissance de la centrale EDF du Bugey (Annecy, Grenoble, Manille, Collège de France et Saclay). La seconde (Paris VI et VII) s'est faite dans le faisceau neutrino de l'accélérateur PS du CERN. Elle sera répétée, avec un détecteur amélioré, auprès de l'accélérateur du laboratoire américain de Brookhaven.

A la recherche

QUAND LE MOT ET L'IMAGE S'EN PRENNENT À TADEUSZ KANTOR

Pour le Polonais Tadeusz Kantor et son théâtre de la mort, dix ans de recherches radicales sur le vivant.

Denis BABLET

*Qu'ils créent les artistes.
Le Maréchal et ses généraux morts
à Nuremberg, juin 1955.
Photo Jacques Babellet/CNRS.*

Pourquoi Tadeusz Kantor ?

Parce qu'il est à la fois le plus grand peintre et le plus grand homme de théâtre polonais d'aujourd'hui et que sa célébrité, après s'être étendue à toute l'Europe, a gagné aussi bien les États-Unis que le Japon.

En pleine guerre, il fonde à Cracovie un théâtre expérimental clandestin. En 1955, il crée le Théâtre Cricot 2 dont les comédiens sont des peintres, des écrivains, des musiciens, des journalistes, etc. Hors de l'institution, il travaille, poussé par une nécessité intérieure, ne cessant de se remettre constamment en question. Il renouvelle les rapports à l'acteur et la fonction du comédien, il brise les relations traditionnelles avec le texte. Il apparaît, à travers un théâtre violemment physique et métaphysique, comme le meilleur représentant du grotesque en notre temps.

En 1976, *La Classe morte* le rend célèbre dans le monde et depuis il joue en tous lieux : de Cracovie à New-York en passant par Buenos Aires et Tokyo.

En dépit des barrières du langage, Tadeusz Kantor touche profondément les publics les plus divers, sans doute parce qu'il est celui qui, aujourd'hui, traduit avec le plus de force les angoisses de l'homme de notre temps, face au passé, au présent incertain, à l'avenir dangereux, à travers une mythologie qui, parce qu'elle n'appartient qu'à lui, est aussi le bien de tous.

Cette année, Tadeusz Kantor a triomphé au Festival d'Avignon et au Festival d'Automne avec *Qu'ils créent les artistes*. En reconnaissance de sa valeur artistique, le Président de la République l'a fait Officier de la Légion d'honneur.

Peintre, scénographe, metteur en scène, homme de théâtre au sens complet du mot, théoricien des arts qu'il pratique. Par dessus tout, un créateur guidé par une volonté absolue de radicalisme en art, le refus de toutes les fausses avant-gardes et le désir impératif de promouvoir, loin des institutions officielles, un théâtre autonome qui ne peut vivre et s'épanouir que dans la contestation des formes admises : contestation du texte en tant que base d'interprétation, du lieu scénique en tant que support de l'illusion, du jeu du comédien réduit à n'être qu'incarnation... Rencontre du tragique et du comique débouchant sur le grotesque. Fidélité à l'avant-garde la plus radicale.

Un objet de recherche : la démarche théâtrale de Tadeusz Kantor

A la recherche de Tadeusz Kantor : une étude aux approches multiples. A travers écrits, esquisses et spectacles, pénétrer l'œuvre de Tadeusz Kantor, analyser son évolution. Le théâtre saisi en tant qu'événement vécu.

Voilà, trop schématiquement évoqués, l'artiste Tadeusz Kantor et sa démarche. J'avais fait la connaissance de l'homme Tadeusz Kantor à Cracovie, un jour de 1967. Je n'ignorais pas son importance, loin de là, mais elle ne m'était apparue qu'à travers quelques articles, des reproductions publiées ici et là, des déclarations, des dessins et des tableaux. Cette rencontre devait déclencher une décision : étudier de manière aussi rigoureuse que possible l'œuvre de Tadeusz Kantor, à travers ses écrits comme ses spectacles et le jeu complexe de l'ensemble de leurs éléments, profiter d'une sympathie mutuelle aboutissant à une amitié profonde tout en conservant la distance nécessaire à un exercice normal de l'observation, de la réflexion et de la critique. Pénétrer dans chaque spectacle, l'éprouver, le démonter, en jauger les significations, en elles-mêmes mais aussi par rapport à Tadeusz Kantor, au monde présent, aux spectateurs et à nous spectateurs privilégiés, certes, mais spectateurs tout de même. Suivre et analyser aussi une évolution, en essayant d'en déterminer les caractéristiques et les causes, les sursauts et les changements de direction, les blocages éventuels et les ruptures, les jeux du hasard et de la nécessité. Examiner enfin à travers le quotidien la pratique théâtrale dans son côté préparatoire et ses aspects événementiels entre l'éphémère et le durable. Notre recherche individuelle et collective allait prendre plusieurs orientations, se perfectionner, tout en ne quittant pas un caractère expérimental, voulu et nécessaire, la quête d'instruments adaptés, et de modes d'expression susceptibles d'assurer la meilleure formulation de ses résultats.

Interroger

Une démarche générale : interroger Kantor selon plusieurs méthodes. La publication de la première anthologie d'écrits de

■ Denis BABLET, directeur de recherche CNRS, directeur du Laboratoire de recherche sur les arts du spectacle, LP 12, 10, rue Charles V, 75004 Paris.

Tadeusz Kantor *Le Théâtre de la mort* (1), recueil de manifestes, de partitions scéniques, etc., précédés d'une introduction destinée à "faire mieux comprendre", la pratique systématique de l'interview plus ou moins directive, élargissant le champ de l'introspection kantoriennne. Interviews au magnétophone, interviews aussi au magnétoscope permettant de mieux voir et faire voir le personnage en état d'interrogation, d'attente ou de réponse. Il est significatif qu'après avoir vu le document vidéo consacré à Tadeusz Kantor peintre (2), Kantor se soit exclamé : "Tu sais, c'est passionnant au point de vue psychologique". Il parlait de lui-même et de l'apparition, sur le moniteur, de ses gestes, de ses mines, de ses réactions souples ou brutales, ironiques ou agressives. Tadeusz Kantor peintre et ses travaux apparaissent certes, mais sans la vision du personnage Kantor, les peintures, les objets, le discours auraient perdu une part considérable de leur impact.

Le recours à la vidéo, mémoire du spectacle et instrument de recherche

Si nos recherches systématiques sur Kantor ont commencé en 1972, c'est en 1976 que j'ai eu recours pour la première fois à la vidéo et, depuis cette date, cet emploi n'a pas cessé jusqu'aujourd'hui. La vidéo, nous l'avons utilisée dans plusieurs buts et selon plusieurs méthodes. D'abord pour conserver des "mémoires" de spectacles, qui permettent d'en prolonger l'observation, même indirecte, car naturellement, l'image de l'objet ne doit jamais être confondue avec l'objet lui-même. Nous procurer des documents, tournés de telle manière qu'ils nous permettent de mieux pénétrer dans les structures mêmes du spectacle, d'en mieux dégager les articulations, les thèmes théâtraux et plastiques, l'interjeu des divers éléments. Nous avons commencé par effectuer un seul tournage, mais bientôt j'ai éprouvé la nécessité de procéder à plusieurs, soit selon des choix thématiques, soit selon des choix d'angles de vue. Par exemple pour *Wielopole-Wielopole*, créé à Florence en 1980, nous avons notamment effectué un tournage de face et de près (situation d'un spectateur moyen) et un tournage de côté, au niveau de l'aire de jeu, à 3m50 du sol, d'un emplacement qu'aucun spectateur n'occupait. Cette prise de vue latérale et d'en haut perdait en effet émotionnel ce qu'elle offrait en possibilité d'analyse "objective", de démontage et de mise à plat des structures spectaculaires et notamment, géométriques, de l'espace au mouvement. Inutile d'insister sur les possibilités qu'offre encore la vidéo à la recherche : arrêt sur l'image, ralenti, passage de la couleur au noir et blanc et inversement. Le noir et blanc en épurant l'image, en ôtant la couleur, permet une analyse plus fine du jeu de l'acteur en concentrant l'attention de l'analyste sur les éléments les plus importants. Cela dit, il ne faut pas penser qu'elle

Qu'ils créent les artistes. Le petit
soldat et le vain de généraux, ses
rives de glorieux.
Photo Jacques Babel/CNRS.



Wielopole - Wielopole.
La photographie et son appareil.
Le photomètre (Théâtre, juin
1986). Photo Jacques Babel/CNRS.

Le XI^{ème} volume des *Voies de la création théâtrale*, entièrement consacré à Tadeusz Kantor, inaugure une nouvelle forme de collaboration avec l'homme de théâtre et propose quatre éclairages différents de sa démarche.

La Classe morte : nouvelle étape de la recherche sur Tadeusz Kantor et de la diffusion de ses résultats : un film qui combine, en une succession à la fois chronologique et thématique, l'enquête sur documents, l'interrogation du créateur, les extraits des spectacles, pour démontrer une démarche et la reconstruire.

élimine ou supplante la photographie et la diapositive dont l'apport nécessaire se situe sur un tout autre plan tant au niveau de la fixation du mouvement, de l'isolement, que des jeux avec la profondeur de champ. Le problème principal reste d'éviter les pièges où tombent nombre de photographes traditionnels (photos à effet, esthétique du photographe surajoutée à celle du spectacle, photos sur mouvements arrêtés, etc.) qui conduisent à une image souvent séduisante mais tout aussi trompeuse du spectacle, d'où le rôle de plus en plus important joué par une technicienne de notre laboratoire dont les prises de vue sont effectuées en fonction de nos besoins et selon une approche expérimentale multiple. La mise en commun de ces diverses démarches, de ces techniques devait permettre l'élaboration du premier volume des *Voies de la création théâtrale* consacré à un seul homme de théâtre, le volume XI étant voué à Tadeusz Kantor (3). Non pas une biographie, ni une quête d'exhaustivité, mais quatre éclairages différents et complémentaires : une introduction à Tadeusz Kantor et à son théâtre, la partition scénique de *La Classe morte* élaborée spécialement pour cet ouvrage par T. Kantor, une étude des modes de présence sur scène de T. Kantor et de leurs significations (phénomène

unique dans le théâtre moderne) et enfin une analyse du spectacle *Wielopole-Wielopole*.

Un film de théâtre, un film sur le théâtre : Le théâtre de Tadeusz Kantor

Cette démarche, cette observation de T. Kantor, l'étude sérieuse de son travail à partir d'une documentation figée ou vivante toujours plus vaste allait aboutir à une nouvelle réalisation : un film en 16 mm, couleurs, très différent dans sa conception des vidéos précédentes qui avaient pourtant préparé sa mise au point sans en définir les caractères : *Le Théâtre de Tadeusz Kantor*, co-production CNRS Audiovisuel-Arcana ministère de la Culture (4). Au départ, en 1983, pas de limites temporelles, à la fin, en 1985, un long métrage de 2 h. 24'. L'idée d'une évocation de l'œuvre de Kantor qui soit comme un dialogue indirect de T. Kantor avec ses réalisations et créations artistiques. Comme matériaux : des documents (peintures, esquisses et croquis, objets, lieux de vie et de travail, etc.), des interviews de T. Kantor, d'importants extraits de ses derniers spectacles (*La Classe morte*, *Où sont les neiges d'antan ?*,

Tadeusz Kantor, grandeur et misère du monde, au théâtre



Wielopole - Wielopole. Le viol de la mariée (Florence, juin 1989). Photo Jacques Babiet/CNRS.

Pour mieux comprendre la démarche de Tadeusz Kantor et l'éclairer, ne pas craindre d'utiliser ses propres procédés esthétiques, les éléments de sa création : répétition, déconstruction et rupture de l'illusion.

Telle semble être la vision du maître en scène polonais, Tadeusz Kantor, l'un des créateurs et des théoriciens de l'art dramatique qui ont le plus marqué notre époque. Lorsque l'on assiste à la conférence intimiste, conçue et filmée sous la direction de Denis Babiet, consacrée à Tadeusz Kantor, on se remémore le cinéma berlinois des années 20, et plus récemment, les spectacles des Souffles du Nord. Denis Babiet nous montre notamment des extraits de *La Classe morte* avec son défilé de figures de cire et de *La Lettre des sept facteurs*, l'orgue de 14 m, dédié à la communication moderne.

Dans *Le retour d'Ulysse*, la chaise de Pénélope symbolise le rôle-clé des objets dans la philosophie de Tadeusz Kantor. "L'objet pauvre, affirme-t-il dans son manifeste, est disponible pour l'art : cela montre sa valeur pour la création entre la poubelle et l'éternité."

Quant au texte littéraire, aussi important soit-il, ce n'est pas le fondement, selon T. Kantor, d'une pièce de théâtre, mais l'un des instruments de la création théâtrale, la sienne, qui ne peut s'épanouir que dans la contestation des styles et des formes en place. Déjà, le happening bouleverse le réglage traditionnel et contribue à amener le maître en scène à des actions multiformes que nous propose cette longue évocation de 2 h 12 : l'humidité cruelle du noir et blanc sombre comme le crépuscule, vide scénique pour l'espace mental et la solitude. Fondateur d'un théâtre radical, théoricien de la scénographie et de l'art, Tadeusz Kantor s'explique dans ce film de recherche de grande qualité. Un scénario et un découpage court construits autour des séquences d'interviews ainsi qu'un choix d'extraits de mises en scènes exemplaires éclairent avec bonheur l'œuvre de T. Kantor pour qui "Le concept de la vie ne peut être réintroduit en art que par absence de vie". Reste donc à réaliser un court métrage de 30 minutes.

Monique Mounier-Kuhn

Wielopole-Wielopole) et de répétitions de son tout dernier, *Qu'ils créent les artistes* ! Les documents doivent agir comme des témoignages, mais aussi des révélateurs (des rapports, par exemple, entre théâtre et peinture chez Kantor). Il faut éviter à tout prix qu'ils apparaissent figés, il est nécessaire, pour qu'ils soient mieux perçus, de susciter un rapport dialectique entre leur fixité ou leur mobilité, l'évolution de leur cadrage et mes commentaires ou les déclarations de Kantor qui leur servent de fond, de soutien ou d'explications. Les interviews : toutes prises à la même époque (en 1984, alors que les éléments du film portaient sur des périodes différentes), dans un même lieu, presque blanc comme le costume de Kantor, une esthétique de la blancheur isolante, l'isolement d'un discours à opposer au restant du film : une opposition pour une confrontation. Et durant ces interviews, de grands thèmes : le Théâtre Cricot 2, T. Kantor et la mort, T. Kantor et le Dadaïsme, l'objet, etc. Les spectacles, enfin, tournés avec des moyens très limités : pour les trois quarts avec une seule caméra, pour un quart avec deux caméras, avec en général trois prises en représentation tantôt avec public, tantôt sans. Un très beau travail de l'ensemble des techniciens de ce film. Exclure au départ toute idée d'"œuvre" cinématographique, mais si l'"œuvre" naît,

pourquoi après tout ne pas l'accepter pour autant qu'elle n'impose pas une esthétique déformante. Deux buts apparemment contradictoires : démonter l'œuvre théâtrale pour l'éclairer sans lui faire perdre, sinon son mystère, du moins la puissance de ce mystère, rendre plus apparents ses éléments structurels, ses charnières, sa construction, ses procédés, et si étrange que cela paraisse, tenter l'impossible, donner à l'image la force de présence et d'émotion que dégage la représentation, mais cela par des moyens proprement cinématographiques (angles de vue, cadrage, mouvements, montage, etc). Bref, éviter toute atteinte à la théâtralité, faire tout pour la rendre présente, et si nécessaire renforcer cette présence.

Et puis, pour mieux montrer Kantor, utiliser sans vergogne les propres éléments et démarches esthétiques de Kantor même, ou plutôt y recourir comme pièces à conviction et comme accents qui éclairent, comme lignes qui soulignent. Faire un film sur Kantor à l'image de Kantor et pas de soi, même si le soi se faufile obligatoirement. D'où l'emploi de la "répétition" (d'images et de sons), d'où celui par exemple de la rupture brutale qui brise l'illusion spectaculaire pour ramener à la parole explicative, du jeu de contrepoint et des procédés de glissement qui déplacent l'humour de Kantor là où lui-même ne l'avait pas forcément prévu mais où il joue subtilement ou sèchement. Un film de théâtre, un film sur le théâtre, voulu comme didactique, où le didactisme, ennemi du divertissement, ne peut et doit passer que par le plaisir. Tout pour augmenter la double présence de l'œuvre de Kantor à l'image et des spectateurs dans la salle afin de renforcer la compréhension intellectuelle, sensible, sensuelle d'un événement théâtral unique.

Ce travail sur Tadeusz Kantor qui se poursuivra ne pouvait pas ne pas me convaincre qu'il ne m'était plus possible de mener à bien une recherche théâtrale sérieuse sans recourir aux moyens audiovisuels, instruments d'investigation, support de l'analyse anatomique du spectacle, et moyen de divulgation pour une rencontre nouvelle avec un plus large public.

BIBLIOGRAPHIE ET FILMOGRAPHIE

- (1) *Tadeusz Kantor, Le Théâtre de la mort*, textes réunis et présentés par D. Babiet, Lausanne, L'Age d'homme, 1977. Nouvelle édition revue et mise à jour, 1985.
- (2) *Tadeusz Kantor peintre*, document vidéo de D. Babiet, image de D. Carr Brown, son de F. Didio, production du CNRS/Audiovisuel, 1982.
- (3) *Tadeusz Kantor, Les Voies de la création théâtrale*, vol. XI, textes et études de T. Kantor, D. Babiet et B. Eruli réunis et présentés par D. Babiet, Paris, Editions du CNRS, 1983.
- (4) *Le théâtre de Tadeusz Kantor*, un film conçu et réalisé par D. Babiet, 16 mm, couleurs, son optique, 2h24 mn. Co-production CNRS Audiovisuel - Arcana ministère de la Culture. Images : J. Blumberg, M. Braunstein, J. Neuman, C. Pellaud ; son : F. Didio, K. Michalski, R. Zosso ; montage : J.-C. Nicaise ; montage négatif : S. Jousse ; assistante à la réalisation : J. Babiet ; directrice de production : B. Feinberg.

LES GELS PHYSIQUES

Sous le vocable "gels physiques" se cachent certains systèmes faisant partie de notre vie quotidienne tels que le cristallin de l'œil ou la gélatine. On ne réalise pas immédiatement qu'ils ont une foule de points communs avec la fibre "haut module" de polyéthylène ou certaines fibres textiles de PVC.

Jean-Michel GUENET

L'étude de la gélification physique qui s'est longtemps cantonnée aux macromolécules biologiques, est en train de s'étendre depuis quelques années aux polymères synthétiques. Outre l'intérêt que présentent ces gels pour la recherche fondamentale, il semble d'ores et déjà qu'ils puissent conduire à des applications telles que l'élaboration de matériaux ayant des propriétés physiques originales. Avant d'aller plus loin dans cet article, il nous semble utile de rappeler ce qu'est un gel. On le définit généralement comme un réseau permanent tridimensionnel de macromolécules, gonflé par un solvant. La tridimensionnalité est obtenue par pontage entre les différentes macromolécules réalisé de deux manières : soit chimiquement par liaison covalente (gel chimique voir fig. 1a), soit physiquement par la formation de domaines ordonnés qui sont le plus souvent de nature cristalline (fig. 1b). Ceci a pour corollaire que la gélification chimique est irréversible car il est pratiquement impossible de revenir à l'état initial où les molécules étaient indépendantes les unes des autres, alors que les gels physiques sont réversibles dans la mesure où les "cristaux" peuvent être fondus puis reformés à volonté sous l'effet de cycles thermiques. L'obligation de former des microdomaines ordonnés n'entraîne pas nécessairement que seuls les polymères totalement stéréoréguliers (c'est-à-dire cristallisables) possèdent l'aptitude à gélifier physiquement. En effet, des polymères à structure irrégulière (atactiques) tels que le polychlorure de vinyle (PVC) ou le polystyrène atactique peuvent aussi donner des gels physiques. Curieusement, bien que le phénomène de gélification des polymères synthétiques soit connu depuis une vingtaine d'années, peu d'études systématiques ont été mises en œuvre. Il faut souligner que le plus souvent, ces gels se formaient intempestivement lors

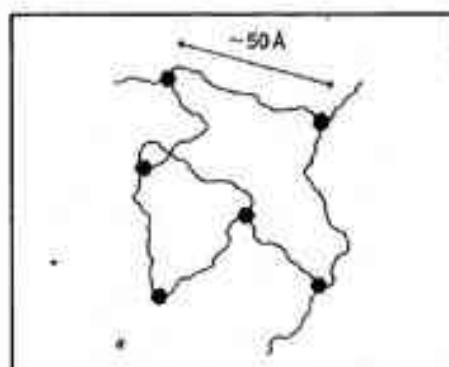
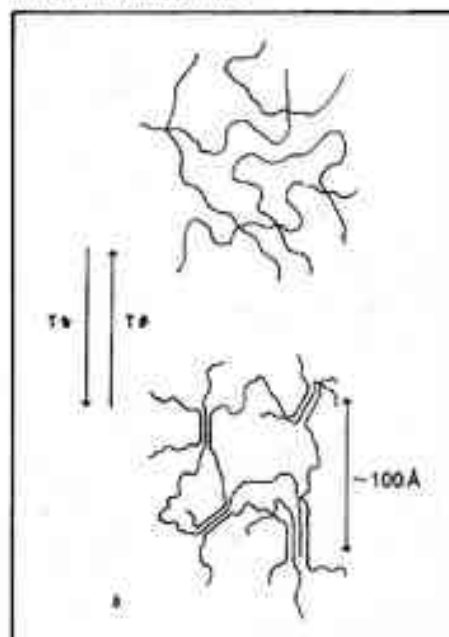


Fig. 1a. Exemple de structure d'un gel chimique. Cas où la réticulation s'effectue sur les bouts de chaînes.

Fig. 1b. Exemple de structure d'un gel physique (schéma du bas) : modèles à franges micellaires. Dans ce modèle les jonctions sont des microcristallites et la maille typique du réseau est de l'ordre de 100 Å. La gélification physique est en principe un phénomène réversible. Une élévation de température (T_0) redonne la solution initiale. Celle-ci trempée de nouveau (T_1) redonne le gel sans modification de structure.



■ Jean-Michel Guenet est chargé de recherche CNRS, Institut Charles Sadron (Centre de recherche sur les macromolécules) 6, rue Boussingault, 67083 Strasbourg Cedex

Ce travail est réalisé en collaboration avec J.C. Wittmann, H. Lotz, H. Mutin, J.S. Guo, J. François, D. Sarazin, J. Herz, X.W. He, S. Candau.

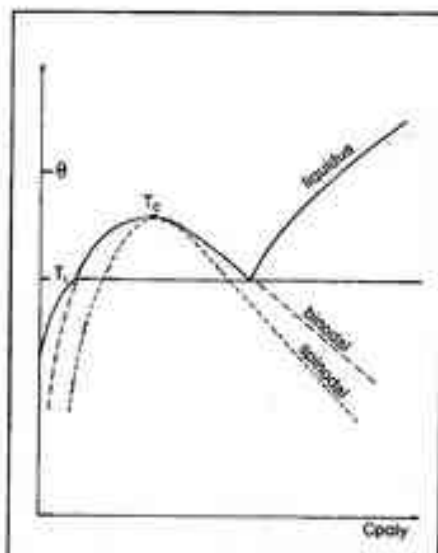
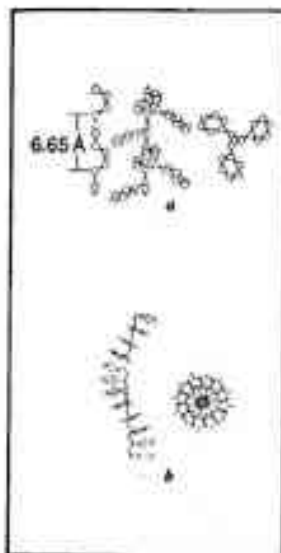


Fig. 2. Représentation simplifiée des hélices 3, (a) et 12, (b).

Fig. 1. Diagramme hypothétique température-concentration pour un polymère stéréorégulier. Le liquidus définit la ligne de cristallisation. La position de cette ligne est fortement dépendante de la vitesse de refroidissement. A vitesse infiniment lente, le liquidus se retrouve plus haut en température et ne traversera pas la cloche de démixtion. Cette cloche de démixtion est définie par deux lignes : la binodale et la spinodale. Entre la binodale et la spinodale, le système est métastable et la démixtion a lieu suivant un processus de nucléation et croissance. Sous la spinodale, le système se retrouve dans un état instable et la démixtion s'effectue selon un processus de diffusion. La structure "réseau" engendrée par décomposition spinodale laisse suggérer que la structure du gel physique provient d'un tel mécanisme. La température θ correspond à T_c pour un polymère qui aurait une masse infinie. Elle est caractéristique d'un couple donné polymère-solvant. On notera que la phase concentrée (le gel) se retrouve à une surfusion beaucoup plus grande après la séparation de phase. En conséquence, sa température de fusion sera plus élevée que sa température de formation.

d'expériences menées sur la cristallisation et de ce fait étaient considérés comme une gêne. Néanmoins, on assiste à l'heure actuelle à un regain d'intérêt pour le sujet qui se traduit par un accroissement des publications scientifiques. Il en ressort que les soucis majeurs des scientifiques sont d'élucider le ou les mécanismes de formation d'un gel, la ou les morphologies ainsi que les structures à l'échelle moléculaire. Une large gamme de polymères est ainsi étudiée.

Nous avons entrepris au Centre de recherche sur les macromolécules (CRM), une étude de la gélification physique sur plusieurs catégories de polymères :

- polymères stéréoréguliers : polystyrène isotactique ;
- polymères atactiques : PVC et polystyrène atactique ;
- copolymère séquencé : polydiméthylsiloxane-polysilphénylène ; cette dernière séquence étant cristallisable alors que la précédente ne l'est pas.

Ces trois systèmes qui constituent un ensemble représentatif devraient nous permettre de dégager quelques règles générales sur le phénomène de gélification physique des polymères synthétiques. Dans cet article, nous décrirons uniquement les deux premiers systèmes qui sont largement étudiés et pour lesquels nous commençons à avoir au CRM quelques résultats intéressants. Nous soulignerons aussi les nombreux points encore obscurs.

Polymères stéréoréguliers : cas du polystyrène isotactique

Ce sont sans doute les travaux d'une équipe de l'université de Bristol qui ont donné un nouvel essor à l'étude des gels physiques de polystyrène isotactique. Ses chercheurs ont découvert par diffraction des rayons X l'existence, dans ces gels, d'une nouvelle forme hélicoïdale de la chaîne (hélice 12, au lieu de l'hélice 3 ; voir fig.2) qui, bien que prévue par l'analyse conformationnelle, n'avait jamais été observée auparavant. De surcroît, ils ont mis en évidence une hystérésis entre la température de formation du gel et sa

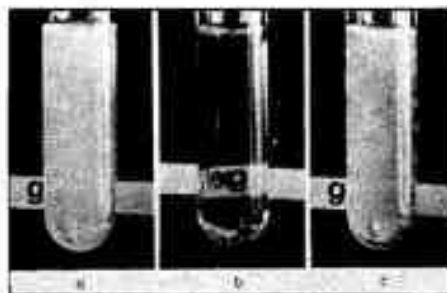
fusion. L'analyse des conditions de gélification indique qu'une solution modérément concentrée dans la décane (solvant synthétique $C_{10}H_{22}$; $C_{pol} \approx 5\%$) gélifie si elle est trempée à $0^\circ C$. Le gel ainsi obtenu présente un point de fusion vers $60^\circ C$. Cependant, si l'on trempe à $50^\circ C$ (on devrait dans un processus de cristallisation classique reformer un gel sous forme 12,) la gélification n'a pas lieu, mais au contraire on observe la croissance de cristaux à chaînes repliées (sous forme d'hélice 3,) qui eux fondent vers $120^\circ C$. La conclusion est qu'il faut tremper en-dessous d'une température T_g bien plus basse que la température de fusion du gel. Ces observations importantes que nous allons maintenant développer, prouvent que les phénomènes mis en jeu lors de la gélification sont plus complexes qu'on ne le pensait.

• **Propriétés thermiques et thermodynamiques.** Revenons aux questions posées par l'hystérèse prononcée entre la formation et la fusion du gel. Par des mesures plus systématiques, le groupe de Bristol a déterminé T_g dans la décane. Cette température est d'environ $20^\circ C$, une valeur qui revêt une grande importance pour qui connaît les propriétés des macromolécules en solution. En effet, il se trouve que la température θ du polystyrène dans la décane est du même ordre de grandeur (voir fig.3). En-dessous de $T = \theta$, il existe toujours une cloche de démixtion où la solution se sépare en deux phases, l'une riche et l'autre pauvre en polymère. De là à penser que la formation d'un gel physique provient d'une séparation de phase avant cristallisation il n'y a qu'un pas. Ce pas a été franchi par des chercheurs de la Case Western Reserve University à Cleveland qui, en utilisant des solvants où θ est différent, ont montré le même type de résultats. En conséquence, ce mécanisme semble tout à fait apte à expliquer l'existence de l'hystérèse. En effet, tant que la séparation de phase n'a pas eu lieu, la gélification est impossible. Inversement, le gel n'a aucune raison de fondre à la température où il s'est formé (voir fig.3). Il est à noter qu'un tel mécanisme avait déjà été proposé quelques années auparavant pour expliquer la gélification de l'agarose.

La découverte d'un nouveau type d'hélice dans les gels physique de polystyrène isotactique redonne de l'essor à un domaine qui aurait pu paraître sans intérêt.

Contrairement à l'opinion couramment répandue, la cristallisation d'un polymère stéréorégulier n'est pas suffisante pour entraîner la formation d'un gel physique. Une démixtion préalable semble nécessaire.

Fig. 4. a) gel formé à -25°C
b) gel ramené à
température ambiante
c) le même gel refroidi
à 0°C .



L'avantage du polystyrène isotactique tient, d'une part, dans sa cristallisation sous des formes différentes, selon qu'il gélifie ou qu'il donne des cristaux à chaînes repliées, et, d'autre part, dans la connaissance des cloches de démixtion par l'intermédiaire de son homologue atactique.

Par une autre méthode, nous avons renforcé l'existence du mécanisme "séparation de phase avant cristallisation". Nous avons remarqué qu'une solution dans la décaline trempée légèrement au-dessus du point de fusion du solvant forme un gel turbide (fig. 4a). En réchauffant à température ambiante, la structure du gel est conservée mais celui-ci devient transparent (fig. 4b). Si l'on refroidit de nouveau ce gel, la turbidité réapparaît (fig. 4c). Dans le cas de la décaline, ce processus est totalement réversible et la transition turbide-clair se produit à température fixe ($T \approx 10^{\circ}\text{C}$) qui correspond à la traversée de la binodale (voir fig. 3). En utilisant d'autres solvants θ (θ variant de 6°C à 52°C) nous avons observé que la température de transition varie dans le même sens que θ . Nous pensons que cette turbidité "réversible" correspond à une séparation de phase secondaire se produisant dans la phase diluée après que la phase concentrée ait été figée par cristallisation. Cette transition apparaît comme la signature du mécanisme de séparation de phase requis pour initier la gélification.

Cependant, si dorénavant un mécanisme général permet d'expliquer un certain nombre de points, on peut se demander pour quelles raisons le gel "cristallise" sous forme 12, au lieu de la forme habituelle 3. Dans le même ordre d'idée, pourquoi cette forme hélicoïdale n'est-elle observée que dans les gels ? Une réponse satisfaisante a été fournie par des chercheurs de Xerox au Canada. D'après eux, et nos résultats vont dans leur sens, la forme 12 ne pourrait exister qu'en incorporant du solvant, c'est-à-dire que celui-ci participerait à la maille cristalline.

Notre étude des propriétés thermiques des gels préparés dans différents solvants est tout

à fait interprétable en utilisant cette hypothèse.

Nous avons mis en évidence une différence de stabilité de l'hélice 12, selon que l'on utilise la décaline ou d'autres solvants. Dans la décaline, la forme 12 est stable dans la mesure où sa disparition coïncide exactement avec la fusion du gel. En revanche, dans les autres solvants la forme 12 est métastable et peut donc être transformée en forme en 3, avant sa fusion. Ceci se traduit entre autre par un brusque changement de la température de fusion du gel suivant la vitesse de réchauffe adoptée ($T_g \approx 90^{\circ}\text{C}$ pour une vitesse élevée, fusion de la 12, $T_g \approx 170^{\circ}\text{C}$ pour une vitesse lente, fusion de l'espèce 3). Une telle différence de comportement suivant le solvant utilisé s'explique difficilement dans le cas de cristaux non solvatés, mais devient naturelle dans le cas des cristaux solvatés. En effet, il paraît impensable d'aboutir à la même stabilité quel que soit le solvant, ne serait-ce que pour des raisons d'encombrements stériques. Notre conclusion est donc que la décaline au contraire des autres solvants, stabilise totalement la forme 12, pour des raisons qui nous échappent encore. De même, deux alternatives se présentent pour justifier la solvation de la forme 12 : ou bien la forme 12 est une hélice qui se forme plus rapidement que la 3, à basse température ; dans ce cas la séparation de phase lui apporterait le moyen d'incorporer du solvant et donc de se stabiliser ; ou bien la séparation de phase induirait la croissance de la structure 12.

Pour notre part, nous penchons plutôt pour la deuxième solution quoique nous ne possédions pas assez de preuves pour l'affirmer.

• Morphologie du gel.

Quel est l'impact de la séparation de phase sur la structure du gel ? À l'aide d'une technique d'extraction qui serait trop longue à détailler ici, nous avons réussi à examiner un gel au microscope électronique. La micrographie (fig. 5) révèle que le gel est en fait constitué de fibrilles de 400 \AA de diamètre environ avec une maille de l'ordre du micron. On est loin du modèle à franges micellaires et la morphologie observée rappelle le mécanisme de séparation de phase.

Ces quelques exemples d'études systématiques démontrent que les idées préconçues pour ce type de gel tombent les unes après les autres : cristallisation classique, cristaux classiques non solvatés et modèle à franges micellaires (voir figure 1b). Des études approfondies révéleront peut-être encore des phénomènes inattendus.

Polymères atactiques : polystyrène atactique, PVC

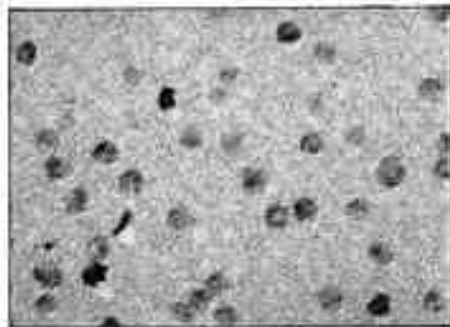
• Polystyrène atactique.

Que le polystyrène atactique forme des gels physiques, ce qui implique une certaine forme de cristallisation, est chose surprenante puisque ce polymère est normalement amorphe. Cependant, d'après les travaux d'une équipe de Cleveland, on peut préparer des gels dans une grande variété de solvants, en général à basses températures (typiquement de -100 à $+8^{\circ}\text{C}$). Le sujet prêterait certainement à controverse pendant

Le fait que l'hélice 12, ne présente pas la même stabilité selon le solvant suggère que cette forme hélicoïdale est stabilisée par incorporation de solvant.

La morphologie se révèle être une résille de maille de l'ordre de $1 \mu\text{m}$ en flagrante opposition avec l'idée préconçue d'un micelle à franges.

Fig. 5. Micrographie électronique d'un gel de polystyrène isotactique préparé dans le 1-chlorodécane (après transformation en 3). Les fibrilles correspondent à la structure du gel. Quant aux taches, ce sont des cristaux à chaînes repliées qui ont crû à partir de la phase diluée lors du traitement thermique.



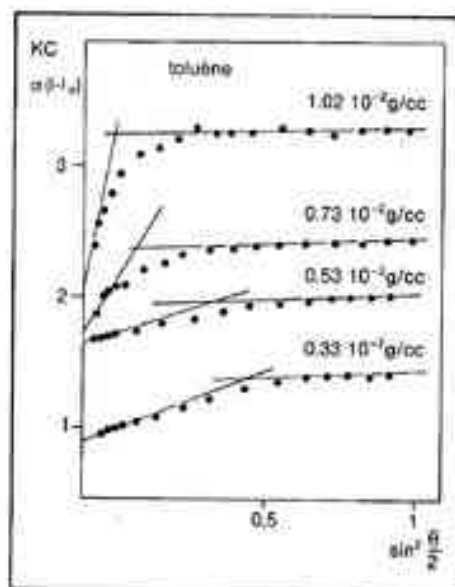


Fig. 6. Diagramme de Zimm (inverse de l'intensité diffusée en fonction du carré du sinus du demi-angle de diffusion) pour un polystyrène atactique ($M_n = 10^5$) en solution dans le toluène à des concentrations où les chaînes s'enchevêtrent (semi-diluée ou moyennement concentrée). Dans le cas d'une solution sans hétérogénéité, l'intensité diffusée devrait avoir la forme :

$$I^{-1}(\theta) \sim \left(\frac{16\pi^2}{\lambda^2} \sin^2 \frac{\theta}{2} + \zeta^{-2} \right) \text{ où } \zeta \text{ est la longueur}$$

d'écrantage du volume exclu. Expérimentalement, on devrait donc obtenir une variation linéaire.

Il semble que les polymères non-cristallins puissent quand même gélifier. La stéréorégularité ne serait donc pas une condition nécessaire pour engendrer un tel processus.

En passant par l'étape "gel physique" on pourra peut-être créer des matériaux nouveaux à partir de polymères d'usage courant utilisés depuis longtemps. Un exemple déjà existant : la fibre polyéthylène à haut-module obtenue par étirage du gel physique.

quelques années car d'aucuns prétendent qu'en fait ces gels ne sont que des solutions très visqueuses. Néanmoins, les découvertes de ces chercheurs nous ont permis de fournir une explication cohérente à un phénomène observé par diffusion de lumière qui n'avait aucune raison d'être avec des chaînes flexibles et amorphes en toutes circonstances.

Par exemple, lorsqu'une expérience de diffusion de lumière est réalisée sur une solution moyennement concentrée à température ambiante, on s'aperçoit que l'inverse de l'intensité diffusée en fonction de l'angle (fig. 6) présente deux comportements, alors qu'en théorie on ne devrait en obtenir qu'un (variation linéaire). Paradoxalement, ce phénomène est plus prononcé dans les bons solvants. A partir des travaux de Cleveland, nous avons pu montrer dans quelques cas que la diffusion anormalement élevée aux petits angles se produit pour des solvants donnant des gels alors que cet effet est absent dans les solvants où la gélification n'a pas lieu. Il semble donc y avoir corrélation entre les deux effets. Dans le cas de la diffusion de lumière, ce serait des pré-gels qui seraient responsables de l'anomalie relevée à température ambiante.

Il est bon de souligner que ces gels, contrairement aux précédents, ne proviennent pas d'un mécanisme de séparation de phase puisqu'ils se forment plutôt dans les bons solvants. Si gélification il y a, le mécanisme reste encore à élucider.

• PVC

Le PVC courant est certainement le plus atactique des polymères et pourtant il peut former des gels et ceci à température ambiante. Pour l'instant le modèle à franges

micellaires semble le mieux adapté pour décrire la structure de ces gels. A l'inverse du polystyrène atactique, il est couramment admis que la chaîne de PVC contient quelques longues séquences dites syndiotactiques (autre type de régularité de l'enchaînement) qui en cristallisant conduiraient à la formation du gel. Cependant, d'autres chercheurs pensent que la gélification est due en fait à des liaisons hydrogènes qui assurent le pontage entre chaînes. Nos propres investigations dans le domaine nous portent à penser que le mécanisme est plus complexe et que le solvant joue un rôle important.

Les gels physiques sont encore loin d'avoir dévoilé tous leurs secrets et il n'est pas déraisonnable de prédire qu'ils provoqueront un engouement grandissant parmi les chercheurs préoccupés de recherche fondamentale.

En ce qui concerne leur utilité sur le plan économique, ces systèmes ont déjà trouvé des applications dont une est particulièrement spectaculaire. Il s'agit de la fibre de polyéthylène à "haut-module". Partant d'un gel physique de polyéthylène qui est ensuite étiré, des chercheurs de DSM en Hollande ont mis au point une fibre qui possède des caractéristiques mécaniques très supérieures au Kevlar (fibre obtenue à partir d'un polymère formant au filage une texture liquide cristalline). Le module élastique de ces fibres peut atteindre 250 GPa, une valeur de l'ordre de deux fois supérieure à ce qu'on savait faire auparavant par des procédés assez coûteux. Une autre application est l'obtention de fibres de PVC par filage d'un gel physique. Ces fibres décrites comme étant triboélectriques ont un usage assez important dans la bonneterie et les textiles.

L'étape gel physique pourrait être susceptible de permettre la fabrication de matériaux à hautes performances à partir de polymères largement répandus. Le désir actuel, qui est d'améliorer les propriétés des matériaux polymères plutôt par des procédés physiques que par des manipulations chimiques, pourrait être satisfait grâce aux gels. ■

BIBLIOGRAPHIE

- Girolamo (M.), Keller (A.), Miyasaka (K.) et Overbergh (N.), *Journal of Polymer Science, Physics Edition*, 1976, n° 14, p. 39.
Wellington (S.), Shaw (J.) et Baer (E.), *Macromolecules*, 1979, n° 12, p. 932.
Sundarajan (P.R.), Tyrer (N.J.) et Blum (T.L.), *Macromolecules*, 1982, n° 15, p. 286.
Guenet (J.M.), Lotz (B.) et Wittmann (J.C.), *Macromolecules*, 1985, n° 18, p. 420.
Tan (H.), Muet (A.), Hiltner (A.) et Baer (E.), *Macromolecules*, 1983, n° 16, p. 28.
Benoit (H.), Picot (C.), *Pure appl. Chem.*, 1966, n° 12, p. 545.
Guenet (J.M.), Wilmoit (N.F.F.), Elismore (P.A.), *Polymer Communications*, 1983 n° 24, p. 230.
Yang (Y.C.) et Geil (P.H.), *Journal of macromolecular Science*, 1983, B 22, n° 3, p. 463.

BIBLIOGRAPHIE COMPLÉMENTAIRE PROPOSÉE PAR LE CDST

Le Centre de documentation scientifique et technique du CNRS propose de fournir aux lecteurs intéressés une bibliographie comportant les 100 références les plus récentes signalées dans la base de données PASCAL (voir bon de commande p. 33).

L'ÉTUDE DE L'ATMOSPHÈRE PAR RADAR ST



Antennes de type coaxial calibrées du radar ST installé à Termes d'Armagnac dans le cadre de la campagne "Fronts 1984". © I.S.E.T.

Les études de l'atmosphère à l'aide d'un nouvel instrument, le radar ST (stratosphère - troposphère) connaissent actuellement un développement rapide aussi bien en recherche fondamentale qu'en recherche appliquée. Le CNRS est associé à des travaux menés en France dans ce domaine.

Michel CROCHET

Depuis 1950, différentes techniques radar appliquées à la météorologie se sont développées et affinées jusqu'à produire des appareils sensibles à diverses cibles atmosphériques dans les nuages (gouttes d'eau, grêlons, flocons). Les derniers progrès technologiques permettent également la détection de cibles en air clair.

Construit récemment, le radar ST permet d'effectuer des mesures aussi bien dans le nuage que dans son environnement.

Alors que les études en air clair par radar ST (stratosphère - troposphère ou MST (mésosphère - stratosphère - troposphère) connaissent actuellement un essor considérable, on peut s'interroger sur les raisons de ce développement tardif quand on sait que les premiers échos (ou "anges") ont été observés en air clair dès avant la seconde guerre mondiale par des radars militaires opérant dans la gamme des ondes métriques et décimétriques. C'est en fait la recherche d'une meilleure résolution spatiale qui allait conduire peu après, à mettre en œuvre des radars à des longueurs d'onde de plus en plus courtes (successivement décimétriques, centimétriques et millimétriques) pour lesquelles les échos parasites provenaient essentiellement de particules de dimensions non négligeables devant la longueur d'onde (gouttes d'eau, grêlons, flocons de neige, insectes...). La forte amplitude de tels échos, l'intérêt des phénomènes météorologiques auxquels ils étaient associés, la disponibilité de techniques radar éprouvées par ailleurs, expliquent le fait que les études de ces cibles "dures" allaient pratiquement couvrir tout le domaine de la radarmétéorologie jusqu'au milieu des années 70 comme décrit par Battan (1973) et Sauvageot (1982), avec le développement successif de différentes techniques radar appliquées à la météorologie :

- les radars centimétriques classiques destinés à établir les cartes des précipitations (réseau Aramis en France);
- les radars centimétriques Doppler en vue de la restitution du champ de vitesse du vent dans les formations nuageuses précipitantes (radar Ronsard en France);
- les radars millimétriques Doppler pour

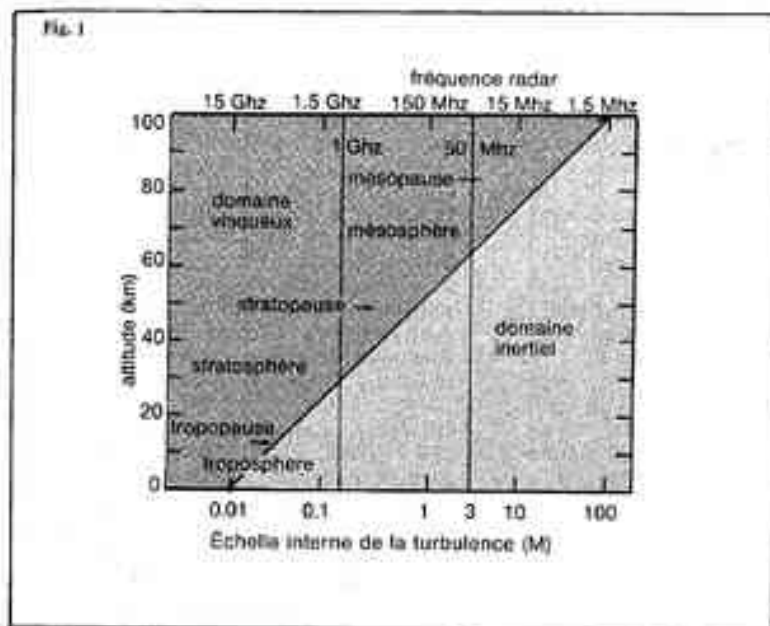
explorer les nuages non précipitants (radar Rabelais en France);

- les radars à multipolarisation en vue de l'identification des phases de l'eau dans les nuages (radar Anatol en France)

Ces diverses méthodes d'exploration qui ont en commun d'être sensibles à des cibles discrètes de dimensions non négligeables devant la longueur d'onde radar et de restituer le champ tridimensionnel des paramètres du milieu (réflectivité, vitesse du vent), nous aident à mieux comprendre un certain nombre de phénomènes météorologiques : la physique des nuages et les mécanismes de précipitation ; l'organisation des nuages dans les cyclones de moyenne latitude (ex : les bandes de pluie) impliquant des interactions entre les processus d'échelle synoptique et de moyenne échelle ; les phénomènes de convection profonde en zone tropicale. Mais, afin de mieux comprendre certains problèmes fondamentaux (origine des bandes de pluie, échanges troposphère - stratosphère, influence et origine des ondes et de la turbulence) il est maintenant nécessaire d'effectuer des mesures aussi bien dans le nuage que dans son environnement en air clair, ce que permet le radar ST.

Pour obtenir des mesures permanentes en air clair aussi bien dans la troposphère que dans la stratosphère, il est nécessaire de détecter des cibles "douces", pratiquement toujours présentes dans l'atmosphère, qui sont associées aux inhomogénéités de l'indice de l'air. Ces cibles, dont la réflectivité est particulièrement faible, vont nécessiter une nouvelle définition des paramètres des radars et des procédures d'observations. C'est ainsi que la longueur d'onde radar sera nettement plus grande que pour les radars précédents réduisant ainsi l'amplitude des échos par diffusion et l'atténuation correspondante. De plus, en vue d'accroître l'énergie des échos par intégration temporelle, les nouveaux radars exploreront une seule direction dans un mode "profilleur" unidimen-

■ Michel Crochet, professeur, laboratoire de sondages électromagnétiques de l'environnement terrestre, U.A. 705, université de Toulon et du Var, "La Gipoine", boulevard des Armaris, 83100 Toulon.

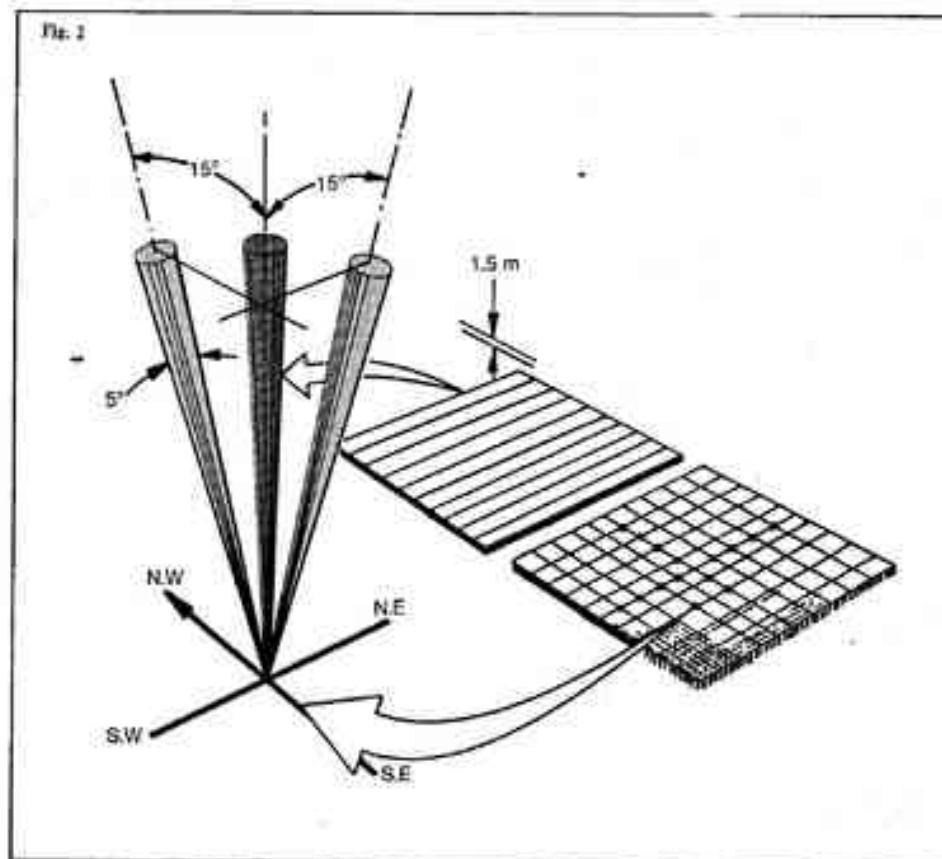


sionnel, abandonnant les champs tridimensionnels précédents; cette méthodologie était depuis longtemps utilisée par les spécialistes des études radar de l'atmosphère ionisée (100 à 500 km d'altitude), ce qui explique l'obtention des premiers résultats par le puissant radar ionosphérique de 50 MHz de Jicamarca au Pérou (Woodman et Guillen, 1974) et le fait que dans tous les pays, les ionosphéristes allaient devenir les promoteurs des ambitieux radars MST (1 à 100 km en altitude) et des plus modestes radars ST (1 à 25 km).

Principe de la mesure par radar ST

Les radars ST opèrent à des longueurs d'onde (30 cm à 7 m) supérieures à celles utilisées en radarmétéorologie classique (8 mm à 10 cm). Ces ondes sont peu atténuées par les nuages et les précipitations et les échos correspondants sont alors faibles ou inexistantes. Par contre, pour ces longueurs d'onde, il

Le radar ST opère à des longueurs d'onde (30 cm à 7 m) supérieures à celles utilisées en radarmétéorologie classique (8 mm à 10 cm).



Il permet de détecter les turbulences en air clair sur une large gamme d'altitudes, avec permanence des mesures et haute résolution temporelle.

FIG. 1. Variation de la dimension minimale de la turbulence (échelle interne) en fonction de l'altitude avec identification des trois couches (troposphère, stratosphère, mésoosphère) et de leurs frontières (tropopause, stratopause, mésopause). A chaque fréquence radar, l'échelle minimale de la turbulence associée définit sur la droite oblique l'altitude maximale que ne pourra théoriquement dépasser un radar ST ou MST opérant à la fréquence considérée.

FIG. 2. Un radar VHF opérant à 50 MHz devra utiliser des antennes de 50 m à 100 m de côté difficilement orientables. Trois réseaux d'antennes coaxiales colinéaires (ou COCO) permettront d'obtenir simultanément par déphasage trois faisceaux directs indépendants en vue de la restitution du secteur vent à l'aide de trois mesures à la verticale et dans deux directions inclinées de 15° par rapport au zénith dans deux plans orthogonaux.

est possible de détecter la turbulence en air clair sur une large gamme d'altitudes. En effet, le radar sélectionne une longueur d'onde, dans le milieu turbulent, égale à la demi-longueur d'onde radar. Pour que l'énergie rétrodiffusée soit suffisante, il est nécessaire que la longueur d'onde sélectionnée par le radar appartienne au domaine dit inertiel de la turbulence dans lequel l'énergie se transfère par cascade, des grandes vers les petites longueurs d'onde, avant de se dissiper en chaleur par frottements dans le domaine dit visqueux de la turbulence. La limite

Il est capable de faire une étude verticale des différents mouvements de l'air et il est particulièrement adapté à la mesure des ondes de gravité.

Au niveau des applications, le radar ST est destiné à mesurer le vent et les turbulences en altitude.

Au niveau de la recherche, ses applications sont plus vastes, allant de la micro-échelle à l'étude des relations troposphère-stratosphère.

entre ces deux domaines, appelée échelle interne de la turbulence, varie avec l'altitude (fig. 1) et définit la portée maximale d'un radar ST opérant à une certaine fréquence. Pour un radar opérant à 50 MHz et sélectionnant une longueur d'onde de 3 m, l'altitude maximale est d'environ 60 km (aux altitudes supérieures, des échos de nature différente liés à la présence d'électrons libres peuvent encore être détectés épisodiquement par un radar MST). Pour une fréquence de 1 GHz, la limite supérieure de la zone inertielle est nettement plus basse (de l'ordre de 25 km).

De plus, pour les plus grandes longueurs d'onde, des phénomènes de réflexion sur les gradients d'indice deviennent prépondérants en tir vertical et permettent de détecter la présence des couches stables et en particulier de la tropopause.

En vue de mesurer le vecteur vent, la méthode la plus simple est la méthode Doppler trois directions (fig. 2) utilisée dans le bas de la gamme VHF où les antennes, compte-tenu de leur superficie, sont difficilement orientables. Le vecteur vent, supposé homogène horizontalement dans l'espace exploré par les trois faisceaux, est déterminé par trois mesures de l'effet Doppler.

Le signal rétrodiffusé présente une énergie proportionnelle à l'intensité de la turbulence du milieu et un décalage de fréquence F_d proportionnel à la vitesse radiale de la cible turbulente entraînée par le vent; cette fréquence Doppler sera extraite en temps réel sur mini-ordinateur et deux traitements complémentaires seront effectués en vue d'améliorer la détection du signal:

- une sommation des échantillons cohérents en phase rendue possible pour les radars VHF par le suréchantillonnage à la fréquence de répétition;
- une sommation incohérente des spectres Doppler destinée à diminuer la variance du bruit et à améliorer la détectabilité du signal.

Moyens mis en œuvre

A l'heure actuelle, la plupart des sondeurs ionosphériques à diffusion incohérente peuvent être utilisés en radar MST (Jicamarca, Chatanika, Arecibo, Millstone Hill, Eiscat) et le sondeur français de Saint-Santin opérant à 935 MHz est en phase d'adaptation par le Centre de recherche en physique de l'environnement, pour une étude fine de la turbulence dans la moyenne atmosphère. Un certain nombre de radars VHF (40-60 MHz) sont opérationnels (Colorado, Alaska, République fédérale allemande, France) ou en cours de développement (Japon, Australie, Grande-Bretagne, etc.), soit de type MST (Alaska, Japon, Australie) ou de type ST.

En France, le radar ST 50 MHz du Laboratoire de sondage électromagnétique de l'environnement terrestre (LSEET) est destiné essentiellement à des études prospectives en physique de la mesure et à des études coordonnées en réseau de radars ST ou avec d'autres radars et

moyens météorologiques. C'est ainsi qu'en 1982, il a été intégré à un réseau de trois radars ST en Camargue avec deux radars ST de la National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA) des Etats-Unis, dans le cadre de l'expérience ALPEX (Alpine experiment) en vue de l'étude des ondes de gravité et, qu'en 1984, lors de l'expérience "Landes - Fronts 84", le radar ST 50 MHz est venu compléter la panoplie de tous les radars météorologiques français en vue de l'étude des fronts, bandes de pluie et nuages. Ce radar fonctionne également en routine en Provence (Fos et Toulon) pour explorer les vents intenses (mistral et "jet-stream") et la turbulence associée.

L'expérience acquise en France à 50 MHz et à 935 MHz devrait aboutir au développement d'un radar bifréquence aux performances accrues, actuellement en cours d'étude sous l'égide de l'Institut national des sciences de l'univers (INSU) et de la Météorologie nationale.

Domaine d'application

Les radars ST présentent des performances particulièrement originales:

- permanence des mesures (en air clair ou nuageux, avec ou sans précipitation),
- extension en altitude (≈ 500 m à ≈ 25 km),
- haute résolution temporelle (de quelques secondes à quelques minutes pour l'obtention d'un profil vertical).

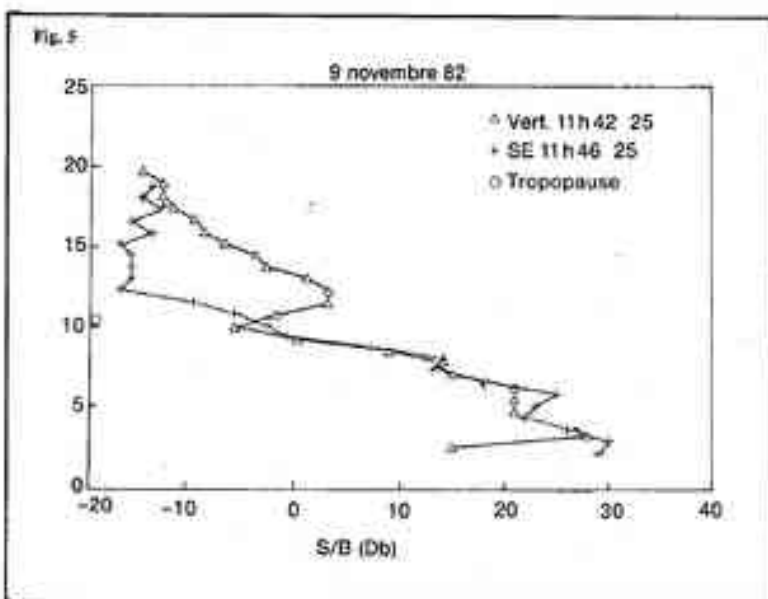
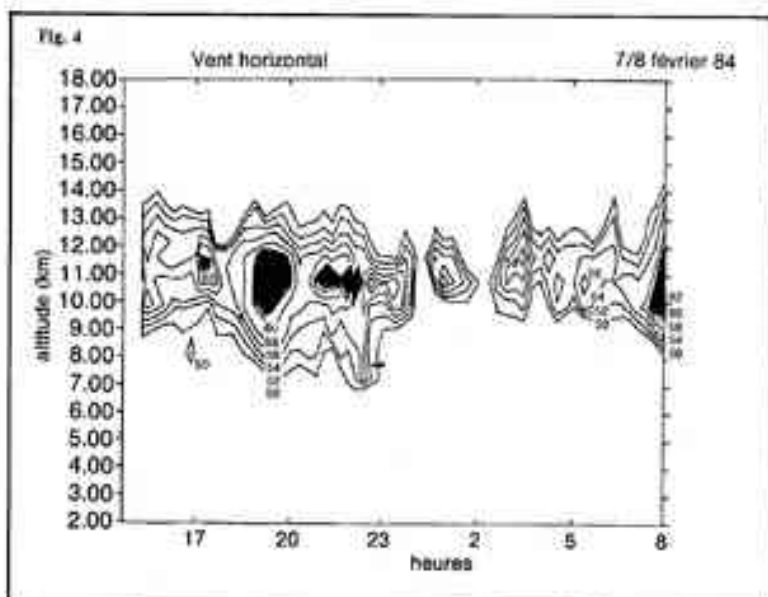
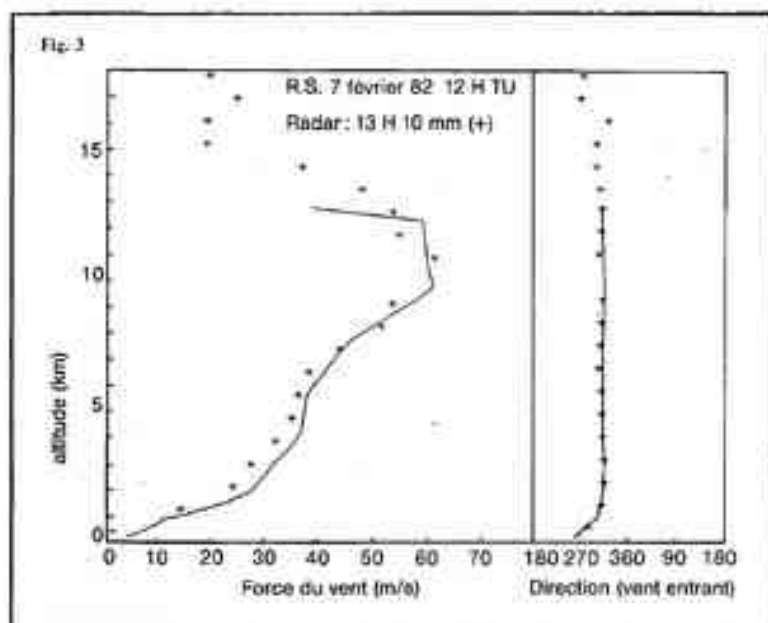
Les domaines de recherche et d'application découleront de ces performances avec lesquelles seront déterminés un certain nombre de paramètres météorologiques: la vitesse horizontale du vent, la vitesse verticale du vent (difficilement mesurable par ailleurs), la turbulence en air clair ou nuageux, la localisation des gradients et des couches stables.

La permanence des mesures sur une large gamme d'altitudes, associée à la haute résolution temporelle, va permettre:

- l'obtention des profils de vent en routine;
- l'identification des régions de forts cisaillements de vent (en particulier du "jet-stream") où la turbulence en air clair ("CAT") peut être importante pour la navigation aérienne;
- la localisation de la tropopause et de ses ruptures, importante pour les échanges stratosphère - troposphère;
- l'étude des fronts et des bandes de pluies associées;
- l'étude de la dynamique des nuages et de leur environnement en air clair;
- l'étude des ondes de gravité générées par les reliefs, les cisaillements de vent et les phénomènes convectifs.

Résultats d'observations préliminaires

Le radar ST est un instrument particulièrement bien adapté à la détermination en routine du profil vertical de la vitesse horizontale du vent et les résultats des mesures sont en excellent accord avec ceux obtenus par ballon. De plus, par vent très fort, comme au voisinage du "jet-



stream" (fig.3), le radar permet en général des mesures à plus haute altitude que le ballon qui s'éloigne alors très rapidement de la station et ne peut plus être localisé. Contrairement aux radio-sondages par ballon, généralement limités à deux, ou quatre mesures journalières, le radar ST peut effectuer des profils en continuité avec une résolution temporelle de l'ordre de quelques minutes. Il est alors possible d'identifier le "jet stream" à la verticale de la station et d'analyser les bouffées de vitesse (fig. 4) qui sont parfois associées à d'importantes perturbations météorologiques au sol.

Le radar ST est également parfaitement adapté à la mesure de la turbulence en air clair et pour les plus basses fréquences à la localisation en tir vertical de la position des couches stables (fig.5). Lors du passage d'un front, la détermination de l'altitude de la tropopause permettra d'identifier la masse d'air polaire (tropopause basse) et la masse d'air tropical (tropopause élevée) ainsi que les éventuelles ruptures de la tropopause, lieux privilégiés des échanges stratosphère-troposphère.

Le radar ST permet de déterminer localement la vitesse verticale de l'air et d'identifier les zones d'ascendance et de subsidence en air clair comme en air nuageux (fig. 6). Cette vitesse verticale est modulée par les ondes de gravité qui affectent l'atmosphère (fig.7). Par sa capacité à faire des mesures permanentes avec une haute résolution spatiale et temporelle dans la troposphère et la stratosphère, le radar ST est l'instrument idéal pour l'étude de ces ondes comme il l'a été démontré lors de l'expérience internationale ALPEX-Provence en 1982. Pour la première fois, il était possible de déterminer par corrélation croisée, à l'aide des mesures des trois radars ST, tous les paramètres des ondes de gravité (Ecklund *et al.*, 1985).

FIG. 3. Comparaison des mesures du vent horizontal obtenu par radiosondage à partir de la station de Nîmes (courbe continue) et par radar ST (croix) à partir de la station de Fos indiquant un excellent accord entre les mesures malgré une distance de l'ordre de 50 km entre les stations. Pour des conditions de vent très fortes d'environ 120 km/h à 11 km d'altitude, le ballon ne peut plus être localisé au-dessus de 12 km alors que le radar peut effectuer des mesures jusqu'à 20 km.

FIG. 4. Observation par radar en Camargue en février 1984 de conditions caractéristiques d'un puissant courant ("jet stream") au voisinage de 11 kilomètres d'altitude. Les courbes représentent les isocontours des vitesses supérieures à 50 m/s. On observe d'importantes bouffées de vitesse à plus de 60 m/s ("jet streaks") qui peuvent être associées à des conditions de mauvais temps ainsi que d'importantes variations de la vitesse reliées à de forts cisaillements du vent, souvent à l'origine d'une forte turbulence en air clair qui peut affecter la navigation aérienne.

FIG. 5. Comparaison des profils de l'énergie des signaux rétrodiffusés respectivement en vertical (—○—) et en oblique (—+—) en Camargue en novembre 1982 avec le radar ST de 50 MHz. On constate que l'énergie est plus forte en vertical qu'en oblique au-dessus de la tropopause située à environ 10 km. Cette différence est due à des phénomènes encore mal connus, souvent associés à des réflexions partielles sur de forts gradients de température. Pour les basses fréquences VHF, ce phénomène favorise les études en vertical à haute altitude avec des moyens relativement modestes comme ceux employés en Camargue. De plus, ce phénomène observable en permanence, permet de focaliser immédiatement par radar l'altitude de la tropopause au niveau de la croissance du signal en vertical.

FIG. 6. Observation par radar ST de la modulation de la vitesse verticale pendant un orage lors de l'expérience Landes - Fronts 1984.

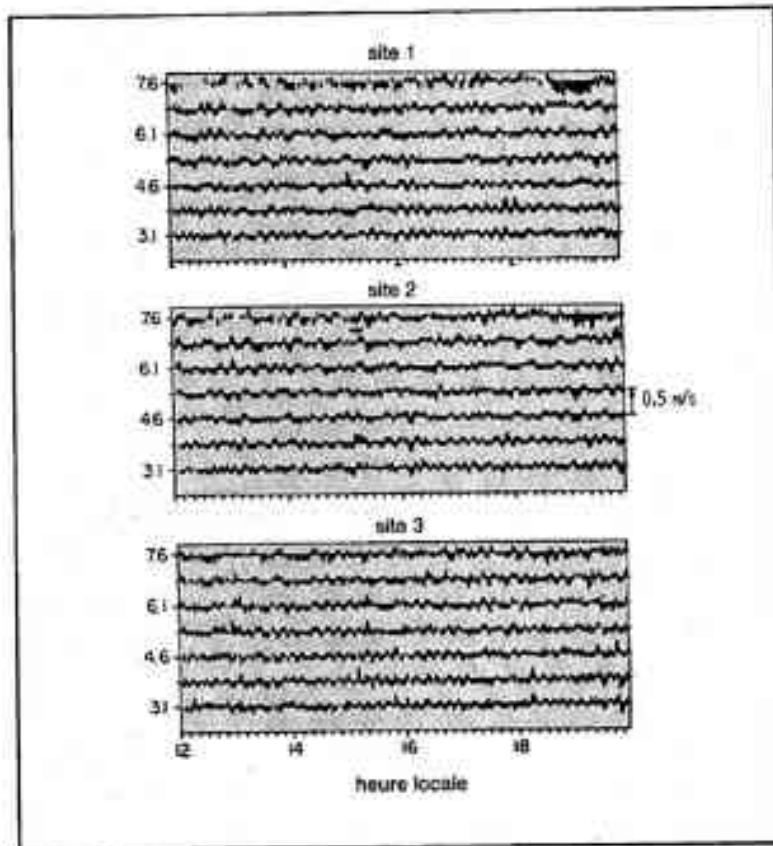
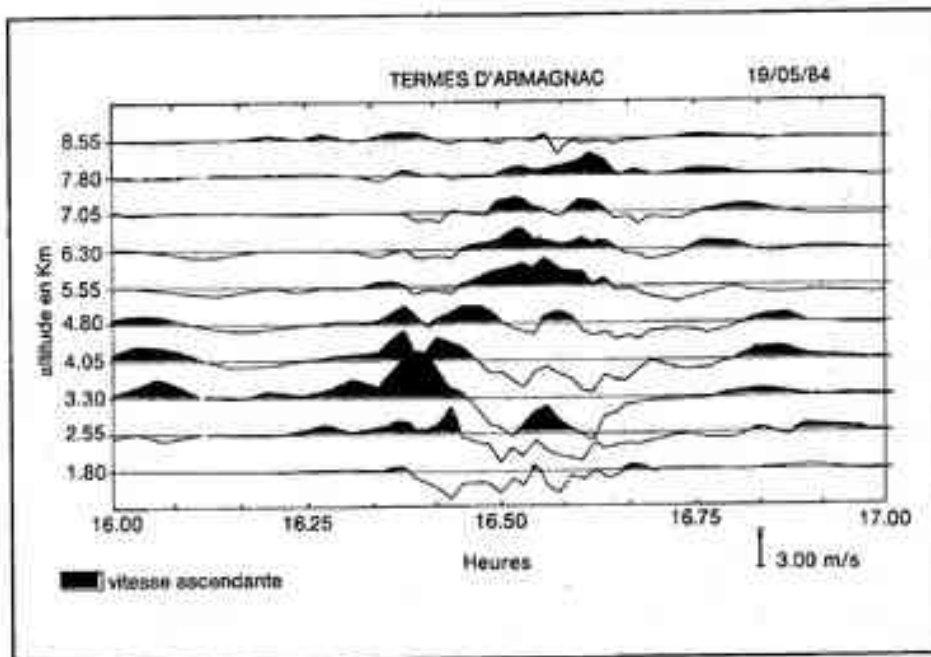


FIG. 7. Représentation d'ondes observées sur la vitesse verticale en trois stations situées au sommet d'un triangle de 5 km de côté en Camargue le 14 mai 1982 lors de l'expérience Alpex - Provence effectuée en collaboration entre le LNEET et le Laboratoire d'aéronomie de la NOAA (Boulder, Colorado, États-Unis).

Perspectives

L'exploration de l'atmosphère par radar en air clair se développe rapidement dans différents pays. Après une première phase où l'objectif principal était l'obtention de

profils des divers paramètres depuis le sol jusqu'à 100 km d'altitude avec les radars MST, le développement actuel serait plutôt orienté vers l'implantation de réseaux de radars ST, ou même de radars T (troposphère seule), en vue d'études de météorologie à moyenne échelle. Au niveau des applications, le radar ST devrait rapidement devenir un profileur de routine du vent horizontal et un moyen de localiser les conditions extrêmes du vent et de la turbulence en air clair. Au niveau de la recherche, les orientations sont multiples et peuvent s'étendre de la micro échelle, avec les études de la turbulence et des nuages, jusqu'à l'échelle synoptique, avec l'apport de mesures permanentes des vitesses tant horizontales que verticales, en passant par la moyenne échelle avec les études des fronts météorologiques, des relations troposphère-stratosphère, des vents locaux et des ondes de gravité.

BIBLIOGRAPHIE

- Battan (L.J.), *Radar observation of the Atmosphere*, The University of Chicago Press, 1973.
- Ecklund (W.L.), Balsley (B.B.), Carter (D.A.), Riddle (A.C.), Cruchet (M.), Garelli (R.), "Observations of vertical motions in the troposphere and lower stratosphere using three closely-spaced ST radars", *Radio Science* (sous presse).
- Sauvageot (H.), *Radar météorologie*, Eyrolles, 1982.
- Woodman (R.) et Gullen (A.), "Radar observations of Winds and Turbulence in the Stratosphere and Mesosphere", *Journal of Atmospheric Science*, 1974, n° 31, p. 493-505.

BIBLIOGRAPHIE

COMPLÉMENTAIRE

PROPOSÉE PAR LE CDST

Le Centre de documentation scientifique et technique du CNRS propose de fournir aux lecteurs intéressés une bibliographie comportant les 100 références les plus récentes signalées dans la base de données PASCAL (voir bon de commande p. 33).

L'INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DANS LES UNITÉS DE RECHERCHE

Qui publie, dans quel support et dans quelle langue ?

DÉPARTEMENT SCIENTIFIQUE	ARTICLES DE REVUES SCIENTIFIQUES				ACTES DE COLLOQUE	OUVRAGES LP	Ouvrages LE	NOMBRE DE PUBLICATIONS COMBINÉES
	U/R*	U/RE	U/RE	U/RE				
PHYSIQUE NUCLEAIRE ET CORPUSCULAIRE	12	5	2	18	40	0	0	4
MATHÉMATIQUES PHYSIQUES DE BASE	142	328	473	1072	1073	82	198	74
SCIENCES PHYSIQUES POUR L'INGÉNIEUR	146	151	53	903	1403	79	42	86
CHIMIE	371	838	202	2874	1288	77	37	178
TERRE, Océan, Atmosphère, Espace	816	167	171	884	1121	78	41	44
SCIENCES DE LA VIE	2283	433	393	4888	3310	327	301	240
SCIENCES DE L'HOMME ET DE LA SOCIÉTÉ	4047	627	67	484	2078	2084	160	261
TOTAL	9480	2260	1201	11723	10402	2721	813	784

Nombres de publications scientifiques parues en 1981 et 1982.

(U/R : articles en langue française dans des revues françaises)

U/RE : articles en langue française dans des revues étrangères

LE/RP : articles en langues étrangères dans des revues françaises

LE/RE : articles en langues étrangères dans des revues étrangères

Des résultats postérieurs à cette enquête montrent, qu'en sciences exactes, la langue étrangère est, dans la plupart des cas, l'anglais contrairement aux sciences humaines où la langue "étrangère" est très variée.

Plusieurs commentaires à ce tableau :

- Les physiciens (département MPB) et les chimistes publient leurs articles pour respectivement 74 % et 64 % en langues étrangères, les chercheurs en sciences physiques pour l'ingénieur et les biologistes pour 61 % ; les chercheurs en sciences de la terre publient pour à peu près la moitié (46 %) en français et les sciences de l'homme pour 87 %.

- Chimistes et physiciens publient plutôt dans des revues étrangères

(77 % et 72 %) ; en sciences physiques pour l'ingénieur et en sciences de la vie les pourcentages sont un peu inférieurs (64 et 62 %) ; les sciences de la terre choisissent des revues françaises pour la moitié de leurs publications (47 %) et les sciences de l'homme pour les trois quarts (77 %).

- 48 % des articles de sciences humaines publiés dans des revues étrangères le sont en français ainsi que 22 % des articles de chimie (qui se distingue ainsi des autres sciences exactes - environ 12 %).

- Quant aux ouvrages spécialisés, ils sont publiés à 50 % en français - si l'on exclut les sciences de l'homme (92 %) - avec un net avantage aux sciences physiques de l'ingénieur et aux sciences de la terre (65 %).

Ces résultats sont extraits d'une enquête réalisée par la direction de l'information scientifique et technique qui s'est matérialisée sous la forme d'un questionnaire joint au dossier de demande de moyens pour 1984, lié à l'examen bisannuel des unités de recherche.

Une première étape de l'enquête, réalisée en 1983 et s'attachant à décrire les activités de diffusion d'information scientifique par les unités de recherche 1981 et 1982, a déjà fait l'objet de trois rapports (*). Ces rapports permettent d'obtenir une première synthèse sur les trois axes

principaux de l'action d'information scientifique : les activités d'information menées vers le public, les actions de publication de textes scientifiques, les moyens documentaires (bibliothèques et bases documentaires) utilisés par les chercheurs de l'unité.

Ce processus d'enquête s'est poursuivi depuis avec les dossiers de demande de moyens pour 1985 et 1986. Cette fiche concernant les activités d'IST a été modifiée en fonction des résultats et des problèmes mis en avant par l'exploitation des premiers questionnaires. Il s'agit donc d'un processus d'enquête relativement lourd dont l'exploitation se poursuit actuellement.

(*)

Rapport n°1 : Bilan global du recensement de l'activité IST, effectué en juin 1983, pour chacun des sept départements scientifiques du CNRS : Physique nucléaire et corpusculaire (IN2P3), Mathématiques et physique de base, Sciences physiques pour l'ingénieur, Chimie, Terre-océan-atmosphère-espace, Sciences de la vie, Sciences de l'homme et de la société, présenté en Mai 1984 (7 derniers de 7 pages plus annexes).

Rapport n°2 : Analyse comparée de l'activité IST recensée en juin 1983, entre les six départements scientifiques : Mathématiques et physique de base, Sciences physiques pour l'ingénieur, Chimie, Terre-océan-atmosphère-espace, Sciences de la vie, Sciences de l'homme et de la société, présentée en Mai 1984 (55 pages plus annexes).

Rapport n°3 : Présentation des résultats de l'enquête DIST-1983 pour chacune des 43 sections du Comité national de la recherche scientifique (excepté les sections 01 et 02) en Novembre 1984 (153 pages).

Le département Physique nucléaire et corpusculaire ne figure pas dans les rapports 2 et 3, vu le faible taux de réponses en 1983. (Ces trois rapports peuvent être consultés à la Direction de l'information scientifique et technique, 15, quai Anatole France - 75700 Paris).

BIBLIOGRAPHIE

Colette Deschamps : "Inventaire quantitatif des publications du Centre national de la recherche scientifique : premiers résultats". Communication présentée au colloque de l'Association francophone d'amitié et de liaison (AFAL), UNESCO, 20-21 juin 1984, Paris, Actes du colloque *Le rôle international des associations de la francophonie* pages 130-137, édité par le Conseil international de la langue française - 1985.

■ Enquête réalisée par Colette Deschamps, docteur d'Etat en sciences, chargée d'études à la DIST et François Gladel, vacataire CNRS, formé à l'Institut national d'études démographiques.



© G. Meyer, AMUSS

Chercheurs-jeunes : à la rencontre

LES "JOURNÉES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES" DE SÉLESTAT (Alsace)

Une expérience de communication originale mobilise la population adulte et la jeunesse d'une ville.

Guy MEYER

La plupart du temps, les actions de diffusion scientifique et technique sont placées dans le cadre de journées "portes ouvertes" ou d'expositions, sans forcément inclure tous les "utilisateurs" des résultats de la recherche, ni essayer d'atteindre tous les types de public. Avec l'Association pour les musées des sciences de Strasbourg (AMUSS), nous avons voulu sortir des sentiers battus en organisant les "Journées scientifiques et techniques de Sélestat" (16-19 avril 1985) qui associaient étroitement les industriels à la recherche et répondaient à deux principes que nous nous étions fixés :

- organiser une manifestation dans une ville d'Alsace autre que Strasbourg, car trop souvent les actions de diffusion scientifique et technique ont lieu dans des villes qui hébergent déjà des laboratoires de recherche ;
- associer comme participants ceux qui, à divers titres, utilisent plus ou moins directement les travaux de recherche : industriels, établissements scolaires, associations de jeunes et de culture populaire, etc.

Montage de l'opération

Au cœur du projet, une entreprise, en l'occurrence la Société Alsacienne d'Aluminium (SAA). Cette entreprise située à Sélestat emploie 750 salariés. Elle fabrique des complexes d'emballage à base de feuilles d'aluminium, de films plastiques et de papier, avec ou sans impression, destinés principalement aux industries alimentaire et pharmaceutique. Cette entreprise répondait aux critères que nous nous étions fixés : une PME

■ Guy Meyer, chargé de recherche CNRS, détaché à l'AMUSS, Institut Charles Sadron (Centre de recherche sur les macromolécules - CRM - / Ecole d'application des hautes polymères - EARP -), 4, rue Boussingault, 67000 Strasbourg.

L'AMUSS

L'Association pour les musées des sciences de Strasbourg (AMUSS), créée en 1982, a comme buts la diffusion scientifique et technique sous tous ses aspects et la construction d'une Maison des sciences (du Centre culturel scientifique, technique et industriel - CCSTI) à Strasbourg. AMUSS, musée zoologique, 29 bd de la Victoire, 67000 Strasbourg.

dynamique, collaborant déjà avec des laboratoires de recherche et fabriquant des produits de haute technicité.

Une manifestation éclatée

Dans cette entreprise, un parcours avait été organisé : "Du pétrole aux complexes d'emballage". Il commençait sous un chapiteau, de 300 m² pour se terminer dans les ateliers de fabrication. Sous le chapiteau, panneaux, vitrines et expériences racontaient aux visiteurs la vie des matières plastiques, de la

molécule chimique de base à l'obtention de polymères en granules puis de produits finis (plaques, mousse, etc.). Les "expériences", plus vivantes, rassemblaient le plus de jeunes, notamment la fabrication de mousse de polyuréthane qui a remporté un grand succès (voir photo). Au cours de toutes ces expériences, les phénomènes fondamentaux étaient expliqués et les formules chimiques données.

En quittant le chapiteau, le visiteur, guidé par le personnel de l'usine, se rendait dans deux ateliers qui prenaient en charge la fabrication d'un emballage complexe et l'impression en couleurs. Au cours de cette visite, jeunes et adultes pouvaient prendre conscience du savoir technique nécessaire pour réaliser ces multiples emballages qu'on jette après usage.

Comme l'indique le schéma d'ensemble, dans toute la ville divers participants abordaient d'autres thèmes allant de la commande numérique de machines-outils au mécanisme de la pollution de l'eau, en passant par l'initiation à l'informatique pour les jeunes, les pluies acides, les jeux mathématiques sans oublier au cinéma *War games* un film de science-fiction, une certaine forme de sensibilisation aux sciences, à la technologie.

Une manière efficace de "diffuser" la science

Une campagne de publicité bien relayée par les médias avait sensibilisé la population de Sélestat et des environs et fait de ces premières journées scientifiques et techniques un succès qui nous a encouragé à renouveler l'expérience : au programme, les journées de Wissembourg, avec la participation de la société Bruker-Spectrospin (Relais culturel de Wissembourg, 15-19 janvier 1986).

À l'occasion de ces manifestations, l'usager tient à remercier la Direction du CNRS qui a bien voulu autoriser son détachement partiel à l'AMUSS.



Lieux d'implantation et thèmes de la manifestation.

Flash Actualités

LES ASTRONOMES FRANÇAIS PRÉSENTS AU RENDEZ-VOUS AVEC HALLEY

Fin août, première mondiale. Le radiotélescope de Nançay (CNRS-Institut national des sciences de l'univers) détectait la première émission en provenance de la comète de Halley. Depuis cette date, les observations radio montrent que la production gazeuse de la comète ne cesse de croître régulièrement. On envisage un taux de production de 2.10^{22} molécules par seconde, lors de son maximum d'activité. Halley se situerait parmi les comètes les plus productives et de toute façon la comète périodique la plus brillante.

Le 12 septembre, une équipe de l'Institut d'astrophysique (unité propre du CNRS - université de Liège) a observé Halley avec le grand télescope de Schmidt de l'Observatoire de Haute-Provence (unité propre du CNRS - université de Liège).

Pour la première fois, en ce qui concerne Halley, deux jets de matière issus du noyau ont été mis en évidence.

Les observations d'octobre et de novembre par cette même équipe et par d'autres équipes à l'Observatoire du Pic du Midi et de Toulouse ont confirmé les résultats radio, l'activité de la comète s'accroissant très rapidement. Milieu novembre, la magnitude de la comète se situait en-dessous de 7. Elle pouvait, dès lors, être observée à la jumelle dans de bons sites. Des astronomes américains et un astronome français au Pic du Midi ont observé à l'œil nu.

Entre le 20 et le 23 novembre, le radiotélescope de 30 mètres de diamètre de l'IRAM (Institut de Radio Astronomie Millimétrique, CNRS - Max Planck Gesellschaft), nouvellement installé au Pico Veleta (Sierra Nevada-Espagne), a détecté avec certitude la présence de la molécule HCN dans la comète de Halley. Elle sera observable jusqu'au 12 janvier en début de nuit. Après le 12 janvier, elle sera trop près du soleil pour être observable.

Une comète avec un nom français Une française découvre une comète

Le 8 novembre 1985, Jacqueline Cifredo a découvert une nouvelle comète,

proche de la comète de Halley, sur un cliché réalisé par Jean-Louis Heudier avec le télescope de Schmidt du Centre d'études et de recherches géodynamiques et astronomiques (unité associée au CNRS).

La comète Cifredo 1985 P (16^{ème} comète découverte en 1985) se trouvait à environ 165 millions de kilomètres de la Terre. Elle a probablement une trajectoire parabolique (comète non périodique).

Elle est passée au plus près du soleil le 8 octobre à 307 millions de kilomètres de celui-ci.

DES NOUVELLES DE L'OPÉRATION 1000 CLASSES - 1000 CHERCHEURS

Destinée à augmenter les échanges entre les jeunes et leur environnement scientifique, cette opération met en relation un chercheur ou un ingénieur du CNRS avec une classe du second cycle et permet aux élèves de réaliser un travail sur la recherche, avec l'aide du chercheur.

Nous avons pour cela sollicité les chercheurs : six cent vingt se sont portés volontaires pour la rentrée scolaire 1985 - c'est un très beau score.

Côté Education nationale, les recteurs ont fait en sorte que tous les lycées aient reçu la liste des chercheurs volontaires de leur région.

Aux professeurs donc de jouer le jeu : il leur suffit de composer le numéro de téléphone du chercheur qu'ils souhaitent pour leur classe.

A ce jour, de très nombreux contacts ont été pris : soixante se sont concrétisés : dix-huit à Paris et Région parisienne, sept en Alsace, neuf en Provence-Côte d'Azur, quatorze à Rouen, trois à Orléans, deux à Dijon, cinq à Nancy, deux à Besançon.

Des articles sur les rencontres classes/chercheurs paraissent dans la presse locale et mobilisent ainsi les enseignants.

Une initiative du CNRS à suivre.

Pour tous renseignements, s'adresser à Madame Kounitsky-Lloret, 15, quai Anatole-France, 75700 Paris.

Les Éditions du CNRS

Point de vue sur...

Parallélisme, communication et synchronisation

Ouvrage collectif, responsables J.-P. Verjux, G. Roucaut, 604 p., III., 200 F.

■ Cet ouvrage collectif est un recueil de réflexions théoriques sur les problèmes posés par l'exécution en parallèle d'opérations élémentaires dans les calculateurs et les réseaux informatiques.

Une première partie est consacrée à la représentation des phénomènes parallèles et à la modélisation des systèmes. On s'attache ensuite à l'analyse et à la preuve des propriétés des programmes parallèles, en utilisant comme outils les réseaux de Petri, le langage PROLOG et des résultats algébriques empruntés à la théorie des groupes.

La troisième partie aborde l'évaluation des performances (algorithmique répartie, bases de données distribuées, théorie des files d'attente). Puis viennent des études de

programmation et de langages liés à l'expression du parallélisme, dans le cadre d'une application "répartie", ou dans celui du calcul vectoriel.

Enfin, les derniers articles sont consacrés aux architectures parallèles (algorithmique systolique, interconnexions rapides, traitement d'images, noyau de systèmes distribués, réseaux locaux).

Il s'agit d'un ouvrage accessible seulement aux spécialistes, qui fait le point des travaux français sur un sujet d'actualité. Ces travaux sont le prolongement d'une action thématique programmée (ATP) du CNRS et se poursuivent au sein du groupement C3 (coopération, communication, concurrence).

A côté de son intérêt incontestable pour les informaticiens proches de C3, ce livre traite de plusieurs sujets qui pourraient avoir une plus large audience, en particulier auprès d'ingénieurs travaillant sur certaines applications de l'informatique. On regrette qu'en dehors de la préface, aucun effort n'ait été tenté pour mettre, partiellement, à leur portée, les résultats obtenus.

Jacques d'Olier

Aux origines de Paris - La genèse de la rive droite jusqu'en 1223

A. Lombard-Jourdan, 248 p., III., 150 F.

■ Les Parisiens connaissent-ils leur histoire ? En tous cas, Anne Lombard-Jourdan traite ici de l'une des phases les plus mystérieuses et les plus importantes de l'histoire de la capitale. Il est vrai qu'elle avait déjà traité le même sujet, il y a quelques années :

mais elle nous donne ici une version très améliorée de ce premier travail. Chacun sait, en effet, que la Lutèce romaine s'étendait sur les pentes de la Montagne Sainte-Geneviève, sur la rive gauche de la Seine. Que le danger des invasions germaniques et normandes ait poussé la population à se replier sur le refuge naturel de l'île de la Cité est très compréhensible. Mais pourquoi le Paris médiéval est-il avant tout centré sur la rive droite? Comment expliquer cette translation du centre urbain?



L'auteur nous rappelle d'abord que l'actuel cours de la Seine recoupe en fait le lit d'un méandre mort qui coulait plus au Nord: il en est resté une zone marécageuse, décrivant un arc de cercle, du Marais au pied de Chaillot via le bas de Montmartre (lieu du sanctuaire gaulois). Le fleuve et le méandre mort entouraient et protégeaient une zone sèche où Camulogène résista au lieutenant de César, Labiénus, en 52 avant Jésus-Christ. Cette partie de la rive droite a été occupée très anciennement, comme en témoignent les trois mégalithes qui existaient encore au Moyen Âge; l'activité du port de Grève (même au plus fort de la prospérité de Lutèce sur la rive gauche, le port est resté rive droite), l'importance des nécropoles du Bas-Empire et de l'époque mérovingienne, la fondation enfin d'églises importantes (Saint-Gervais vers la fin du IV^{ème} siècle, Sainte-Colombe, Saint-Paul et Saint-Pierre, devenu Saint-Merri, et Saint-Germain, devenu plus tard l'Auxerrois, au VII^{ème} siècle), tout cela prouve l'occupation et le dynamisme anciens du site. Lorsque les Normands viennent mettre le siège devant la Cité en 885-886 et établissent leur camp retranché autour de St-Germain (l'Auxerrois), ils se heurtent aux fortifications du bourg de Grève et au pont fortifié sur la Seine, alors que la rive gauche est complètement abandonnée. Le développement ultérieur du marché et du cimetière de la zone des Champeaux (les Halles et le cimetière des Innocents), les rivalités entre le roi et l'évêque pour s'assurer le contrôle de la dynamique ville marchande de la rive droite, sont étudiés dans les derniers chapitres d'un livre où l'auteur aura su conjuguer, avec ténacité et minutie, l'histoire et la légende, les textes et l'archéologie, pour éclairer la genèse de la plus grande ville de l'Occident médiéval.

Jean-Philippe Genet

La lecture sensorimotrice et cognitive de l'expérience spatiale - Directions et distances.

Sous la direction de Jacques Paillard, 228 p., ill., 170 F.

Evolution des systèmes de communication chez les carnivores et les primates: organisation sociale et modalités de communication.

Jean-Jacques Roeder, 80 p., ill., 70 F.

■ Ces deux livres constituent les deux premiers ouvrages d'une nouvelle collection des Editions du CNRS, intitulée "Comportements" et animée par Pierre Roubertoux. Les thèmes des ouvrages devraient correspondre aux activités de la section 30 du CNRS (psychophysiologie et psychologie) et notamment accentuer les liens qui existent entre neurosciences, éthologie et sciences cognitives. La vocation de la nouvelle collection est donc fondamentalement interdisciplinaire. C'est d'ailleurs parfaitement dans cette optique que s'inscrit le volume publié sous la direction de Jacques Paillard, volume collectif puisqu'il s'agit des actes du quatrième Forum-Espace, tenu à l'Institut de neurophysiologie et psychophysiologie de Marseille en mars 1984 et consacré au thème "Directions et distances". Ce Forum-Espace rassemblait avec bonheur des psychologues, des psychophysiologistes et des neurophysiologistes s'intéressant à l'organisation spatiale du comportement et trop nombreux pour être mentionnés individuellement. L'ensemble des communications se regroupe en quatre parties insistant plus particulièrement, dans la perspective des directions et des distances, sur la vue, le geste, la locomotion et l'orientation lointaine. L'ensemble constitue un excellent bilan de la connaissance dans ce domaine. Si le précédent ouvrage offrait un dialogue entre neurosciences et psychologie, l'ouvrage de Roeder constitue un travail exemplaire dans le domaine de l'éthologie - la science du comportement animal - et fait un bilan de la communication chez les carnivores et les primates. Ce qui fait, par rapport aux études antérieures de la communication animale, l'originalité de ce travail, c'est le fait qu'il ne se borne pas à décrire les communications, mais qu'il les intègre dans les modalités des systèmes sociaux. S'appuyant sur une importante bibliographie, l'auteur peut ainsi montrer que chez les espèces solitaires, les communications visuelles et sonores se développent au détriment des communications olfactives, alors que le contraire se produit chez les espèces grégaires. Les deux ouvrages sont, on le voit, assez différents et illustrent sans doute assez bien les diverses facettes que la collection "Comportements" pourrait offrir dans les années à venir.

puisqu'elle prévoit une parution de quatre à cinq volumes par an, et conservera une place aux monographies exceptionnelles (comme celle de Jean-Jacques Roeder) même si elle vise à privilégier les ouvrages collectifs (comme celui publié sous la direction de Jacques Paillard). Ces deux livres augurent bien de cette nouvelle collection consacrée à l'un des domaines de recherche les plus fructueux d'aujourd'hui, l'interaction entre neurosciences et comportement. Ils intéresseront, bien sûr, les chercheurs spécialistes, mais aussi un public assez vaste de psychologues et d'étudiants en psychologie et en neurosciences.

Georges Chapouthier

Vitalité de la petite pêche tropicale, pêcheur de Saint-Louis du Sénégal

Régine Bonnardel, 124 p., ill., 150 F.

■ La pêche vient au deuxième rang des exportations sénégalaises, c'est un secteur dynamique et en développement rapide. Mais le recul de la pêche piroguère et le déplacement des zones de prise a affaibli les villages traditionnels de pêcheurs (bien que ce soient eux qui fournissent l'essentiel du personnel des nouvelles pêcheries). Naguère premier centre de pêche du Sénégal, un de ces villages, Guet Ndar, est l'objet principal de l'étude de Régine Bonnardel. Les questions principales qu'elle pose et auxquelles elle s'efforce de répondre sont donc: "comment est-il possible qu'un centre de pêche si actif avant 1960 ait pu être, en moins de dix ans, à ce point marginalisé, ait sombré aussi complètement dans le marasme, perdant huit à dix mois par an le meilleur de ses forces vives? A quel prix acceptable Guet Ndar pourrait-il se réanimer et contribuer à la revitalisation de la vieille cité dont il est partie organique?". L'étude monographique de ce faubourg de pêcheurs, où l'on sent une grande sympathie du chercheur avec son objet d'étude, est donc l'occasion d'une étude détaillée des problèmes et des perspectives d'une économie en mutation. Elle débouche sur l'analyse des perspectives d'une réorganisation, respectueuse des traditions bien établies et moderne à la fois, dans le cadre de l'économie nationale et internationale. Elle peut être utile non seulement à des lecteurs sénégalais ou africanistes, mais aussi à ceux qui s'intéressent à la petite pêche et à sa réorganisation, un problème qui se pose partout dans le monde en termes comparables.

Hervé Théry

Ces ouvrages sont disponibles chez votre librairie habituelle ou à la librairie du CNRS, 295, rue Saint-Jacques - 75005 Paris - Tél (1) 43.26.56.11

**Nouveautés / juin /
juillet / août / septembre /
octobre 1985**

Nouveautés / juin / juillet / août / septembre / octobre 1985						
<i>Paroisses et communes de France</i> , dictionnaire d'histoire administrative et démographique, Charente Maritime / 17 Philippe Hercule, 632 p., ill.	200		<i>Gallia</i> , tome 42, fascicule 2, 1984 - Fouilles et monuments archéologiques en France métropolitaine, 216 p., ill.	250	<i>Fouilles de 1966-1967</i> , Roger Guéry, collection Etudes d'antiquités africaines, 452 p., ill.	470
<i>Les céphalaspides du Spitzberg</i> , Philippe Janvier, Cahiers de paléontologie, 256 p., ill.	300		<i>L'absolutisme éclairé</i> , colloques de Mâtrafured, ouvrage collectif, co-édition Akadémiai Kiadó, Budapest, 364 p.	80	<i>Atlas linguistiques de la France</i> , tome II, <i>Atlas linguistique et ethnographique de l'Alsace</i> , A. Bothorel-Witz, Marthe Philipp et Sylviane Spindler, 402 p., ill.	750
<i>Revue d'histoire des textes</i> - tomes XII-XIII/1982-1983, 420 p., ill.	450		<i>Démographie paysanne en Bas-Quercy, 1751-1872 - Familles et groupes sociaux</i> , Jean-Claude Sangot, 312 p., ill.	78	<i>Atlas linguistiques de la France</i> , volume III, <i>Atlas linguistique et ethnographique de la Lorraine romane</i> , L'homme Jean Lanher, Alain Litalze et Jean Richard, 360 p., ill.	150
<i>Recueil des inscriptions gauloises (RIG)</i> , sous la direction de Paul-Marie Duval. Volume I: <i>textes gallo-grecs</i> , Michel Lejeune, collection supplément à Gallia, 45, 476 p., ill.	480		<i>Les noms de personne sur le territoire de l'ancienne Gaule - III. Les noms de personne contenus dans les noms de lieux</i> , Mario-Thérèse Morlet, 564 p.	450	<i>Les voies de la création théâtrale</i> , volume I, J. Grotowski, E. Barba, Living Theatre, Open Theatre, V. Garcia et Arrabal (réimpression), sous la responsabilité de Jean Jacquot, collection Arts du spectacle, 348 p., ill.	150
<i>Recueil des sources arabes concernant l'Afrique occidentale du VIII^e au XVI^e siècle (Bilad al-Sudan)</i> , traduction et notes par Joseph M. Cuoq (réimpression), 536 p., ill.	350		<i>Les fibules en Gaule méridionale, de la conquête à la fin du V^e siècle après J.C.</i> , Michel Feugère, <i>Revue archéologique de Narbonnaise</i> , supplément 12, 688 p., ill.	490	<i>Carte de la végétation de la France au 200 000</i> : notice détaillée, végétation des Pyrénées, 69 Bayonne, 70 Tarbes, 71 Toulouse, 72 Carcassonne, 76 Luz, 77 Foix, 78 Perpignan, G. Dupias, 212 p., ill.	90
<i>Le personnel de l'enseignement supérieur en France aux XIX^e et XX^e siècles</i> , Christophe Charles et Régine Ferré, 284 p., ill.	120		<i>Archives parlementaires de 1792 à 1860</i> , première série (1787-1799), tome XCIV du 13 thermidor au 25 thermidor An II (31 juillet au 12 août 1794), 636 p.	460	<i>Bibliographie himane, années 1960-1970</i> , partie alphabétique de G à L/2 ^e fasc., Denise Bernot, 336 p.	60
<i>Actes du IV^e séminaire de l'école de biologie théorique</i> , Solignac, juin 1984, ouvrage collectif, sous la responsabilité de G. Bencherit et J. Demongeot, 352 p., ill.	290		<i>Gallia préhistoire</i> , tome 27, fascicule 2, 1984, <i>Fouilles et monuments archéologiques en France métropolitaine</i> , 180 p., ill.	230	<i>Contribution à la théorie générale de l'état</i> (2 tomes), R. Carré de Malberg (réimpression), 1532 p.	320
<i>Inscriptions latines de Narbonnaise - Fréjus (ILN)</i> , Jacques Gasco et Michel Janon, collection supplément à Gallia, 44, 232 p., ill.	290		<i>Paléorient 10/2</i> , 1984, <i>Revue pluridisciplinaire de préhistoire et protohistoire de l'Asie du sud-est</i> , 164 p., ill.	230	<i>Lex contradictions du sandinisme - Nicaragua</i> , Juan Diaz, Claire Pailler, Roberto Santana et Pierre Vayssière, collection Amérique latine - pays ibériques, 264 p., ill.	79
<i>Carré de Malberg et l'origine de la distinction entre souveraineté du peuple et souveraineté nationale</i> , Guillaume Bacot, 204 p.	100		<i>1789-1989 - Bicentenaire de la révolution française</i> , n° 2/juin 1985, 304 p.	40	<i>Voyages en France par les pays de faible densité</i> , ouvrage collectif sous la direction de Nicole Mathieu et Pierre Duboscq, 196 p., ill.	74
<i>La Galère - marginalisations juvéniles et collectivités locales</i> , Jean-Charles Lagrée et Paula Lew-fai, 284 p., ill.	90		<i>Comportement</i> , 2/1985 <i>Evolution des systèmes de communication chez les carnivores et les primates: organisation sociale et modalités de communication</i> , Jean-Jacques Roeder, 80 p., ill.	70	<i>Antiquités africaines</i> , tome 21/1985 et table des tomes 1 à 20, 296 p., ill.	400
<i>Catalogue des poésies françaises de la bibliothèque de l'Arsenal, 1501-1600</i> Alison Saunders et Dudley Wilson, 208 p.	120		<i>Tchad, Regards sur les élites ouaddaïennes</i> , Contributions à la connaissance des élites africaines, III, Issa Hassan Khuyat, 232 p., ill.	90	<i>Cahiers d'onomastique arabe - 1982-1984</i> , ouvrage collectif sous la responsabilité de Jacqueline Sublet, 172 p.	90
<i>Annuaire de législation française et étrangère</i> - Tome XXX/1983, 644 p.	400		<i>Archéologie médiévale</i> , tome XV/1985, 352 p., ill.	63	<i>Radio et télévision en Europe</i> , colloque, sous la direction de Charles Debbasch, 356 p.	80
<i>Le mouvement ouvrier maghrébin</i> , ouvrage collectif, collection Etudes et chroniques de l'Annuaire de l'Afrique du Nord, 336 p., ill.	90		<i>Basques et navarrais dans l'ordre de Santiago (1580-1620)</i> , Martine Lambert-Gorges collection Maison des pays ibériques, 238 p., ill.	170	<i>Summa Aurea - Guillaume d'Auxerre</i> , Liber quartus, Jean Ribailhier, collection Spicilegium bonaventurianum, co-édition CNRS/Collegii S. Bonaventurae, 578 p.	400
<i>Carte écologique du Népal - nepalganj-dallekh 1/250000</i> , Jean-François Dobromex, Damodar Prasad Joshi, Tirtha bahadur Shrestha et Françoise Vigny, collection Cahiers népalais, document n. 12, 16 p., ill.	100		<i>Revue archéologique de l'Est et du Centre-Est</i> , tome XXXVI, fasc. 1 et 2, 160 p., ill.	100	<i>Bibliographie annuelle de l'histoire de France - Du V^e siècle à 1958</i> , année 1984, Colette Albert-Samuel, 980 p.	450
			<i>Code pour l'analyse des formes de poteries</i> , Jean-Claude Gardin, avec la collaboration de Jean Chevalier, Jacques Christophe et Marie-Rose Salomé (Réimpression), 120 p., ill.	75		
			<i>La nécropole orientale de Sittif (Sétif, Algérie)</i>			

