### 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 06/12/2025 sur la plate-forme EMAN : <a href="https://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/155">https://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/155</a>

### **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 pages 60 Notice créée par Valérie Burgos Notice créée le 05/10/2023 Dernière modification le 11/12/2024



 $Fichier\ is su\ d'une\ page\ EMAN: \underline{http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/155?context=pdf$ 

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 influer 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 libèrer des hommes dont la libre expression est le garant de la nôtre.

Aujourd'hui, l'espoir est vil 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 : profésseur 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 : Goery 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 Barbault, Jean Bourdon, Georges Chapouthier, Bernard Dormy, Claire Dupay, Max Fontet, Catherine Fucha, Jean-Philippe Genet, James Hieblot, Louis Jauneau, Claudine Laurent, Jean Loca, Jacqueline Mirabel, Jean Montuelle, Janine Bondost, Dominique Simonnet, Hervé Thèry, Maryvonne Tissier.

Membres correspondents: Nadine Chalem-Goussin, Gérard Litamand, Jean Chouty.

Numero 63: 19 F.

Abonnement et vente au numéro. En 1986, le numéro: 20 F. Abonnement annuel ; 74 F. 34 F pour l'étranger soir bulletin d'abonnement pages 31-34 pour l'annex 1988). Tout changement d'édresse duit être signalit à la rédaction. Revue bimestrielle comportant cinq numéros par an Nous remarcions les auteurs et les organismes qui cel participe à la rédaction. Les intertures et les chapsaus introductifs ent été rédigos par la rédaction. Les textes et illustrations peuvent être répréduits sous réserve de l'autérisation du directeur de la publication. Direction artistique: ODT/J. Galodit, 12-14, Rond-Point des Champs Elysees, 75008 Faris. Realisation: Boto-France impression, boutevard de Beautourg: Emerateville, 77203 Forty.

C.P.A.D. 203 - 258N - 2-222-03770-0-185N 0153-985 X.

C. Centre national de la recherche scientifique.

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

## LE COURRIER DU CNRS

Dette. filege gratique Donet we creftiyet distiment 19 a received to the foreasse. - Street-wette Tel : 01 69 82 39 17





Pare I de converture

Un arc de l'anneau du super synchrotron du CERN sur un fond étailé : la nébuleuse de la Rosette.

© CERN I © CNRS photo OHF.

### Page 4 de converture

Wiclopolo - Wiclopolo, Le retour du déporté. (Tadeusz Kanter, Florence, juin 1980). Photo Jacquie 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 Nº 63

- 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 Mounier-Kuhn

### 13 Débats et positions Où va la physique des particules?

- Présentation Pierre Lehmann
- Introduction à la physique des particules : la matière et les forces Louis Janneau
- IR Le modèle standard des particules élémentaires, ses succès et ses lacunes Pierre Darriulat
- 23 Le bouillonnement des idées théoriques : vers une unification de toutes les interactions Pierre Fayet
- La réponse des expérimentaleurs Michel Davier
- 36 La physique des particules interroge l'Univers Pierre Salati
- ...41 Le retour sur terre : le développement des accélérateurs de particules Guy Coignet
- 44 Le rôle insolite du neutrino François Vannucci

### 46 A la recherche

- Quand le mot et l'image s'en prennent à Tadeusz Kantor Denis Bablet
- Les gels physiques Jean-Michel Guenet
- 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 Nº 63



5 Editorial

Pierre Papon

7 Decoration

Piotr Slonimski, CNRS Gold Medal 1985.

8 Dialogue

At the Cité, scientific culture is accessible to all

Interview with Maurice Lèvy, president of the Cité des Sciences et de l'Industrie de La Villette (La Villette Centre for Science and Industry). Monique Mounier-Kuhn

- 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 mecanisms? 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 fallings.

Is the standard model of particle physics an "open-Sesame" to the doors of the Universe? Pierre Darriulat

23 The multitude of theoretical ideas: towards an unification of all interactions

When space acquires new dimensions...
Pierre Fayet

29 The experimentors' reply

Experimentors, 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

particle accelerators

From the first accelerator to the future
Désertron 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 Vannueci

- 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 triboelectric 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.
- 59 Inquiry

Michel Crochet

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 Sélestat (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 Genes, Jacques d'Olier, Hervé Théry

Bibliography

### Editorial



our 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 demière 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 permettent 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 Hawaii par

Cependant au cours des années quatre-vingts la conscience de nouvelles solidantés 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

Mais il a fallu faire plus et mieux. Plus, car dans le contexte actuel de compétition internationale, l'instauration d'un véritable espace européan 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 récueillir 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 our; 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 quir tente d'insuffer le projet EUREKA.

Le CNRS est présent dans tous ces projets. Qu'il s'apisse 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'asscroître 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 voiet. international des projets de recherche mis en œuvre par les laboratoires du CNRS, ou inoter à la création de réseaux ;
- multiplication et financement spécifique de Programmes internationaux de coopération scientifique (PICS) de grande ampleur mottant 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 marifester 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 désormals 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 vigillance 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 socteurs 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 corrélées. Une coopération entre organismos 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 ministérialle de Hanovre en novembre 1985.



Système d'irrigation des terres cultinées à Sheudi un Noudan (l'eau provient du NiU, © CNRS - Photo Miller/Rivière.

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'aigit 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 situatient, souvent, beaucoup plus en avail.

En outre, la mise en œuvre d'une politique globale au niveau de l'ensemble de l'organisme se révétait très délicate tant sont diverses, à ce niveau, les approches de chacun des départements qui le composent. Coox a conduit notre Centre à agir dans trois directions ; D'abord rechercher, face aux problèmes du développement, en quei 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 détaut 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 contribuerent 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 (TINSERM, l'ORSTOM, etc.) et des organisations non gouvernementales - la CIMADE (service recuménique d'entraide), le Comité catholique contre la fairn 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 fiaison 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 elleméme 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 procéde 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 internationaex de coopération scentifique (PSCS), 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 aigué 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.

è 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 mitochandries 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 mosasque des genes, · 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 bactèries. 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 on rendu possibles les spectaculaires developpements de notre connaissance du vivant, au cours de ces quarante dernières années. Dans un premier temps, Piotr Slonintski 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 cametérise cette mutation, résulte d'un défaut de synthèse de toute une série d'enzymes de la chaîne respiratoire normalement liés aux mitochendries. 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 récombinaison 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 gênes chromosomiques

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 queiques-uns des genes 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 functionnelles 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 -

protéines spécifiques l'épissage de l'ARN messager d'un ou de plusieurs gènes, c'est-à-dire l'élimination des séquences interculnires et réunion des différents segments transcrits: P. Slonimski appelle ces protéines les ARN maturases. Au même moment, et par une approche differente, plusieurs laboratoires arrivent à la même conclusion en étudient des gênes 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 sequençage du gène du "cytochrome b". Mais l'ARN maturase de ce gêne 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 gênes du noyau (plusieurs centaines de génes seraient concernés) synthétisées dans le cytoplasme puis transportées dans

serait de réguler par l'intermédiaire des

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: differenciation cellulaire, développement et morphogénèse, organisation et expression du génôme, 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.

l'organite. En étudiant une dizaine

P. Slonimski apporte une contribution

essentielle à l'étude des relations et des

compartiments d'une cellule eucaryote,

d'entre eux, le laboratoire de

interactions entre les différents

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



Maurice Lévy, Président de la Cité de 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, & Columbia et au CALTECH; if 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 abserve, au bénéfice du gouvernement et de la communauté scientifique de son pays, ce qui se fait dans la recherche et la technologie améri-

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, compé-tence, 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 - Eles-vous un président heureux, au cœur de cette Cité des sciences et de l'industrie que l'on ve 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

### 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 carcusse d'une salle des ventes de la viande... Parler de "Palais" dans de telles conditions aurait

eté 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 nient 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 devantage 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

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 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'appêtit 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 positioncharnière, 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. l'espère aussi que la présentation très originale de la science et de l'industrie, proposée ici, à La Villette, fera tache d'huile, et que la Cité aura un grand rayonnement en France, en Europe et

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

dans le monde.

M.L. - Notre vocation n'est pas parisionne. Les besoins dont je parle, la sensibilisation nécessaire, et souhaitée, du public, à cette nouvelle révolutionscientifique, 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 regionale 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 françuise, à Paris et dans toutes les régions. Nous faisons partie d'un ensemble, l'Europe, et cette évolution scientifique et technique dent 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'inno-

Nous avons refuse la division par disciplines: mathématiques, physique, chimie, biologie, qui dressent des barrières. Mieux vaut partie 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 socioéconomique.

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 cucher 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 comvenzon entre le Centre national de la rocherche acionatique et sa CAR des experces et de l'industria de La Villetta a les signes le 21 sont 1995, per Monsieur Maurice Layy président du la CRB d'Ammieur Papen, crecteur paneral du CRBS.
Cet accord-castre prévoit entre les deux établissements une cooperation et une coordination dans plusieurs comeines enformation accentifique et technique.

• récherché en histoire des brences, des techniques et des industries.

Parmi les modalisés prévues ligurent notamment:

notamment;

« les échanges de personnels par des mises à disposition;

« les prestations matérialles et les prestations intellectuelles pour la conception et la réalisation d'expositions de maquettes de documents sudiorisuels, le fatrication et la commenciamente de lavres prochures, casserbes, cartes position, jous et autres produits de vulgarisation scientifique.

Forgenisation d'ections de tormition :
 Fexecution des contrats de récherche, la

le muse en commun des programmes de recherche par la crisation d'unites mistes de recherche CNRS-CSI. Le Consté de coordination CNRS-CSI aboute l'orientation, la coordination et le suive dus religions patre les deux organismus et térinit les domaines programmes et térinit les domaines programmes et térinit les domaines programmes.

Lin contrat a été gasse entre la Cité des solonoss et de l'Industrie et l'Atélier d'auptoration de Meudon-Bellevue, créé per le Direction de l'Information solon-trique et technique.

L'Alekes d'exploration se voit sinsi contier le sont de conceveir et de rénitor des maquetles inferentiers et des toimais maquetles d'infermation et d'arrivation rotanment pour les trièmes "Manipoinnie sumière" et Percevoir et agé Une collaboration est enjagée dans le domaine des réstautions du CNRS-Audonauel et dans celes de la protothèque Plusieurs contrats ont égitlement été aignés entre la Cité et des libonatoires du CNRS

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

M.L. – Pour deux ruisons. 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 sensihilité visuelle, c'est l'an. Il faut rendre la science attrayante, frapper l'imagination des visiteurs en leur montrant que la science peut être helle, 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 codomaine, 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 eut été anormal d'ignorer ces activités

M. M.-K. – On s'intéresse beaucoup actuellement à la llaison entre l'art et la science. Mais la littérature ne sert guère la cause scientilique. Peut-oil solliciter davantage les lettres au

bénéfice des sciences?

artistiques, de les côtoyer seulement.

Nous tenons au contraire à réussir in

situ cette union de l'art et de la science.

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 chairs et concis. Rien que cet aspectlà, 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 Planctarium est dû à Michel Butor. Le commentaire d'un film projeté à la Géode est de Jacques Lucarrière.

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 jeur curiosité, avec tout jeur talent ?

M.L.— Certes non, Cela vient sans doute du fossé qui sépare en France les littéraires des scientifiques, en particuller dans leur formation intellectuelle ; ils vivent dans des univers opposés. Comme les écrivains sont sûrs de leur cupacité 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 peau de balle",... et Simone de Beauvoir, qui affirme: "Je ne connais n'en de plus bas qu'un ingénieur". Si la science avait à leura 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?

M.L. – 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 lequelle l'ensemble doit être achevé. En janvier 1987, le Centre international de conferences 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'aviona pas encore truité, 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 prochaînes années ?

M.L. – L'actualité aura su place de même que les thèmes scientifiques prèvus. 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 espérens aussi avoir un budget d'investissement, pour créer de nouvelles présentations scientifiques. Un musée est une ceuvre de création personnelle, où les choix restent arbitraires : on ne peur pas tout montrer. Mais nous avors, dans nos cartons, un grand nombre de projets

(I) Festival de l'indemnie et des techniques (27 octobre 1985 - 26 janvier 1986). Le CNRS présente sur sun stand l'imit et la vision et les douveux matériaux. que nous pourrons réaliser, en collant le plus possible à la demande du public.

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

M.L - 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 beneficié 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 parter à la fois de la science, de la technique, du mythe, de l'économic, l'encyclopédic Dideret 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 cinquanfième 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 reponsable. Le général Joffre a dit: "Je ne sais pas qui est responsable de la victoire de la Marne, mais je suis 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...

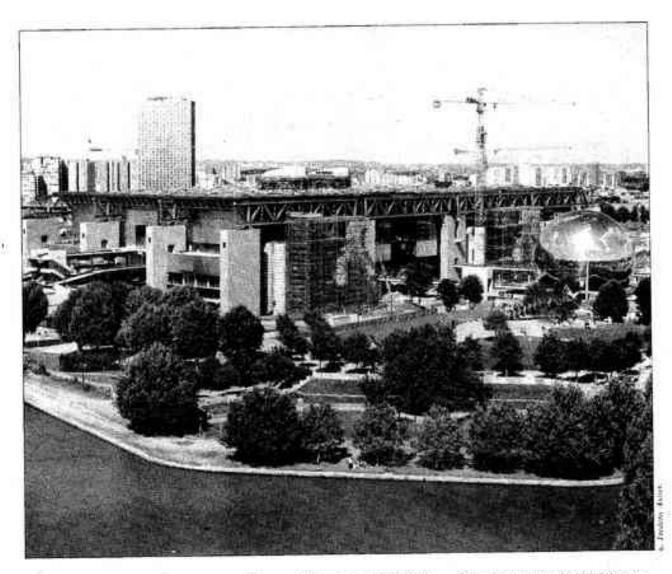
M.M.-K. – Croyez-vous pouvoir rendre la science vivante, dans un espace aussi immense, avec autant de projets? Ce gigantisme me fait peur, l'extrême diversité aussi...

M.L. – Nous avons voulu utiliser, dés le départ, ce gigantisme qui vous inquiête et en tirer parti. Pour s'adresser à tous les publics, il faut un large évantail 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 Géode, le Planetarium.

En rassemblant tous ces ficux avec une carte fixe et un menu qui change, nous pourrons 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-



viennent dans le déroulement des tests et des expériences; et ils se mettent eux-mêmes à l'épreuve pour mesurer feur savoir, pour interroger, pour comprendre. La science sera-t-elle ici vruiment 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: enseigrants, 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 considérent 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 ontils changé en profondeur? l'en doute! Il y a eu, dans la communauté scientifique, des attitudes très réservées vis-àvis de La Villette. Beaucoup considémient que ce très gros effort financier aurait dû être destiné aux laboratoires. Sans la Cité, il est vrai que bet 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 amoner 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 trouveurs"

Comme à l'Espace Entreprise, où les industriels montrent leur capacité de conception de nouveaux produits, comme au FIT, nous voulons chaque unnée 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 parfer 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 quesques 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 offrirons les moyens de realiser 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

Nous travaillons etroitement 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 Goéry 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, nu 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, Goéry Delacôte conduit une politique de communication très proche de celle de la Cité, qu'il a contribuée 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 recharche 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 nox 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 simplettes" 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 salies 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 tache 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. À 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 étrangères la Cité pourra-t-elle se mesures 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 sciencer et de l'industrie doit évoluer avec dynamisme, sans se laisser dépasser par ceux qui s'en inspireront.

### 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?

ML. - 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

### Débats et positions

## OÙ VA LA PHYSIQUE DES PARTICULES?

### PRÉSENTATION

Pierre LEHMANN

Au-delà de l'atome et du novau, 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 sousstructures 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 nonconservation 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 régissant 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 noclezire et de physique des particules (IN2P3).

### PAUL MUSSET (1933-1985)

Les physiciens des particules ont appra-nièle besicosip de triblesse la dispartion de leur collèger Paul Musset, le 4 sep-tembre derrier, victime d'un accident de



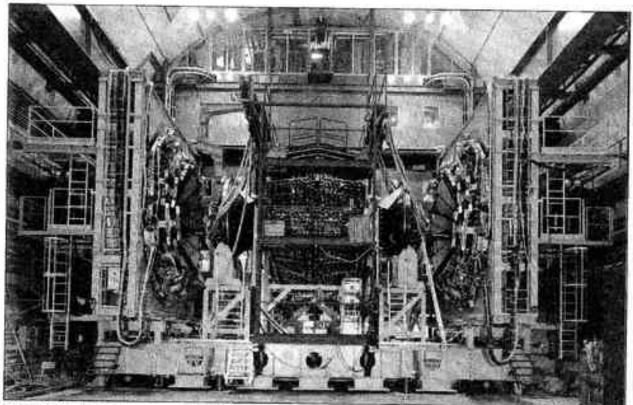
Paul Musset avait commence se carrière au CNPS dans le Laboratoire de physique de l'Ecole polytechnique, dinge par le professeur Louis Leprince Hinguet, il jous un rôle moteur, avec Andre Lagarique, dispara la joussi prematurament, dans la conception et la construction de la grande champre à bulles Garganielle, et tans la découverte, en 1973, des olaractions de neutrino dess' à pourant neutre. Il avait entre temps obtenu un poste de physicien au CERN. Esprit coneux, inventit, il s'était passionne pour la recherche des "monopéles reagranques", particulas énigrant-ques prodites par les theories de crande unitroblem. ambication.

Paul Musser était un physicien de grande valleur, et un bomme de coeur dont Jour 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 CA2 du cultiumneur proton-antiproton du CERN. .... CERN

uels sont les constituents de la matière? Au siècle dernier, les découvertes des chimistes avaient imposé l'idée que la matière était formée de parties insécubles 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 umsi la simplicité cachée sous l'extraordinaire diversité du monde. Tout semblait bâti à partir de trois constituants élèmentaires le proton, le neutron et l'électron.

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'èlectrons de très grande énergie) protons et neutrons et découvrirent que ceuxci 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° m 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 direcrement. 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

<sup>■</sup> Linuis Jaurienu, directeur de recherche CNRS, travaille un Laboratoire de l'accellérateur linéaire - LAL - (IN2P3 - université de Paris-Sud), Centre d'Otsay, 91403 Orsay Cedes.

cible par des particules de très grande ênergie (produites par exemple par des accèlerateurs) peut creer de nouvelles particules

Autre fait surprenant ; un 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 pout 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 découven d'autres particules, qui ressemblaient beaucoup aux particules déjà connues, mais qui possédaient une charge électrique de signe opposé. Ils les ont appolées antiparticules. L'antiparticule de l'électron (négatif) est un électron positif ou positon. Celle du proton (positif) est un proton negatif, ou antiproton. Dès qu'une particule et une antiparticule de même nature, par exemple un proton et un antiproton, entrent en contact, elles s'annihient mutuellement, pour donner de l'énergie ou d'autres particules. D'autre part, de violentes collisions entre particules peuvent créer des paires protonantiproton (mais aussi d'autres parti-

### Les forces

cules).

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 cèlestes. 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 fone 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. Elie est trop faible pour assurer la cohésion de quoi que ce soit, mais elle se manifeste, par exemple, dans la radioactivité B du neutron.

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

### Table Les particules "élémentaires" (en 1985)

LEPTONS.

QUARKS

Charge électrique (unité : charge du proton) n Nautrinos Leptons charges (thu) d

lauxquels il faut ejouter leuro ant perticules: antileptons et antiquerks. Leptons et quarka sont regroupes en trois familles, dont la première suffit pour expliquer notre monde ordinaire

### Les particules composées (hadrons)

Les hadrons sont des systèmes de quarks. Il un existe deux sortes:

•les baryons (dont le proton et le neutron, rassombles nous le nom de nucléons, sont les chefs de file) sont composés de trois quarks par exemple : proton = uud, neutron = udd

les mesons (comme le méson n) sont composés d'un querk et d'un antiquark par exemple: n' = ud (d = antiparticule du d)
 Le quark étrange s, le quark charme c : entrent dans la composition des particules

stranges, charmees.

Note our les symboles des quarks le pour "up" ten haub, d'pour "down" ten sest, s pour "strange" (étrange), o pour charme, b pour "softom" (tos) ou "basuty", t pour "soft (haut) ou "truth" (vente)

### L'organisation de la recherche en physique des particules

La recherche experimentate un physique des particules nécessate des moyens très. lourda et trea complexes (acciderateura et depublis de detection; pur depassent largement les possibilités d'un seul labo-ratoire (et maine, très souvent, d'un seul

es acceterateurs sont maintenant con-Contres dans quelquet grands centres nationaux our internationaux, at sort useses par des squipes provenant de nom-tireus laboratoires différents L'Europe dispose d'un grand centre, le CERN (Dentre duropéen de techerches nuclée, res), crée en 1952 à l'initiative des physiciens, et construit près de Geneve de part et d'aure de la frontiere l'anco sur sissité. CERN est actuellement, dans le monde l'un des deux centres ins plus importants dans le domaine de lé physique des particures (l'autre est le Laboratoire Fermi mux Stats-Unity Le laborators allomand DESY, a Hambourg Joue equiement le rôle d'un certre suropeun livrar carte

Le travail experimental s'effectué au sein de visales collaboracions internationales. formers d'équipes qui p'associent pour construire les délecteurs. Les syste experimentaux sont coloroux of longs it construire par minimum peux à trois ansi et les programmes sont donc soumé à une planticationt et stricte. La collabore tion UA1, au CERN, regroupe plus d'une centaine de physiciena un construction des grands defecteurs pour transcal de collesies LEP, dont les projets ont été appropriées en 1962, rassemble, pour che con prosincir centaines de physiciens ingements et techniques provincir de plusieurs dizaines de laboratoires differents. Ces detecteurs il entrerord en sor-vice go'en 1989.

Le mode de vie des physiciens a éte

affecte par la fourdeur des moyens in it en ey Les socélerateurs fonctionnent pair et mult et ne s'arrêtent que pour des periodes d'entretien et de développement. La con-centration des installations experimentales implique de fréquents denacements pour les personnels qui dovent plier tra-voiller leur in terrain. Un maine laborafoire, pour utilities de façon optimale son potennel fechnique, doit s'engagor simul-tanément dans pronieurs a spériobles qui se trouvert à des stades de développe ment differents (construction, prise de

données, atridycol Le physique des particules n'avrait pas conno un tel espor de les moyens sans en progres realmes par alleurs pans les domaines de l'electronique rapide mina-turisée et de l'informatique Mars, par ses axigences technologiques constaminent à la limite des possibilités, ette à indenti-

blement favorisé des progres La physique expérimentale des particules s'effectue en France dans les labolistoires de l'institut national de physique qualquier et de physique des particules, ifCP3-CNRS (laboratoires progres (rAnnecy et de Stranbourg, interatoires nances de Paris VI et VI, du College de Franço, de l'Ecole polytechnique, du Lisboratoire de l'accelerateur income (LAL) a Orsay, de Lyon, de Clemant, de Grenable et de Starce le et dans le Dopartument de phy sique des particules elementaires (DPRPE) du Centre d'étates nucleures

La physique théorique des particulars offectue dans des laboratoires propres du CNRS ou qui la sont associos (Ecole normale superieure. Paris VI et VII. Collège de France, Ecole polytechnique, Otsay, Annecy Borganux Marseille Montpeller, Non-et Straitbourgs et au Centre d'étudies

<sup>\*</sup>En realité, l'existence du sisième quark (le goark 1) reste encore à confirmer

autre caractéristique qu'on appelle leur purtée. La force électromagnétique et la force gravitationnelle peuvent s'exercer à très grande distance (théoriquement infinie). La force nucléaire se fuit sentir seulement à très petite distance (de l'ordre de 10-10 cm) et la force faible à une distance

environ mille fais 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. Duns le cas de la force électromagnétique, ce sont les photons, ou grains de lumière, des ondes électromagnétiques : ondes henziennes, lumière, rayonnements X et y. 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 gravitone, 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 nommès

gluons.

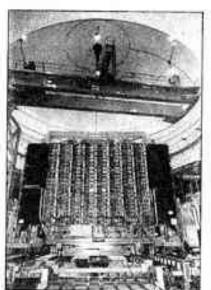
### Vers l'unification des forces

Les physiciens ont recherche du côté. des forces l'unité et la simplicité qui semblaient s'évanouir du côté des particules. Deia Maxwell, au dix-neuvième siècle, avait unifié la description des phénoménes électriques et magnétiques. Einstein et quelques autres physiciens de son époque avaient cherche 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' (1983) au grand collisionneur proton-untiproton du CERN apporta une confirmation éclatante et renforça la confiance des théoriclens 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 théone 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 UAI du collisionneur proson untigrottes 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 disaine d'années, certains entreprirent donc de rassembler la théorie électrofaible et la chromodynamique en une nouvelle théorie dite de grande unification. La force electrofaible et la force entre quarks y sont considérées comme des facettes d'une force unique, mais celle-ci n'appuraîtrait comme telle qu'à des énergies fantastiques, irréalisables au lahoratoire. Et c'est ici que la physique des particules rejoint la cosmologie: on pense, en effet, que ces energies 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<sup>16</sup> ans ou peutêtre plus encore | Plusieurs expériences tentent actuellement de déceler ce phéno-

Dans le cadre strict de la théorie de

### Quelques définitions

### Energie

L'unité d'énorgie utilisée en physique des particules est rélectron volt. C'est l'énergie acquiss par un électron accéléré par une différence de potentes électrique d'un volt. Un ev vaul 1, 0, x 10<sup>-19</sup> joule. Les multiples nont le KeV (10<sup>2</sup> eV), le MeV (10<sup>3</sup>), le GeV (10<sup>3</sup>), le TeV (10<sup>19</sup>). Selon la théorie de la relativité, 8 y a une certaine oquivalence entre masse et autorité soule certaine ou de la relativité en par l'entre de la relativité et par l'entre de la relativité en par l'entre de la relativité en par l'entre de la relativité en partie de la relativité en l'entre de la relativité en le l'entre de la relativité en l'entre de la relativité en le l'entre de la relativité de l'entre de la relativité de l'entre de la relativité de l'entre de l'entre le l'entre de la relativité de l'entre l

energie (cette equivalence s'exprime par la ociobre rolation E = mc1, où c est la wisses de la lumière). En accord avec cette theorie, des transformations misses energie s'effectuent dans les réactions extre particules

no dest appele l'énergie de messe d'une particule de masse m. L'énergie de masse de l'électron est d'envirue un derni MéV. celle du proton d'environ un GeV. On dira que leurs masses sont respectivement de l'ordre d'un demi-MeV/c<sup>2</sup> et d'un GeV/c<sup>2</sup>

### Le spin des particules

Les particules possedent des propriétes de rotation interne et sont caractérisées, de rotation interne et aut de teur charge en plus de teur massa et de teur charge électrique, car leur moment cinécque in trinséque ou apin. Mala l'image classique par le la company de la company de la company de la compa d'une touple en rotation est trompeuse. La mecanique classique n'impose pas de restrictions au mouvement de rotation d'un corps, et son moment cinétique peut presidre n'exporte quelle velour. Par contre, le moment oinétique d'une particole possede une valeur bien définie. Evalué en unité de apin (dénotée X, égule a la constante de Planck fi divisée par 2 m), il est determiné par un nombre qui ne peut etre qu'entier ou decil-entier (on parie afors de apin entier ou dem-entier). Il n'y s aucune analogie classique à cette propriété quantique du moment cristique De plus, les particules de spin entier et celles de spin dam-entier en des proprietts tras differentin. Colles de spin en-tier s'appellent des basons (du nom du physicien indien Base), celles de spin demi-entier des fermions (du nom du phy-sicien italien Fermi). Les particules de matière (laptions et quarris) con un apin 1/2 (sinsi que protons et neutrons), les quanta des forces (photons, bosons intermédiaires faibles, pluoris) ont un spin 1. Les besure de Higgs ont un spin 0. Les syméfries internes s'appliquent à des parti-cules de même soin Par contre, les supersymétries établissent des relations entre particules de spins différents

### Accélérateurs et collisionneurs

Les accélérateurs accélérent, à l'aide de champa électriques, des particules char-gées et stables : électrons ou protons. Ces particules sont ensults projetées sur une cible Les chocs entre, par exemple, les protons extrats de la machine et les noyaux atomiques de la cible sont sourde nouvelles particules qui sont recuellles, localisées, triens et transpor-ties, par des systèmes électromagnéti-ques, jusqu'aux zones experimentales ou sont places les délecteurs

Les colleionneurs réalisent des collisions entre les particules de deux hasceaux cir-culant en sons inverse. Ces faisceaux se croisent dans prosieurs zones d'intersection autour desquelles sont places des apparellages experimentaux. Les machi-nes actuellement en fonctionnement sont des colinionneurs e'e' ou proton-anti-

proton.

Le collision d'un electron et d'un position de chacun 20 GeV, par exemple, realise une energie totale de 40 GeV à partir de laquelle se creent des particules: il est alors possible d'y rechercher des particules dont la massa peut être compriso entre 0 et 40 GeV/c'.

grande unification, if 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 ônergies plus élevées que celles actuellement disponibles. De nouvelles machines sont en construction, d'autres en projet. Pour affer beaucoup plus foin, 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 passède une symètrie si-gnifie qu'e ne change pas - d'est-à-dire qu'e reste inverient - dans une certaine qu'il reste inverient - dans une certaine transformation par exemple une sphére parfette est invariante par rotation. De mème, les lois de la physique possedent des propriétes d'invariance, où symétres. Ce concept de symétrie jour un rôle considerable dans de nombreuses d'acrolines scientifiques, notamment en physique des particules.
Les lois de la physique doivent être independantes du lieu et du moment de l'experience aussi bien que de l'ocertuison.

pendantes du lieu et du moment de l'ex-périence, sussi bien que de l'orientation de l'appareil d'observation (but su moins sant que l'expérience n'est pas influencée par (orientation privagalée introduite par la pesanteur I). Ced veut dire qu'elles sont invariantes dans les translations d'es-pace et de temps et dans les notations. Ces symbbles dias externes, impliquent par cette des autories, impliquent que cera nes grandisurs physiques sent conservées quantité de mouvement (produit de la masse par la vitesse) et energie pour les translations d'espace et ce temps, monent anguiaire intrinseque

pour les rotations.

pour les rotations.
Il existe d'autres quantités conservées qui caracterisent les particules, par exemple la charge électrique. è est tentant de les associer à des symétries je est-é-dire des invariances) qui élles, re-coloament plus l'espace-temps et sont dites internes. Prenons un exemple. Les noyaux atomques sont constitués de protons et de neutrons maintenus ansemble par la force nucléaire. Des protons ont une charge électrique positive, les neutrons sont neutres, et la different très legerement par leur masse. Si l'on pouvait réteinche le force électromagnatique, le force micléaire ne verrait plus aucune différence enfre eux : un proton et un neuference enfre eux: un proton et un neu-tron seraient "bonnet blanc et blunc bon-net" et pourmient être échangés sans que la force nucléaire ne s'en aperçoive. Ceci oet une symétrie de sample (consue sous le nom de "eymétrie de spin tsutopique"), mais aux conséquences tres protondes. On peut considérer qu'elle est un reflet de la symètric entre les doux cliarits "ordinaires" (u et d) qui entrent dans la consti-

tution du proton et de neutron Souvent, une symétrie n'est qu'appro-chée on dit qu'elle est brisée C'est ainsi que la force électromignétique, dans les rioyeux atomiques, brise la symétrie sous-jagente de la force nocléaire proton et neutron possedent alors des propriétés différentes.

Dans cet exemple free particuler, la

symotrio est brisse par une cause extenecre Mais elle peut aussi se briser sponturament: la loi fies équations) est symétrique, mais l'état tondamental, d'est-adire la solution d'énergie minimum, he l'est plus. Des exemples de aymètres apontanement brisées les rencontrant dans de nombreux domaines de la physique. C'est le cas du phénomène d'almantation aportanée d'un corps ferromagnetique. En l'absence d'un champ magnétique exterieur, in y a pas os direction privilègies dans l'appare. Cispendant, el la symptrie est brisse par une cause extevilegiée dans l'espece. Cependant, si la température est inferieure à une température critique, il apportat une almentation spontanee, qui brior la symotrie de rotation dans l'espace à trois dimensions en introdoisant une descrion privilegies, celle de l'aimariation.

Fuix les physiciens ont distingué aubille Puis les physiciens ont distingue aublie-ment ayristries globales et symétries locales. Par exemple, une symétrie locale de rotation aignifierant une invariance dans une rotation dont l'angle pourreit être différent en chaque point de l'espace (et à chaque instant. If est évident qu'un corps solide appracierait peu un tel traite-ment et que des tensions internes s'y mandesteraient. Céci m'est, bien sor, qu'ur e shaloge à ne pes prendre au pied de la tettre, mais d'est un effet de ce genre une symberchert les othesiclens. Ser les que recherchent les physiciens : fier les forces, et donc les quants qui les prope-gent, à des symétries incales. Le concept de symétrie locale est apparu d'abord dans la théorie de la force électromagnétique et a recu le nom de "symètrie de jau-ge". Les théories de ce type sont pour co-le appeters théories de lauge. Main quel est donc leur interêt?

Le problème des infinis Quand les théoriciens, dans les années 40, cherchèrent s construire une tricone quantique du champ électromagnétique pour décrire les interactions des photons avec les particules chargées, its se héur-terent à un terrible probleme : les calcuts conduisaient la plus souvent à des résul-

il apparut finalement possible de résora apparat matement possible de resor-bor, de masquer en quelqué sorte, ces-inflais à condition de rendincer (su moins-provisoirement) à predire par la thédrie cottoines quantités (par exempté la charge et la masse de l'electror). Des thédries dans lesquélles un tol trainement des infinis est possible sont dies renor-malisables. C'est la cas de l'electrodymi-mique quentique qui sourries à des tests mique quantique qui, soumise à des tests

de plus en plus poussés, n'a jumma

de plus en plus poussés, n's jumais démunii son accord avec l'expérience. Le succes de l'électrodynamique quantique est raile au fait qu'elle est une trienne de juige. L'ides s'impost donc peu à peu que les théories de jauge étalent le mouin dans loque devalent se douler les tréches des autres forces. La première à subir ce traitement fut le treche de la lorce faible. Cesa théorie (construits par Fermi en 1938, perfectionnée par l'eynmen et Gell-Mann en 1957 dynnet de bots résultain à condition qu'on ne lui en demande pas trop étie n'était pas renormalitable). La force faible pouvait être transportée par des guarnes des boons Wi qui d'après l'expérience devait eveir une grande massa. Or, dans une boons théorie de jouge, renormalissible, les quants étalent dépoursus de massae (cas des photons). se (cas des photony)

se (cas des photonis).
La solution fut trouvée utérieurement, en faisant appel à un mécanisme, propose par Englert. Brout et Hogs, qui parmet d'avoir une théorie renormalisable même al les quanta n'ont pes une masse nulle alle à appelle symétrie de jauge apomanément brisée. Les équations de base restent irréprochabitement symétriques et la masse des quants n'y apperait pas mais la solution perd "apontantément" cette symétrie et les quants y deviennent massés.

Comment ce quasi miracle s'accomplis-

Comment ce quasi miracle s'accompit-Comment co quasi immedie è accompa-il 7 è faut tout de même y mettre le prix en introdulasmit dans la theorie un nouveau champ appeté, du nom de son inventeur. Champ de Higga". Cet ingredient est in-dispensable pour donner une masse aux quanta raibles. Mais, en theorie quano-que, champ veut des particules. Et du champ, ou plutot des champs de Higga, il reste qualque chose qui correspond à une ou plusieurs particules.

La theorie la plus simple la si La theorie la plus aimple lasse un seul boson de Higgs, qui est neutre. Dans des theories plus compliquées, il y a presque toujours plusiours bosons de Higgs. Mol-heureusement . la théorie nous fournit ries peu de renseignements sur leurs musses et la manière dont ils interagis-sent, et ils soulevent divers problèmes. La recherche du ou des bosons de Higgs est le object masses, des reportamess ses

recherche du ou des posons de regisses un objectif majeur des programmes ax-perimentaix actuels. Le formalierne des theoriers de jauge fut ensulte appliqué à l'infortaction forte entre quarks et gluons sot les gluons n'ont pas de masse), puis sux diverses tentitives 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 étémentaires 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).

otre 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, catalogues, 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 XVIII siècle, Newton, enonçant les lois de l'attraction universelle, donnait une description unifiée du mouvement des planètes et des phénomènes lies 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. A peine ce succès était-il acquis que le XX 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'avenement 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'on mettre en évidence les constituants élémentaires. Ce n'est qu'au cours des vingt derniéres années qu'a pu s'ébaucher, dans le cadre des théories dites de jauge, une description unifiée de l'ensemble des nouveaux phênomênes. 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'efforcerni 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 mux rotations.

L'interaction entre deux particules élémentaires résulte de l'échange d'une troisiéme 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

<sup>■</sup> Pierre Durriufat, physicien au Centre européen de recherches nucléaires (CERN). Division EP, CH - 1211, Genéve 23, Suisse. Il est le porte-parole de l'expérience UA2.

Le cadre permettant l'unification des lois de la nature est celui de thécries voisines de l'électromagnétisme mais plus générales, les théories de jauge. Les interactions entre particules ponctuelles sont décrites par l'échange d'autres particules. Les invariances et symétries dont jouissont ces échanges sont essentielles pour assurer la viabilité de la théorie. unité. Cette notion d'échange entre purtieules ponctuelles est tout à lait contraire à notre intuition (voir encadre 1).

### Les forces: des échanges de particules

L'echange d'un photon entré un électron et un position implique pour chacun d'eux la faculte d'emettre ou d'absorber un pho-

Mais l'aminsion d'un photon par un élec-tron augmente l'énergie de ce dernier d'une certaine quantité à E et viole dont le loi de conservation de l'énergie il sullit, pour s'en convaincre, de se placer dans le système de reference de l'électron est au repos).

Cependant, la mécanique quantique permet une telle violation poursu qu'alle soit suffisamment ophimière pour interdire qu'on puisse l'observe. C'est le cas ai le photon est prosque immédiatement réapphoton est presque immediatement leag-sortie, son escepade ne durant pas plus que le tempo àt felle à à E par la relation, s'incertitude A1 à E = n les constante de Planck, divisée par 2m. Plus la particula achangeir est massive, pius à E est grand, donc plus à1 et par consequent in porteo de la force sont petits. En effet à E > Mor entraine à1 ;, hMcf., ce qui conduit à une ponée de l'ordre de hMc.

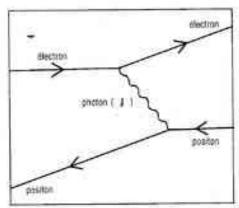
L'interaction élémentaire est définie par le diagramme 1h et son intensité est spécifice par une constante l'appelée constante de couplage), qui est reliée a la prohabilité d'émission ou d'absorption de la particule échangée. Dans le cas de l'électromagnétisme, cetla constante n'est autre que la charge électrique de la particule qui émet ou absorbe un photon.

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

L'interaction élémenuire peut intervenir plusieurs fois dans ce processus. Par exemple, la diffusion c'e peut être décrite par la, mais aussi par des diagrammes tels que le et

Pour que la théorie soit viuble (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 zero du potentiel).

Les expériences de diffusion d'électrons par les noyaux d'atomes et d'unnihilation 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.



HG. In. Interaction d'un électron et d'un positon par échangs d'un photon.

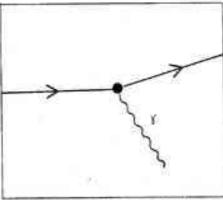
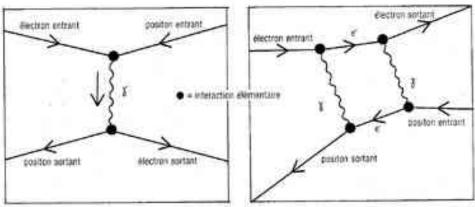


FIG. 16. Diagramme de base à pareie duquel tout les autres tont constrairs.



HG, le, et ld. Exemples de diagrammes contribuant à l'interaction d'un électron et d'un position.

### L'interaction faible et son unification à l'électromagnétisme

La taillouctivité B, née avec le siècle (Becquerel 1896, Rutherford 1902), est un phénomene 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'emission simultance d'un électron. Une partie du mystère attaché à ce nouveau phénomène fut levée dans les années 30 Jorsque Pauli et Fermi comprirent qu'il s'accompagnuit de l'emission d'une nouvelle partieule, dont l'interaction avec la matière était trop faible pour qu'on paisse l'observer, le neutrino (v). 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 theoriquement infinie, tandis que l'interaction faible a une portée très courte et une intensité beaucoup plus petite. D'autre part, une propriété de symètrie, appelée symètriemiroir ou parité, est violée par l'interaction fatble, et conservée par l'interaction électro-

magnétique (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 fl, implique l'échange de particules nouvelles, W° et Z°. Leur découverte récente est un succès éclatant de la theorie électrofaible qui unifie les deux interactions.

# tantii neutrina

décrivant la désintégration 8 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'in-

teraction (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

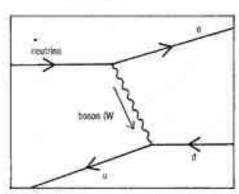
dans les atomes (diagramme 2b).

FIG. 2s. Désimégration p d'un yourk d'en un yourk u, us électron et un aurineutrine.

La violation de la parité par l'interaction faible

Un systems passede la symptrio-mirar. Ou symmetric throde-gassine, is now image dans un mirror to natifications. Cect rest pas toujours le cas dans la nature por resemble certaines molecules sont any matriques et existent sous deux formes Au début des années 50, on panaut que Dutes les interactions des particules possestaient cette symétre-misor, c'estposestaint cette symema-milior, c'esta-tifre ou'il étail impossible de distinguer
in quiche de la droite de une particule de son image dans un milior, par une expe-nionce de physique des particules.
En 1956, annivairet des resultats mui compris, line et l'ang sudgererant que rin-teraution fartre retails la pante? Ced fut continno la même arrico por l'espérience de Wulet al Cette appréciation montre une de Wulet at Cede experience montra une asymétrie de l'émission de l'élection per des noyeux de cobait 60 rédirectils il dont opins nuclames claient 'quies' à tres hasse temperature et prientes par un champ magnetique

Cependant, les deux interactions exhibuient des similitudes mathématiques déjà remarquées par Fermi en 1933. D'autre part, on ne posséduit pas de théorie satisfaisante de l'interaction faible (la théorie de Fermi n'était pos renormalisable) alors que la théorie électromagnétique avait un pouvoir prédictif remarquable. Il semblait done 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'emission il demande que W ait un spin unité, comme le photon. Le diagramme 2a



HG. 2b. Interaction d'un neutrino avec un quark d, produisant un électron et un goark a.

Pour que la nouvelle théorie ait une chance d'être renormatisable, il fallait qu'elle posséde 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 nou-veaux "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 Zº.

En 1973, des expériences, réalisées dans la chambre à bulles Gurgamelle sur le faisceau de neutrinos du CERN, montrérent 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 devalent être dues à l'échange d'un boson intermédiaire neutre. Jusqu'alors, on pensalt que, dans la diffusion, le neutrino se changeait toujours en lepton chargé, par exemple v, en e , ce qui correspondait à l'échange d'un boson chargé.

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



Fig. 3: Photographic d'une collision proton-antiproton (expérience UAS). Une collision par dizators de millions produit au W ou un Z dont les produits de désiraignation dobrar être identifiés parmi toutes les poéticules produites. 4: CERN.

tion de celle-ci avec l'interaction faible. Le symétric 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 consistérent en la mise en évidence, par l'observation d'une petite "violation de la patité", 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\*. L'unalyse des expériences de diffusion de neutrinos indiquair que leurs masses de vaient être pròs 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'accelérateur 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 We et Ze. La difficulté consistait à accumuler un faisceau suffisumment dense d'antiprotons qui, n'existant pas à l'état naturel, doivent être préalablement produits. En effet les collisions protonantiproton susceptibles de produire un Waou un Zº (par fusion d'un quark du proton avec un antiquark de l'antiproton) sont extrèmement 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 e3 v, et du Zº par sa désintégration en e'e' (voir figure 4). Aujourd'hui près de 350 W'et 40 Z'ont été détectés et nombre de leurs propriétés ont été étudiées. En particulier les masses du We et du Zo ont été mesurees et leurs valeurs sont en parfait accord avec les prédictions de la théorie. Les mesures ont confirmé le spin unité du W net, 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 envemble 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 suit pourrant 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, v, y, W', Z') l'interaction.

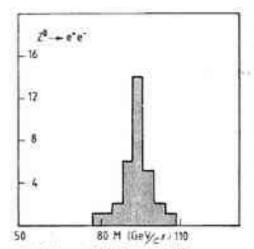


Fig. 4. Démonstration de l'existence du Z'. La distribation observée de la musse M des paires e' e produites dans les collisions proton-antiproton présente une accumulation autour de la matie du Z'.

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 chaeun d'eux le nont 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 émetunt 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-a-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 (mésonsk

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 poyau, par collision très violente avec une autre particule, on ne parvient à en sortir qu'un jet très serré de partiquies, 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 interpréte 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

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

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Non Carnete du Convier du CNRS, n° 45, mm 1983; "Les collisions protos antigrotos," de Bernard Aubert et l'article du Cosmer de CNRS, n° 49; juntier 1983; "Les permiers camitatis bosons intermediaires".

<sup>\*\*</sup> Lubarancier de physique corpusculaire du Collège de France, et Lubarancia d'Anneci-le-Vieux de physique des particules pour UAL Lubarancie de l'accidenteux hoteate d'Onco paur UAZ. Des equipes du Departement de physique des particules élémentaires (DPhPE) de Sactus participent également à ves deux expériences.

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

comme s'ils étaient libres (coci est vérifié par l'expérience). Il en résulte que, dans le domame des grandes énergies de collisions, il est possible de faire des calculs en "chro-modynamique quantique" (QCD) comme en electrodynamique 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 electrique).

C'est à fravers l'étude des jets, menée à la fois dans le cadre de collisions e + e quark + antiquark, e\* + quark - quark + neutrino, quark + quark - 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'ebaucher.

### Les lacunes et les objectifs poursuivis

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

VE - 35 GeV 10 13 15.5

CELLO

22 LE COURRIER DU CNRS 63



naissons l'existence, mais douze : il existe en effet deux autres familles tout à fait semblables à celle qui rassemble les leptons e, v, et les quarks u et d. Sans doute existe-t-il une raison à ce bégaiement apparent de la nature, mais elle nous échappe complétement. Par ailleurs, pour obtenir des bosons Wet Z mussifs, 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 heaucoup 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 theorie unifice. 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 décoler, 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 adaptes à cette tâche. D'autre part, tant en Europe qu'aux Etats-Unis, la réalisation d'accélérateurs permettant d'explorer de nouveaux domaines d'energie, où les signes d'une unification plus large devraient se manifester, est déjà à l'étude.

Le détecteur CELLO.

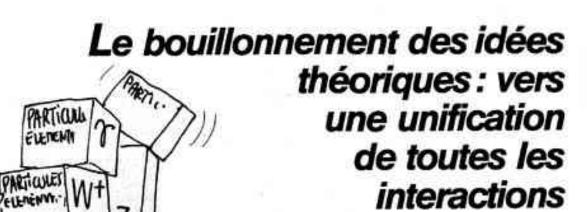
Le désecteur CELLO.

Ce désecteur est initiallé sur l'anneau de calitisions élec-trum-position PETRA à llambourg. La photographie le montre curest pour des opérations de montage. Les fais-ceaux d'électrons et de positions séculent selon son arc. Un champ magnétique (1.3 teslus) est créé pur une bobline supraconductrice. Le retour du flux magnétique se fait dans le fer des pièces actaganales. La partie contrale est un détecteur de traces. La canvinne circulaire eurerte cantient les calorimètres (chaous de vients habeaux cantient les calarimètres (plaques de plumb balgnant dans l'argon liquide) utilisés pour la dévection des pho-tons. Le paide total de l'appareil est de 1400 tonnés. (Ch-ché DEST).

Quarks et gipons dans les emaibilations e\* e\*. L'annihilation e\* e\* produit des hadrons groupes iel en 2 ou 1 jets. Les événements enregistrés dans le détectour franco-allomand CELLO (anneau de collision PETRA à Hamhourg) sont présentés en projection sur un plun per-pendiculaire à la ligne des faiscence incidents d'électrons et de positions. L'u disecteur central (pour du cercle poin-tillé) permet de reconstruire les troces, courbées par un champ magnétique parullèle à lu ligne des faisceaux. L'énergie (en GeV) de chaque jet ent indiquée à l'extérieur du pointille. Huit désecteurs, à la périphirie, déserminent l'inergie emportée par les photons peoduits en même temps que les particules chargées. Cette énorgie est indi-quée dans chaque netant. On peut roir que le flux d'éner-gie totale (particules chargées + photons) se concentre fans les directions des jets.

sant ces steretions des jets.
L'érènement u, comportant 2 jets opposés, est interprété
comme dis au processat e' e' + quark + untiquark. Le
quark et l'antiquark me peuvent s'arracher l'un à l'autre
[confinement] et se transformant chacun en un jet de par-

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



Quand l'espace acquiert de nouvelles dimensions...

Pierre FAYET

râce au travail effectué par les physiciens depuis de nombreuses années, notre connaissance de la structure de la mutière 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 nonspécialiste comme une prolifération de nouvelles particules sans grand intérêt. Aussi estil 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

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 basons 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 (y) 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-

<sup>■</sup> Pierre Fayet, maître de recherche CNRS et maître de conférences à l'Ecole polytechnique, travaille au Laboratoire de physique shéorique de l'Ecole normale supérieure, 24, rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05. Il étudie les théories de grande unificu-tion supersymétriques, formulées dans un espacetemps à plus de quarre 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 y 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 Wi et le Z, 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 giuons. Ces gluons, au nombre de buit, 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 àrisée, de manière à prendre en compte ces différences. (Ce n'est qu'à des ènergies tout à fait considérables que ces différences entre interactions s'estomperaient 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 inteructions 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<sup>s</sup>, etc.; ces processus élémentaires sont responsables de l'existence des diverses interactions (voir figure 1);
- enfin la symétrie, tout en demourant 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 apontanément, est assez général en physique. Il permet à des particules reliées par une symétrie, comme par exemple le photon et le W<sup>±</sup>, d'acquérir des masses différentes.

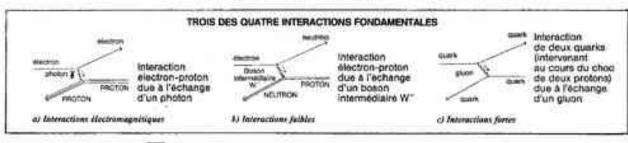
FIG. 1. Exemples d'interactions électromagnétiques, faibles et fortes féholsis de manière à en illustrer les ressem-

Un électron et un proinn peuvent interagir par échange d'un photon finteractions électromagnétiques, fig. 12), ou d'un boson intermédicire W linteractions faibles, fig. 1b), A cause de lagrande masse du W , ces dernièrs événements, où le proton te iransforme en un noutron et l'électron en neutrino, sont beaucoup plus rares. (C'est un diagramme analogue à celui de la fig. 1b, où inservient auxil un boson W , qui décrit la désintégration radioactive du neutron par interactions faibles, n + p e V).

Lu figure le représente la diffusion de deux quarks pur

Lu figure le représente la diffusion de deux quarks pur échange d'un gluon (interactions fortes). C'est l'un des processus élémentaires qui interviennent un cours du chec de deux protons, chacun d'eux étant constitué de trois

La théorie de la grande unification s'appaie sur les ressemblances entre interactions électromagnétiques, faibles et fortes. Elle permet de relier, par use aymétrie, les leptoux (comme l'électron et le neutrino), et les quarks; uinsi que les divers bosons intermédiates (photons y, W<sup>1</sup>, Z et gluons) responsables de l'existence de ces interactions. (Voir plus lein la figure 2.)





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

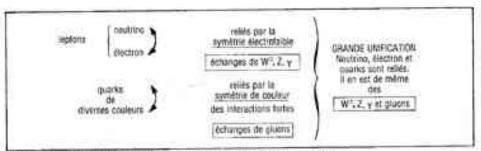


FIG. 2. La grunde unification des interactions falbies, électromagnétiques et fueres.

### 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 consequence essentielle de la grande unification est l'existence, à côté des bosons intermédiaires W<sup>+</sup>, Z, y 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 désintégerait alors, par exemple, en un méson n° 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" ou 10" 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 mannées, voire beaucoup plus. Même si ceci est considérablement supérieur à l'âge de l'Univers (de l'ordre de 10<sup>st</sup> 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 vio supérieure à 10<sup>31</sup> ou à 10<sup>32</sup> années environ. L'observation directe d'une instabilité du proton serait d'une très grande importance, en confirmant la validité des idées précèdentes 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<sup>32</sup> ou 10<sup>34</sup> années environ. Etant donné les incertitudes existant dans les divers modèles théoriques, une non-observation de ce phénomène ne permettrait pas d'invalider, de manière générale, l'idée de grande unification.

A défaut de 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 incomprises. 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-a-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 intérvenir 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 ?

Ii 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 composès. 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.

"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 supersy-

### 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 (ain-

si d'ailleurs qu'au mathématicien, mais ce n'est pas notre propos) un nouveau domaine d'investigations. On peut essayer de l'utiliser pour relier les bosons intermédiaires (W\*, 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 'idée de supersymètrie ? Ou bien, peut-on imaginer que, mafgré 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\*, 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 voic.

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 supersymètrie et la structure de l'espace-temps. Essayons d'en donner une idée, en utilisant un langage simplifié à l'exces. 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 supersymètrie 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 superespace.

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 mentionne plus haut entre supersymétrie et translations dans l'espacetemps conduit à considérer, de manière plus générale, les changements de repère dans le superespace. Ceci mêne 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 accelerateurs, comme les anneaux de

Participes indesires				images (hypothétiques) de ces particules par supersymétrie	
Forticules responsables de feruntance des minisactions	fortes electromogrations tables postulationicles	gluons photon y W1, Z graviton	spin 1	gluinos photino winos et zinos gravitino	spin 1/2 5pm 3/2
Constitueres de Si nutrière	leptons	Hectron	3pm 1/2	sélectrons "sneutrinos"	apun O
	quarks		564	"squerks"	

FIG. 3. Les particules et leurs images par supersymétrie. FIG. 3. Les partiques et turis images par supersymètice.

Les theories supersymètriques prévoient que, pour chaque particule connue écolonne de gauche), il duit exister une nourelle particule qui lutant associée, et que l'on appelle von image par supersymètrie (colonne de droits). Une particule et son
image ant même charge électrique, même couleur, mais différent par leurs propriètes de rotation interne (spin) et parleurs
masses. Lu plupart de ces nouvelles particules doivent avoir des masses de plusieurs discines de GeV/e<sup>2</sup>, ou moins. En
nutre, la supersymétrie permet d'établie un lien, mon montionné dans le tableux ci-dessus, entre les hosons intermédiaires
(tels que les W<sup>2</sup>: et Z) et les hosons de Higgs associés à la brinne de la symétrie entre les interactions.

26 LE COURRIER DU CNRS 63

Les théories

supersymétriques prévoient

associóe une particule serur.

qu'à chaque particule est

ayant un mouvement de

rotation interne différent.

naturellement en physique

Elies permettent à la gravitation de s'introduire

des particules.

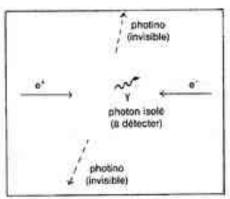


FIG. 4. Une des manifestations possibles de la supersym

FIG. 4. One des manifestations possibles de la imperiyme-trie: la production d'une paire de photions (hypotheti-quest per annihilation e' e'.
Un électron (e') et un puison (e') persent en principe c'annihiler paur danner une paire de photinos. Mais seax-ei sont probablement pratiquement invisibles, camme les neutrinos, si hien que la réaction e' e' 2 phocomme tes neutrinos, si hien que ta réaction e « 2 pho-tinos resterait imaperçue. Auxil est-ce une réaction val-sine, e « photon + 2 photimos, que l'on cherche à mettre en évidence. L'état final, qui comprend un photon mais pas d'autre particule visible, est maiastinant détec-table. Ces expériences sont actuallement effectules auprès des anneaux de enthisian PEP (Stanford, Califor-nial) et PEPA (Deschares). nie) et PETRA (Hambourg), Aucun tigne de l'existence des photinos n'est encoré apparu. Des expériences analo-gués sont en cours auprès du collisionneur proton-antiproton du CERN.

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

L'espace où nous vivons

extrêmement petites

supplémentaires

échappant à notre

observation directs.

pourrait avoir plus de trois dimensions, les 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 exempte, 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 ellemême 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 pe-tite. L'espace précédent, bien qu'intrinséquement 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 formor 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 falla 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 5 dimensions.

Nous vivous dans un espace à trois dimensions, et nous summes habituée à en danner des représentations planes, motre wil et notre cereau étant entraînés à reconstituer les images des ubjets en trois dimensions. Sur le figure 5a, ou rois facilement que le demi-ave Ox est situe en avant du plane (Ot. De même, on peut atiliser des représentations planes d'oppaces à quatre dimensions implus). C'est ce que nous avant fait dans la figure 5. Il feut ainre imaginer que le demi-ave Ox est titué en avant du plan y Oz, tandis que Ou pointe dans une quatrieme direction, orthogonale aux trois précédentes. Dans la figure 5b, la quatrieme coordonnée, u, varie de moins l'infini à plus l'infini. As contraire dans la figure 5c, la quatrieme dimension est compacte, la coordonnée u variant sentement de O à L.

Les dimensions d'espace supplémentaires mot en général au nombre de deux, six ou sept, selon la théorie considérée (l'espace-semps u utors six, dis ou onte dimensions, au total). Ces dimensions sant roulées sur elles mêmes pour former des aphètes, des anneux ou d'autres structures extrêmement petires. Elles doirent être inférieures à 16 - l'em contraine, sant quoi elles auraient déjà cie ubservées ; non pas au microscape, même électronique, muis grâce à ux qui en tient leu pour des disinforeures a 10°C de accidenteurs de particules à très haute énergie.

Lances aussi faibles : les accidenteurs 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 interaccions. L'échelle d'énergie à inquelle elle se produit
est ainre firée par la taible I. des dimensions susplémentaines à e.m. » h'Le ; à une taible ≤ 10° cm correspond ainsi une énergie d'unification ≥ 10° GeV. Par
est ainre firée par la taible I. des dimensions aupstiment importants à des distances de l'ordre de 10° cm , ou a des interpret de l'unifer de 10° GeV. Ce n'est qu'il
de telles énergies, où les quarte interactions ont des intensités comparables, que l'on peut espèrce 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<sup>15</sup> 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 suzquels obéit l'Univers. nouvelle échelle d'énergie (E-Re/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 précedente (E-Ac/L) peut vraisemblablement être aussi identifiée à l'énergie d'unification gigantesque - à laquelle les trois interactions, faibles, électromagnétiques et fortes, devienment indiscernables. Pour une énergie d'unification ≥ 10<sup>th</sup> GeV, on trouve alors que la tuille L des dimensions supplémentaires doit être ≤ 10 H 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 trouvernit 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<sub>p</sub>, fixée par la constante de Newton

de la gravitation universelle (E<sub>e</sub> = (ħ e '/G<sub>locini</sub>)''), et voisine de 10'' GeV. La longueur associée, appelée longueur de Planck, est voisine de 10'' 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 élémentuires 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 ≤ 10<sup>-11</sup> cm, ou à des énergies ≥ 10<sup>m</sup> GeV (suppolons que la taille d'un proton est d'environ 10 " cm, et l'énergie de masse d'un W3 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 gênéral 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 supersymètrie et de directsions 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 onergies 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 o, numériquement voisine de 1/137, qui détermine la valeur de la charge de l'électron; un but fort ambiticux...

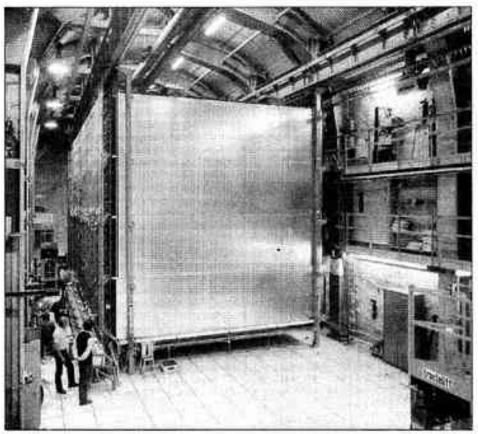
En attendant, les physiciens sont à l'affût de tout indice expérimental permettant de confirmer, d'infirmer ou de modifier chacune de leurs idées. Pour cela, l'étude détaillée des propriétés des particules connues, et la recherche de nouvelles particules, comme les bosons de Higgs et les nouvelles particules 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<sup>16</sup> GeV, les idées précédentes ont des conséquences testables à des énergies qui sont - comparativement bien sûr - relativement basses: de l'ordre de 10° à 10° GeV environ. Aussi est-il crucial de pouvoir disposer, audelà 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-antiproton en projet aux Etats-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.

grand or fail des expérience c'est qu'or est pas present

## 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 Feijus se présente comme un parallélipipé de section varrée 4,2 m x 6,2 m er de longueur 12 m, constitué de modules formés de plaques de for, d'épaisseur 3 mm, et de plans de tubes de déscotion alternativement verticaux et haricontaux. Son poids total est de 910 tounes. Il comprend 990 000 "tubes à plasme "qui, n'ésant pas sensibles de manière permunute, daivent être déclembles par des tubes Grigor, au norder de 18 000. Le passage d'une particale dans le désocteur est déterminé par l'ensemble des tubes verticaux et horizontaux touches simultanément. © CEN / Saclay.

La description des phènomènes sub-nuclésires par la théorie est encore très incomplète. Mais la voie dans laquelle il faudra s'engager dépend des découvertes expérimentales à venir. e programme expérimental actuel en physique des particules est centre sur deux tâches prioritaires. D'une part, il reste à découvrir les éléments encore manquants prédits par le "modèle standard", qui rend jusqu'il présent très bien compte des phénomènes observés. D'autre part, nous suvons 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 osurs, 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'accèlérateur linéaire - LAL - (IN 2 P 3 - 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 symétric sous-jacente est brisée : en effet, les bosons Wet 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 vuleur des masses des bosons W et Z, dépendent crucialement 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 poine commencé. De plus hautes énergies sont nécessaires.

Les théories de grando unification, qui rassemblent les interactions faible, électromagnétique et forte dans un même cadre, prévolent que le proton pourrait être instable.

La désintégration possible du

expériences souterraines afin

proton est recherchée

de se protéger du rayon-

activement dans des

nement cosmique.

laisse ouvert un vaste domaine, de quelques GeV/c' à quelques TeV/c'. 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 aiertes cependant : l'observation au SLAC (Stanford) d'un état à 2,2 GeV/c<sup>3</sup> dans les désintégrations de la particule Ψ (1) a été en fait contredite par les résultats de l'expérience DM2 à Orsay, et un état vers 9 GeV/c1 annonce 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 GeV/c1: 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" 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.

vue 2

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

> Un événement enregistré dans le détecteur du Fréjus. Les deux dessins représentent le même événement dans les vues verticule (i) et horizontale (i). Les points représentent les impacts enregistrés par les tubes é glasses, les carrés, ceux enregistrés par les tubes Geiger. Dans cet érénement, l'énergie totale des particules observées est de l'endre du Gel, ce que l'en attendrait de la dés et de l'endre du Gel, ce que l'en action. Muis une étade plus précise montre que cet événement a ésé produit par un neutrino cosmique.

10 cm

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 théoriclens vers 10<sup>16</sup>-10<sup>18</sup> années, dans le cadre d'un modèle particulier. Cette valeur énorme (rappelons que l'âge de l'univers est estimé à environ 10<sup>18</sup> 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 x 10<sup>18</sup> 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 periphérie 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.

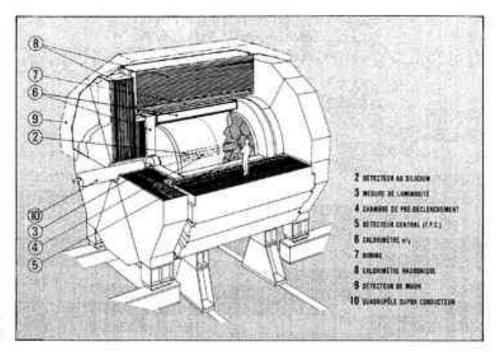
Malgré deux années d'observation pour les premières grosses expériences, aucun signal convaincant n'a encore été observé. La méthode Cerenkov a déjà permis de montrer que le mode p = e' n ° prédit par la théorie unifiée la plus simple n'était pas présent au tiveau attendu. Cette théorie ne peut donné 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 e de spin 0 (appelé sélectron), au photon y de spin 1 un photon y 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 supersymètrie 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 é est instable, le photino y 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 è a une masse supérieure à 22 GeV/c2, ou bien qu'il n'existe pas. Si la supersymètrie 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 ALEPH destiné au collisionneur LEP.

> circulé à partir de l'expérience UA1 au CERN. Il semble, cependant, que de nouvelles analyses ne confirment pai 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 symétric électrofaible, c'est-à-dire de l'ordre de 100 GeV/c<sup>2</sup>. Jusqu'à maintenant, seules les expériences UAI 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 soutermine, 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 nient été découverts, cette région de masse est inexplorée pour les autres types de particules. Les mesures systématiques qui y secont entreprises, en particulier la détermination précise des masses des bosons W et Z et des panimétres 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 Z" ont été observés jusqu'ici, le LEP en produira plus d'un million par an, et l'observation de ces Z" sem 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 Etats-Unis pour une machine de 20 TeV par faisceau. Il semit aussi possible de construire un anneau de ce type (seulement 9 TeV) dans le tunnel du LEP, économisant ainsi la majoure 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 accelérateurs linéaires; des énergies de l'ordre du TeV pourraient être réalisées. A cette échelle, le domaine de masse possible du boson de Higgs seruit 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" è 10" 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.

ciens 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

La communauté des physi-

CERN.
De plus hautes énergies
pourront être atteintes avec
un collisionneur protonproton ou proton-antiproton.

- (II La particule Ψ , découverte en 1974, est un çan lié de quarks charmés cc.
- (2) Participent à entre expérience : pour le CNRS d'une part, le Laboratoire de l'accédenteur linéaire à Orsay et le Labosatoire de physique mactèries et des hautes énergies à Paris VI et VII et, d'autre part, le CEA 2 Saclay.
- (3) Ulter particule charges de vitesse supérieure à la vitesse de la hamière dans un milieu d'éndice n (s/m) éntet de la larmière par un phinomene assez analogue su bang produit par un avon supersocique.
- (4) Participent à cette expérience: pour le CNRS, d'une part, le Laboratoire de l'accélérateur linéaire à Orasy et le Laboratoire de gifseique muclèaire et des heutes érargies à l'École polyvechnique et, d'autre part, le CEA à Saclay.
- (5) Voir l'article du Counter du CNRS, n° 47, septembre 1982 : "Préparation des expériences pour le LEP" de Paul l'alle-Vairant.
- (6) 1 l'ermi = 10<sup>-15</sup> m, ordre de grandeur de la faille du protion.

## 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

es observations effectuées grâce aux grands télescopes révélent 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 èchelles 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 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 devuit 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 décroitre au cours de son expansion. Dans un passé très fointain, 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 infiniex ; la singularité cosmique (voir encadré sur l'approche de l'instant initial). L'Univers est ne 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

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 étoilés. Or, les calculs de nucléo-synthèse 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 nucléo-synthèse 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'homogénèité de l'espace, dont les preuves ne cossent 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<sub>e</sub>) à 400 par cm². L'observation des galaxies et de leur distribution conduit à une estimation de la densité baryonique (n<sub>e</sub>) d'environ 1 baryon par m². Pendant longtemps, la valeur de 10-5 pour le rapport n<sub>e</sub>/ n<sub>e</sub> 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-

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.

a théorie du Big Bang n'a

été acceptée qu'en 1965, et

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

<sup>■</sup> Pierre Saluti est multre-ossistant ul'université de Savoic et effectue ses recherches dans le Groupe de physique théorique du Laboratoire d'Annecyle-Vieux de physique des particules (LAPP-IN2P3), IEP 909, 74019 Annecy-le-Vieux Cedex



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

Guand on remonte dans le passe, la temperalura de l'Univers augmente. l'énérgie d'agration thermique croit et les particuées élémentaires qui constituent le magma princretais aont de plus en plus nombreuses. Peut-on des tors éléchotre, du moites par la perisée, la singulame doantique, l'instant original ou 1 = 0.7 Une berffere empleche pour inistant toute progra-sion vers le passe. C'est l'epoque de Planck'. Elle correspond au ringne de la gravitation quentique. Notre description d'un Univers homogène et loctope, fondée sur la trisévité genérale que eta une bisons classimus de la gravité, est insufficante pour appréhender l'époque de Planck. Des phénomènes éton-nants a'v déroulent, ains, la geomètre de l'expace tramps, qui est l'essance des phéno-memes gravitationnels, devient foue. La notion même de quisabilité subit également findere-mination quantique. La relation de cause a efet sintre deux evenements est alors de sant l'époque de Planck, soient suffisantes à elles sectes pour auplique. La rélation ne versi pus alors récesseure. En det nitre, l'univers a l'appaque de Planck, se pard dons les nimbes de la gravitation quantique. En effet, il n'existe pas, le l'home a cherite, de theure d'ammique de la gravitation quantique. En effet, il n'existe pas la l'home a cherite, de theure d'ammique de la gravitation des interactions des plumps prochaments sont les recentaires des pourses complèmentaires les unes fes aures existent.

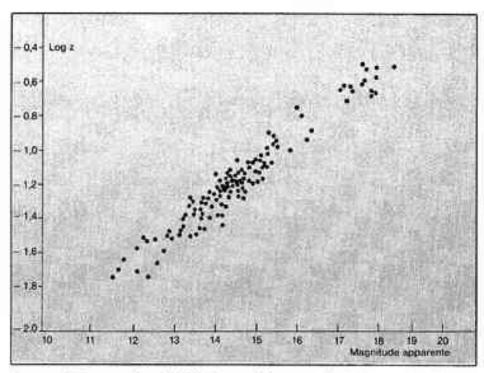
is supergravité unit e la gravitation classique elativité générale; el la supersymètre ; les théories de Kaluza-Kieur aupposent que les pace-tempas plus de guarre dimensionnes les dimensions supplémentaires en plient sur elles-inèmes (compagification menalogness) pour engendrer les interap-

les thacres de corde imaginent que les exotations d'une porde dans un espace à 10 ou 26 dimensions associées à une compactification dimensions especiales à une compactification dimensions et le physique habiter.

A meute actuelle, l'effervescence règne et la gravitation quentique, est un domaine de recherche très actif et en pien dévelope-

recharche très actif et en pient dévelopement.

51 un ne peut remonter dans le passe jusqu'à
la singulente originale, un peut du noice,
essaver de prevoe le futur de ruidicers rout
depend de sa denoté moyenne de matere à
l'univers est trop messit à se recontractera.
L'almet on graviationnelse entre les gassées
corportant sur l'energie chef que leur au processus d'expansion. Les galaties consorbit
alors de se fur maturitament et commenceront à tomber les unes ven les suf-es. Le frin
du Big Bang se descuera a reviers. L'alemparatura augmenters et l'univers l'inta ders le
praiser d'une nouvelle sponse de Plancs. Au
contratte, si l'univers est lèger le processus
d'expansion se ralentira deu à peu mais sens
étamet S de plus le nucleon set valiment inssable dens 10° enness su olus, les structures
actuelles se terrori densgrégèes et l'espace
le servi plus remoit que pur un ocean quoc de
phôtons et de neutrines. L'Univers a donc le
choix entre coux destins très diferents. Le
densité critique dont dépend ce choix est
componie en bis 10° et 2 x 10° gram (cette
valleur est dou monse car la constante de
l'univen 3x 10° gium Gardone nous carées
La metière valibé a une densité moyenne d'en
une masse de pusitions du anne le le recutero ait
une masse de pusitions de annes d'en pour
une masse de pusitions de senses d'en pour viron 3x10 g.cm. Gardonie nous cerson-dant de conclure il sufficial que la neutrino all uno masse de qualques dicamen d'eri pour que le seun critique not d'essené et que rotre Universisch condernie alle recontracter i sur difficile de predire in futur der Universitäri bale noue de condernam pas et demple moyenne de mattere. La reponse requestantalen de vanir paredoxalement de la physique de i inflormant petit is par exemple on mesure avec precision.



C'est ce genre de diagramme qui a permis à l'habble de mettre en évidence une relation de simple proportionnalité entre la vicence de récession des golaxies et leur distance à la terre. Chaque point figure une golaxie lointaine. Sur l'axe havitontal, le magnitude apparente est proportionnelle au logarithme de la distance l'a magnitude apparente est proportionnelle au logarithme de la distance l'au l'axe vertical, è messore la vitesse de récession et et » vic où e est la vitesse de la inmiere, L'échapeutilon montre ér-dessus est celui de J. G. Hoessel, J.E. Gunn et T.X. Thaan (Ap. J. 241, 488, 1980). On constate que les paints se regroupent au voirinage d'une deuite. Une analyse plus fine mattre que vitesse de récession et éloignement sont hien proportionnels et met ainsi en évidence l'expansion de l'Univers. (Extroit de l'article "Le Big Bang aujourd'hui" de Tring X. Thaan, La Recherche, n' 151, junter 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 dù être abandonne. It nécessitait un mécanisme de séparation matièreantimatière qui n'a jamais pu être proposé. L'Univers, au moment de l'annihilation nucléon-antinucléon, était donc dissymétrique e devalt contenir plus de baryons que d'antibaryons Les théories grand-unifiées sont venues à la rescousse de la cosmologie en esquissant une solution su 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<sup>te</sup> GeV.

tefois un mécanisme microscopique de répulsion matière antimatière qui aurait permis à suffisamment de nucléons et d'antinuciéons de se séparer au moment de l'annihilation (température inférieure à 1 GeV), pour que les survivants soient au nombre de 1 nucléon pur milliard de photons. L'Univers aurait ainsi été constitué d'îlots séparés de pure mutière et de pure antimatière. Malheureusement, un tel mécanisme n'a jamais été inventé, et les chercheurs ont dù admettre qu'un surplus de nuciéons devait déjà préexister au moment de leur annihilation avec l'antimatière. Cette disgracieuse asymétrie huryonique 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, afors comment?

A 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 se 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.

A la fin des années 70, avec l'avenement de la grande unification, des forges remplissant les conditions de Sakharos 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'originc, (T > 10 GeV), I'Univers contenuit autant de barronsque d'antibarrons. Versune tempénature de l'ordre de 10" GeV ou supérieure, les busons super-lourds de jauge reex bosons transmettent l'interaction grand-unifiée) et les bosons super-lourds de Higgs (ces bosons sont responsables de la brisare de la symètric grandunifiée) 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 légére préférence nour les premiers! Les calculs effectués dans le cadre de ce scénario prévoient un large éventail de valeurs pour le rapport na/n., incluant 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 homogème, était composé, à l'époque de Planck, d'environ 10 d'omaines 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'homogénéilé de l'espace a 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-uniflée, 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 dilateit d'un facteur d'environ 10<sup>15</sup>. 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 entredeux domaines quelconques. Comment l'Univers, aujourd'hui si homogène à grande échelle, pouvait il avoir, à l'époque de Planck, l'as-pect d'un puzzle à 10 " 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) GeV) les forces électro-faibles et fortes étaient identiques et se fondaient pour ne constituer qu'une seule interaction : la force grandunifiée. Vers 10th GeV, cette harmonieuse symètric 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 tiquide), des gouttelettes de symétrie brisée apparaissaient spontanément, vers 10" 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 1014. Grace 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 enflè jusqu'à occuper le volume que le modèle standard de la cosmologie attribuait auparavant à l'ensemble de ses 10° 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 mulheureusement 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 accèlérateurs 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 gelfossilisation associé à une forte annihilation de l'espèce concernée si la température devient inférieure à son énergie de masse. L'Univers étant eff expansion, les divers réactifs en pré-

### SINGULARITÉ COSMIQUE?

T = 10 14 GeV = 10 12 1K 1 = 10 165 s Epoque de Planck. La gravitation est quantique. Les quatre forces fondamentales de la nature d'orce forte, force taible, force électromagnétique et gravitation) s'unissent en une seule et unique interaction. flègre de la grande unification. Les forces forte et électro-taible sont unifiées. T = 10 14 GeV = 10 10 K t = 10 128 s

T = 100 GeV = 10 15 K

= 100 MeV = 10 \*F %

t = 10

T = 10 "K; 1 = 100 s

T = 4000 °K; t = 10 ° ans

I = 10 'K; t = 10 ans

T = 0.0.. "K; t = 10 th ass

E

8

La symétrie grand-unifiee se brise. La force forte se différencie de l'interaction électro-faible. L'inflation a lieu. L'Univers acquiert son homogénéité. L'asymétrie baryo nique est générée. Les bosons super-founds se désiatégrant en favorisant les quarks (donc les baryons) par rapport aux antiquarks.

La force électromagnétique se différencie de la force faible

Les quarks et les antiquarks, jusqu'à présent libres, se retrouvent confinés au sein des buryons et des antibaryons. Ces demiers, des leur formation, s'annibilent. Seul le militancième de matière excédentaire subsiste.

L'Univers est un magma de protons, neutrons, électrons et photons. Les nucléons s'unissent pour lermer des noyaux de plus en plus élaborés. Les éléments lègers sont syntháltaés en grande partie à cette époque.

Les éléctrons, jusqu'alors libres, se combinent aux noyaux pour former de la matière nestre. La recombinaison a lieu.

Les galaxies se forment.

Si l'Univers est léger et si le nucléon est vraiment instable, toutes les structures scholles étholes, galoxies...) se désagrégent. L'espace est rempli uniquement par des photons et des neutrinos.

Au cours du temps, la température et l'énergie d'agitation thermique du magma primordial décroissient sans cesse. Des événements concernant la physique des particules ont lieu. Les grandes structures de l'Univers (gataxies...)

se forment.

sence subissent une formidable dilution ainsi qu'un retroidissement importum, la dilatation de l'espace s'accompagnant d'une violente chute de température. Les particules élémentaires subissent une véritable trempe chimique à l'échelle cosmique et les diverses réactions nucléaires et corpusculaires se talemissent, puis cessent. L'étude de la fossilisation d'une population de particules est fructueuse. En prenant des particules connues, on paut 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 microonde 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 supersymètrie, 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, seur masse ou feur durée de vie. Chaque particule a un rôle à jouer pendant les trois premières minutes et le scènario 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 semit alors soit supérieure à 500 MeV, soit inferieure à une containe d'eV.

En définitive, les rapports entre des domaines aussi éloignés a priori que physique des par-- étude de l'infiniment petit 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 périmée et remplacée. Cependant, elle aura joué un rôle majeur dans notre conception de l'Univers au XX siècle.

\*Vuir l'article du Coomer du CNRS, n'58, nov.-dec. 1984 : "L'infiniment petit et l'infiniment grand" de J. Audouze

#### BURLIOGRAPHIE

de soptombre 1984

Audeure (J.), Aujourd hui Funtvers, Parts, Belfond,

Reeves (H.), Patience dans l'uzur, l'évolution coumi-que, Parix, Le Seuil, 1981.

Sciama (D.W.), Modern enamology, Cambridge, ambridge University Press, 1971

Silk (J.), The Big Bang, San Francisco, Freeman, 1980. Weinberg (S.), Les trois premières minutes de l'uni-vers, Paris, Le Seuil, 1978.

Weinberg (S.), Gravitation and cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity, New York, John Wiley & Stors, Inc., 1972. Cours de Gif-sur-Yvette de physique des particules

### Glossaire

Saryon : il n'agit de la familio des particules à laquelle apparticment les nucléons (neutron et proton). L'antimatiere associen est constitues par les untibaryons. A l'heure actuelle, seuls les baryons legers subsistent : le neutron et le profon.

Constante de Hubble : la vitesse d'éloignement (appeles vitesse de récesaion) des ga-laxies est proportionnelle à leur tioignement de la terre. La constante de proportionnable s'appelle constante de Hubble et vaus de 50 à 100 km/s/Mpc. Almsi, une gataxe distante de la terre de 1 magaporaec (environ 3x10° km) s'en éloigne avec une vitusse d'environ 50 à 100 km/s. Le rapport entre se distance à la hirre et ua vilesse de récession permet d'estimer frès approximativoment l'instant ou cette galaxie diant durs nos parages immediats, c'est-à-ctire l'instant indial où l'Univers a commencé à se d'inter. Cet instant originel remonte a environ 10 à 20 milliards d'années (3x10" km 100 km/s = 3x10" s = 9,5 milsants d'années)

Epoque de Planck : à partir de la constante de gravitation universelle de Newton G<sub>A</sub>, on oc gravitation universalle de Newton  $G_{\rm Ni}$  on paut construire, en utilisant une judicieuse constitution de hi et de c. une massa que fion appelle masse de Ptanck (on peut traduire cette masse en épergie à partir de la relation d'équivalence masse énergie  $E=mc^{-1}$ ;  $M_{\rm c}=(h,c,r,G_{\rm H})^{1/2}=2.17\times10^{-6}~{\rm kg}=1.22\times10^{-6}~{\rm GeV/c^2}$ .

Si deux particules chargées ont chacuna cette 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 aiors de les traiter avec la mécanique quantique. Il est possible également de combruire, foujours à partir de G<sub>n</sub>, une longueur t<sub>n</sub> qui veut 1,5×10. Le cm Cette longueur ceractérise l'échete qui dessours de taquete les intéraches arrélationnelles deviennent quantiques. tons gravitationoples deviennent quantiques 1,22×10° GeV (energie) et 1,6×10° cm (on-gueur) définissent les conditions naturelles dans lesquelles la gravitation suoil le nou

quentique et cenne d'être classique. Ces con-ditions régnerit vers t = 10<sup>-45</sup> s, au moment où l'Univers a une temperature de 10<sup>-73 °</sup> K, où l'energie moyenne des particules étémentai-res est de l'ordre des 10° GeV de la masse de Planck et où la taille de chaque domaine causal (vitesse maximum de procegation de la causalte multipliée par l'âge de l'Univers ti devient comparable à L., Cette pérode qui suit de peu la naissance de l'Univers est appelée époque de Planck

Mégaparsec (abréviation MPC) : la mégaparsec vaut un million de parsec. Le parsec est une unité de distance astronomique et vaut

Super-amas galectiques for galaxies on sont pas dispersões au hazard mais se regroupent au sein d'amas galactiques. Gouxal formerit à lour tour les super-amais galactiques qui apparemenent constituent le dernier échelon de la hiérarchie

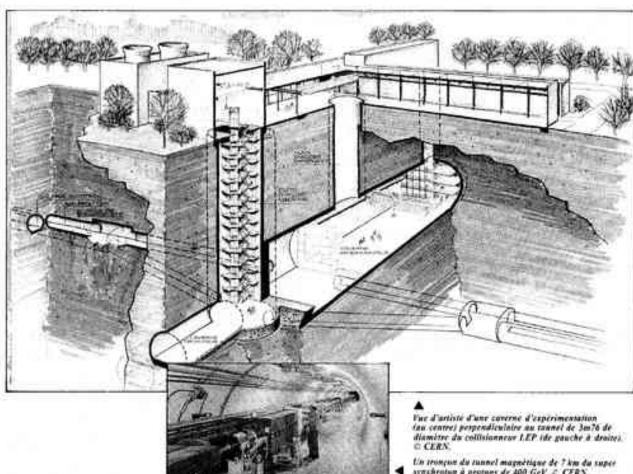
Température : la lempérature est mesurée en degres Kelva. A foute température T, on pout associer l'énergie kT ou k est la constante de Boltzmann ( k = 1,35×10<sup>-12</sup> J ° K ¹). C'est pourquoi on mesure souvent en cosmologie la température en terme d'énergie, sachant que 1 MeV vaut 1,6 x 10<sup>-15</sup> joule , soil encore 1,16 x 10 \*\* \*K

Rayonnement thermique: lorsque l'on chauffe un four à une température T, sa cavité, si elle est bien hermétique, abrité un "gaz de photoris" iles physiciens appetent de four corps nor?. Ce gaz est en équilibre thermodynamique avec les parois et a la inéme temperature T. Le rayonnement associé appelé reyconement thermique, a un spectre caractéristique qui ne dépend que de 7. Or l'Univers peut justiment se concevoir commi un four à l'échelle cosmique. Il abrite encore à l'houre actuelle un rayonnement thermique de 2,7°K, que Punzias et Winon ont obtectà dans la bandu rudio. En putre, temperatura Tierdonsite it, des photons sont relices par n, / T = 20 cm ° x ° K °

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

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

Guy COIGNET



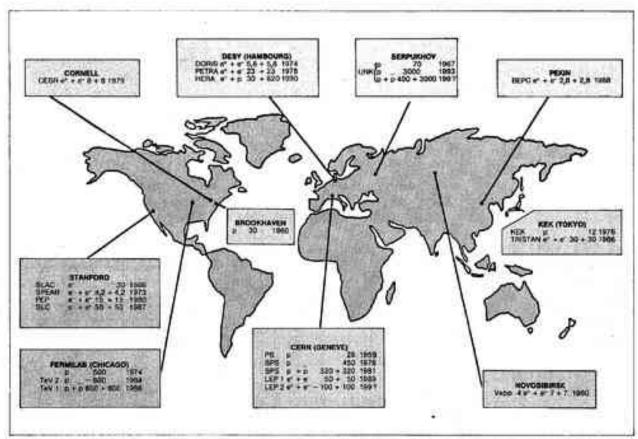
Des champs électriques sont utilisés pour accèlérer les particules ; des champs magnétiques dévient leur trajectoire.

ans 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 component une limitation en énergie liée à leur longueur. En appliquant, perpendiculairesynchrotun à protunt de 400 GeV. C. 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° mm de mercure). C'est sur ce principe que fonctionnent les accelérateurs circulaires, les plus courants de nos jours.

■ Guy Caignet, maître de recherche CNRS, travalle au Laboratoire d'Annece-le-Vieux de physi-que des particules (LAPP-IN2P3), BP 909, 74019 Annecy-le-Vieux Cedex, Il est engagé dana un pro-gramme d'expériences au CERN, Depuis 1982, il est le représentant français au Comité européen pour les futurs accélérateurs (ECFA).

<sup>\*</sup> Les terroes marqués d'une astinique som définis dans le



# Sigles SPS: Supre Pentoe Synchrotian (CERN) LEP: Large Eleganos Pontou Collider (CERN) SLAC: Stanford Linear Accelerator Center SLC: SLAC Linear Collider (Stanford) SNC: Suprenombuting Super Colleger (Described) LHC: Large Hadron Collider (Juranom) CESR: Curried Electron Storage Ring HESY: Beutschen Elektroner-Synchronium

### 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<sub>in</sub> 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<sub>in</sub> = 40 GeV) a été obtenue avec le synchrotron à protons de Fermilab (Chicago) grâce à l'emploi d'aimants supraconducteurs;

 les "collisionneurs" dans lesqueis des paquets de particules circulent en sens opposé dans un anneau et interagissent frontalement dans des zones spécialement conçues; l'ènergie 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 + p
 (p = antiproton) permet d'atteindre E<sub>m</sub> = 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 consomnation électrique à un niveau acceptable lors de l'utilisation du LEP à E ... > 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 Teslas\*) 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 positions 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/c'. Or, dans les collisions p + p (ou p + p), seulement

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

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 "cm-2 s ", 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 circonférences 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 Désertron. 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 + 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 Désertron. Il permettrait, en outre, l'étude des interactions e(100 GeV) + p(5-9 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 collissionneur p + p ou p + 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 (1014 cm-2 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 nouvenux concepts plus officaces 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 consèquent des champs électriques très élevés. Leurs caractéristiques (durée

Glossaire

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

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

1 Tesla - 10 kilogauss.

Luminosité L: c'est une quantité caracteristique du collisionneur, qui permet de calculer le taux d'interaction (nombre d'interactions par seconde). Elle est proportionnelle à l'interactie de chacun des faisceaux ainsi qu'à la fréquence de lours collisions. Elle est inversement proportionnelle à la surface d'interaction des deux faisceaux. Elle s'exprime en cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Le taux d'interaction est le produit de la luminosité par la section efficace o, exprimée en cm<sup>-2</sup>.

- La section officace o c'est une mesure de la probabilité qu'une réaction se produiss. Pour une réaction donnée, o représente la section apparente de la particule cible telle que la réaction se produite ai le projectile touche cette aurface o. L'unité est le barn = 10 °cm² ut ses sous-multiples : 1 millibarn = 10 °cm².

I nanobarn = 10 " cm"

La section efficace de la réaction (forte) protonproton est de quelques dizaines de milibarna,
celle de la réaction (faible) neutrino-nucléon de
10 " cm" (pour des neutrinos d'une anergie de
1 GeV)

des impulsions, taux de répétition, etc.) devraient évidemment être adaptées. Par irradistion, avec un lasét, de photoculhodes (électrodes émettant des électrons sous l'action de la lumière), il serait possible de produire des paquets d'électrons intenses, cux-mêmes utilisés pour générer le champ accélérateur. Les champs les plus élevés (quelques dizaines de OV/m) semblent pouvoir être atteints dans les plasmas, milieux ionisés et donc exempts de chaquages. Par exemple, le battement 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 requiérent 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, sar l'avenir à long terme de la physique des particules dépend de leurs résultats.

### BIBLIOGRAPHIE

Colgnet (G.), "High energy accelerators, what next?". Tire a part LAPP-EXP-84001 (or references effect dans cet article).

The 1984 DPF summer study on the design and utilization of the SSC, Snowmans (Htati-Unis), 1984. Complex rendus,

Large Hadron Collider in the LEP transet, ECFA-CERN Workshop, ECFA 84/85; CERN 84-10. Lausanne, 1984. Comptes rendus.

The challenge of ultra-high energies, ECFA-RAL Meeting, ECFA-83/68, Oxford, 1982. Comptes tendus.

The generation of high fields, CAS-ECFA-INFN Workshop, ECFA 85/91; CERN 85-07, Frascati, 1984. Comptes rendus.

63 LE COURRIER DU CNRS 43

Aux Etats-Unis, les physiciens étudient le projet d'un collisionneur proton-proton de 100 km ou plus de circonférence: le Désetton.
Un projet similaire consisterait en l'installation d'almants 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

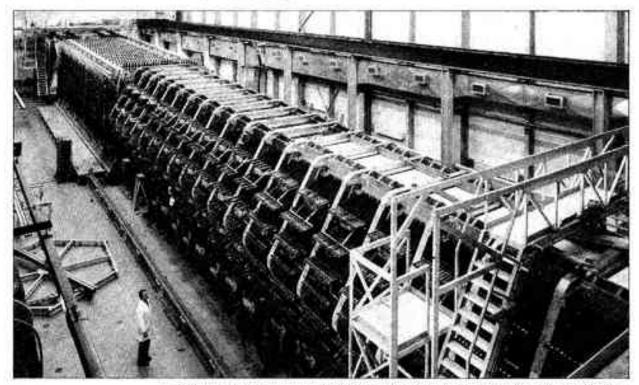
approche pluridisciplinaire.

sur de nouvelles idées. Certaines nécessitent une

# Le rôle insolite du neutrino

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

François VANNUCCI



Douz déterreurs dans le faisceau neutrine du SPS du CERN. Cullaborations CDHS (CERN - Dortmund - Heidelberg-Saclay) et CHARM (CERN - Hambourg - Amsterdam - Rôme - Moscou). Ces doux installations entregistrent les interactions des neutrinos avec la matière. Elles permestent d'étudier la structure du proton et du neutron, de déterminer les paramètres de la théorie électrofolble et de rechevelses de neuvelles particules. Le promier déceteur (CDHS) a une masse de 1400 tonnex © CERN.

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

Le monde baigne dans un véritable océan de neutrinos. es neutrinos (symbole v) peuvent traverser toute la terre, et en ressortir indemnes. Cette propriété, on 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

■ François Vannucci, professeur à l'université Purix VII, laboratoire de physique nucléaire et des huutes énergies, IN2P3 - université de Paris VI et de Paris VII. 4, place Jussieu, tour 32, 73230 Paris Cedex 05. Il est actuellement engagé dans une expérience qui cherche à mestre en evidence une éventuelle masse du neutrino.

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, done leur nombre augmente sans cesse. Ainsi le soleil envoie sur terre quelques 10<sup>th</sup> neutrinos par seconde et par m<sup>7</sup>, et le moindre réacteur nucléaire produit de l'ordre de 10<sup>m</sup> neutrinos chaque se-conde. 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

On connaît trois espèces distinctes de neutrinos: v<sub>e</sub>, v<sub>e</sub>, v,

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 convaincants.

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 antincutrino. 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, τ, et τ, et τ, sera toujours produit avec e, r, avec µ. Inverse-ment, dans ses interactions, r, creera un c et non un µ, tandis que v, créera un µ. Cette regle fut le résultat d'une fameuse expérience. prouvant qu'il existe au moins deux neutrinox distincts; on vérifia que les neutrinos produits en même temps qu'un muon redonnent toujours un moon quand ils interagissent. Quand, en 1976, le 1 fut découvert, on généralisa cette règle d'association, et très logiquement on fit l'hypothèse d'un troisième neutrino v. . Ce dernier neutrino est beaucoup plus difficile à produire que v, ou v, et. comme il n'interagit pas davantage, il n'a pus 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'avenement 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 nombrouses particules qui très rapidement se désintégrent 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, 1011 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 10th 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 v... Les réacteurs nucléaires sont de puissantes sources de v., mais d'énergie beaucoup plus faible et la statistique mondinte 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 no restait celui, fondamental, de lour 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 ex 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 farme et les preuves expérimentaies en faveur d'une masse n'existent pas encore de munière absolument convaincante. Pourtant, plusieurs phénomènes deviennent possibles des 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 v, on recherche, à une certaine distance du point où les v, sont créés, l'apparition de neutrinos de type v. ou v.. 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 décélent 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 B du tritium. Cette expérience donne une masse de 30 eV/ c' pour le neutrino v... 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 coux-ci n'ont pus 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 révélent 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.

<sup>\*</sup>L'une de ces expériences a été effectuée sous un réacteur de pursuance de la centrale EDF du flugey (Ameecs, Grenoble, Matseille, Collège de France et Socia). La veconde (Paris VI et VII) s'est fant dans le faisceau neutrina de l'accelérateur PS du CERN. Elle sera répétée, avec un désocieur améfioté, auprès de l'accelérateur 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 théatre de la mort, dix ans de recherches radicales sur le vivant.

Denis BABLET



cintre, 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 radiculisme en art, le refus de toutes les fausses avant-gardes et le désir impératif de promouvoir, Join 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

Voilă, trop schématiquement évoqués l'artiste Tadeusz Kantor et sa démarche. l'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 privilégies, 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

Interroger

d'assurer la meilleure formulation de ses

résultats.

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 Théatre de la mort (1), recueil de manifestes, de partitions sceniques, etc., précédés d'une introduction destince à "faire mieux comprendre", la pratique systématique de l'interview plus ou mains directive, élargissant le champ de l'introspection kantorienne. Interviews au magnétophone, intervièws aussi au mugnétoscope 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 passionnunt au point de vue psychologique". Il pariait 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 apparaissaient certes, mais sans la vision du personnage Kamor, 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 commence en 1972, c'est en 1976 que l'ai eu recours pour la première fois à la vidéo et, depuis cette date, cet emploi n'a pas cassé 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 amais être confondue avec l'objet luimême. Nous procurer des documents, tournés de telle manière qu'ils nous permettent de mieux pénétrer dans les structures même) du spectacle, d'en mieux dégager les articulations, les thèmes théatraux 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 seton 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 sot, 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 eu de l'acteur en concentrant l'attention

La recherche sur Tedeusz Kantor réclame un recours

A la recherche de Tadeusz

approches multiples. A travers écrits, esquisses et spectacles, pénètrer

l'œuvre de Tedeusz Kantor,

analyser son évolution. Le

théàtre saisi en tant

qu'événement vécu.

Kantor: une étude aux

La recherche sur Tedeusz Kantor réclame un recours expérimental à la vidéo utilisée selon différents points de vue pour approfondir l'analyse des structures du spectacie, notamment dans les domaines de l'espace, du mouvement, du jeu de l'acteur.

63 LE COURRIER DU CNRS 47

de l'analyste sur les éléments les plus

Cela dit, il ne faut pas penser qu'elle

importants.



Wictopole - Wictopole.
Le photographe et son appareitphoto mitraultense (Flacence, Islan,
1906), Photo Jacquie Bakkel CNRS.

Le XI\*\*\* volume des Voles de la création théâtrale, entièrement consecré à Tadeusz Kentor, 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 résutats: 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 démonter 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 a 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 consacté à un seul homme de théâtre, le volume XI étant voue 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-Wielonole.

### 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-Arcanal 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'ane 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, exquisses 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'anton ?

# Tadeusz. Kantor, grandeur et misère du monde. au théâtre

Telle semble être la vision du melleur en scane polonais, Tadeusz Kantor, l'un des createurs et des théoriciens de l'ert dramatique qui ont le plus marqué notre époque Lorsque l'on assiste à la conference int-miste conçue et filmée sous la direction de Denis Bablet, consacrée à Tadeusz Kantor, on se rememore le cinéma berlinois des innées 20, et plus récemment, les spectsclas des Souffes du Nord. Denis Bablet nous montre notamment des extraits de La Classe morte avec son defile de figures de cire et de Le Lettre des sept facteurs, longue de 14 m, dell à la communication moderne. Dens Le retour d'Ulysse, la chaise de Pene-lone symbolise le rôle-clef des objets dans la philosophie de Tedeusz Kantor, "L'objet pauvre, effirme-t-il dans son manifeste, cal disponible pour l'art, ceta montre sa valeur pour la création | entre la poubelle et l'éter-Quant au texte littéraire, sussi important soit-il, ce n'est pas le fondement, selon T Kantor, d'une pièce de théâtre, mais l'un des instruments de la creation théâtrale, la sienne, qui ne peut a épanquir que dans la contestation des atyles et des formes en place. Déla, le happening bouleverse le réglage traditionnel et contribue à amener le matteur en acène à des ections multiformes que nous propose catte longue évocation de 2 n 1/2 i luminosas cruelle du noir et blanc sembre comme le crépuscule, vide scéni-que pour l'enpace mental et la solitude Fondateur d'un théâtre radical, theoricien de la sconographie et de l'art, Tadeusz Kantor s'explique dans de film de recherche de grande qualité. Un scénario et un découpage court construits autour des sequences d'interviews ainsi qu'un choix d'extraits de sea on acener exemplaires eclaireraunt avec bonbeur l'œuvre de T. Kartor pour qui "Le concept de la vie ne peut être mintroduit en art que par absence de vie". Reste donc à renliser un court metrage de 30 minutes

Manigue Mounier-Kuhn



Wielapate - Wielapole. Le viol de la mariée (Rorence, Jain 1989). Photo Jacquie Bables/CNRS,

Wielopole-Wielopole) et de répétitions de son tout dernier, Qu'lls crèvent 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 Dadaisme, l'objet, etc. Les spectacles, enfin, tournés avec des moyens très limités: pour les trois quarts avec une scule 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'acuvre" cinématographique, mais si l'"œuvre" naît,

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 reconstruction, rupture de Fillusion.

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 théâtrafité, 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'empioi 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 la où lui-même ne l'avait pas forcément prévu mais on it joue subtilement ou séchement. 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 movens 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. Bablet, Lausanne, L'Age d'homme, 1977. Nouvelle édition revue

(2) Tadeusz Kantor pelatre, document vidéo de D. Babiat, image de D. Cart Brown, son de F. Didio, production du CNRS/Audiovisuel,

(3) Tadeusz Kantor, Les Votes de la crégiton théàrrale, vol. XI, textes et études de T. Kantor, D. Bablet et B. Eruli réunis et présentés par D. Bablet, Paris, Editions du CNRS, 1983. (4) Le théâtre de Tadeutz Kanzer, un film conçu et réalisé par D. Bablet, 16 mm, couleurs, son optique, 2h24 mn. Co-production CNRS Audiovisuel - Arcanal ministère de la Culture. Images: J. Blumberg, M. Braunstein,
J. Neuman, C. Pelland; son: F. Didio,
K. Michalski, R. Zosso; montage: J.-C. Nicaise;
montage negatif: S. Jousse; assistante à la
réalisation: J. Bablet; directrice de production: B. Feinberg.

### A la recherche

# LES GELS PHYSIQUES

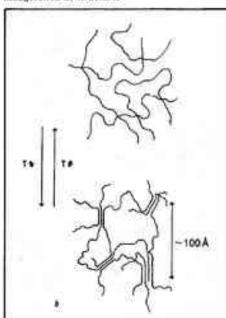
Sous le vocable "gels physiques" se cachent certains systèmes faisant partie de notre vie quotidienne tels que le cristallin de l'œil ou la gélatine. On ne réalise pas immédiatement qu'ils ont une foule de points communs avec la fibre "haut module" de polyéthylène ou certaines fibres textiles de PVC.

Jean-Michel GUENET

Jétude 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 désà 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, goofié par un solvant. La tridimensionnalité est obtenue par pontage entre les différentes macromolécules réalisé de deux manières : soit chimiquement par Mison 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 pus nécessairement que seuls les polymères totalement stéréorèguliers (c'est-à-dire cristallisables) possèdent l'aptitude à gélifier physiquement. En effet, des polymères à structure irrégulière (atactiques) tels que le polychlorure de vinyl (PVC) ou le polystyrène atactique peuvent aussi donner des gels physiques. Curiousement, bien que le phénomène de gélification des polymères synthétiques soit connu depuis une vingtaine d'années, peu d'études systèmatiques ont été mises en œuvre. Il faut souligner que le plus souvent, ees gels se formaient intempestivement lors

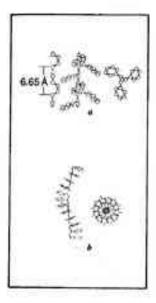


~50A



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

Cs travail est réalisé en collaboration avec J.C. Wittmann, B. Lotz, H. Mutin, J.S Gen, J. François, D. Senerin, J. Hery, X.W. He, S. Cundau.



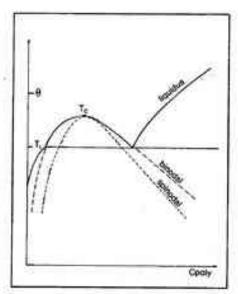


Fig. 2. Représentation simplifiée des hélices 3, (a) et 12, (b).

Fig. 1. Diagramme hypothètique températureconcentration pour un polymère stéréorégulier. Le
liquidus définit la ligne de cristallisation. La position de cette ligne est fortement dépendante de la
ritesse 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 démixition 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
r'èseau" engendrée par décomposition spinodale
laisse suggérer que la structure du gel physique provient d'un tel mécanisme. La température 0 coerespond à T, pour un polymère qui aurait une masse
infinie. Elle est caractéristique d'un couple danné
polymère-solvant. On notera que la phase concentrée (le gel) se retrouve à une surfusion beaucoup
plus grande après la séparation de phase. En conseque ca 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 fornation 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: polydiméthylsiloxanne-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.

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

### 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 gets physiques de polystyrène isotactique. Ses chercheurs ont découvert par diffraction des rayons X l'existence, dans ces gets, 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 jarmais 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 modérêment concentrée dans la décaline (solvant synthétique  $C_{sp}H_{11}$ ;  $C_{so} = 5\%$ ) gélifie si elle est trempée à 0°C. Le gel ainsi obtenu présente un point de lusion vers 60°C. Cependant, si l'on trempe à 50°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 °C. La conclusion est qu'il faut tremper en-dessous d'une température T, 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 theemodynamiques. Revenons aux questions posées par l'hystérèse prononcée entre la formation et la fusion du gel. Par des mesures plus systèmatiques, le groupe de Bristol a déterminé T., dans la décaline. Cette température est d'environ 20°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 9 du polystyrène dans la déculine 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 9 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 separation de phase n'a pas eu lieu, la gélificution 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 aupuravant pour expliquer la gélification de l'agarose.

Fig. 4, a) gel formé à -25° C b) gel ramené à température anbiante t) le même gel refruidit à 0° C.

9

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 methode, nous avons renforce l'existence du mécanisme "séparation de phase avant cristallisation". Nous avons remarque qu'une solution dans la décaline trempée légérement 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 reapparaît (fig. 4c). Dans le cas de la décaline, ce processus est totalement réversible et la transition turbide-clair se produit à température fixe (T = 10°C) qui correspond à la traversée de la binodale (voir fig. 3). En utilisant d'autres solvants θ (θ variant de 6°C a 52°C) nous avons observé que la température de transition varie dans le même sens que 9. Nous pensons que cette turbidité "réversible" correspond à une séparation de phase secondaire se produisant dans la phase diluce après que la phase concentrée nit été figée par cristallisation. Cette transition apparaît comme la signature du mécanisme de séparation de phase requis pour initier la gelification.

Cependant, si dorénavant un mécanisme général pormet 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 pos 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 meeure où sa disparition coincide 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<sub>a</sub> = 90°C pour une vitesse élevée, fusion de la 12,, T. = 170°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 misons 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 solvatation 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

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? A l'aide d'une technique d'extraction qui serait trop longue à détailler ici, nous avons réusis à examiner un gel au microscope électronique. La micrographie (fig.5) révèle que le gel est en fait constitué de fibrilles de 400 A 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 systèmatiques 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.

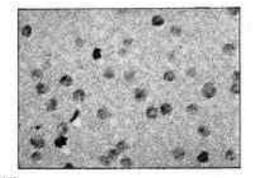
### Polymères atactiques : polystyrène atactique, PVC

 Polistprine otactique.
 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°C). Le sujet prêtera certainement à controverse pendant

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

La morphologie se révêle être une résille de maille de l'ordre de 1 µm 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-chlorododécane (après transformation en 3,). Les fibrilles correspondent à la structure du gel. Quant aux taches, ce sont des cristaux à chaines repliées qui ont crû à partir de la phase dilaée lors du traitement thermique.



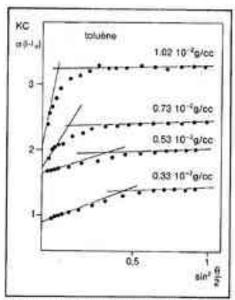


Fig. 6. Diagramme de Zimm (inverse de l'intensité diffusée en fonction du carré du sinus du demiangle de diffusion) pour un polystyrène atactique (M<sub>c</sub> = 3 10°) en solution dans le toluène à des concentrations où les chaînes s'enchevêtrent isemidiluée ou moyennement concentrée). Dans le cas d'une solution sans hétérogénéité, l'intensité diffusée devrait quoir la forme:

 $I^{+}\theta = (\frac{16}{\lambda} \frac{n^{4}}{2} \sin^{3} \frac{\theta}{2} + \xi^{-2})$  où  $\xi$  est la longueur d'écrantage du volume exclu. Expérimentalement, on desrait donc obtenir une variation linéaire.

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 done y avoir corrélation entre les deux effets. Dans le cas de la diffusion de lumière, ce serait des pré-gels qui scruient responsables de l'anomalie relevée à température ambiante. Il est bon de souligner que ces gets, 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

#### · PVC

reste encore à élucider.

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 alactique, 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 condiciraient à la formation du gel. Cepradant, d'autrès chercheurs pensent que la gélification est due en fait à des liaisons hydrogènes qui assureraient le pontage entre chaînes. Not 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 ent déjà trouvé des applications dont une est particuliérement spectaculaire. Il s'agit de la fibre de polyéthylène à "haut-module". Partant d'un gel physique de polyéthylène qui est ensuite etire, 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 critalline). 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 chinsiques, pourrait être satisfait grâce aux gels.

### BIBLIOGRAPHIE

Girolamo (M.), Keller (A.), Mlyasaka (K.) et Overborgh (N.), Journal of Polomer Science, Physics Edition, 1976, rf. 14, p. 19. Wellinghoff (S.), Shaw (J.) et Baer (E.), Macromolecules, 1979, rf. 12, p. 932. Sundaragian (P.R.), Tyrer (N.J.) et Bluhm (T.L.) Macromolecules, 1982, rf. 15, p. 286. Guenet (J.M.), Lots (B.) et Wittmann (J.C.) Macromolecules, 1985, rf. 18, p. 420. Tan (H.), Moet (A.), Hiltner (A.) et Baer (E.), Macromolecules, 1983, rf. 16, p. 28. Beneit (H.), Picot (C.) Pure appl. Chem. 1966 rf. 12, p. 545. Guenet (J.M.), Wilmott (N.F.F.), Elismote (P.A.), Polymer Communications, 1983 rf. 24, p. 230. Yang (Y.C.) et Gell (P.H.), Journal of macromolecular Science, 1983, B 22, rf. 1, p. 463.

#### BIBLIOGRAPHIE COMPLÉMENTAIRE PROPOSÉE PAR LE COST

Le Centre du 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 communde p. 33).

63 LE COURRIER DU CNRS 53

Il semble que les polymères noncristallisables peuvent 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 example dejà existant : la fibre polyéthylène à hautmodule obtenue par étirage du gel physique.

### A la recherche

# L'ÉTUDE DE L'ATMOSPHÈRE PAR RADAR ST



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

Antennes de type coasial culiviraire du ruder ST installé à Termes d'Armagnas dans le cultre de la campagne "Fronts 1964", € 1.SELT

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 mosures aussi blen dans le nuage que dans son environnement.

lors 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 des avant la seconde guerre mondiale pur des radars militaires opérant dans la gamme des ondes métriques et décamétriques. C'est en fait la recherche d'une meilieure résolution spatiale qui alluit 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, grélons, 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 météoro-

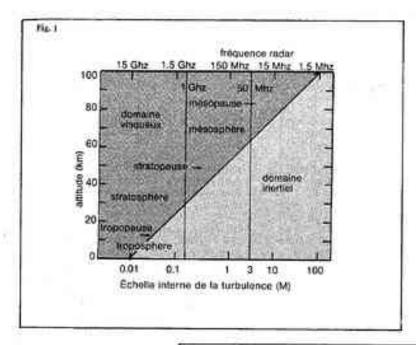
- les radars centimétriques classiques destinés à établir les cartes des précipitations (réseau Aramis en France);
- les rudars centimètriques Doppler en vue de la restitution du champ de vitesse du vent dans les formations nuageuses précipitantes (radar Ronsard en France);
- · les radars millimétriques 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 phénomênes 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 synaptique 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 rudar 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 "profileur" unidimen-

Michel Crochet, professeur, laboratoire de kondages électromagnétiques de l'environnement terrestre. UA 705, université de Toulon et du Var, "La Giponne", boulevand des Armaris, 83100 Toulon.



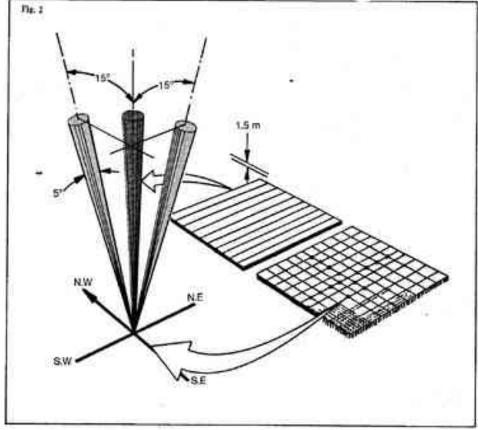
sionnel, abandonnant les champs tridimensionnels précédents; cette méthodologie était depuis longtemps utilisée par les spécialistes des études radar de l'atmosphère ionisée (100 à 500 km d'altitude), ce qui explique l'obtention des premiers résultats par le puissant radar ionosphérique de 50 MHz de Jicamarca au Pérou (Woodman et Guillen, 1974) et le fait que dans tous les pays, les ionosphéristes alfaient 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 opérent 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 inexistants.

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 pormet 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 turbuleuce (échelle interne) en junction de l'altitude avez identification des trois enuches (traposphire, straumphère, méinsphère) et de leurs frontières (trapopause, straumpause, mésopause). A chaque fréquence radar, l'échelle minimale de la turbuleuce associés définit sur la droite vhilique l'altitude maximale que ne pauera théoriquement dépaster un radar SI ou MST opérant à la fréquence considérée.

FIG. 2. Un radar VIII sepérant à 50 MHz devra atiliser des antennes de 50 m à 100 m de côté difficilement arientubles. Trois réseaux d'antennes coaxiales colinéaires (ou COCO) permettrous d'abtenir simultanément par dépharage trois faisteaux directifs indépendants en oue de la restitution du secteur vent à l'aide de trois mesures à la serticule et dans deux directions inclinées de 15° par rappart au génith dans deux glans arthogonaux.

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, atlant de la micro-échelle à l'étude des relations troposphèrestratosphère. entre ces deux domaines, appelée échelle interne de la turbulence, varie avecl'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 neuvent 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 stubles 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 explore 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 Ed proportionnel à la vitesse radiale de la cible turbulente entraîné par le vent; cette fréquence Doppler sera extraîte 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 d'estinée 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 operant 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-Brotagne, 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 assentiellement 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,

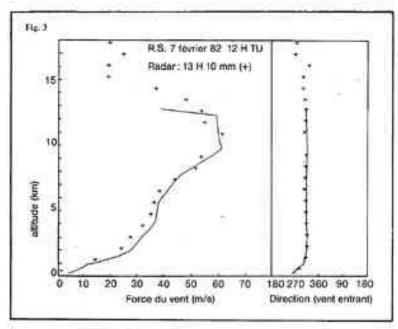
### Domaine d'application

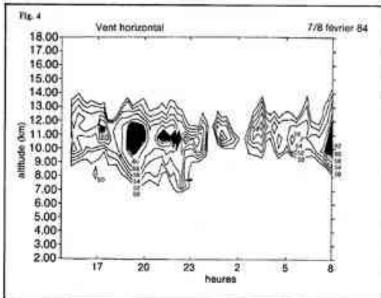
Les radars ST présentent des performances particulièrement originales :

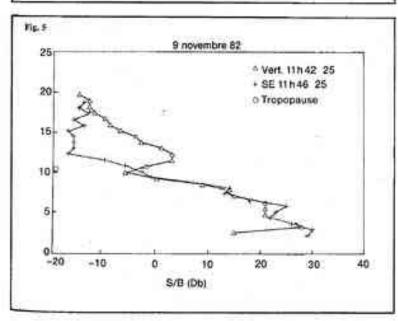
- permanence des mesures (en air clair ou nuageux, avec ou sans précipitation),
- extension en altitude (≈ 500 m à ~ 25 km).
- hatite résolution temporelle (de quelques secondes à quelques minutes pour l'obtention d'un profit vertical).
   Les domaines de recherche et d'application découlerent de ces 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 "jetstream") 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 particuliérement bien adapté à la détermination en routine du profit 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'annalyser les boulfées de vitesse (fig. 4) qui sont parfois associées à d'importantes perturbations météorologiques au sol.

giques 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

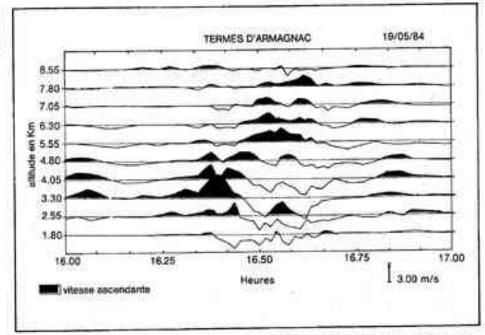
stratosphère-troposphère. Le radar ST permet de déterminer localement la vitesse verticale de l'air et d'identifier les zones d'ascendance et de subsidence en air clair comme en air nuageux (fig. 6). Cette vitesse verticale est modulée par les ondes de gravité qui affectent l'atmosphère (fig.7). Par sa capacité à faire des mesures permanentes avec une haute resolution 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 on 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).

ITG. ). Compareison des mesares du vent horizontal obtenu por radiosendage à partir de la station de Mines (coarbe continne) ei par radar ST (croix) à partir de la station de Fou indiquant an excellent necond antre les metures matgré ann distance de l'ordre de 30 km entre les stations. Pour des tandions de vent très forts d'environ 220 km/h à 11 km d'altitude, le ballon ne peut plus être localisé au-dessas de 12 km alors que le radar peut effectuer des mesares jungo'à 20 km.

FIG. 4. Observation par radar en Camarque en férrier 1954 de condictions caractéristiques d'un paissant courant ("Jet streum") au voirinage de 11 kilomètres d'altitude. Les courbes regrésentées sont les inocumiours des tiesses supéricares à 50 m/s. On observe d'importantes bouffees de vitasse à plus de 60 m/s ("Jet streuks") qui peuvent être associées à des conditions de maurais temps ainsi que d'importantes variations de la vitesse reliées à de forts cisaillements du vant, souvent à l'arigine d'une forte turbuience en air clair qui peut affecter la navigation aérienne.

FIG. 5. Comparaison des profits de l'energie des signaux rétrodiffasés respectivement en versical (6-2) et en ublique (1-4) en Camarque en novembre 1862 avec le radar 57 de 50 MHz. On consteix que l'énergie est plus forte en vertical qu'en oblique àu-dessus de la tropopulate située à environ 10 km. Cette différence est due à des phénomènes encore mul connus, souvent ussociés à des réflexions particles sur de forts gradients de température. Pour les basses fréquences VIII, ce phénomène favoir les étades en vertical à haute voltisade avec des mygens relativement mulestes comme ceux employés en Camarque. De plus, ce phénomène observable en permanence, permet de localiser immédiatement par radar l'editude de la tropopaute su niveau de la croissance du signal en vertical.

FIG. 6. Observation per radar SI de la modulation de la vitette verticale pendant un orage lors de l'expérience Londer -Fronts 1984.



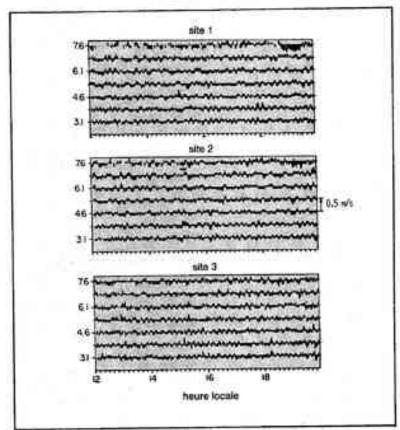


FIG. 7. Représentation d'ondes observées sur la vitante verticule en trois stations sluvées au sommet d'un triangle de 5 km de clief en Comarque le 14 mai 1983 lurs de l'expérience Alpex - Prevence effectuée en collaboration entre le LSEET et le Laboratoire d'adronnaise de la NOAA (Boulder, Colorado, États-Units).

### Perapectives

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 devisit 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 troposphèrestratosphère, des vents locaux et des ondes de gravité.

### BIBLIOGRAPHIE

Battan (L.J.), Radar observation of the Atmosphere. The University of Chicago Press, 1973

Eckiund (W.L.), Balsley (B.B.), Carter (D.A.), Riddle (A.C.), Cruchet (M.), Gatello (R.), "Observations of vertical notions in the troposphere and lower stratosphere using three closely-spaced ST radars", Radio Science (sous presse).

Sauvagest (H.), Radar météorologie, Eyrolles, 1982.

Woodman (R.) et Guillen (A.), "Radar observations of Winds and Turbulence in the Stratosphere and Mesosphere", Journal of Atmorphere Science, 1974, p. 31, p. 493.505.

#### BIBLIOGRAPHIE COMPLÉMENTAIRE PROPOSÉE PAR LE COST

Le Centre de documentation scientifique et technique du CNRS propose de fournir aux lecteurs intéressés une bibliographie comportant les 100 références les plus récentes signalees dans la bise de données PASCAL (voir bon de commande p. 11).

# Enquête

# L'INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DANS LES UNITÉS DE RECHERCHE

Qui publie, dans quel support et dans quelle langue?

INCOMPANIES.	ARROLD WALE							
	%	The	1/4	1/10	ACTES DE COLLOGAS	CANAMACE	Campion	ACADEM DE ACADEM CONTRA CONTRA CONTRA
PHYSICAL MALENNE	19	6.	1	19.	40	D	100	
MATHEMATYCE TO PASSE	142	are	413	1001	1973	- 12	/94	*
CONTRACTOR S	545	101	50.	- 903	1403	79	42	
CION	1800	N/4	200	2974	1200	- 77	- 97	179
THE CHINA	494	167	1.179	104	101	78	- 41	:40/
EDENCE THE LAWE	2293	423	201	4000	3310	337	381	240
TO LA BOOM	ew.	627	67	494	30M	2594	100	200
rath	5480	7902	1301	11725	1600	E78E	BUJ	784

Nombres de publications scientifiques parues en 1981 et 1982.

(LF/RF; articles en langue française dans des revues françaises

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

LE/RF: articles en langues étrangères dans des royues françuises

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 moitlé 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 - ai 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 prémiers questionnaires. Il s'agit donc d'un processus d'enquête relativement lourd dont l'exploitation se poursuit actuellement.

(\*)

Rapport n°1: Iliian giobal du recemement de l'activité IST, effermé en juin 1983, pour chasan des sept départements scientifiques (lu CNRS: Physique nucléaire et corpusculaire (IN2P3). Mathématiques et physique de base, Sciences physiques pour l'ingénieur, Chimie, Terre-océan-atmosphérs-espace, Sciences de la vie, Sciences de l'homme et de la societé, présenté en Mai 1984 (7 densiers de 2 pages plus amexes).

17 densiers de 7 soges plus america.)
Rappet e 2: Analyse compares de l'activité IST recensée en juin 1963, entre les aix départements acientifiquée: Mathématiques et physique de base. Sciences physiques peur l'impénieur, Chimie, Terre-ocean atmosphère-espace, Sciences de la vie, Sciences de l'Bonnne et de la société, présentée en Mai 1984 (55 pages plus annexes).

Sciences de l'homme et de la société, présentée en Mai 1984 (55 pages plus annexes).
Rapport se'3: Frésentation des résultats de l'engaête DIST-1983 pour chucuné des 43 sections du Comité national de la recherche scientifique (excepté les sections 01 et 02) en Novembre 1984 (133 pages).

Le département Physique modifaire et corpusculaire de figure par dans les rapports 2 et 3, vu le faible taux de répartes en 1983. (Ces très rapports peuvent être consultés à la Direction de l'information etientifique et technique. 15, quai Amstote France - 19700 paris).

### BIBLIOGRAPHIE

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

Enquête réalisée par Colette Deschumps, docteur d'Etat ès sciences, chargée d'études à la DIST et François Gladel, vacutaire CNRS, fortné à l'Institut national d'études démographiques.



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

a plupart du temps, les actions de diffusion scientifique et technique sont placées dans le cadre de journées "portes ouvertes" ou d'expositions, sans forcement 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 Sélextat" (16-19 avril 1985) qui associaient étroitement les industriels à la rectierche et répondaient à deux principes que nous nous étions fixés: · organiser une manifestation dans une ville d'Alsace nutre que Strasbourg, car trop souvent les actions de diffusion scientifique et technique ont lieu dans

toires 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.

des villes qui hébergent déjà des laboru-

### Montage de l'opération

Au œur du projet, une entreprise, en l'occurrence la Société Alsacienne d'Aluminium (SAA). Cette entreprise située à Séiestat emploie 750 salariés. Elle fabrique des complexes d'emballage à base de feuilles d'aluminium, de films plustiques 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 rocherche CNRS, detaché à l'AMUSS, Institut Charles Sadron (Centre de recherche sur les macromolécules - CRM - / Ecole d'application des hauts polymères - EARP -), 4, rue Boussingault, 67000 Strasbourg.

60 LE COURRIER DU CNRS 63

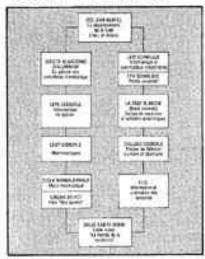
### L'AMUSS

L'Association pour les trusées des sciences de Straubourg (AMUSS), crées en 1982, a commé buts la diffusion scientifique et technique sois tous ses aspects et la construction d'une Malson des sciences ou Certire culturel scientifique technique et industriel-CCSTs à Strasbourg. AMUSS, musée zoologique, 29 bit 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 pêtrole 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 moontaient aux visiteurs la vic des matières plastiques, de la



Lieux d'implantation et thêmes de la manifestation.

molécule chimique de base à l'obtention de polymères en granulés puis de produits finis (plaques, mousse, etc.). Les "expériences", plus vivantes, rassemblaient le plus de jeunes, notamment la fabrication de mousse de polyuréthanne 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 renduit dans deux ateliers qui prennent 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

Comme l'inique le schema 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).

A l'occasion de cos manifestations, l'aurour tient à remercier la Direction du CNRS qui a bien voulu autoriser son détachement parties à l'AMUSS.

### Flash Actualités

### LES ASTRONOMES FRANÇAIS PRÉSENTS AU RENDEZ-VOUS AVEC HALLEY

Fin sout, premiere mondiate. Le radiotéléscope de Nançay (CNRS-Institut national des sciences de l'univers) détectait la premiere émission en provenance de la comête de Halley. Depuis cette date les observations radio montrent que la production gazeuse de la comête ne cesse de croltre régulièrement. On envisage un taux de production de 2.10<sup>23</sup> molècules par seconde, lors de son maximum d'activité. Halley se situerait parmi les comêtes les plus productives et de toute façon la comête périodique la plus brillante.

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

Pour le 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 Midiet de Toulouse ont confirmé les résultats radio, l'activité de la comête s'accélérant très rapidement. Milieu novembre, la magnitude de la comête se situait en-dessous de 7. Elle pouvait, des lors, être observée à la jumelle dans de bons sites. Des astronomes américains et un astronome français au Pic du Midii l'ont observée 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 Millimètrique : CNRS - Mex Planck Gesellschaff), nouvellement installé au Pico Veleta (Sierra Nevada-Espagne), à 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 Ciffreo a découvert une nouvelle comète, proche de la comète de Halley, sur un cliché réalise par Jean-Louis Heudier avec le téléscope de Schmidt du Centre d'études et de recharches géodynamiques et astronomiques funité essentiale au CMPS!

(unité associée au CNRS)

La comète Ciffreo 1985 P (16\*\*
comète découverte en 1985) se trouvait à environ 165 millions de kilomètres de la Terre. Elle a probablament une trajectoire parabolique (comète non périodique).

Elle est passée au plus près du sciell 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 trevail sur la recherche, avec l'aide du chercheur

Nous avons pour dela sollicité les chercheurs six cent vingt se sent portes volontaires pour la rentrée sociaire 1985 - c'est un très beau score

Côte Education nationale, les rectorats ont fait en sorte que tous les typées aiont reçu la liste des chercheurs volontaires de teur région.

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

A ce jour, de très nombreux contacts ont été pris : acixante se sont concrétises : 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 Naricy, deux à Besançon

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

Une initiative du CNRS à suivre.

Pour tous renseignements, s'adresser à Medame Kountsky-Lioret, 15, quai Anatole-France, 75700 Paris.

## Les Éditions du CNRS

### Point de vue sur...

#### Parallélisme, communication et synchronisation

Ouvrage collectif, responsables J.-P. Verjus, G. Raucairal, 604 p., III., 200 F.

■ Cet ouvrage collectif est un recueil de réflexions théoriques sur les problèmes posés par l'exècution 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 Pétri, le langage PROLOG et des résultats algébriques empruntés à la théorie des groupes.

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 liées à l'expression du parallélisme, dans le cadre d'une application "répartie", ou dans celui du calcul vectoriel. Enfin, les dernions 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 sculement 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 poursuivant au sein du groupement C3 (cooperation, communication, concurrence). A côté de son intérêt incontestable pour les informaticiens proches de C3, ce livre traite de plusieurs sujets qui pourralent 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

Jucques d'Olier

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

mettre, partiellement, à leur portée,

les résultats obtenus,

- A. Lombard-Jourdan, 248 p., ill., 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:

muis 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 reptier 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 ore 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 séche 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 témnignent les trois mégalithes qui existaient encore au Moyen Age; l'activité du port de Grève (même au plus fort de la prospérité de Lutéce 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 findu IV siècle, Sainte-Colombe, Saint-Paul et Saint-Pierre, devenu Saint-Merri, et Saint-Germain, devenu plus tard l'Auxerrois, au VIII'm 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 Scine, alors que la rive gauche est completement 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., iil., 170 F.

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

Jean-Jacques Roeder, 80 p., III., 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 theme "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 numbreux 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 Rocder 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 comunication 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 hibliographie, 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 puisqu'elle prévoit une parution de quatre à cinq volumes par an, et conservers une place aux monographies exceptionnelles (comme celle de Jean-Jacques Roeder) même si elle vise à privilègier 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 sur, les chercheurs specialistes, 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., III., 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 piroguière 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

Los questions principales qu'elle pose et auxquelles elle s'elforce de répondre sont donc: "comment est-il possible qu'un centre de pêche si actif avant 1960 ait pu être, en moinx de dix anx, à ce point marginalisé, alt 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 su: 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 sculement 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.

Herve Thery

Ces ouvrages sont disponibles chezvotre libraine habituel ou à la librairie du CNRS, 295, rue Saint-Jacques - 75005 Paris - Tel (1) 43, 26.56.11

assez bien les diverses facettes que la

collection "Comportements" pourrait

offrir dans les années à venir

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

Gallia, tome 42, fascicule 2,

1984 - Fouilles et monuments

archéologiques en France

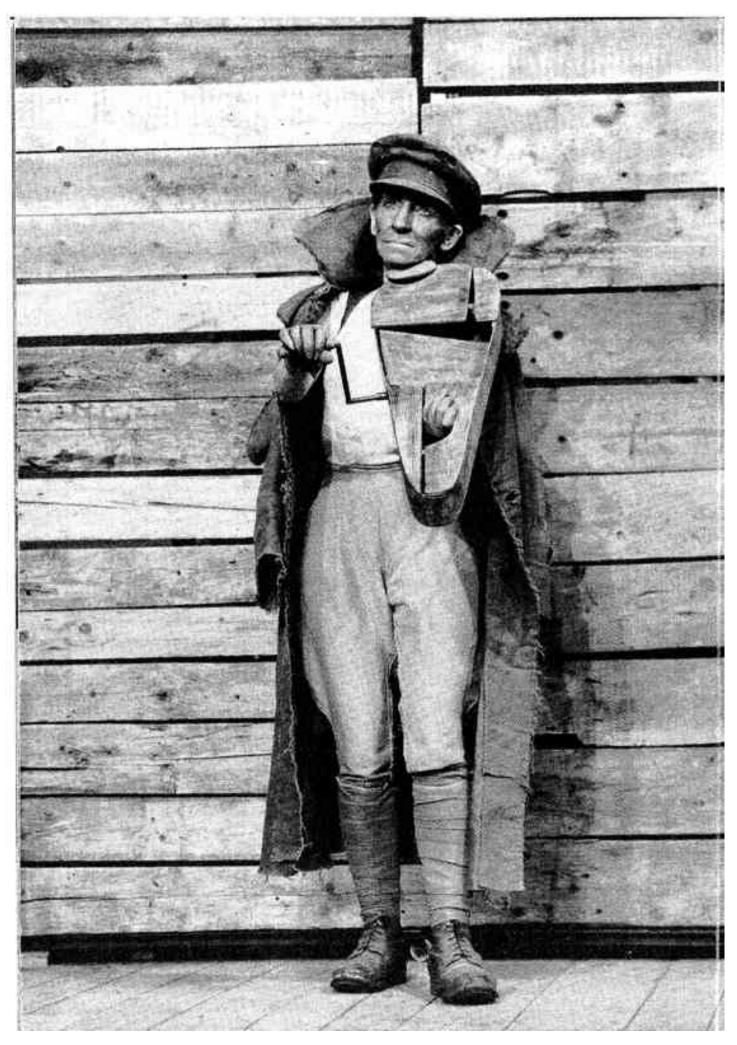
métropolitaine, 216 p. ill.

L'absolutisme eclaire, colloques de Matrafüred, ouvrage EF collectif, co-édition Akadémiai Kiado, Budapost, 364 p. Paraisses et communes de France, Démographie paysanne en Bax-Quercy, 1751-1872 - Familles dictionnaire d'histoire administrative et démographique, Charente Maritime / 17 Philippe Hercule, et groupex sociaux, Jean-Claude 632 p., ill. Sangor, 312 p., ill. 200 Les cephalaspides du Spitzberg. Les noms de personne sur Philippe Janvier, Cahiers de le territoire de l'ancienne Gaule - III. paléontologie, 256 p., ill. 300 Les noms de personne contenus dans les nums de l'eux. Marie-Thérèse Revue d'histoire des textes -Marlet, 564 p., tomes XII-XIII/1982-1983, Les fibules en Gaule 420 p., ill. 450 méridionale, de la conquête à la fin du Ves slècle aprèx J.C., Michel Recuell des inscriptions gauloises Feugère, Revue archéologique de (RIG), sous la direction de Paul-Marie Duval. Volume 1: textes gotto-Narhonnaise, supplément 12. grees, Michel Lejoune, collection 688 p. III. supplément à Gallia, 45, 476 p. ill. 480 Archives parlementaires de 1797 à 1860, première série (1787-1799), tome XCIV du 13 Recueil des sources arabes concernant l'Afrique occidentale du VIII au XVV siècle (Bilàd althermidor au 25 thermidor An II (31 juillet au 12 août 1794), 636 p. 460 Sildan), traduction et notes par Joseph M. Cuoq (réimpression), Gallia prehistoire, 350 536 p., ill. tome 27, fascicule 2, 1984, Foullles Le personnel de l'enseignement et monuments archéologiques en et XX ... sunérieur en France aux XIX .... France métropolitaine, 180 p. ill. siecles, Christophe Charles et Paléorient 10/2, 1984, Revue Régine Ferre, 284 p., ill. 120 pluridisciplinaire de préhistoire et protohistoire de l'Asie du sud-est, Actes du IV est séminaire de l'école de biologie théorique, Solignac, juin 164 p., ill. 1984, ouvrage collectif, sous la 1789-1989 - Bicentenaire de responsabilité de G. Benchetris et la révolution française, nº 2/juin J. Demongeot, 352 p., ill. 290 1985, 304 p. Inscriptions latines de Comportement, 2/1985 Narbonnaise - Fréjus (ILN), Jacques Evolution des systèmes de Gascou et Michel Janon, collection communication chez les carnivores supplément à Gallia, 44, 232 p., ill. 290 et les primates : organisation sociale Carrê de Malberg et l'origine de et modalités de communication, la distinction entre souveraineté du Jean-Jacques Roeder, 80 p., ill. peuple et souveraineté nationale, Tchad, Regards sur les élites Guillaume Bacot, 204 p. 100 ouaddalennes. Contributions à la La Galère - marginalisations connaissance des élites africaines, juvėniles et collectivitės lucales, III, Issa Hassan Khayar, 232 p. ill. Jenn-Charles Lagrée et Paula Archéologie médiévale. Lew-fai, 284 p., ill. tome XV/1985, 352 p., ill. Catalogue des poésies françaises Basques et navarrais de la bibliothèque de l'Arxenal, 1501dans l'ordre de Santiago (1580-1620) 1609 Alison Saunders et Dudley Martine Lambert-Gorges collection Wilson, 208 p. Maison des pays ibériques, Annuaire de législation française 238 p. ill. et étrangère - Tome XXX/1983, 644 p. 400 Revue archéologique de l'Est et du Centre-Est, tome XXXVI, fasc. 1 et 2, 160 p., ill. Le muuvement ouvrier maghrébin, ouvrage collectif, collection Etudes et chroniques de l'Annuaire de Code pour l'analyse des l'Afrique du Nord, 336 p. ill. 90 formez de poterlex, Jean-Claude Gardin, avec la collaboration de Jean Carte écologique du Népal -Chevalier, Jacques Christophe et nepalganj-dallekh 1/250000, Jean-Marie-Rose Salomé (Réimpression), François Dobremez, Damodar Prasad 120 p., ill. Joshi, Tirtha bahadur Shrestha et Françoise Vigny, collection Cahiers La nécropole orientale

nepalais, document n.12, 16 p. ill. 100

fouittes de 1966-1967, Roger Guery, collection Etudes d'antiquités. africaines, 452 P. III. 250Atlas linguistiques de la France, tome II, Atlas linguistique et ethnographique de l'Alsace, A. Bothorel-Witz, Marthe Philipp et Sylviane Spindler, 402 p. iii. Atlas linguistiques de la France, volume III. Atlas linguistique et ethnographique de la Lorraine romane, L'homme Jesn Lanher, Alain Litaize et Jean Richard. 360 p., III. 150 Les voles de la création theatrale, volume I, J. Grotowski, E. Barba, Living Theatre, Open Theatre, V. Garcia et Arrabol (réimpression), sous la responsabilité de Jean Jacquot, collection Arts du spectacle, 348 p., III. Carie de la végétation de la France au 200 000°; notice détaillée, végétation des Pyrénées, 69 Bayonne, 70 Tarbes, Toutouse, 72 Carcassonne, 76 Luz. 77 Foix, 78 Perpignan, G. Dupias, 212 p. ill. Bihliographie hirmane, années 1960-1970, partie alphabétique de G à L/2' fasc., Denise Bernot, 230 336 p. 60 Contribution à la théorie générale de l'état (2 tomes), R. Carré de Malberg (réimpression), 230 1532 p. 320Les contradictions du sandinisme - Nicaragua, Juan Diaz, Claire Pailler, Roberto Santana et Pietre Vayssière, collection Amérique latine - pays ibériques, 264 p. iil Voyages en France par les pays de faible denzilé, ouvrage collectif sous la direction de Nicole 70 Mathieu et Pierre Duboscq. 196 p. ill Antiquités africaines, tome 21/1985 et table des tomes 1 à 20, 296 p., ill. 400 Cahters d'onomastique arabe - 1982-1984, ouvrage 61 collectif sous la responsabilité de Jacqueline Sublet, 172 p. 90 Radio et télévision en Europe, colloque, sous la direction 170 de Charles Debbasch, 356 p. 80 Summa Aurea - Guillaume d'Auxerre, Liber quartus, Jean 100 Ribaillier, collection Spicilegium bonaventurianum, co-odition CNRS/Collegii S. Bonaventurae, 400 578 p. Bibliographie annuelle de l'histoire de France -DU V siècle à 1958, année 1984, Colette Albert-Samuel, 980 p. 450

de Sitifio (Sétif, Aigèrie).



 $Fichier \ issu \ d'une \ page \ EMAN: \underline{http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/155?context=\underline{pdf}$