

# AUVERGNE SCIENCES

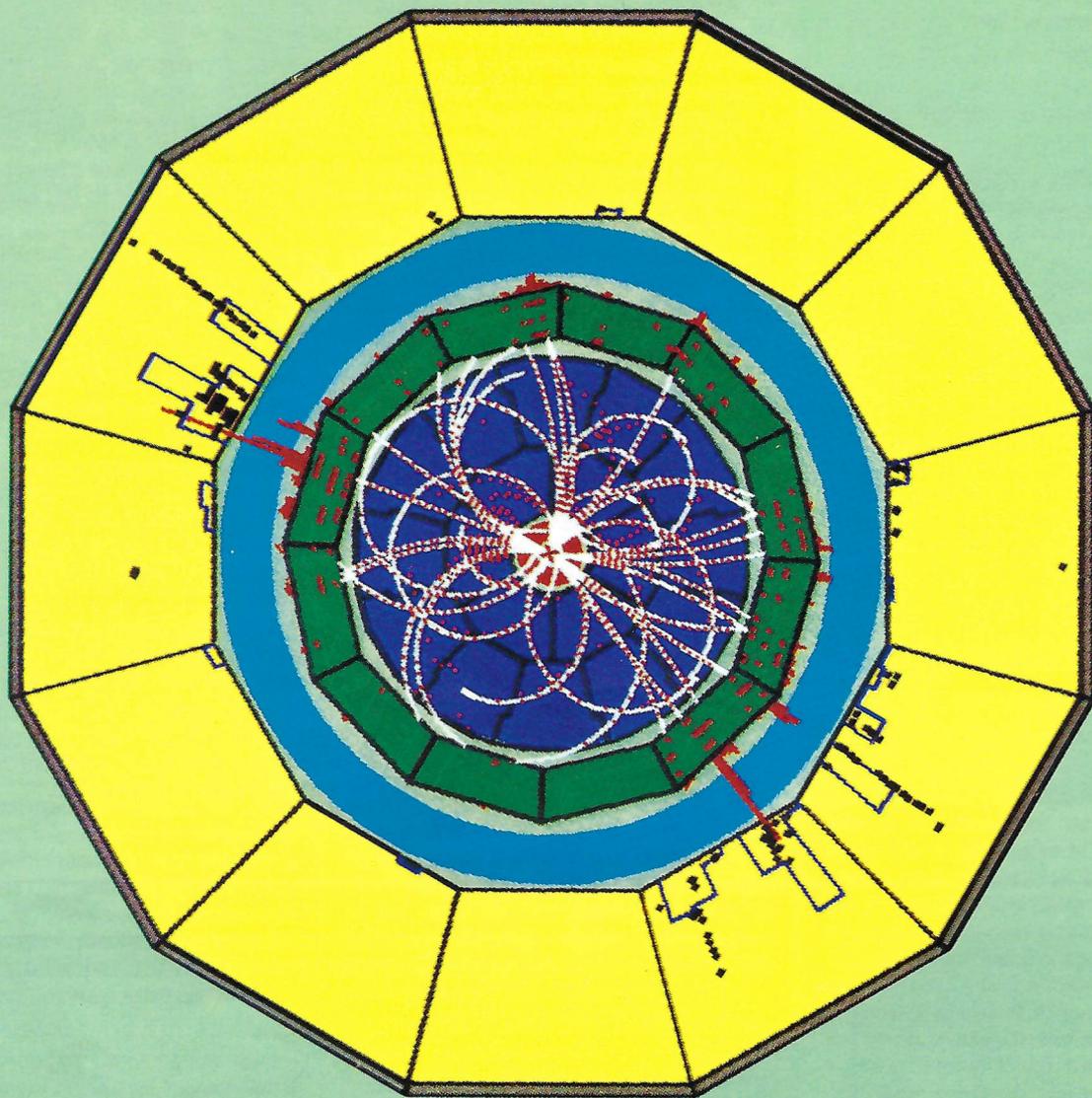
**BULLETIN DE L'ADASTA**

N° 15-16

Octobre - Novembre - Décembre 1990

20 F

**INTERVIEW DU MINISTRE de la RECHERCHE et de la TECHNOLOGIE**



**MONSIEUR DE LA PALICE DÉCOUVRE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE  
LE MONDE DE L'INFINIMENT PETIT**

**ASSOCIATION POUR LE DÉVELOPPEMENT DE L'ANIMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE EN AUVERGNE**

## SOMMAIRE

— Une interview de <b>Monsieur Hubert Curien, Ministre de la Recherche et de la Technologie</b> .....	3
— Le dossier : <b>Monsieur de La Palice découvre la mécanique quantique</b> par Charles Ruhla .....	5
— La recherche : <b>Le monde de l'infiniment petit</b> par J.-Cl. Montret .....	11
<b>La physique des particules au CERN Une expérience : ALEPH</b> par Bernard Michel .....	15
— Conférences-Visites <b>Les pesticides</b> par M <sup>me</sup> J. Fournier .....	18
<b>Le satellite Hipparcos et la nouvelle carte du ciel</b> par P. Bacchus .....	20
<b>Visite à Nancy Observatoire radioastronomique</b> .....	22
— Biologie <b>Les vitamines</b> par Michel Massaux .....	23
— Expositions .....	26-27
— Musée crozatier : L'acier, nouveau matériau	
— Université d'été : L'enseignement expérimental de l'optique	
— Mille milliards de microbes	
— La physique des sons	
— Découverte de l'Univers	
— Informations régionales — Semaine minéralogique de Saint-Germain-l'Herm (P.d.D.)	
— Visite du CERN .....	28

Le 2 juin 1986 était créée, à l'initiative de R. JOUANISSON, Maître de Conférences à l'Université Blaise-Pascal, et avec le soutien de quelques industriels et universitaires clermontois, l'Association pour le Développement de l'Animation Scientifique et Technique en Auvergne (ADASTA). Sollicité par l'assemblée des membres fondateurs présidée par J. FONTAINE, alors Président de l'Université CLERMONT II, j'acceptais d'assumer la présidence de cette nouvelle association. A l'issue de deux mandats successifs, comme le demandent les statuts, je vais dans quelques jours transmettre le flambeau au nouveau Président que désignera le bureau. Il m'est, dès lors, apparu souhaitable de dresser à l'attention des lecteurs d'Auvergne Sciences le bilan des quatre premières années d'activité.

Trois grands objectifs ont guidé nos actions :

- Contribuer au développement du niveau scientifique et technique du public et, notamment, des jeunes et de leurs formateurs.
- Montrer l'importance de ce développement pour faire face aux enjeux économiques et aux mutations culturelles et sociales.
- Faire connaître le potentiel scientifique, technique et industriel de notre Région.

Sur le premier point, je crois pouvoir dire, en évitant l'écueil de l'autosatisfaction, que la contribution de l'ADASTA a été abondante et de qualité. Nous avons présenté au public clermontois plusieurs grandes expositions scientifiques ; je n'en citerai que trois : l'exposition du centenaire de l'Institut Pasteur, celle créée par le Palais de la Découverte sur les insectes « mi-démons, mi-merveilles » et l'exposition, création propre de l'ADASTA, consacrée à l'Astronomie, en juin dernier. 10 000 visiteurs pour chacune des deux premières, 5 000 pour la troisième présentée dans un cadre, il est vrai, plus restreint, témoignent d'un réel succès rarement observé dans notre ville pour des manifestations de ce type.

Il s'y ajoute l'organisation de nombreuses conférences sur des sujets allant de l'histoire des sciences aux applications des techniques les plus en pointe ; elles ont été prononcées, pour la plupart, par d'éminentes personnalités scientifiques dont le Professeur H. CURIEN, Ministre de la Recherche, et ont rassemblé de larges auditoires (entre 100 et 200 personnes).

Notre action en faveur de la jeunesse s'est exercée en profondeur ; notre équipe pédagogique a créé un véritable centre de ressources en documents et matériels destinés aux enseignements de Sciences Physiques (plus de 30 documents pédagogiques), nous avons participé à plusieurs projets d'action éducative ; nous nous sommes engagés, en liaison avec la MAFFEN, dans de nombreuses actions de formation pour les enseignants du Secondaire (une centaine d'heures de stage par an, 3 universités d'été). Dans ces domaines l'ADASTA a franchi les frontières de l'Auvergne et ses matériels pédagogiques sont, par exemple, utilisés dans plusieurs académies.

Grâce à notre revue « Auvergne-Sciences », nous nous sommes efforcés de montrer par des articles et interviews l'importance du développement du niveau scientifique et technique pour affronter les enjeux économiques et les mutations culturelles et sociales de notre temps. Auvergne-Sciences qui a paru régulièrement au cours des 4 années est diffusé en Auvergne et hors de l'Auvergne. Cette revue a vaillamment résisté aux épreuves du temps et a gardé une qualité reconnue. Elle a, par ailleurs, contribué à faire connaître le potentiel scientifique et technique de notre Région, plusieurs articles consacrés à l'activité industrielle en Auvergne ont complété les visites d'entreprises organisées par l'ADASTA (une vingtaine de visites, un millier de personnes).

Il vous appartiendra maintenant, chers lecteurs, de porter votre appréciation sur l'activité de notre association lors de la prochaine Assemblée Générale mais aussi de faire connaître vos souhaits et suggestions. Le prochain bureau animé par un nouveau Président devra, en symbiose avec notre Directeur Scientifique, définir la politique future de l'ADASTA ; il conviendra, en particulier, de réfléchir au rôle que pourrait jouer l'Association dans le cadre d'un Centre Culturel Scientifique et Technique dont la création pourrait être envisagée en Auvergne.

Au cours de ces quatre dernières années l'ADASTA s'est progressivement affirmée comme l'association leader pour la diffusion de la culture scientifique et technique en Auvergne ; elle doit garder sa personnalité en mettant au service de la communauté son expérience, ses compétences, son savoir-faire.

Je voudrais enfin dire, et ce sera ma conclusion, qu'au terme de mes deux mandats, le succès de notre Association est l'œuvre, avant tout, de son créateur, R. JOUANISSON et de l'équipe d'animateurs qui l'entourent. Je me félicite d'avoir pu collaborer avec eux et les assure de ma fidèle amitié ; quant à l'ADASTA, son ancien Président lui souhaite prospérité et longue vie.

R. VESSIERE

L'ADASTA a reçu en 1990 le soutien financier

- de la Délégation à l'Information Scientifique et Technique (Ministère de la Recherche et de la Technologie)
- du Conseil Régional d'Auvergne
- de la Direction Régionale des Affaires Culturelles (Ministère de la Culture et de la Communication)

## Auvergne-Sciences : publication trimestrielle

## Adhésions et Abonnements :

Adhésion à titre individuel .....	100 F
Adhésion à titre collectif .....	500 F
Membre bienfaiteur .....	1000 F

L'adhésion donne droit au service gratuit du bulletin et à des réductions sur les différents services rendus par l'Association (publications, stages, visites...).

Adressez le courrier à ADASTA, UFR Sciences, 63177 Aubière Cedex - Tél. 73 40 72 26

Directeur de la Publication : Roger VESSIERE  
Rédaction : Roland JOUANISSON

Bulletin trimestriel - Abonnement : 100 F par an  
Edité par ADASTA - Complexe des Cégeaux  
63177 AUBIERE CEDEX - Tél. 73 40 72 26

## INTERVIEW DE MONSIEUR HUBERT CURIEN, Ministre de la Recherche et de la Technologie



Monsieur Hubert Curien, lors de sa visite à Saint-Germain-l'Herm (Puy-de-Dôme), à l'occasion de la 2<sup>e</sup> semaine minéralogique (dont on trouvera un compte-rendu par ailleurs) a bien voulu nous accorder une interview et répondre à quelques questions fondamentales concernant la politique de recherche en France. Nous l'en remercions vivement.

Rappelons que M. Hubert Curien, Ministre de la Recherche et de la Technologie, a exercé les plus hautes fonctions universitaires. Cet ancien élève de l'École Normale Supérieure, spécialiste de minéralogie et de cristallographie, professeur à l'Université Pierre et Marie Curie à Paris, a été – entre autres – Directeur du CNRS et de la DGRST. Il a également dirigé le programme spatial qui a abouti à l'éclatant succès de la fusée Ariane.

*Monsieur le Ministre, il y a quelques mois, lors d'une communication au Conseil des Ministres, vous avez fixé les grandes orientations de la politique de recherche pour les prochaines années, à savoir : soutien de la recherche fondamentale, développement de la recherche industrielle, diffusion de la culture scientifique et technique.*

*Pouvez-vous justifier en quelques mots les raisons de ce choix ?*

La recherche fondamentale est un enjeu culturel et politique : il n'y a pas de grand pays qui n'apporte une contribution substantielle au progrès des connaissances. Sans le rayonnement de l'œuvre de nos grands savants passés et présents – il y en a beaucoup –, la France serait un peu moins la France.

Mais, bien sûr, la recherche « cognitive » (en vue de connaître) constitue aussi le socle du développement technique que notre secteur productif doit impérativement maîtriser à l'égal de nos meilleurs concurrents. L'effort de recherche sera d'autant mieux accepté par nos concitoyens qu'il sera mieux connu et compris, et c'est une excellente raison de mon attention à la diffusion de la culture technique. Mais, plus généralement, la science et la technologie constituent, en cette fin du 2<sup>e</sup> millénaire, un élément central de notre patrimoine culturel, un élément que tous doivent pouvoir partager.

*D'abord, en matière de recherche fondamentale comment donner un nouvel élan à nos organismes de recherche ?*

*Pensez-vous prendre des mesures spécifiques dans ce domaine ?*

L'effort de notre pays en matière de recherche fondamentale se situe à un bon niveau,

et nos institutions de recherche comme le CNRS, l'INSERM, l'Institut Pasteur et bien d'autres tiennent dans le monde de la recherche une place respectée et souvent enviée. J'encourage nos chercheurs à multiplier leurs contacts et leurs entreprises communes, notamment avec des partenaires européens, mais bien entendu d'abord à travers les frontières des organismes et des établissements universitaires. Je les encourage également à se regrouper autour de thèmes qu'ils définissent ensemble comme prioritaires ; de telles priorités apparaissent aujourd'hui dans des domaines tels que l'environnement.

*Quelles sont les principales mesures prises pour renforcer la recherche industrielle et l'innovation dans les entreprises ?*

*Quelle est la situation dans notre pays par rapport aux autres grands pays industriels ?*

Nos industriels comprennent de mieux en mieux la nécessité de consacrer des efforts à la recherche, et particulièrement depuis quelques années. C'est pourquoi nous les encourageons vigoureusement, par la voie de crédits incitatifs à des opérations de recherche et par celle de dégrèvements fiscaux au bénéfice de telles opérations. Dans ces deux voies, le projet de budget pour l'année 1991 contient des progrès substantiels.

Quant à la situation dans le contexte international, comment la définir en quelques mots ? Disons que nous sommes à la queue du peloton de tête, et que c'est moins que jamais le moment de s'endormir...

*Le troisième volet concerne la diffusion de la culture scientifique ; c'est une tâche difficile et mal comprise (à laquelle nous som-*

*mes personnellement confrontés à l'ADASTA). Quelle est la situation actuelle dans notre pays et comment voyez-vous l'avenir dans ce domaine ?*

Il me semble que nous enregistrons de bons succès sur le terrain, à l'échelle régionale, grâce à l'action d'institutions comme l'ADASTA, et en milieu scolaire grâce aux programmes d'action éducative. La presse écrite nationale nous écoute également de mieux en mieux. En revanche, nous avons du mal à trouver notre place sur les grands médias audiovisuels. C'est pourquoi j'ai créé avec Catherine TASCA l'Agence Jules Verne, dont la tâche consiste à sélectionner et soutenir des projets d'émission de qualité, puis à les promouvoir auprès des chaînes de télévision. Ce n'est pas facile, mais soyez assuré que je persévérerai.

*Parmi les difficultés qui freinent le développement de la diffusion de la culture scientifique il faut souligner le peu d'enthousiasme manifesté par les organismes de recherche à reconnaître le travail des chercheurs dans ce domaine. Les universitaires qui se lancent dans cette voie sont de fait pénalisés sur ce plan professionnel. Il en est de même, semble-t-il des chercheurs qui se consacrent à la recherche appliquée ou à un travail administratif. Pensez-vous Monsieur le Ministre qu'il soit possible de prendre des mesures susceptibles de modifier cet état de fait ?*

C'est vrai que l'état d'esprit ne change que lentement, mais il change. Très récemment, j'ai rendu visite à Arc et Senans à une rencontre organisée par le CNRS, de sa propre initiative, avec des jeunes de toutes origines. De

même, le Directeur Général de l'INSERM soutient des clubs de jeunes. Ce type d'action montre bien la voie à suivre et les encouragements qu'elle appelle. Les chercheurs ont, parmi leur devoir, celui de faire connaître et populariser leurs travaux.

*En avril 1987, à l'invitation de l'ADASTA, vous avez bien voulu accepter de prononcer une conférence ayant pour titre : « Recherche et Technologie : de quoi l'Europe est-elle capable » ?*

*Pouvez-vous nous dire quelles sont, trois ans plus tard, vos déceptions et vos satisfactions dans ce domaine ?*

**Etes-vous toujours aussi «Eurooptimiste» ?**

De plus en plus, et j'aurais bien du mal à vous citer une grande ou même une moyenne déception. Par exemple, en décembre dernier, pendant que la France assurait la présidence des Communautés européennes, nous sommes parvenus à un accord sur un ensemble de programmes de recherche européens qui aboutit, en quelques années, à doubler pratiquement l'ampleur de cet effort commun. Et je citerai encore le CERN de Genève, l'ancêtre de la coopération scientifique européenne, qui obtient actuellement des résultats de toute première importance et du meilleur

niveau mondial sur les particules élémentaires et la structure intime de la matière.

Surtout, je suis heureux de constater que, de plus en plus, l'Europe se concerta et parle d'une voix dans laquelle les discordances se sont fortement amenuisées, lorsqu'il s'agit de dialoguer avec nos grands interlocuteurs outre Atlantique ou dans le Pacifique.

Et je n'ai pas mentionné le succès d'EUREKA, dont les réussites, comme par exemple les nouvelles stations d'épuration de l'eau par ultrafiltration, font déjà partie de la vie quotidienne. Sur l'Europe, c'est le cas de le dire, je serais intarissable...

### La Délégation à l'Information Scientifique et Technique (DIST)

La Délégation à l'Information Scientifique et Technique (DIST) dépend de la Direction Générale de la Recherche et de la Technologie, placée elle-même sous l'autorité du Ministre de la Recherche et de la Technologie. La DIST est dirigée par M. Guy POUZARD.

Au sein de la DIST, le Département « Culture Scientifique et Technique », dirigé par M<sup>me</sup> Marie-Noëlle FAVIER, a pour mission de promouvoir la Culture Scientifique et Technique. Ce département :

— participe à la création et au développement de CCST. Actuellement, il existe 14 centres en France (Mulhouse, Pleumeur Bodou, Rennes, Hérimoncourt, Cayenne, Montreuil, Argenteuil, Limoges, Thionville, Villeneuve d'Asq, Poitiers, Marseille, Grenoble, Valbonne) qui ont pour vocation de mettre en œuvre des actions culturelles, avec les acteurs de la Recherche, de la Culture, de l'Éducation et de l'Industrie. (Sans avoir les moyens d'un CCST, l'ADASTA joue pleinement ce rôle en Auvergne. Pour cela, elle reçoit une aide financière de la DIST).

— veille au bon développement de la politique menée par les organismes sous tutelle du MRT en matière de diffusion des connaissances, notamment par le renforcement des liens entre la communauté scientifique et l'école (aide aux projets d'action éducative, jumelages entre classes et chercheurs,...).

— apporte son soutien aux initiatives des collectivités territoriales et à la vie associative dans les domaines scientifiques et techniques.

— contribue à une politique de production et de diffusion, à la réalisation d'expositions et de manifestations en France et à l'étranger (émissions à la télévision, expositions itinérantes, etc...).

## « RÉCRÉASCIENCES »

La Direction à l'Information Scientifique et Technique organise un « appel à propositions » pour le développement de la culture scientifique et technique chez les jeunes (de 4 à 13 ans).

Ces réalisations devront permettre :

- 1) de sensibiliser les enfants à un thème scientifique et/ou technique en s'attachant à le valoriser par une présentation attrayante, esthétique, ludique, récréative...
- 2) de les familiariser à la démarche scientifique en offrant des situations d'observations, de manipulations, de réflexions.
- 3) de favoriser l'éveil, l'imagination et la créativité de l'enfant par des moyens audiovisuels et/ou interactifs tout en privilégiant une approche faisant appel aux aptitudes sensorielles des enfants.
- 4) d'apporter des réponses concrètes et éducatives à leur curiosité à partir d'éléments de connaissances respectant un niveau de formulation appropriée ainsi qu'à partir des savoir-faire.

Cet appel à propositions s'adresse au monde associatif (éducation populaire, mouvements de jeunesse, sociétés savantes...), au monde scolaire, aux musées et aux collectivités locales.

Les réalisations illustreront soit un thème fondamental ou bien s'inspireront de l'actualité scientifique telle que les nouvelles technologies, l'environnement, la génétique, la domotique, la communication, l'information, les transports, les biotechnologies...

Pour répondre à cet appel à propositions toutes les formes d'expression peuvent être proposées : films, livres, expositions, kits, malles, coffrets de manipulation, spectacles vivants, aménagements de véhicule... ou tout autre support original.

Une attention particulière sera portée aux projets originaux et novateurs qui seront assortis d'un programme de circulation et de large diffusion. L'itinérance du produit sera considérée comme le garant de sa rentabilité au niveau national.

L'ADASTA prépare un important dossier pour répondre à ces propositions. Le détail sera donné dans le prochain numéro.

**Date limite des dossiers : 15 novembre 1990 et 15 mars 1991.**

Des renseignements complémentaires peuvent être obtenus auprès de la Délégation Régionale à la Recherche et à la Technologie, 43, rue de Wailly, Clermont-Ferrand.

# LE DOSSIER

## MONSIEUR DE LA PALICE DÉCOUVRE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

par Charles Ruhla\*

Que peut-il y avoir de commun entre Monsieur de La Palice, brillant homme de guerre du XVI<sup>e</sup> siècle, et la Mécanique Quantique, théorie physique fondamentale qui domine le XX<sup>e</sup> siècle ? Rien, sinon l'idée que la Science, chose très sérieuse, gagne beaucoup à être enseignée avec un peu d'humour. Mais avant d'en arriver là, nous devons d'abord nous poser quelques questions fondamentales, et d'abord la première d'entre toutes : La Science, qu'est-ce que c'est ? L'exemple des éclipses totales de soleil va nous permettre d'illustrer la réponse.

Disons d'abord qu'il s'agit d'un magnifique phénomène naturel puisque le globe obscur de la lune masque complètement le globe brillant du soleil et que cela permet d'apercevoir la partie extérieure de l'atmosphère solaire, plus connue sous le nom de couronne solaire (Fig. 1).

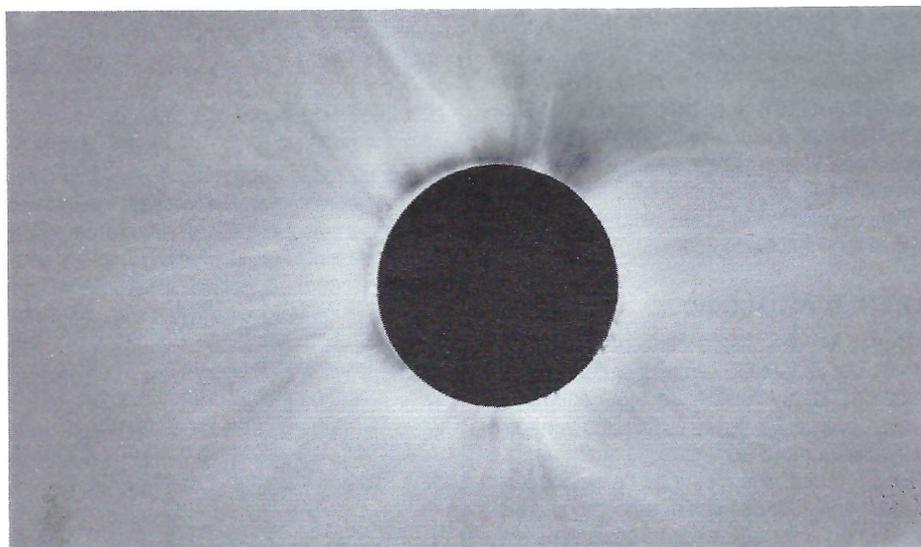


Figure 1 : Une éclipse totale de soleil

Au temps des civilisations primitives ce spectacle était effrayant car il représentait la disparition inopinée de la lumière, de la chaleur, de la vie ; et comme il est dans la nature humaine de chercher une explication à toute chose, on l'interprétait comme l'action d'une divinité maléfique s'attaquant à une divinité bénéfique : le soleil. C'est une explication, puisqu'elle donne une cause aux éclipses, mais ce n'est pas de la Science car les mauvaises humeurs d'une divinité sont imprévisibles. Aujourd'hui en revanche, grâce aux observations et aux calculs des astronomes, les éclipses sont prévisibles à la seconde près, jusqu'à l'an 2000, et même bien au-delà.

L'explication scientifique est opérationnelle car elle débouche sur des prévisions, et l'Homme, au lieu de subir les lois naturelles, peut les utiliser à son avantage.

### LA PRÉVISION DÉTERMINISTE

Le travail des astronomes va nous permet-

tre de mieux comprendre comment s'élabore une prévision scientifique. Au départ, il y a l'observation très précise du ciel avec des instruments d'optique. On repère et on mesure à un instant donné la position et la vitesse du soleil, de la lune, des planètes, des étoiles, et l'ensemble des résultats obtenus constitue ce que l'on appelle les conditions initiales. On introduit ces conditions initiales dans les équations de la mécanique céleste, équations qui représentent l'action des forces d'attraction universelle s'exerçant entre les astres du système solaire, c'est-à-dire essentiellement entre le soleil, la terre et la lune pour ce qui nous concerne. La résolution de ces équations permet de prévoir l'avenir du mouvement de ces astres, et en particulier les dates des prochaines éclipses. Ces prévisions

\* Prof. Charles RUHLA, Institut de Physique Nucléaire de Lyon - IN2P3-CNRS/Université Claude-Bernard, 43, bd du 11 Novembre 1918, F-69622 Villeurbanne Cedex.



sont très précises, et l'on trouve ces dates à la seconde près, dans tous les almanachs.

Cet exemple astronomique nous amène à définir le déterminisme au sens pratique que lui donne les physiciens :

« On dit qu'il y a déterminisme si la connaissance précise des conditions initiales et des forces permet de prévoir l'avenir d'un système physique avec précision ».

C'est sur ce schéma déterministe que s'est développé, fort bien, toute la physique classique jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, mais la découverte du monde microscopique des molécules, des atomes, des noyaux puis des particules élémentaires telles que le proton, l'électron, le photon, a posé un nouveau problème, obligeant les physiciens à dépasser le cadre familier du déterminisme. Pour situer le problème, nous allons analyser une expérience de diffraction.

### LA PRÉVISION PROBABILISTE

On envoie le faisceau d'un laser sur un premier écran percé d'un trou de faible diamètre (environ 1 mm) et l'on observe ce qui se passe au-delà du trou (Fig.2).

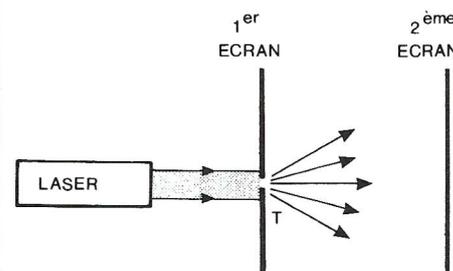


Figure 2 : Schéma d'une expérience de diffraction de la lumière d'un laser par une petite ouverture circulaire.

On constate alors que la lumière ne continue pas en ligne droite, mais se répand dans de multiples directions faisant apparaître ainsi, sur le deuxième écran, une figure très

caractéristique appelée figure de diffraction. On y observe un maximum d'intensité lumineuse au centre, entouré d'anneaux concentriques dont l'intensité diminue du centre vers la périphérie (Fig. 3).

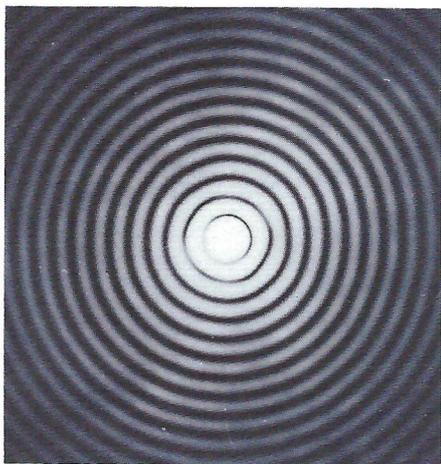


Figure 3 : Figure de diffraction d'un faisceau de lumière parallèle et monochromatique après le passage à travers une petite ouverture circulaire.

Puisque l'on pense, depuis Max Planck (1900), qu'un faisceau de lumière est formé d'un grand nombre de grains élémentaires appelés photons, on peut s'interroger sur l'avenir d'un photon se présentant à l'entrée du trou, c'est là que le problème apparaît (Fig. 4).

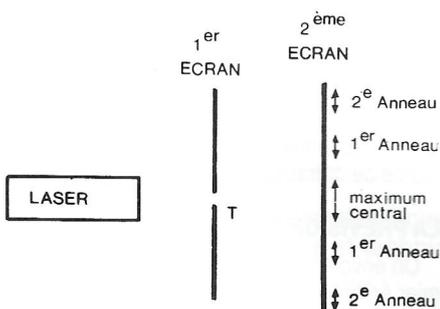


Figure 4 : En raison du phénomène de diffraction le photon qui se présente à l'entrée de l'ouverture circulaire a plusieurs avènements possibles (maximum central, premier anneau, deuxième anneau... etc).

Si nous voulons rester dans le schéma déterministe, il nous faut connaître les conditions initiales de façon précise ; pour cela, nous devrions faire deux mesures précises et simultanées : une mesure de position et une mesure de vitesse. Mais la Nature se rebelle au schéma déterministe élémentaire que nous cherchons à lui imposer ; si l'on cherche à mieux localiser le photon en diminuant le diamètre du trou, on augmente les dimensions de la figure de dif-

fraction, donc l'ouverture de l'éventail des vitesses à la sortie du trou, si bien que l'on n'arrive pas à définir expérimentalement des conditions initiales précises. Cette analyse a été faite en 1926 par Heisenberg et elle montre bien pourquoi il est nécessaire d'abandonner le schéma déterministe au niveau de l'infiniment petit. Les physiciens développent donc dans ce cas une autre méthode de prévision, qui est probabiliste. En fonction du diamètre du trou, on peut calculer la probabilité de détecter un photon sur le maximum central, sur le premier anneau, sur le deuxième anneau, sur le troisième anneau... etc., et cet exemple nous fait sentir, par comparaison avec une théorie déterministe, ce que représente une théorie probabiliste :

« On dit qu'une théorie est probabiliste si la connaissance des conditions initiales et des forces permet de prévoir les différentes voies d'évolution d'un système physique avec la probabilité attachée à chacune de ces voies ».

Pour décrire les mouvements des particules au niveau microscopique, les physiciens ont donc créé une théorie probabiliste, la mécanique quantique. Ce fut un travail de longue haleine, et tout cela est raconté avec brio et humour dans un petit livre de Georges Gamow : « Trente années qui ébranlèrent la physique ». On y trouve tous les grands noms de l'époque : Max Planck (1900), Albert Einstein (1905), Niels Bohr (1913), Louis de Broglie (1924), Erwin Schrödinger (1926), Werner von Heisenberg (1926), Paul Dirac (1928). Avec Paul Dirac, la théorie est parvenue à la forme pratique et bien structurée sous laquelle on l'utilise toujours aujourd'hui.

### LE CHOIX PÉDAGOGIQUE

Après les chercheurs viennent les pédagogues. Comment faut-il enseigner cette théorie moderne et révolutionnaire aux générations qui suivent, c'est-à-dire à ceux qui vont être les utilisateurs de la mécanique quantique. Le rôle du pédagogue n'est pas de reconstituer devant son auditoire la longue démarche historique de la découverte avec ses sinuosités, ses errements, ses impasses, mais au contraire de chercher un chemin plus simple et plus direct pour introduire la théorie. Au fil des années, depuis 1928, les choix pédagogiques ont évolué d'une part en fonction des modes, d'autre part en fonction de la personnalité de l'enseignant. Une situation nouvelle existe depuis 1985 à la suite d'une très belle expérience réalisée à la Faculté des Sciences d'Orsay par P. Grangier, R. Roger et A. Aspect. C'est une « expérience d'interférences à un seul photon », réalisée pour des objectifs de recherche très fondamentaux et très délicats qui n'ont pas leur place ici. En revanche, cette expérience est très simple dans son principe, même si elle est délicate à mettre en œuvre, et elle constitue une excellente introduction expérimentale aux concepts de la mécanique quantique. C'est donc ce que nous allons faire, en essayant d'abord d'oublier tout ce que

nous avons pu apprendre, puis en nous laissant guider par le solide bon sens et la logique imperturbable de Monsieur de La Palice puisqu'il est – à son corps défendant – le chantre des vérités premières.

### LA SOURCE DE LUMIÈRE

Pour décrire une expérience d'optique, on commence toujours par la source de lumière. Dans le cas qui nous intéresse, elle n'est pas une simple lampe, mais un ensemble complexe, placé dans le vide, et dont nous donnons le schéma ci-dessous (Fig. 5).

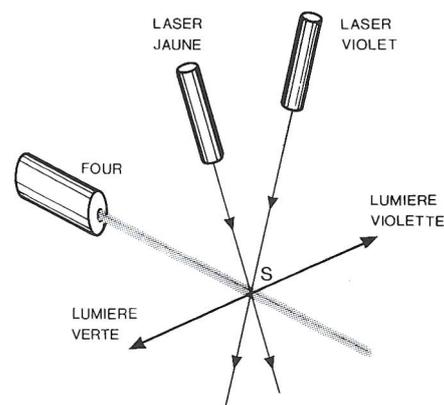


Figure 5 : Schéma de la source de lumière utilisée dans l'expérience d'interférences à un seul photon.

Sur ce schéma, on remarque un four émettant un jet rectiligne d'atomes de calcium. Sur ce jet, en un point S, on envoie deux faisceaux lasers, l'un de lumière violette (longueur d'onde  $\lambda = 406,0 \text{ nm}^1$ ), l'autre de lumière jaune (longueur d'onde  $\lambda = 581,0 \text{ nm}$ ). Sous l'action combinée de ces deux faisceaux laser, les atomes de calcium sont excités. Ensuite, chaque atome de calcium se désexcite en émettant successivement deux radiations : la première est verte (longueur d'onde  $\lambda = 551,3 \text{ nm}$ ), la seconde est violette (longueur d'onde  $\lambda = 422,7 \text{ nm}$ ). L'intervalle de temps entre les deux émissions successives est au maximum de l'ordre de  $9 \text{ ns}^2$  ; on dit que ces deux radiations vertes et violettes sont corrélées dans le temps. Le point S joue donc le rôle de source de lumière et c'est à ce titre qu'il apparaît sur les trois schémas qui représentent les trois étapes de l'expérience (Fig. 6, 7, 8).

#### Première étape : La quantification

La première étape de l'expérience est une banale opération de contrôle du bon fonctionnement de la source ; et pourtant elle est déjà pleine d'enseignements (Fig. 6).

De part et d'autre de la source S, on a placé deux tubes photomultiplicateurs  $\text{PM}_0$  et  $\text{PM}_A$ . Ils sont très sensibles et peuvent enregistrer l'arrivée d'un seul photon. Cet enregistrement correspond à une absorption par effet photoélectrique, et l'amplification qui suit aboutit à la délivrance d'une impulsion électrique

(1) nm signifie nanomètre, c'est-à-dire un milliardième de mètre.

(2) ns signifie nanoseconde, c'est-à-dire un milliardième de seconde.

# LE DOSSIER

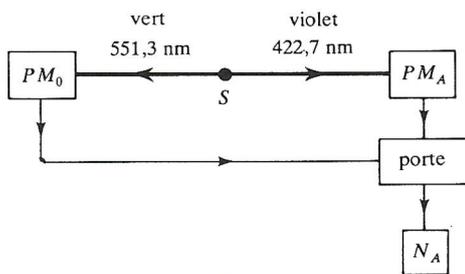


Figure 6 : La première étape de l'expérience met en évidence la quantification des échanges d'énergie entre la lumière et les détecteurs  $PM_0$  et  $PM_A$ .

dont la hauteur est proportionnelle à l'énergie du photon incident. L'électronique associée comporte une logique qui permet de particulariser l'enregistrement de chaque voie : la voie associée à  $PM_0$  n'enregistre que la radiation verte, et celle qui est associée à  $PM_A$  n'enregistre que la radiation violette. La porte électronique s'ouvre, pour une durée de 9 ns, lorsque la radiation verte est détectée par  $PM_0$ . Si pendant la durée d'ouverture de la porte, la radiation violette est émise par le même atome dans la direction de  $PM_A$ , cette seconde radiation, détectée par  $PM_A$ , fournit une impulsion qui franchira la porte et sera comptée en  $N_A$ . Enfin, des compteurs permettent de connaître le nombre  $N_A$  de photons violets détectés par  $PM_A$  quand la porte est ouverte, pendant la durée d'une séquence d'enregistrement qui est de plusieurs heures.

La fonction de cet appareillage est l'utilisation d'un photon vert qui sert à découper dans le déroulement du temps une petite fenêtre de 9 ns pendant laquelle un seul photon violet, issu d'un même atome, peut être détecté.

Nous avons parlé jusqu'ici le langage habituel du physicien ; il est temps maintenant de recourir à Monsieur de La Palice. Consulté sur cette première expérience, il intervient avec une suffisance qui n'exclut pas pour autant la précision du langage, car il utilise successivement trois formules : «j'observe», «je conclus», «j'imagine».

«J'observe que le photomultiplicateur  $PM_A$  détecte de la lumière violette quand la source  $S$  fonctionne et qu'il ne détecte plus rien lorsqu'on éteint la source. J'en conclus que la lumière violette a été émise par la source  $S$  et qu'elle s'est propagée jusqu'au photomultiplicateur  $PM_A$ .

J'observe que les échanges entre la lumière et le photomultiplicateur  $PM_A$  se font par quantités d'énergie égales que j'appellerai des quanta.

J'imagine que les quanta sont des corpuscules émis par la source, se propageant de  $S$  à  $PM_A$ , et qui sont absorbés par le détecteur. J'appellerai ces corpuscules des photons».

Et Monsieur de La Palice se retire avec dignité dans ses appartements.

## Deuxième étape : Le photon individuel

La deuxième étape de l'expérience va nous conduire à la notion de photon bien individualisé (Fig. 7).

Sur le chemin de la radiation violette, on a placé une lame semi-réfléchissante  $LS_\alpha$  qui sépare le faisceau primaire incident en deux faisceaux secondaires, l'un transmis, et détecté par  $PM_A$ , l'autre réfléchi, et détecté par  $PM_B$ . Comme dans la première étape, la porte est ouverte par  $PM_0$  pour une durée de 9 ns. Pendant cette durée, on enregistre la détection soit sur  $PM_A$  (comptage  $N_A$ ) soit sur  $PM_B$  (comptage  $N_B$ ) soit à la fois sur  $PM_A$  et sur  $PM_B$  et nous appellerons cela une coïncidence (comptage  $N_C$ ). L'expérience dure cinq heures et donne les résultats suivants :

- les valeurs de  $N_A$  et  $N_B$  obtenues sont toutes les deux de l'ordre de 100 000. En revanche, la valeur de  $N_C$  est très faible par rapport à  $N_A$  et  $N_B$ , car elle est égale à 9 ;
- la succession des impulsions venant de  $PM_A$  est aléatoire dans le temps et il en est de même pour  $PM_B$  ;
- la valeur très faible de  $N_C$  indique que les comptages sur  $PM_A$  ou sur  $PM_B$  s'excluent mutuellement. Dans une analyse élémentaire, nous pourrions considérer que  $N_C$  est nul et qu'ainsi l'exclusion mutuelle est parfaite.<sup>3</sup>

Voyons maintenant ce que Monsieur de La Palice pense de tout cela. Il est très flatté d'être à nouveau consulté mais reste néan-

moins très attentif, et il nous fait la déclaration suivante.

«J'observe que la lumière se propage depuis la source jusqu'à  $PM_A$  ou  $PM_B$ , car si j'éteins la source, la détection cesse.

J'observe que les comptages  $N_A$  et  $N_B$  correspondent à ceux d'un jeu de pile ou face, c'est-à-dire que les deux éventualités s'excluent mutuellement et que les comptages sont aléatoires.

J'observe que les chemins optiques 1 et 2 sont discernables, car l'expérience me permet de dire, pour chaque quantum, si la lumière est passée par 1 (détection par  $PM_A$ ) ou par 2 (détection par  $PM_B$ ).

J'imagine que chaque photon issu de la source s'oriente aléatoirement vers la voie 1 ou la voie 2 au moment où il atteint la lame séparatrice et, si vous me permettez cette formulation très directe, je vous dirai qu'il est dans la nature du photon de jouer à pile ou face».

Toujours très satisfait de lui-même, Monsieur de La Palice se retire à nouveau.

## Troisième étape : Les Interférences

On a réalisé un interféromètre de Mach-Zehnder qui permet d'obtenir deux figures d'interférences (Fig. 8). Le faisceau de lumière violette issu de la source  $S$  est séparé en deux parties par la lame  $LS_\alpha$ . Après réflexion sur deux miroirs différents, ces faisceaux secondaires se rejoignent sur une seconde lame

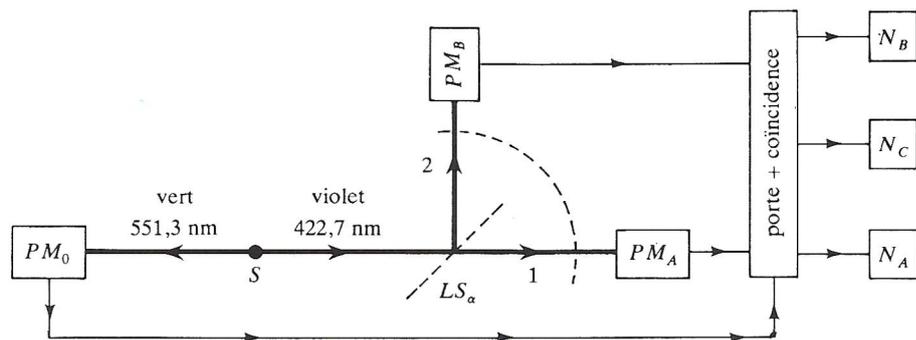


Figure 7 : La deuxième étape met en évidence deux chemins optiques 1 et 2, discernables expérimentalement et qui s'excluent mutuellement.

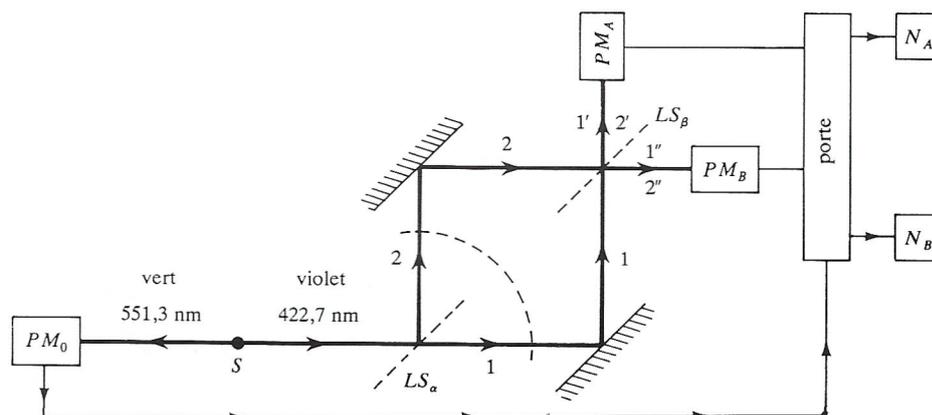


Figure 8 : La troisième étape fait intervenir deux chemins optiques 1 et 2 indiscernables expérimentalement. Il en résulte un phénomène d'interférence observable soit au niveau de  $PM_A$  soit au niveau de  $PM_B$ .

(3) Une analyse très détaillée de ce résultat est donnée par les auteurs de l'expérience (référence 2).

semi-réfléchissante  $LS_B$ . Là encore, chaque faisceau se sépare en deux parties, si bien que l'on crée ainsi deux zones d'interférence, la zone  $(1', 2')$ , où l'on a placé  $PM_A$ , et la zone  $(1'', 2'')$ , où l'on a placé  $PM_B$ . Les figures d'interférences obtenues se présentent sous forme d'anneaux alternativement clairs ou sombres (Fig. 9) et l'on peut régler l'appareillage de façon à placer  $PM_A$  au niveau du centre blanc (Fig. 9a) et  $PM_B$  au niveau du centre noir (Fig. 9b).

Si l'on veut bien se rappeler que l'on parle en termes de photons et qu'il s'agit de photons individuels, on doit admettre que le phénomène d'interférence ne résulte pas de l'interaction de deux photons successifs, mais que c'est le photon qui interfère avec lui-même ; avec le réglage choisi, l'interférence est constructive sur la voie  $(1', 2')$  et destructive sur la voie  $(1'', 2'')$ . Qu'en dirait Monsieur de La Palice ?

Monsieur de La Palice réapparaît sur la scène et l'on devine, derrière sa courtoisie, une légère tendance à l'agacement. Son intervention sera brève :

« J'observe que les chemins optiques sont différents de  $LS_A$  à  $LS_B$ , puis se superposent en  $(1', 2')$  et  $(1'', 2'')$ . J'observe sur  $PM_A$  un phénomène qui me paraît naturel, à savoir :

Lumière + Lumière → Lumière

J'observe sur  $PM_B$  un phénomène qui m'étonne, à savoir :

Lumière + Lumière → Obscurité

J'appellerai interférence ce phénomène de superposition de lumière et je qualifierai cette interférence de constructive pour  $PM_A$  et de destructive pour  $PM_B$ . J'ai imaginé dans le cas précédent que la lumière était formée de corpuscules, les photons, qui passaient soit par la voie 1, soit par la voie 2. Je désirerais savoir dans ce cas par quelle voie est passée le photon individuel, et pour cela je vous demande de supprimer la voie 2, ce qui permettra de vérifier si ce photon est bien passé par la voie 1 ».

Manifestement, Monsieur de La Palice est inquiet ; au lieu de se retirer, comme il le fait habituellement, il préfère demeurer sur place, avec une indifférence feinte, mais en fait il est clair qu'il attend avec une certaine nervosité le résultat de cette nouvelle expérience.

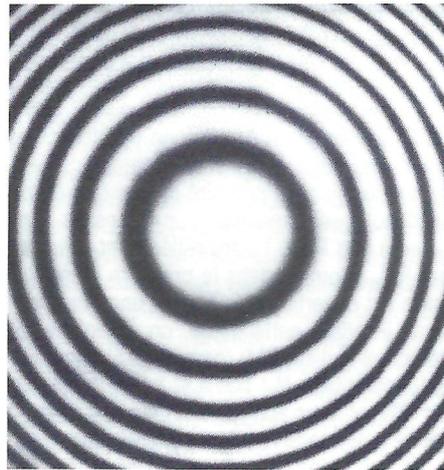
## DUALITÉ ONDE - CORPUSCULE

Si l'on supprime l'une des voies, que ce soit la voie 2 ou la voie 1, on constate que le phénomène d'interférence disparaît. Par exemple, au lieu d'observer un comptage  $N_A$  très grand et un comptage  $N_B$  très faible, on obtient des comptages toujours sensiblement égaux sur  $PM_A$  et sur  $PM_B$ .

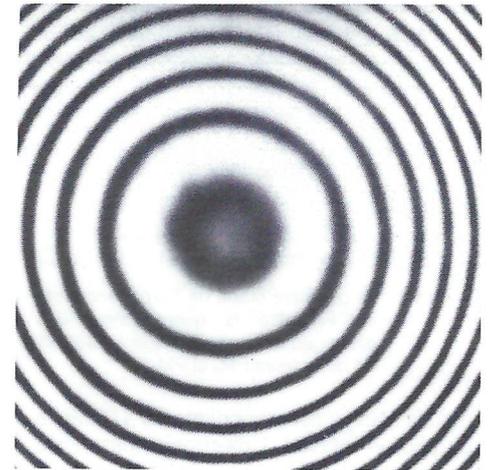
Visiblement, ce résultat contrarie Monsieur de La Palice et c'est avec une prudence accrue qu'il poursuit l'analyse de l'expérience :

« J'observe qu'il est nécessaire d'avoir deux chemins optiques différents et ouverts pour obtenir le phénomène d'interférence.

Pour chaque quantum détecté, je constate mon impuissance à découvrir si la lumière est



(a)



(b)

Figure 9 : Figures d'interférences données par l'interférence de Mach-Zehnder  
 (a) anneaux à centre blanc (maximum de lumière au centre)  
 (b) anneaux à centre noir (obscurité au centre).

passée par la voie 1 ou par la voie 2, car ces deux cheminements sont indiscernables.

Si j'imagine que les photons passent seulement par la voie 1, cela voudrait dire que la voie 2 est inutile et ce n'est pas ce que j'ai observé ; il en est de même si j'imagine que les photons passent seulement par la voie 2, car cela voudrait dire que la voie 1 est inutile et je ne l'ai pas observé non plus.

Si j'imagine que la source  $S$  émet des corpuscules, je suis obligé d'admettre que chaque photon individuel passe à la fois par les voies 1 et 2, mais cette hypothèse est en contradiction avec les résultats de l'expérience précédente pour laquelle j'étais obligé d'imaginer que le photon s'orientait aléatoirement soit vers la voie 1, soit vers la voie 2.

J'en conclus que l'idée de corpuscule n'est pas bonne pour expliquer le phénomène d'interférence.

Je vais imaginer que la source émet une onde ; cette onde se sépare en deux sur  $LS_A$  et les deux ondes secondaires vont parcourir, l'une la voie 1, l'autre la voie 2. Elles se superposent sur  $LS_B$  pour donner des interférences, constructives en  $(1', 2')$ , destructives en  $(1'', 2'')$ . Au terme des voies  $(1', 2')$  et  $(1'', 2'')$ , j'imagine que chaque onde se condense en corpuscules qui sont détectés par les photomultiplicateurs.

Je crois que je commence à y voir clair ; j'imagine que la lumière a deux formes complémentaires : suivant le type d'expérience proposée, elle se présente tantôt comme une onde, tantôt comme un corpuscule, mais jamais comme les deux à la fois, au même instant et au même endroit. Ainsi, dans l'expérience où les chemins optiques suivis sont discernables, la lumière se comporte comme le ferait un corpuscule depuis la source  $S$  jusqu'à la détection en  $PM_A$  ou en  $PM_B$ . Au contraire, dans une expérience où les chemins optiques suivis sont indiscernables, la lumière se comporte d'abord comme le ferait une onde, et donne lieu à un phéno-

mène d'interférence, puis elle se comporte comme un corpuscule au moment de la détection qui est un effet photoélectrique. Je trouve que la lumière a un comportement bien étrange mais, en imaginant la notion de dualité onde-corpuscule, j'ai l'impression que tout a été dit ».

Monsieur de La Palice se retire à pas lents, très provisoirement, et comme à regret. Est-il impressionné, malgré lui, par les nouveautés qu'il vient d'énoncer, ou bien craindrait-il, en son for intérieur, que tout n'ait pas été dit ?

## LES IMPÉRATIFS DE LA CAUSALITÉ

Tout n'a pas été dit, car le problème de la causalité reste posé. Si l'on examine attentivement les schémas des expériences correspondant à la deuxième étape (Fig. 7) et à la troisième étape (Fig. 8), on constate que les deux appareillages ont en commun  $LS_A$  et qu'ils ne diffèrent qu'à partir d'une frontière située au-delà de  $LS_A$  et représentée sous la forme d'un quart de cercle pointillé. Nous avons dit que la lumière prenait la forme d'un corpuscule ou d'une onde suivant que l'appareillage comportait des chemins optiques discernables ou non, mais, dans les deux expériences en cause, cette mise en forme doit se produire sur  $LS_A$  avant que la lumière ait franchi la fameuse frontière, alors que rien ne distingue encore les deux types d'appareillage, puisqu'ils ne diffèrent qu'au-delà. Tout se passe comme si la lumière « choisissait » sa forme ondulatoire ou corpusculaire avant de « savoir » si elle va rencontrer un appareillage mettant en évidence un phénomène d'interférence ou un effet photoélectrique, et cela remet en question le principe de causalité.

Monsieur de La Palice réapparaît brusquement et sans qu'on l'ait appelé ; il est décontenancé et il s'exprime avec lassitude :

« J'ai imaginé que la lumière prenait la forme onde ou corpuscule en fonction de l'expérience proposée.

Je remarque que cette mise en forme doit intervenir sur la lame séparatrice  $LS$  avant

que la lumière atteigne la région de l'appareillage qui impose cette même mise en forme, ce qui voudrait dire que la cause intervient après l'effet.

Je sais que les ondes et les corpuscules respectent le principe de causalité à savoir que la cause précède l'effet.

Je conclus que la lumière n'est ni une onde, ni un corpuscule ; elle ne se comporte ni comme la houle à la surface de la mer, ni comme le boulet qui sort d'une bombe, ni comme aucun des objets qui me sont familiers.

Je vous demande d'oublier tout ce que je viens de dire à propos de cette expérience qui me paraît décidément fort mystérieuse.

Et Monsieur de La Palice se retire tout penaud, en laissant aux témoins présents l'impression qu'il ne reviendra plus.

**LA SOLUTION LOGIQUE**

Cette retraite a duré longtemps, et pourtant elle arrive à son terme. Monsieur de La Palice réapparaît spontanément, avec un sourire serein, et sa déclaration finale n'est pas exempte d'une pointe de malice.

« J'observe que, dans tous les cas, les photomultiplicateurs enregistrent des quanta de lumière lorsque je mets en marche la source lumineuse.

J'en conclus que « quelque chose » s'est propagé depuis la source jusqu'aux détecteurs. Ce « quelque chose », cet objet quantique, je continuerai à l'appeler photon, mais je sais aussi que le photon n'est ni une onde, ni un corpuscule.

J'observe que le photon donne lieu au phénomène d'interférence si les chemins optiques suivis sont indiscernables, et que ce phénomène d'interférence n'a pas lieu si les chemins optiques suivis sont discernables.

Pour chaque détecteur, j'observe que la suite des quanta détectés est aléatoire dans le temps.

Si je répète plusieurs fois l'expérience dans des conditions identiques, j'observe que les comptages de quanta sur chaque photomultiplicateur sont reproductibles au sens statistique du terme. Ces comptages me permettent de déterminer expérimentalement, pour chaque type d'appareillage, la probabilité de détection d'un quantum sur un détecteur donné, et cette probabilité représente le résultat des expériences.

J'affirme que le rôle d'une théorie physique est de prévoir les résultats des expériences.

Je demande aux physiciens théoriciens de m'établir une théorie qui permettra de prévoir par le calcul quelle est la probabilité de détection d'un photon sur un détecteur donné. Cette théorie devra tenir compte du comportement aléatoire du photon, et de la présence ou de l'absence du phénomène d'interférence suivant que les chemins optiques sont indiscernables ou discernables.

Au travail, Messieurs ! Mes vœux vous accompagnent en cette lourde tâche et je vous souhaite bien du plaisir !».

Sur ces fortes paroles, Monsieur de La Palice se retire définitivement.

**LA MÉCANIQUE QUANTIQUE**

Sensibilisés à l'appel de Monsieur de La Palice, les physiciens ont beaucoup travaillé, et la théorie tant attendue a vu le jour : c'est la mécanique quantique. Elle s'applique parfaitement au photon, mais aussi à l'électron, au proton, au neutron et, d'une façon générale, à toutes les particules de la physique microscopique. Elle fonctionne ainsi, depuis soixante ans, à la satisfaction générale des physiciens.

A la base, on définit une nouvelle grandeur, l'amplitude de transition de l'état initial à l'état final que l'on désigne par un nouveau symbole, le bracket, à lire de droite à gauche :

$$\langle f|i \rangle$$

On passe de l'amplitude de transition à la probabilité de détection d'une particule par simple élévation au carré

$$P = |\langle f|i \rangle|^2$$

Enfin, quatre postulats mathématiques donnent les règles de calcul de l'amplitude de transition dans toutes les situations possibles. Nous les écrivons ci-dessous sans les expliciter davantage, et uniquement pour montrer qu'il s'agit de règles très simples.

Règle d'addition pour les voies discernables

$$|\langle f|i \rangle|^2 = |\langle f_1|i \rangle|^2 + |\langle f_2|i \rangle|^2$$

Règle d'addition pour les voies indiscernables

$$|\langle f|i \rangle|^2 = |\langle f|i \rangle_1 + \langle f|i \rangle_2|^2$$

Passage par un état intermédiaire

$$\langle f|i \rangle = \langle f|v \rangle \langle v|i \rangle$$

Ensemble de deux particules indépendantes

$$\langle f_1 f_2 | i_1 i_2 \rangle = \langle f_1 | i_1 \rangle \langle f_2 | i_2 \rangle$$

On admirera le fait que toute la physique théorique de l'infiniment petit tienne en si peu de formules. On doit cette simplicité aux pères fondateurs de la mécanique quantique auxquels nous nous devons de rendre hommage. Mais nous associerons à cet hommage, celui qui aujourd'hui, par sa logique élémentaire, nous a conduit jusque là en présentant son portrait.



Monsieur de La Palice  
1470 - 1525

« Un quart d'heure avant sa mort, il était encore en vie ».

**REMERCIEMENTS**

- Cet article a été publié dans la revue du Palais de la Découverte (Février 90). Nous remercions le Palais de la Découverte de nous avoir autorisés à le publier dans la revue « Auvergne-Sciences ».

- Cet article comporte de larges extraits du Chapitre 7 du livre de Charles Ruhla « La Physique du Hasard », collection Liaisons Scientifiques, Hachette 1989. Nous remercions les Editions Hachette de nous avoir autorisés à les publier.

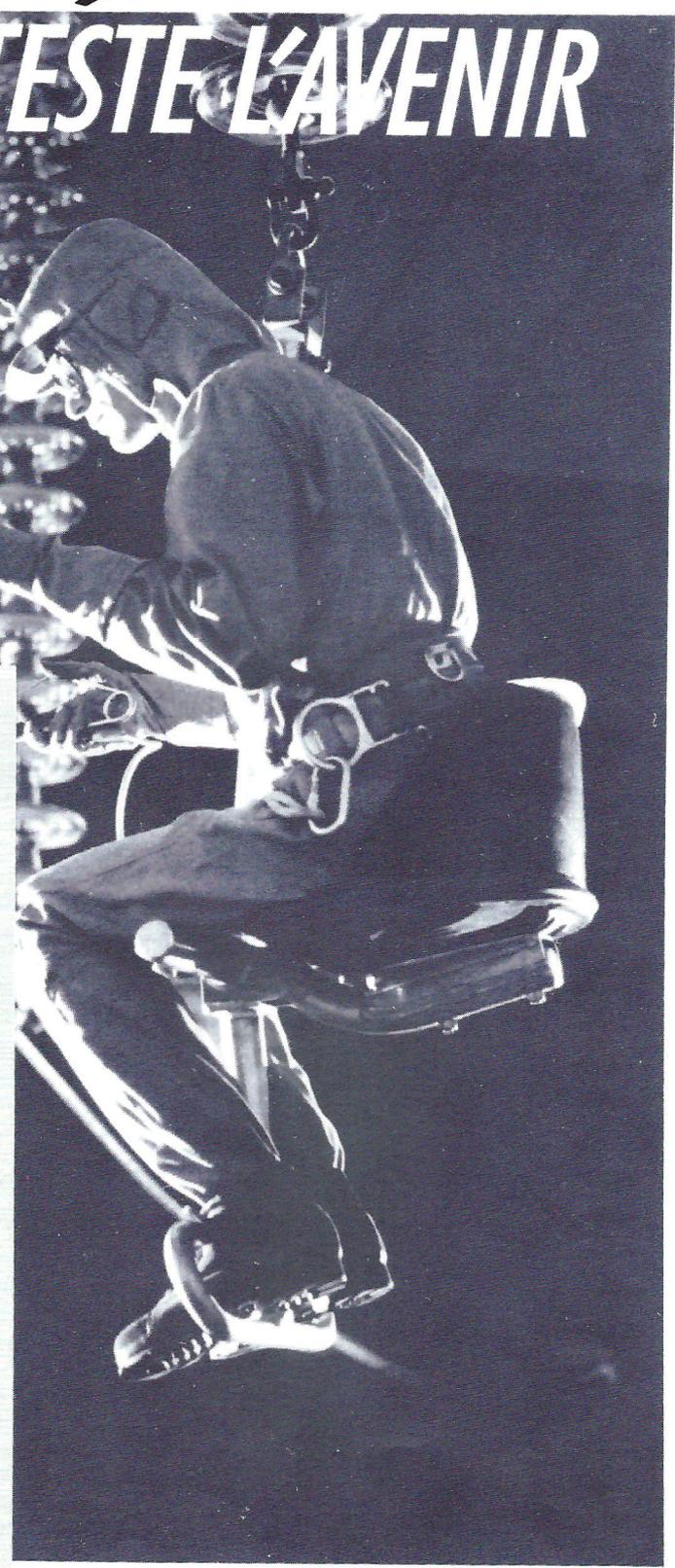
- Les clichés des figures d'interférence et de diffraction ont été réalisés par Monsieur Jouanisson, Maître de Conférences à l'Université de Clermont-Ferrand. Nous le remercions de nous avoir autorisés à les reproduire dans cet article.

**BIBLIOGRAPHIE**

1. GAMOW G., « Trente années qui ébranlèrent la Physique » - Dunod, Paris 1968.
2. GRANGIER P., ROGER G., ASPECT A., « Etats à un seul photon et interférences lumineuses : une expérience de pensée devenue réalité » - Images de la Physique 1987. Supplément au Courrier du CNRS n°68, 1987, page 25.
3. TARNOWSKI D., « Onde, particule : le double jeu quantique » - La Recherche, n° 178, Juin 1986, page 841.
4. VARENNES J.-Ch., « Le maréchal de La Palice ou le dernier des chevaliers français » - Collection Présence de l'Histoire, Editions Perrin 1989.

# POUR VOUS, IL TESTE L'AVENIR

**A**vant d'être utilisés, techniques et matériels sont longuement testés dans les laboratoires d'Electricité de France. Grâce aux équipes de chercheurs qui y travaillent, de nouvelles applications de l'électricité sont mises au point. A l'écoute des utilisateurs et de leurs besoins, les chercheurs améliorent la qualité et la sécurité des procédés électriques.



## LE MONDE DE L'INFINIMENT PETIT

par J.-Cl. Montret\*

La Mission Académique à la Formation des Personnels de l'Education Nationale a organisé en mai 1989 des Journées « Langevin » dont l'objectif était de présenter quelques aspects de la recherche de pointe menée dans les laboratoires clermontois. Nous publions la conférence du Professeur J.-Cl. MONTRET qui dirige notamment une équipe faisant partie de l'expérience ALEPH de l'accélérateur géant du CERN à Genève. Ce séminaire a pour but de suivre l'évolution des concepts et des expériences qui ont présidé, depuis l'antiquité, à la recherche des composants ultimes et universels de la matière. On montre que cette étude ne peut se faire sans celle des forces qui régissent les lois de l'Univers.



### I - LES CONSTITUANTS

#### • Recherche des éléments

**Philosophes grecs :** Les objets naturels sont construits à partir d'un nombre restreint d'éléments. Leur agencement et les proportions variables définissent les propriétés des corps.

**Les chimistes** identifient et classent les éléments chimiques dont toute substance est composée : Mendeleïff.

**Les physiciens** succèdent aux chimistes et percent le secret de la structure des édifices atomiques et moléculaires.

#### C'est le début de la physique nucléaire et des particules.

Successivement apparaîtront :

- La mise en évidence du rôle fondamental de l'**électron constituant universel de la matière.**

- En face de lui : un noyau, constitué de particules lourdes (baryons) : les **protons** et les **neutrons.**

- On est en présence de l'**atome** dont la cohésion est assurée par l'interaction électromagnétique → théorie quantique des champs → **le photon.**

- Le noyau impose la notion de **forces nucléaires** indépendantes de la charge électrique

Portée :  $10^{-13}$  cm

Théorie quantique des champs → il existe un vecteur de l'interaction nucléaire de masse 140 MeV : **le meson  $\pi$ .**

- Dans le même temps, on découvre le **muon** (non prédit théoriquement).

- Fermi et l'étude des désintégrations  $\beta$  des noyaux amène une interaction supplémentaire, l'**interaction faible** et une particule, **le neutrino.**

- Dirac : A toute particule on doit associer une antiparticule de même masse et durée de vie, mais de charge électrique opposée.

\* Le Professeur J.-Cl. MONTRET est Directeur du Laboratoire de Physique Corpusculaire de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand.

#### • Les difficultés augmentent :

Avec les nouveaux accélérateurs d'énergie > à 1 GeV, apparaissent les nouvelles particules (**étranges**, puis **charmées**,...) et, vers les années 60 les **résonances.**

#### • L'étrangeté :

Certaines particules obéissent à des règles particulières pour leur création ou leur disparition. Par exemple pour le méson k.

#### • La production associée :

$\Pi + N \rightarrow k + \Lambda$  (Au méson k est toujours associé le baryon  $\Lambda$ ).

• **Leur désintégration :** Par interaction faible (qui ne conserve pas l'étrangeté).

$$Ex : k^+ \rightarrow \Pi^+ + \Pi^0$$

• Gell-Mann et Nishijima introduisent pour expliquer ce comportement, une quatrième « charge » appelée « étrangeté ».

Cette dernière est conservée par les interactions fortes et électromagnétiques et non conservée par l'interaction faible.

#### • Les résonances

• Découverte  $\approx$  Années 60.

• Ce sont des états très instables dont la durée de vie ( $\approx 10^{-23}$  à  $10^{-24}$  sec) est très courte.

• Détectées par leur produit de désintégration.

• Relation d'incertitude :  $\Delta E \cdot \Delta \tau \approx h$  conduit à une largeur  $\Delta E \approx 100$  à  $150$  MeV.

Leurs masses sont connues à **150 MeV près.**

Ex : **Baryons**

$$N^* \rightarrow N + \Pi \quad \begin{cases} M = 1520 \text{ MeV} \\ \Gamma = 125 \text{ MeV} \end{cases}$$

**Mesons :** triplet mesons vecteurs :

$$\begin{aligned} \rho &\rightarrow \pi\pi & M &= 770 \text{ MeV} & \Gamma &= 153 \text{ MeV} \\ \omega &\rightarrow \rho\pi & M &= 782 \text{ MeV} & \Gamma &= 8,5 \text{ MeV} \\ \Phi &\rightarrow K\bar{K} & M &= 1019 \text{ MeV} & \Gamma &= 4,4 \text{ MeV} \end{aligned}$$

### SOLUTION - MODÈLE DES QUARKS

• Un nombre quantique supplémentaire : l'**Isospin.**

• Pour traiter proton et neutron comme une même particule, **le nucléon** observable

dans deux états de charge distincts, on introduit un nombre quantique supplémentaire : l'**isospin.**

• Spectre de masse des hadrons.

Les particules se groupent en famille de masses voisines : les **super multiplets** : ce sont des particules de même spin-parité. (Fig. 1).

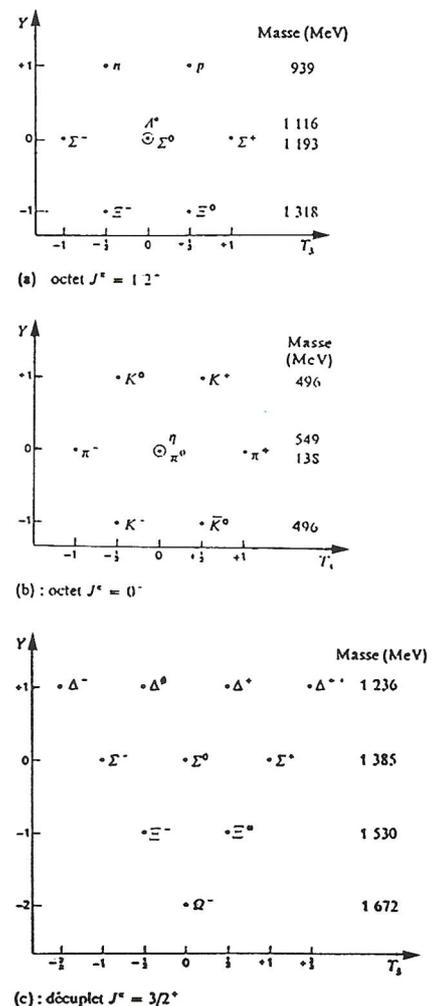


Figure 1 : Super Multiplets d'isospin

# LA RECHERCHE

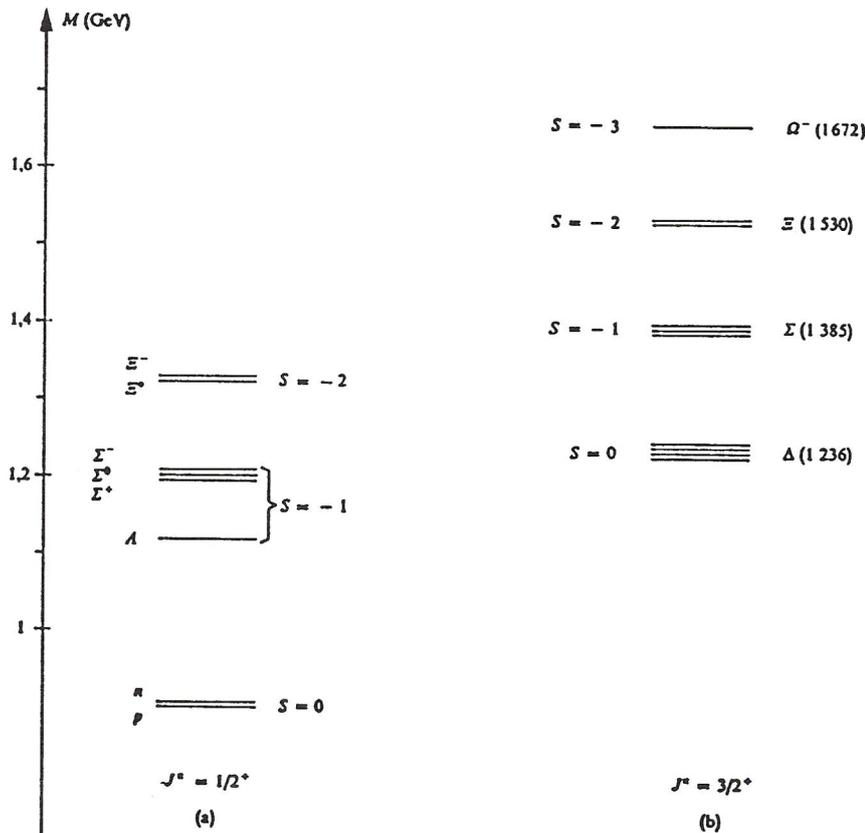


Figure 2 : Spectre de masses des 8 baryons  $J^\pi = 1/2^+$  (a) et des 10 baryons  $J^\pi = 3/2^+$  (b). L'espacement entre les masses des membres d'un même multiplet d'isospin (quelques MeV), a été exagéré sur la figure.

A l'intérieur d'un super multiplet, les particules sont groupées en particules de masse très voisines : **Les multiplets d'isospin** (Fig. 2).

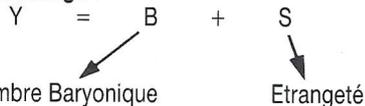
• On attribue à chaque hadron un nombre quantique dynamique I tel que la multitude des états de charge soit  $(2I + 1)$ .

Ex : Nucléon : doublet de charge (+, 0)  $I = 1/2$   
 Meson  $\pi$  : triplet de charge (+, 0, -)  $I = 1$

## REPRÉSENTATION ET MODÈLE DE L'OCTET

On introduit :

**L'Hypercharge :**



**La Charge électrique** q est liée au spin isotopique et à l'hypercharge par la relation  $q = I_3 + Y/2$ .

On représente les supermultiplets dans le plan (Y,  $I_3$ ).

### • L'outil mathématique

A partir des propriétés géométriques des représentations, Gell-Mann établit un modèle théorique basé sur la théorie des groupes, appelé  $SU_3$ .

L'exploitation de ces symétries conduit à la représentation irréductible de ce groupe qui

correspond à un triplet de 3 particules u, d, s, que l'on va désigner sous le nom de **quarks**.

### • Les nouvelles particules

**1974** : Découverte à Stanford et Brookhaven de particules ayant des propriétés différentes de ce qui est prévu.

$J/\psi$   $m = 3095$  MeV  
 $\Gamma = 0,068$  MeV (Largeur très étroite)

Il fait partie d'une famille dont les récurrences vont jusqu'à 4415 MeV.

Faible largeur donc durée de vie  $\tau$  grande. Ce sont les mésons charmés.

$J/\psi$  état liés de quarks «charmés et anti-charmés  $c\bar{c}$ ».

**1977** : Découverte d'un état lié  $b\bar{b}$  (quark «beau») :

La famille du **upsilon** ( $T$ ).  
 $m_T = 9560$  MeV  $\Gamma = 0,052$  MeV.

**1975** : Découverte d'un lepton supplémentaire : **le lepton  $\tau$** .

$m_\tau = 1784$  MeV  
 Durée de vie :  $2,3 \cdot 10^{-12}$  sec.

**Pour résumer** : on peut dresser le tableau suivant des particules élémentaires.

Leptons			
$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$	Charge électrique
			0
			-1

**Quarks**

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \rightarrow ? \quad \begin{matrix} +2/3 \\ -1/3 \end{matrix}$$

- ainsi les baryons sont formés de 3 quarks  
 Ex : P = uud  
 n = udd

- Les mesons sont formés d'un quark et d'un antiquark.

$$\begin{matrix} \Pi^0 = u\bar{u} \\ \Pi^+ = u\bar{d} \end{matrix}$$

## LES FORCES

Dans la nature et à notre échelle d'énergie, toute interaction entre deux objets peut être ramenée à une des interactions suivantes :

- Interaction de gravitation
- faible
- électromagnétique
- forte

## PROPRIÉTÉS ÉLÉMENTAIRES DE CES INTERACTIONS

### • Intensité

Nombre sans dimension attaché à la «force» de l'interaction.

$$C_g = \frac{G \cdot m_p^2}{\hbar c} \simeq 6 \cdot 10^{-39}$$

$$C_f = G_f \cdot m_p^2 \simeq 10^{-8}$$

$$C_e = e^2/\hbar c = 1/137$$

$$C_F = g^2/4\pi = 15$$

### • Portée des interactions

$$r_0 \simeq \frac{1}{\mu} \quad (\mu \text{ est la masse de la particule})$$

Gravitation et électromagnétique  $r_0 \rightarrow \infty$

Forte  $r \simeq 10^{-13}$  cm

Faible  $r \simeq 10^{-16}$  cm

(Découverte du porteur de l'interaction faible en 1984 :  $W^\pm, Z^0$ ).

**Formalisme mathématique pour décrire les interactions** : Théorie quantique et relativiste.

Description du monde microscopique :

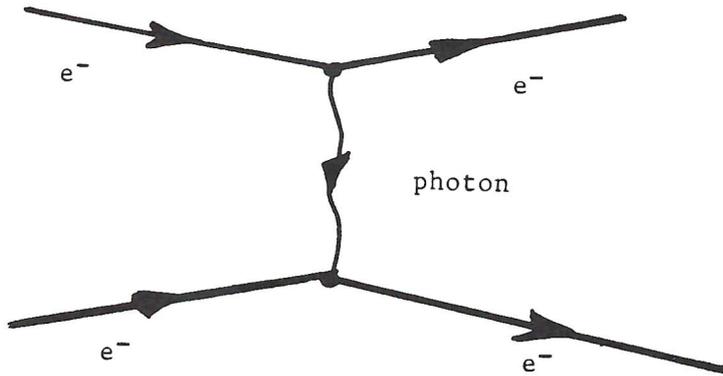
Théorie quantique

Les particules sont créées puis annihilées :

Théorie relativiste.

**En fait** : **Théorie quantique des champs** : Toute interaction est matérialisée par un quantum de champ (particule) émise par une particule et réabsorbée par l'autre.

Ex. : Interaction entre deux électrons



Ainsi, pour les quatre interactions fondamentales, on a :

Force	Forte	Electro Magnétique	Faible	Gravitation
Quanta du champ	Gluons	Photons	$W^+, W^-, Z^0$	Graviton
Particules sensibles à cette force	Quarks Gluons	Particules chargées	Quarks Leptons $W^+, W^-, Z^0$	Toutes

**Les Gluons et la couleur**

• **Les quarks** sont des fermions liés par des échanges de bosons, **les gluons** qui véhiculent l'interaction forte.

• **La couleur des quarks**

La couleur est un nouveau nombre quantique introduit pour lever une difficulté qui était apparue avec l'existence du  $\Delta^{++} = u.u.u.$  en contradiction avec le principe d'exclusion de Pauli (on ne peut avoir 3 fermions dans la même case quantique) :

On attache alors aux quarks une propriété complémentaire, la couleur, qui existe dans trois états :

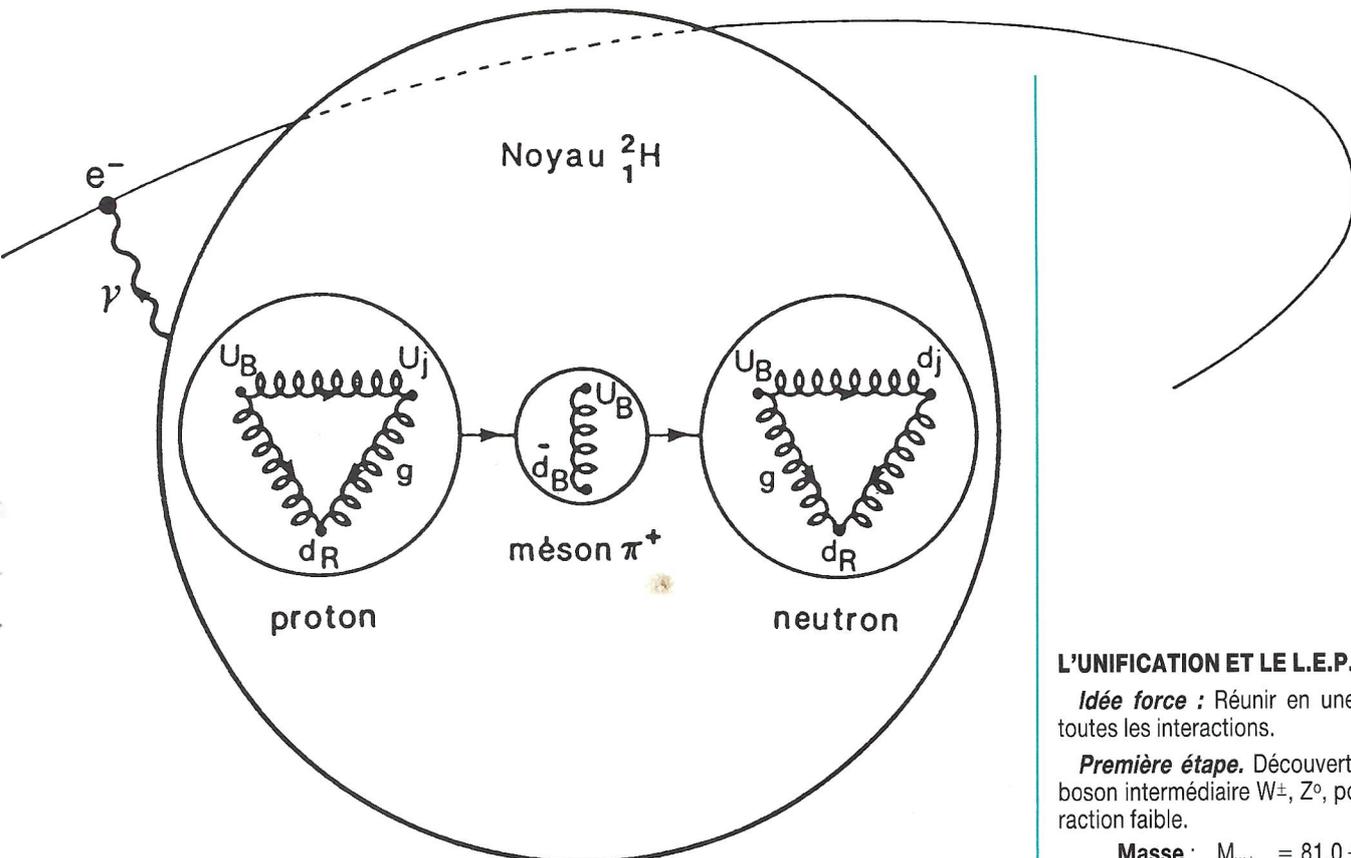
bleu, jaune, rouge.

**La chromodynamique quantique** étudie la liaison entre quarks par échange de gluons porteurs de couleur.

**Résultats essentiels de la chromodynamique quantique (Q.C.D.)**

- Un baryon est formé de 3 quarks différents par leur couleur et on dit que les baryons sont gris.
- Un méson est toujours formé d'une paire quark-antiquark de même couleur.

• **Image schématique de la matière** Ex de l'atome de deuterium.



**L'UNIFICATION ET LE L.E.P.**

**Idée force** : Réunir en une seule théorie toutes les interactions.

**Première étape.** Découverte au CERN du boson intermédiaire  $W^\pm, Z^0$ , porteur de l'interaction faible.

Masse :  $M_{W^+} = 81.0 \pm 1,3 \text{ Gev}$   
 $M_{Z^0} = 92.4 \pm 1,8 \text{ Gev}$

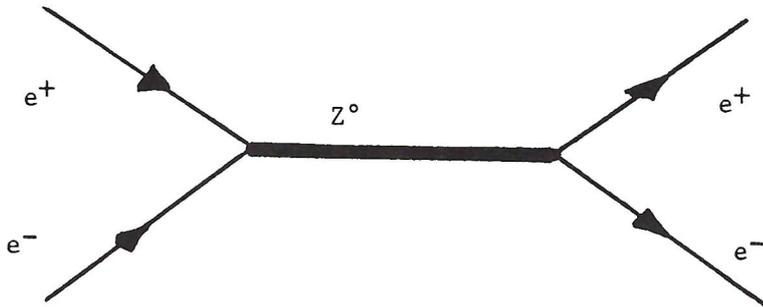
# LA RECHERCHE

## LE FUTUR IMMÉDIAT : LE LEP

### LE CONTEXTE

En 1981, les états membres du CERN décident la construction du LEP.

C'est un collisionneur  $e^+ - e^-$  qui dans une 1<sup>re</sup> étape fournira  $2 \times 50$  Gev dans le centre de masse.



Avec son anneau de 27 km, situé pour une part dans le canton de Genève et pour l'autre dans le pays de Gex, le LEP constitue le plus grand collisionneur du monde.



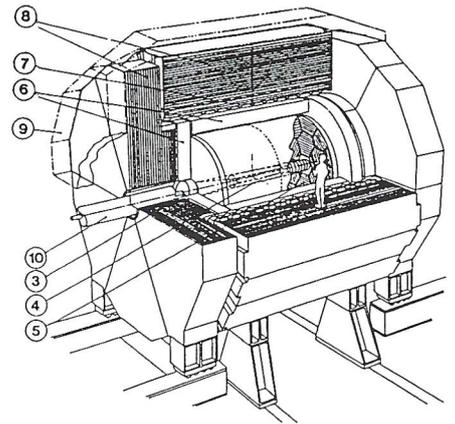
En choisissant l'énergie des faisceaux à 45 Gev, on est en face d'une «usine» de production de  $Z^0$ .

Le début des expériences a eu lieu dans l'été 89.

### UNE EXPÉRIENCE TYPE : ALEPH

C'est une collaboration de 25 laboratoires mondiaux, regroupant 250 physiciens environ dont le laboratoire clermontois.

**Son but :** A partir de la haute statistique récoltée, étudier complètement la théorie électrofaible, afin de faire un pas décisif dans l'unification des forces régissant les phénomènes naturels.



- ③ Luminomètre
- ④ Chambre interne (IC)
- ⑤ Chambre centrale (IPC)
- ⑥ Calorimètre électromagnétique
- ⑦ Aimant
- ⑧ Calorimètre hadronique
- ⑨ Détecteur de muons
- ⑩ Quadropole supraconducteur

### ALEPH DETECTEUR

# Une mission : la sante.

**MSD**  
**MERCK**  
**SHARP**  
**DOHME**  
**CHIBRET**

Centre de Recherche de Riomp (Puy-de-Dôme)

LABORATOIRES MERCK SHARP & DOHME-CHIBRET

3, Avenue Hoche - 75008 Paris ☎ 42 67 97 22

## LA PHYSIQUE DES PARTICULES AU CERN UNE EXPERIENCE : ALEPH

par Bernard Michel\*

Le CERN est le grand laboratoire européen pour la physique des particules. Grâce à un ensemble unique au monde d'accélérateurs (PS, SPS, LEP, etc...) des collisions de particules de très haute énergie peuvent être observées : électron-positron, proton-antiproton, noyau-noyau, proton-noyau par exemple.

L'enjeu est multiple : il s'agit d'une part de déterminer les constituants fondamentaux de la matière. Pour cela il est nécessaire de disposer des sondes qui permettent de scruter les détails les plus infimes de la matière. Ce sont les accélérateurs de particules d'énergies de plus en plus élevées. Il s'agit également de comprendre et de décrire les interactions entre ces particules.

### LES CONSTITUANTS FONDAMENTAUX DE LA MATIERE

Depuis l'époque où l'atome s'est avéré être constitué d'un noyau, formé de protons et de neutrons, et d'électrons, de très nombreuses autres particules ont été découvertes :

Les **leptons** ou particules légères. Il s'agit, en plus de l'électron  $e^-$ , des leptons  $\mu^-$  et  $\tau^-$ , qui ne diffèrent de l'électron que par leur masse. A chacun de ces leptons chargés est associé un lepton neutre, ou **neutrino**, soient trois neutrinos différents  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  et  $\nu_\tau$ . A chaque lepton, chargé ou neutre, correspond son antiparticule : le positron  $e^+$ , mais aussi leptons  $\mu^+$  et  $\tau^+$  et les antineutrinos  $\bar{\nu}_e$ ,  $\bar{\nu}_\mu$  et  $\bar{\nu}_\tau$ . Les leptons chargés sont sensibles aux interactions électromagnétiques et faibles, alors que les neutrinos n'interagissent que faiblement. L'exemple le plus connu d'interaction faible est la désintégration du neutron,  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ , responsable de la radioactivité  $\beta$ .

Les **hadrons** quant à eux, sont en plus sensibles à l'interaction forte, responsable de la cohésion des noyaux atomiques. Ils ont été classés en **baryons**, ou particules lourdes, chargées ou neutres, tels que proton, neutron, mais aussi  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ , etc..., et en **mésons**, de masse intermédiaire entre leptons et baryons, tels que mésons  $\pi$ , K, etc... En fait plusieurs centaines de ces hadrons ont été découverts à ce jour. Ils peuvent être classés en familles, ou multiplets, possédant des propriétés de symétrie vis-à-vis de certains nombres quantiques, tels que le spin ou l'isospin

\* Bernard MICHEL, Directeur de Recherches au CNRS, dirige l'équipe du laboratoire de physique des particules de Clermont-Ferrand qui collabore à l'expérience ALEPH au CERN.

par exemple. A ce point l'analogie est frappante avec la classification périodique des éléments atomiques, qui contient en elle-même l'idée que les atomes sont formés d'un nombre limité de constituants, le noyau d'une part, les électrons d'autre part. De la même façon les hadrons sont constitués de **quarks** : une paire quark-antiquark pour les mésons, un arrangement de trois quarks pour les baryons. La première preuve expérimentale de la nature composite des hadrons provient d'expériences de diffusion électron-proton dont les résultats ne pouvaient être interprétés comme provenant de l'interaction de charges électriques ponctuelles. Bien que datant de vingt ans environ, ces travaux ont valu le prix Nobel 1990 à trois chercheurs américains : Friedman, Kendall et Taylor.

Le modèle des quarks prévoit donc que les nucléons sont formés à partir de 2 quarks de charge électrique fractionnaire :

le quark u ( $q = + \frac{2}{3}$ ) et le quark d ( $q = - \frac{1}{3}$ ).

Le proton est constitué d'un arrangement uud (charge  $q = +1$ ) et le neutron d'un arrangement udd (charge  $q = 0$ ).

De la même façon les mésons  $\pi$  sont constitués par exemple de paires  $u\bar{d}$ ,  $\bar{u}d$ ,  $u\bar{u}$  et  $d\bar{d}$  pour aboutir à 3 états de charge  $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^-$ .

La très grande multiplicité des hadrons conduit à penser qu'il existe d'autres quarks que les quarks u et d qui constituent la matière ordinaire, de même qu'il existe d'autres leptons que l'électron et le neutrino électronique. Ainsi les mésons  $K^+$ ,  $K^-$  et  $K^0$  sont formés de paires  $u\bar{s}$ ,  $\bar{u}s$ ,  $d\bar{s}$  et  $\bar{d}s$  et le baryon  $\Lambda$  d'un arrangement uds. Le quark s, ou quark «étrange», est ainsi le troisième quark de la série. En 1974, le quark «charmé» c a été mis en évidence lors de la découverte de la particule  $J/\psi$ , état lié  $c\bar{c}$ . Le prix Nobel a été attribué aux responsables des deux expériences qui ont observé cette particule pour la première fois (B. Richter et S. Ting). Depuis, un cinquième quark, le quark «beau» b a également été découvert. Les multiples combinaisons de ces différents quarks et anti-quarks génèrent la grande variété de hadrons recensés aujourd'hui.

### LES INTERACTIONS FONDAMENTALES

Quatre interactions fondamentales sont connues à ce jour :

- La gravitation
- L'interaction électromagnétique
- L'interaction faible
- L'interaction forte

L'interaction électromagnétique qui intervient entre des charges électriques en mouvement est décrite parfaitement depuis le siècle dernier grâce aux équations de Maxwell. Au niveau microscopique, la théorie des interactions entre particules relativistes porteuses de charges électriques élémentaires est l'électrodynamique quantique. Elle n'a jamais été mise en défaut, et ce jusqu'à un très haut niveau de précision. Ainsi la constante de structure fine a été mesurée avec une incertitude relative de l'ordre de  $10^{-8}$ . L'électrodynamique quantique est une théorie des champs où un boson de jauge, le photon, est le vecteur de l'interaction électromagnétique, dont la grande portée est due au fait que le photon a une masse nulle.

L'interaction faible, de très courte portée, à tel point qu'elle a un moment été considéré comme ponctuelle, semble d'une nature très différente de celle de l'interaction électromagnétique. En fait, dans les années 1960, l'idée a germé que ces deux interactions pouvaient être similaires, à condition que l'interaction faible soit véhiculée par des bosons de masse élevée, afin de rendre compte de sa très courte portée. Un certain nombre d'arguments théoriques situaient cette masse aux environs de 100 GeV/c<sup>2</sup>. C'est ainsi qu'une théorie unique de ces deux types d'interactions a été élaborée prévoyant 4 bosons de jauge : le photon, bien entendu, les bosons chargés  $W^\pm$  et le boson neutre  $Z^0$ . Cette théorie prévoit par exemple qu'une paire électron-positron peut s'annihiler aussi bien en un photon (interaction électromagnétique  $e^+e^- \rightarrow \gamma$ ) qu'en un boson  $Z^0$  (interaction faible à courant neutre  $e^+e^- \rightarrow Z^0$ ). De même les interactions faibles à courant chargé, telles que la désintégration  $\beta$  du neutron par exemple, sont décrites grâce à l'échange d'un boson W :  $d \rightarrow uW^-$ , le  $W^-$  se désintégrant instantanément

# LA RECHERCHE

$$\text{en } e^- \bar{\nu}_e, \text{ soit } \begin{pmatrix} (ud) \\ \text{neutron} \end{pmatrix} d \rightarrow \begin{pmatrix} (ud) \\ \text{proton} \end{pmatrix} u + e^- + \bar{\nu}_e.$$

On peut donc considérer que cette **théorie électrofaible**, ou **modèle standard**, décrit une seule et même interaction dont les manifestations varient suivant l'énergie totale mise en jeu : Interactions électromagnétiques prédominantes à basse énergie, d'où le nom d'interactions faibles pour les processus faisant intervenir les bosons massifs W et Z, alors que ces derniers deviennent d'une importance comparable à partir de 100 GeV et au delà. Les interactions faibles à courant neutre ont été observées pour la première fois au CERN dans les années 1970, ce qui a valu le prix Nobel aux théoriciens qui sont à l'origine du Modèle Standard, Glashow, Salam et Weinberg. Les bosons  $W^\pm$  et  $Z^0$  ont également été découverts au CERN en 1983 dans des collisions proton-antiproton, c'est-à-dire dans des collisions  $u\bar{u} \rightarrow Z^0$ ,  $d\bar{d} \rightarrow Z^0$ ,  $u\bar{d} \rightarrow w^+$ ,  $\bar{u}d \rightarrow w^-$ , conduisant au prix Nobel pour les physiciens C. Rubbia et S. Van der Meer. L'interaction électrofaible s'applique aussi bien aux leptons qu'aux quarks, qui sont rangés en familles, ou doublets d'isospin faible :

pour les leptons

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

pour les quarks

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

Il est à noter que le sixième quark t n'a pas encore été mis en évidence, mais personne ne doute que ce sera chose faite dans les années à venir. Par contre la théorie électrofaible ne contraint absolument pas le nombre de familles à trois.

La théorie de l'**interaction forte**, ou **chromodynamique quantique**, est bâtie sur un modèle similaire à l'interaction électrofaible : la charge de couleur, portée par les quarks, joue le rôle de la charge électrique dans l'interaction électromagnétique. Les vecteurs de l'interaction forte sont les **gluons**. De ce fait on appelle souvent Modèle Standard, l'ensemble de la théorie électrofaible et de la chromodynamique quantique. Il reste toutefois un certain nombre de difficultés à vaincre pour que cette théorie de l'interaction forte soit aussi cohérente que la théorie électrofaible : elle ne rend compte des phénomènes qu'à haute énergie où les quarks sont considérés, au moins au premier ordre, comme quasi-libres à l'intérieur des hadrons. Elle n'apporte aucune explication au phénomène de confinement des quarks au sein de la matière hadronique. En effet, les quarks n'ont jamais été observés à l'état libre et toute tentative

pour les isoler se traduit invariablement en une fragmentation de ce quark en hadrons ordinaires.

## AU DELA DU MODELE STANDARD

Le fait que la chromodynamique quantique soit une théorie de jauge, au même titre que la théorie électrofaible, a suscité de grands espoirs en faveur d'une **théorie de grande unification** des interactions électrofaibles et fortes. En fait de telles théories ont déjà été élaborées : elles feraient se correspondre, dans une symétrie d'un type nouveau, les familles de quarks et les familles de leptons, de la même façon que la théorie électrofaible associe le lepton chargé et le lepton neutre, ou les deux quarks d'une même famille. Elles prévoient même l'instabilité du proton, dont la recherche expérimentale est pour l'instant négative. En fait, si le proton est instable sa durée de vie est toutefois supérieure à  $10^{33}$  années.

Partant du principe que la nature aime l'économie et la simplicité, l'existence d'au moins trois familles de leptons et de quarks comme constituants élémentaires de la matière n'est pas très satisfaisante (pas plus que ne l'était l'existence d'une centaine d'éléments atomiques, ou de centaines de hadrons). D'où l'idée que quarks, leptons, mais aussi bosons de jauge, pourraient être formés de constituants plus élémentaires. Un tel concept a donné naissance à des **modèles composites**, qui prévoient par exemple l'existence de leptons et quarks excités (de la même façon que l'atome, lui-même objet composite formé d'un noyau et d'électrons, peut exister à l'état excité). D'autres modèles, encore plus ambitieux, tentent de décrire dans une seule théorie les quatre types d'interactions connues. L'idée est, qu'à des énergies extrêmement élevées (de l'ordre de l'énergie de Planck, soit  $10^{19}$  GeV), il n'existerait qu'une seule interaction qui se découplerait au fur et à mesure que l'on descend dans l'échelle des énergies. C'est la généralisation de l'interaction électrofaible qui se découple en interaction électromagnétique et interaction faible lorsque l'on s'éloigne de la région d'unification (de l'ordre de 100 GeV) vers des énergies plus basses. La conséquence pour la physique des particules se traduirait par de nouvelles symétries qui feraient se correspondre fermions (particules de spin demi-entier) et bosons (particules de spin entier). De telles **théories «supersymétriques»** prévoient qu'à toute particule (lepton, quark, photon, bosons Z et W) est associée une particule supersymétrique dont le spin diffère de  $\frac{1}{2}$ .

La recherche de ces nouvelles particules est donc l'enjeu majeur de la physique des hautes énergies actuelle : qu'il s'agisse d'états excités de particules connues, ou de leurs partenaires supersymétriques. L'ambition est de décrire l'univers avec un minimum

de constituants et une théorie unique des différents types d'interactions que nous connaissons. C'est ce qui fait de la physique des particules une science frontière. Cela est d'autant plus vrai que les liens avec d'autres domaines de la physique, tels que l'astrophysique et la cosmologie, sont de plus en plus évidents. Si l'on en croit le Modèle standard de la cosmologie, les conditions qui prévalaient lors du «big-bang» faisaient de l'univers de cette époque un plasma très dense de particules interagissant entre elles, et se refroidissant pour former l'univers que nous connaissons à l'heure actuelle. Cette évolution est donc intimement liée au nombre et à la nature des particules qui le constituent, ainsi qu'à leurs interactions. Une des questions fondamentales est celle de l'existence de «matière cachée» dont la conséquence pourrait être, selon sa densité, une expansion indéfinie de l'univers, une expansion asymptotique vers un état stable, ou au contraire une phase de contraction après la période d'expansion. Cette «matière cachée» pourrait être constituée de particules massives qui n'ont pas encore été détectées. Elle pourrait également s'expliquer par le fait que des particules connues, telles que les neutrinos, ont une masse, même très faible compte tenu de leur densité très élevée dans l'univers. (La masse du neutrino électronique, si elle est non nulle, est inférieure à 30 eV).

## L'EXPERIENCE ALEPH

C'est une expérience qui s'inscrit dans le cadre général de la physique des particules décrit plus haut. Elle est installée sur le grand anneau de collision électron-positron LEP au CERN. L'énergie totale disponible dans la collision est actuellement limitée à 100 GeV, et sera portée à 200 GeV d'ici quelques années. Dans cette première phase le LEP n'est rien d'autre qu'une usine à produire des  $Z^0$ . Il suffit pour cela de faire s'annihiler électron et positron avec une énergie totale suffisante pour produire un  $Z^0$ , soit 91.2 GeV/C<sup>2</sup>. Depuis la mise en service du LEP, il y a un peu plus d'un an, l'expérience ALEPH a observé 200000  $Z^0$  environ. Dans les années à venir ce nombre sera porté à plusieurs millions. Nous pourrions alors tester la théorie électrofaible avec un niveau de précision s'approchant de celui de l'électrodynamique quantique.

Une fois produit, le  $Z^0$  se désintègre immédiatement, soit en paires de leptons ( $Z^0 \rightarrow e^+ e^-$ ,  $\mu^+ \mu^-$  ou  $\tau^+ \tau^-$ ) ou en paires quarks-antiquarks ( $Z^0 \rightarrow u\bar{u}$ ,  $d\bar{d}$ ,  $s\bar{s}$ ,  $c\bar{c}$  ou  $b\bar{b}$ ). Dans ce dernier cas, quarks et antiquarks se fragmentent pour donner des jets de hadrons observables dans le détecteur. De la sorte, la désintégration d'un  $Z^0$  peut conduire à un état final allant de deux à plusieurs dizaines de particules stables. (La photographie de couverture donne l'exemple d'un tel événement). D'où la complexité et l'herméticité des détecteurs qui doivent enregistrer de telles désintégrations. Il s'agit de détecter et d'identifier

toutes les particules produites dans l'interaction, de mesurer leur énergie et leur direction de propagation.

C'est dans ce but que s'est formée, il y a une dizaine d'années la collaboration ALEPH. L'initiative en revient à J. Steinberger<sup>(1)</sup> qui a coordonné les efforts de groupes de 30 laboratoires, dont celui de Clermont-Ferrand, provenant de 10 pays différents.

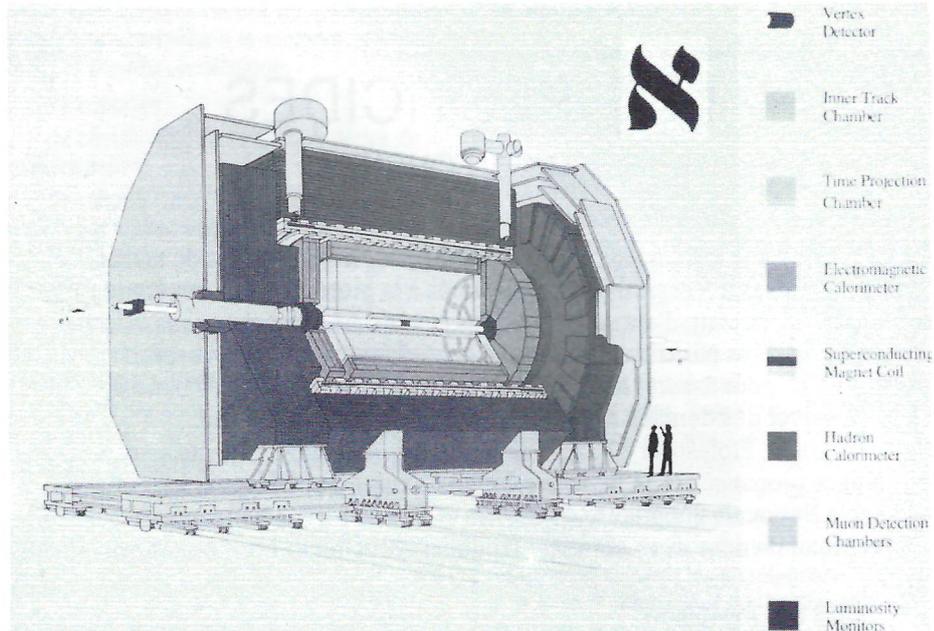
Après une phase d'étude et de tests de prototypes, la construction du détecteur a commencé en 1985.

ALEPH s'articule autour d'un solénoïde supraconducteur produisant un champ magnétique homogène de 1,5 tesla dans un volume cylindrique de 5 m de long et 5 m de diamètre environ. Les particules chargées produites dans une collision voient leurs trajectoires incurvées dans le champ magnétique en forme d'hélices. Il suffit alors de mesurer le rayon de courbure et le pas de l'hélice pour déterminer la quantité de mouvement et la direction de propagation des particules. A cet effet, des chambres sont placées à l'intérieur de la bobine magnétique. Elles fonctionnent d'après le principe selon lequel toute particule chargée ionise le milieu qu'elle traverse. Grâce à un champ électrique appliqué entre des électrodes, les charges électriques produites par ionisation sont accélérées grâce à un phénomène d'avalanche. Il est ainsi possible d'échantillonner les charges produites le long de la trajectoire et donc de reconstruire la trajectoire elle-même.

Un « calorimètre » électromagnétique est également placé à l'intérieur de la bobine. Il est constitué d'une épaisseur de plomb de 10 cm environ, et permet d'identifier électrons et photons. En effet, de telles particules développent dans un matériau lourd des gerbes électromagnétiques, jusqu'à y déposer toute leur énergie. Il suffit alors d'échantillonner ce dépôt d'énergie, en insérant par exemple des plans de chambres à l'intérieur du plomb, pour identifier ces gerbes et mesurer leur énergie.

Un calorimètre hadronique est situé à l'extérieur de la bobine. Il identifie les hadrons qui y développent des gerbes hadroniques. Il est bâti sur le même principe que le calorimètre électromagnétique. Le plomb est remplacé par le fer qui constitue le retour de champ de la bobine, soit une épaisseur de 1,20 m environ. Il sert également à identifier les muons, qui sont les seules particules à traverser l'ensemble du détecteur en y déposant un minimum d'énergie et sans développer de gerbes.

Un tel détecteur doit pouvoir isoler les différentes particules produites lors d'une collision (jusqu'à plusieurs dizaines). Le pouvoir de résolution dans l'espace est donc une qualité essentielle. Il est obtenu un multipliant



le nombre de cellules élémentaires de détection de dimensions aussi petites que possible. ALEPH en comporte plusieurs centaines de milliers. Les informations de chacune de ces cellules doivent être enregistrées très rapidement, c'est-à-dire avant que puisse se produire une nouvelle collision, soit avant 22 micro-secondes. Cela donne une idée de la rapidité et de la complexité de l'électronique associée au détecteur, ainsi que des systèmes d'acquisition de données. Ces données sont ensuite analysées grâce à des ordinateurs puissants, jusqu'à fournir pour chaque collision des informations physiques : nature, énergie et direction des particules produites. L'analyse physique proprement dite peut alors commencer sans autre contrainte de temps que la rapidité avec laquelle les résultats doivent être publiés : la compétition avec les expériences concurrentes est en effet sévère.

ALEPH a été installé sur le site expérimental en 1988 et au début de 1989. La figure ci-jointe montre une vue du détecteur. Les prises de données ont commencé pendant l'été 1989. Depuis la collaboration a produit une vingtaine de publications dans des revues internationales. Les résultats les plus marquants concernent les tests précis de la théorie électrofaible :

- Mesure précise de la masse du bozon  $Z^0$  :  $M_Z = 91,19 \pm 0,04 \text{ GeV}/c^2$
- Mesure précise des probabilités de désintégration du  $Z^0$  en paires de leptons en paires quark-antiquark.
- Mesure du nombre de famille de neutrinos. C'est peut-être le résultat le plus important. Il n'existe pas d'autres neutrinos que  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  et  $\nu_\tau$ , ce qui limite le nombre de doublets, de leptons et de quarks. Ceci ne vaut que si l'on en croit le parallélisme, suggéré par le Modèle Standard, entre lep-

tons chargés et leptons neutres d'une part, entre leptons et quarks d'autre part.

- Enfin toutes les recherches de nouvelles particules, leptons et quarks excités, particules supersymétriques, etc..., se sont révélées négatives. Cela signifie que si de telles particules existent, leur masse est probablement supérieure à  $50 \text{ GeV}/c^2$ , voire  $100 \text{ GeV}/c^2$  pour certaines d'entre elles. En effet, elles n'ont pu être produites au LEP où l'énergie totale disponible est actuellement de 100 GeV. Leur recherche sera l'un des enjeux de la phase II du LEP, où cette énergie totale sera doublée. Elle se poursuivra sans doute auprès des futurs accélérateurs en projet à l'heure actuelle (collisionneurs proton-proton de plusieurs milliers de GeV) et qui devraient remplacer le LEP dans les années 2000.

Comme on le voit, la physique des particules a encore quelques belles années devant elle !

## P.S.M. COMPOSANTS

- ▶ Composants électroniques professionnels
- ▶ Matériel et outillage
- ▶ Appareils de mesure
- ▶ Librairie technique

29, place du Changil  
 63000 CLERMONT-FERRAND  
 Tél. 7331 1376

(1) J. STEINBERGER a reçu en 1988, conjointement avec L. LEDERMAN et M. SCHWARZ, le prix Nobel de Physique pour la mise en évidence du neutrino muonique, et l'intuition qu'à chaque lepton chargé devait être associé un neutrino.

## LES PESTICIDES

par M<sup>me</sup> J. FOURNIER

Ces produits de la chimie fine, indispensables pour les uns, outils de mort pour les autres sont essentiellement destinés à la protection des végétaux ; ils ont aussi beaucoup d'autres utilisations comme médicaments dans la lutte contre les insectes parasites de l'homme ou du bétail, contre les vecteurs des maladies, pour assurer notre confort contre les mouches et les blattes, pour conserver des denrées stockées, pour protéger les forêts, etc...

M<sup>me</sup> J. Fournier, Professeur à l'Université d'Angers a abordé ce thème au cours d'une conférence prononcée le 16 mars dernier au Campus des Cégeaux, à l'invitation de l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie et de l'ADASTA. Nous remercions M<sup>me</sup> Fournier de nous avoir autorisés à publier le texte de cette conférence.

### LES FRUITS DE LA PASSION

La chimie est née dans l'atelier du forgeron, du verrier ou de l'herboriste ; c'était une activité populaire, en ce sens qu'elle se faisait en direct, sous le regard des gens, par d'autres dont on connaissait le père et le grand-père. Il y avait bien quelques sorciers, quelques empoisonneurs, mais là-encore, on avait affaire à des personnes. Avec la sophistication des procédés, l'accroissement des productions, la spécialisation au sein d'équipes, le passage à l'échelle industrielle, la chimie s'est progressivement enfermée dans ses laboratoires ; derrière les murs de ses usines, elle pratique un langage codé, certes fécond, mais qui n'a plus rien à voir avec les connaissances et l'expérience des gens qu'exprimaient les anciens noms vernaculaires.

On ne perçoit plus de la chimie que des odeurs sans relation avec les produits finis dont notre confort ne saurait se passer, même la bonne vieille eau de javel se déguise avec une odeur de frais : au mieux, on ne voit plus de la chimie que ses produits, coupés de l'activité intellectuelle et de l'habileté expérimentale qui leur ont donné le jour et dont les chimistes sont justement fiers. On ne parle plus de chimie dans le grand-public qu'à propos d'incendies, d'accidents qui polluent le Rhin, la Loire ou la Vézère, de camions transporteurs renversés sur une autoroute, de déchets industriels balladeurs, de nappes phréatiques et de gibier empoisonnés par des produits de traitements agricoles. On accuse la chimie d'être à l'origine des maladies des phoques, de la raréfaction des huîtres, des cancers, du temps détraqué, et des fruits qui n'ont plus de goût. Mais, les médicaments, les prothèses, la disparition des anciens fléaux, la lutte contre les criquets ravageurs, beaucoup seraient surpris d'entendre dire que c'est de la chimie. Ce sont aujourd'hui les médecins, les agronomes et les journalistes qui «découvrent» les produits de la chimie. On ne se rappelle que les médicaments sont

chimiques qu'à propos du dopage de sportifs, ou de «suicide, mode d'emploi». Parmi ces produits, les plus contestés sont à coup sûr les pesticides. Les chimistes sont-ils des empoisonneurs machiavéliques ou des irresponsables entêtés ? Peuvent-ils ignorer les implications sociales, éthiques, politiques et économiques de leurs recherches et de leurs enseignements ?

### CHIMIE DES PESTICIDES

Si l'on revient à la définition : sciences des transformations de la matière, il n'y a pas de chimie spécifique des pesticides ; il n'y a pas non plus de chimie sans applications, celles que le chimiste a voulues, et celles que d'autres ont conçues de ses produits. En refusant de prendre le temps de les examiner, nous avons souvent joué les apprentis sorciers.

Il y a une très grande variété de familles chimiques de pesticides, on connaît de mieux en mieux le mécanisme des actions pesticides et on peut souvent associer un mécanisme à une formule, ainsi les urées substituées se combinent à une protéine du chloroplaste et interrompent le transfert d'électrons photosynthétiques entre les photosystèmes II et I. Les insecticides carbamates se fixent sur une enzyme, l'acétylcholinestérase, à la place de l'acétylcholine dans les synapses nerveuses. La transmission de l'influx nerveux est électrique le long des axones, et chimique dans les synapses entre deux neurones. L'acétylcholine est l'un des neurotransmetteurs chimiques produit au niveau de la membrane présynaptique, qui va déclencher un autre influx après combinaison avec un récepteur postsynaptique. Le neurotransmetteur est ensuite libéré dans l'espace synaptique puis détruit par hydrolyse catalysée par l'acétylcholinestérase. Puis l'enzyme est libérée et peut recommencer à hydrolyser une autre molécule d'acétylcholine. Les carbamates se fixent sur l'enzyme mais ils sont hydrolysés beaucoup plus lentement que l'acétylcholine, pendant ce temps, l'enzyme est hors circuit,

et l'acétylcholine s'accumule, transmettant des rafales de signaux au neurone qui suit.

Les fongicides de la famille du triazole sont des inhibiteurs de la biosynthèse de l'ergostérol.

En agrochimie, le chimiste intervient au niveau de la synthèse, au niveau de la formulation, au niveau de l'analyse et... au niveau de la communication.

### DES NOMS POUR SIGNIFIER

On désigne du nom de «matière active» le corps pur tenu pour responsable de l'action biocide d'un produit commercial. La matière active a un nom chimique officiel, selon les règles de l'IUPAC. Souvent, elle a aussi un nom chimique abrégé, et un nom approuvé par les organisations nationales et internationales de normalisation ; L'AFNOR est l'Association Française de Normalisation et l'ISO est l'Organisation Internationale de Standardisation. Ces noms sont tout autant officiels que ceux de l'IUPAC, tout aussi univoques. Ils ne décrivent pas la formule chimique, du moins pas dans toute sa précision. Le nom approuvé ou le nom abrégé peuvent manquer. Certaines banques de données enregistrent les produits par un numéro : c'est le cas de la banque CAS utilisée par les chercheurs pour leurs recherches bibliographiques. Pendant la phase expérimentale qui précède le dépôt d'un brevet, les produits ont des noms et des numéros de code qui préservent le secret de leur identité chimique. Les préparations commerciales ne contiennent pas la matière active pure, ce sont des mélanges, avec des diluants, des épaississants, des émulsionnants, des antimoussants ; chacune a un nom de marque déposée, et chacune a un numéro d'autorisation de vente. Tout ce que nous venons de rappeler, c'est de la communication, de la terminologie ; pour que les noms de produits transmettent une information chimique, les chimistes ne doivent pas se désintéresser ni se laisser éliminer de ce secteur d'activité.

## CULTURE DE CHIMISTE

La chimie peut expliquer beaucoup de choses qui permettraient de mieux contenir les risques économiques ou sanitaires liés à la manipulation et à la dispersion des produits dans l'environnement. Le manège par exemple est un complexe tétraédrique réducteur du manganèse, l'utiliser contre l'oïdium de la vigne en mélange avec un produit à base de permanganate revient à les inactiver l'un et l'autre.

### a) Formulation

La formulation, c'est la finition. Une matière active agit sur l'espèce-cible en modifiant une ou plusieurs fonctions physiologiques qui résultent de mécanismes biochimiques. Il faut assurer le meilleur accès de la matière active à sa cible biochimique primaire :

- il y a une dose efficace du produit à trouver, la concentration au niveau de la cible dépend de la quantité administrée, de la vitesse de transport jusqu'à la cible et de la vitesse d'élimination du produit, parfois on peut ajouter un synergiste qui ralentit la dégradation du produit et prolonge sa durée d'activité. C'est le cas du butoxyde de pypéronyle dans les produits à base de pyrèthri-noïdes.

- il faut minimiser les risques de contact, d'inhalation ou d'ingestion des produits par la personne qui fera le traitement, il faut prévenir des accidents par une signalisation : la couleur, l'odeur, ou par l'addition de vomitifs et d'antidotes. Il ne faut pas que les additifs soient toxiques pour la culture à protéger. Il faut aujourd'hui prévenir les atteintes à l'environnement, l'accumulation dans les nappes phréatiques et l'apparition de résistances.

Il faut que le produit reste compétitif : on doit pouvoir le conserver, il doit pouvoir voyager, c'est-à-dire supporter d'être entreposé au chaud ou au froid, d'être secoué sans qu'il se produise une démixtion des émulsions et des suspensions. Il doit pouvoir être utilisé avec les matériels d'épandage disponibles. La deltaméthrine est un insecticide efficace à 18g/ha apparu en 1976. Les matériels d'épandage étaient conçus pour déverser 300 à 500l/ha, on voit aujourd'hui des appareils à ultra-bas volume capables de nébuliser de façon homogène 1 à 4l de liquide sur un hectare. Le produit doit pouvoir être préparé avec des installations du service de formulation : on ne fait pas des granulés comme on fait une poudre. Certains de ces objectifs sont contradictoires, il faut trouver le meilleur compromis. Nous définirons la formulation comme :

- les opérations de passage de la matière active technique à ses spécialités commerciales,

- l'adaptation d'une matière active à un usage,

- le procédé physique utilisé pour mélanger une matière active avec un solvant ou un support solide, et des additifs,

- l'obtention des performances optimales d'un produit, la meilleure activité biocide

pour les mauvaises herbes ou les insectes à combattre combinée à la moindre perturbation de l'équilibre écologique.

Cela suppose :

- de choisir éventuellement un dérivé de la matière active,

- de choisir une présentation physique, poudre, granulés, suspension, aérosol,

- de choisir un conditionnement : un dosage, une quantité, un emballage.

Le 2,4-D est le plus commun des herbicides, présent dans plus de 100 préparations commerciales ; il est vendu sous forme de carboxylate de sodium, potassium ou d'ammoniums, et aussi sous forme d'esters. On distingue les herbicides de contact, comme l'ioxynil, qui brûlent les parties de la plante sur lesquelles ils sont appliqués, et les herbicides systémiques, comme le 2,4-D, qui se déplacent de cellules en cellules et sont véhiculés avec la sève par les vaisseaux conducteurs du végétal, jusqu'au site de la fonction biochimique qu'ils perturbent. L'absorption peut se faire par les organes aériens, tiges ou feuilles, ou par les racines. Un herbicide systémique à absorption foliaire pénètre dans la plante essentiellement à travers la cuticule. C'est une couche de cires qui recouvre l'épiderme. Les cires sont des esters d'acides gras et d'alcools à longues chaînes aliphatiques (C12 à C22). Ils sont souvent porteurs de groupements secondaires acide ou alcool faiblement ionisés et tournés vers l'extérieur. Cette structure s'opposera à la pénétration du 2,4-D s'il est sous forme de carboxylate.

Sous la cuticule se trouvent les parois cellulaires des cellules de l'épiderme, souvent précédées d'une couche de pectines. Les pectines sont des polymères amorphes composés essentiellement d'acide galacturonique ; et la cellulose est un polymère de bêta-D-glucose organisé en microfibrilles. L'herbicide doit progresser à travers ces couches comme un soluté dans un solvant. Trop peu hydrophobe, il ne pénètre pas dans la cuticule cireuse ; trop hydrophobe il y reste piégé. Le coefficient de partage d'un produit entre un solvant non miscible à l'eau, l'octan-1-ol, et l'eau, ou la balance hydro-lipophile d'un produit sont des caractéristiques importantes à considérer. On peut les modifier par des substituants, un fluor ou un chlore substitués à un hydrogène sont des éléments qui augmentent la solubilité dans les solvants non aqueux ; mais on peut alors modifier complètement le spectre d'activité biocide d'un produit. On peut agir par des adjuvants, des tensioactifs qui vont favoriser l'étalement du produit sur la feuille, la durée de contact, la vitesse d'évaporation du solvant. Les ammoniums quaternaires sont des tensioactifs. Ils sont solubles à la fois dans l'eau et dans l'huile, associés aux carboxylates ils vont se comporter en agents de transfert de phase, des molécules-taxis qui transporteront le carboxylate d'une phase cireuse dans une phase hydrophile.

### b) Stéréochimie

En principe, nous savons depuis Pasteur, voilà un siècle, que la stéréospécificité est la ligne de partage entre la chimie de la matière inerte et celle du vivant. Ce n'est pourtant que dans les 15 dernières années que l'on s'est vraiment inquiété de ce problème en agrochimie. De nombreux produits d'origine biologique sont chiraux, et leurs biosynthèses sont généralement stéréospécifiques ou stéréosélectives, alors que les produits fabriqués par l'homme en l'absence de catalyseurs stéréospécifiques sont des mélanges de stéréoisomères dont la séparation est coûteuse et difficile. Par suite, beaucoup de pesticides ont été ou sont commercialisés sans séparation. Les effets biologiques résultent d'interactions entre le produit et des molécules endogènes, récepteurs et enzymes, qui sont des protéines. Leurs structures sont chirales et elles distinguent les énantiomères comme une main droite ne peut pas se glisser indifféremment dans un gant droit ou un gant gauche. L'élimination des produits chez les animaux se fait souvent par l'urine sous forme de conjugués entre un produit d'oxydation et le glucose ou un acide aminé. L'oxydation met en jeu d'autres enzymes chirales et la conjugaison avec une molécule chirale ne se fait pas indifféremment à la même vitesse pour deux énantiomères. Si les deux diastéréoisomères peuvent se former, ils n'ont pas la même solubilité ni la même persistance. Les biologistes n'ont pas toujours une idée claire de ces différences :

- que signifie la demi-vie dans un sol d'un mélange de diastéréoisomères dont les effets et les vitesses de métabolisation et d'élimination sont différents ? C'est comme si l'on parlait de l'âge d'une famille. Les chimistes ont longtemps considéré le problème sous le seul angle économique, est-il plus avantageux de vendre un produit qui contient 50 % de matière inactive en éliminant l'étape de séparation des énantiomères, ou est-il plus avantageux de faire la séparation et d'économiser ainsi 50 % de la matière première ? On n'avait pas conscience que cette charge inactive peut agir comme polluant, inactive comme insecticide elle peut avoir d'autres effets toxiques pour d'autres espèces. Des stéréoisomères peuvent aussi s'interconvertir : le gossypol est un produit extrait de l'huile de graines de coton sous forme racémique. C'est l'énantiomère lévogyre qui a des propriétés inappétantes et stérilisantes pour certains insectes nuisibles. Au cours de l'extraction, l'huile est chauffée, le gossypol est racémisé, 50 % devient inactif. L'exposition à la lumière en plein champ, et certains agents chimiques peuvent avoir des effets semblables. Une meilleure connaissance des équilibres permet de mieux maîtriser les conditions de traitement et de formulation des produits. Il est possible que la sélectivité de certains produits tienne à la capacité que certaines plantes ou insectes ont de les isomériser, soit

▷▷▷

▷▷▷

dans le sens d'une activation, soit dans celui d'une inactivation.

Sur 28 matières actives insecticides homologuées entre 1980 et 1989, 19 soit les  $\frac{2}{3}$  présentent des cas de stéréoisométries.

**c) Analyse de traces**

On fait des analyses pour vérifier le dosage des produits formulés. On fait aussi des analyses pour vérifier que les produits végétaux livrés à la consommation ne contiennent pas de produits pesticides à des doses pouvant être toxiques pour le consommateur. La cinétique de disparition des produits permet de déterminer des calendriers de traitement, des délais entre le dernier traitement et la récolte. Ces résidus sont à l'état de traces, il faudrait prendre en compte la matière active mais aussi les produits de dégradation et de conjugaison qu'elle engendre dans la plante traitée. Le rapport de deux énantiomères répandus sous forme racémique n'est pas 50/50 dans les résidus, ce n'est pas nécessairement le même dans les résidus d'espèces végétales différentes, ou de différents sols. Trouver 0,1 ppm de fonophos dans les carottes n'a pas la même signification toxicologique selon qu'il s'agit de 90 % d'énantiomère actif ou de 90 % de l'autre. L'analyse par chromatographie à l'aide de colonnes achirales donne un seul pic pour le mélange. C'est un problème qui n'est jamais soulevé par les praticiens de ce genre d'analyses.

**d) Structure, activité biocide et rémanence**

Le séthoxydime est un herbicide de post-lévée, et le diflubenzuron un régulateur de croissance insecticide qui posent des problèmes d'équilibres de tautoméries. Dans le premier cas, il semble que la forme active soit la forme dione. Dans le second cas la forme active pourrait être une forme imidique. Ceci expliquerait que l'analogue dichloré soit moins actif, les chlores sont «gros» et empêchent la conjugaison, la forme imidique est défavorisée. Le mode de dégradation des produits, chloré et fluoré, est différent. Le produit difluoré subit préférentiellement l'hydrolyse en acide benzoïque et phénylurée peu rémanents, tandis que le produit dichloré subit l'hydrolyse en benzamide dont la durée de vie peut atteindre deux ans, dioxyde de carbone et aniline. Ces études permettent de concevoir de nouvelles molécules plus efficaces et moins polluantes.

Ces quelques exemples montrent qu'il reste beaucoup de travail intéressant à faire, au laboratoire, et pour partager une culture chimique, afin d'optimiser l'utilisation de ces nouveaux outils agricoles.

# LE SATELLITE HIPPARCOS ET LA NOUVELLE CARTE DU CIEL

par P. BACCHUS\*

Dans le cadre de l'exposition « Découverte de l'Univers » présentée en mai 1990 au Centre municipal Pierre Laporte à Clermont-Fd, l'ADASTA et l'AAAA avaient invité le Professeur Pierre BACCHUS, à venir prononcer une conférence sur l'expérience Hipparcos. Nous remercions le Professeur P. Bacchus d'avoir bien voulu nous autoriser à publier le texte de cette conférence.

**L'ASTRONOMIE ET LES CATALOGUES STELLAIRES**

Le satellite lancé à Kourou le 8 août 1989 après plus de 20 ans d'études est le premier qui soit destiné à faire de l'*astrométrie*. Tout d'abord, qu'est-ce que l'*astrométrie* ?

C'est la branche de l'astronomie qui détermine la position, la distance, le déplacement des astres. Associée à la mécanique céleste elle constitue l'astronomie de position, dont elle est la partie observationnelle et cinématique, la mécanique céleste étant la partie théorique et dynamique. Elle existe depuis l'antiquité : l'astronome grec Hipparque (2 siècles avant J.-C.) savait déterminer, avec des instruments fort rudimentaires, la position des étoiles, la distance de la Lune, la précession des équinoxes... Il est le premier à avoir constitué un *catalogues d'étoiles*, comportant la position et l'éclat d'un millier d'étoiles. Par la suite des dizaines d'autres catalogues ont été établis, de plus en plus étendus et précis.

Ces catalogues contiennent les données nécessaires à l'établissement des *cartes du ciel*. Ils constituent le point de départ nécessaire de toutes les autres branches de l'astronomie. La persévérance avec laquelle les catalogues ou les cartes du ciel ont été développés montre bien le caractère absolument fondamental de l'*astrométrie*.

A une étape remarquable de ce développement on trouve l'astronome danois Tycho Brahé – le dernier des observateurs à l'œil nu – qui à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle, était capable de mesurer la position des astres avec une précision d'une minute de degré. Aujourd'hui la précision atteinte est de l'ordre de 0", 01, et le nombre d'étoiles cataloguées est de plusieurs millions. Mais la précision ultime n'est atteinte que pour quelques milliers d'étoiles, celles qui forment le *Catalogue Fondamental*. Toutes les autres sont connues avec moins d'exactitude, au point de conduire souvent à des incertitudes dans l'identification des étoiles. Même dans le Catalogue Fondamental il existe des erreurs systématiques, rendant assez illusoire la précision annoncée plus

haut. La situation actuelle de l'astronomie est loin d'être totalement satisfaisante, et c'est pour la faire progresser encore que le satellite Hipparcos a été inventé.

**LES INSTRUMENTS DE L'ASTROMÉTRIE**

Depuis le XVII<sup>e</sup> siècle et l'invention de la lunette astronomique, l'instrument fondamental des mesures astrométriques est l'*instrument méridien*. Il est formé d'une lunette micrométrique, de 1 à 2 mètres de longueur focale, perpendiculaire à un axe horizontal Est-Ouest autour duquel il tourne, balayant ainsi le plan méridien. On mesure l'instant de passage d'une étoile dans ce plan, ainsi que sa hauteur à cet instant. Après 3 siècles d'usage intensif ayant apporté une moisson considérable de découvertes (aberration, parallaxes, mouvements propres, mécanique du système solaire et de la Galaxie. ...) cet instrument a vu ses performances plafonner : il se montre sensible aux déformations élastiques, inélastiques, thermiques, qui rendent quelque peu incertaine la perpendicularité entre l'axe optique et l'axe de rotation, dont la rigueur est le principe même de l'instrument.

C'est pourquoi à cours du XX<sup>e</sup> siècle des instruments astrométriques de types nouveaux ont été imaginés. Si l'on doit n'en citer qu'un, ce sera l'*astrolabe impersonnel* de Danjon. On y trouve, non pas un angle droit entre pièces métalliques de grandes dimensions, mais l'angle de 60° d'un prisme, par l'intermédiaire duquel les mesures de position sont obtenues. Ce prisme est la seule pièce de l'instrument dont l'indéformabilité soit requise. De petites dimensions, et fait d'un matériau unique, le verre, ce prisme est très indéformable, et les mesures astrométriques ont ainsi connu, depuis les années 1950, un progrès certain.

Cependant, il subsiste une limitation très grave dans les possibilités des instruments : ils observent les astres *au travers de l'atmosphère*, et cette dernière est inhomogène, instable, réfringente, dispersive, absorbante... C'est pour échapper à ces défauts que les instruments nouveaux doivent être envoyés dans l'espace, d'où le projet de satellite astrométrique Hipparcos.

\* P. BACCHUS est ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure et ancien Directeur de l'Observatoire de Lille. Il a activement collaboré à l'expérience HIPPARCOS.

## PRINCIPE DE L'INSTRUMENT HIPPARCOS

Un instrument spatial ne saurait être le démarquage des instruments existant sur Terre. Il a fallu innover entièrement. C'est ce qu'a fait à partir de l'année 1965 le Professeur P. Lacroute, Directeur de l'Observatoire de Strasbourg. J'ai eu l'avantage d'être associé à ces recherches depuis leur origine.

La partie fondamentale de l'instrument est un *miroir angulaire*, c'est-à-dire deux miroirs étroitement associés, et faisant entre eux un certain angle (29°). Les petites dimensions de cette pièce (35 cm) et le matériau dont elle est faite (céramique indilatable) la rendent insensible aux déformations, et l'angle de base de l'instrument est très constant. Si deux étoiles se trouvent dans le ciel à une distance angulaire de 58°, et qu'elles envoient leurs faisceaux lumineux sur chacun des deux miroirs, les faisceaux réfléchis sont parallèles. Ils entrent tous deux dans un télescope, et forment dans le plan focal des images des deux étoiles, qui coïncident (ou qui sont voisines, si la distance angulaire des étoiles est *voisine* de 58°). L'observation de la coïncidence, ou la mesure du petit écart des images, permet de connaître avec beaucoup d'exactitude la distance angulaire de deux étoiles, éloignées l'une de l'autre sur le ciel.

En mesurant ainsi la distance angulaire de nombreuses paires d'étoiles, séparées toutes d'un angle voisin de 58°, on peut reconstituer par le calcul les positions relatives de toutes ces étoiles : on a obtenu un catalogue de positions stellaires. La précision obtenue est en rapport avec celle avec laquelle est défini l'angle de base entre les deux miroirs : elle sera de 0",002, c'est-à-dire bien au-delà de celle des meilleurs instruments terrestres. De plus on peut penser que ces déterminations seront largement dépourvues d'erreurs systématiques.

Le premier projet Hipparcos devait mesurer au coup par coup, des distances angulaires de paires d'étoiles préalablement choisies. Par la suite on a préféré faire tourner le satellite sur lui-même, avec une vitesse constante (1 tour en 2 heures) autour d'un axe perpendiculaire à l'axe optique du télescope. On balaye ainsi un grand cercle de la sphère céleste, et les étoiles (ou les paires d'étoiles) qui passent dans le champ sont mesurées «au vol». Un autre mouvement de satellite, beaucoup plus lent, permet de déplacer le grand cercle balayé, de manière à explorer tout le ciel.

Les images stellaires qui parcourent le plan focal sont reçues sur une *grille*, succession de bandes alternativement claires et opaques, et la lumière transmise est modulée, puis analysée par un système photoélectrique. La phase de cette modulation détermine la position de l'étoile.

## LE PROGRAMME HIPPARCOS

Il n'est pas question de mesurer la position de toutes les étoiles du ciel, tout d'abord

parce que les étoiles observables sont limitées à la magnitude 12. Même celles-là sont trop nombreuses, et l'on s'est limité à une liste de 120 000 étoiles, qui constitue le *catalogue d'entrée*.

La durée prévue de la mission Hipparcos est de 2,5 ans, et chaque étoile du catalogue traverse plusieurs dizaines de fois le champ de l'instrument. Pendant ce temps les étoiles se déplacent de façon sensible, à cause de leur *mouvement propre*. La comparaison des positions déterminées en début et en fin de mission donne accès au mouvement propre. La précision de sa détermination est de 0,002" par an. Ceci n'est pas beaucoup meilleur que les déterminations terrestres, mais ces mouvements propres sont nombreux et obtenus tous de la même façon. Cette homogénéité les rend particulièrement précieux.

D'autre part les étoiles montrent un déplacement apparent annuel, en relation avec la position de la Terre sur son orbite. C'est le phénomène de *parallaxe*, qui permet de connaître la distance des étoiles. C'est ce paramètre qui est considéré comme de loin le plus intéressant, aux yeux de la plupart des astronomes. C'est lui qui est mis en évidence dans le sigle «HIPPARCOS» (High Precision PARallaxes COLlecting Satellite) – qui en même temps rend hommage à Hipparque, le premier des astrométristes.

Au début du projet Hipparcos, en 1965, il n'était question que de mesurer les positions stellaires, et cela n'avait de valeur que pour de rares astrométristes. Lorsqu'il est apparu possible de mesurer aussi les mouvements propres, les cinématiciens galactiques se sont sentis concernés. Et lorsqu'enfin il a été question de parallaxes, ce sont tous les astrophysiciens qui ont été impliqués. Ce fut dès lors une explosion d'intérêt, et le nombre de personnes s'occupant du projet est passé d'un seul coup de quelques unités à plusieurs centaines. Il a été pris en charge par un organisme international, l'Agence Spatiale Européenne (ESA), il a trouvé un financement, les études de réalisation ont été lancées, la construction de cet instrument complexe a démarré, et l'on a abouti au lancement par la fusée Ariane en 1989.

On a pu voir en 1982 une preuve évidente de l'intérêt suscité par Hipparcos, lorsqu'un appel a été lancé à tous les observatoires ou laboratoires astronomiques du monde, pour leur demander quelles étoiles ils aimeraient voir observer par Hipparcos. Plus de 200 réponses sont parvenues, comportant parfois une seule étoile, parfois des dizaines de milliers. Après une sélection sévère et délicate, on a abouti au catalogue d'entrée de 120 000 étoiles.

## LA COLLABORATION INTERNATIONALE

Ce projet est ainsi devenu une œuvre internationale, plus exactement européenne, mais son origine française ne fait pas de doute.

Son maître d'œuvre est l'ESA, où sont représentés 11 pays européens : Allemagne, Belgique, Danemark, Espagne, France, Irlande, Italie, Pays-Bas, Royaume-Uni, Suède, Suisse. Chacun d'eux s'est vu confier, dans son industrie nationale, une part de travail de réalisation, et l'ensemble a été regroupé et monté par l'entreprise française Matra.

L'ESA a déjà effectué une trentaine de lancements de satellites par la fusée Ariane, dont 85 % avec succès. De nombreux satellites scientifiques sont déjà à l'actif de l'ESA : Météosat, Giotto, Spot, etc.

Parallèlement à cela des groupes internationaux s'occupaient, les uns de l'établissement du catalogue d'entrée, les autres des programmes de calcul à effectuer pour obtenir les 5 inconnues attachées à chaque étoile : 2 pour la position, 2 pour les composantes du mouvement propre, et enfin la parallaxe – auxquelles s'ajoute un certain nombre d'inconnues auxiliaires, comme l'angle de base du système de miroirs.

Les données de ce calcul sont des comptages de photoélectrons, effectués 1200 fois par seconde sur les faisceaux stellaires modulés par la traversée de la grille dans le plan focal. 1200 données par seconde, à peu près en permanence pendant 2 ans et demi, représentent en tout 100 milliards de données. Elles doivent remplir un millier de bandes magnétiques.

Un programme de calcul permet de tirer de ces données près d'un million d'inconnues. Ce programme a été établi en double, indépendamment par deux groupes de spécialistes provenant soit des pays du Nord de l'Europe, soit du Sud. Il conviendra que les deux programmes aboutissent au même résultat...

Le temps d'ordinateur nécessaire était à l'origine estimé à plusieurs années. Devant l'accélération permanente des performances des ordinateurs, on pense maintenant que quelques mois de calculs suffiront.

## LES AVATARS DU LANCEMENT

Une fois le satellite Hipparcos prêt, il a dû attendre son tour, et son lancement a été remis plusieurs fois. Par exemple, le satellite Giotto, mis en chantier bien après lui, a été lancé avant ; mais celui-ci était destiné à rencontrer la comète de Halley, qui ne pouvait attendre.

Le lancement du 8 août 1989 s'est effectué dans de bonnes conditions. Hipparcos était associé à un satellite de télévision (TV-SAT2), et tous deux devaient être mis en orbite géostationnaire circulaire, à 36 000 km de la Terre. Après une seule interruption du compte à rebours, ces deux satellites ont été placés avec succès sur une orbite d'attente elliptique, dont le périégée était à basse altitude, et l'apogée à 36 000 km.

Deux jours plus tard, il était prévu de transformer cette orbite d'attente en une orbite

définitive (géostationnaire), en donnant au satellite une impulsion supplémentaire lors d'un de ses passages de l'apogée, grâce à un moteur d'apogée à poudre. Alors que cette manœuvre réussissait du premier coup pour TV-SAT2, le moteur d'apogée d'Hipparcos refusait obstinément de s'allumer. Des tentatives nombreuses ont été effectuées, et l'on se souvient peut-être des comptes rendus d'insuccès, qui ont alimenté l'actualité écrite ou télévisée pendant plusieurs semaines à cette époque.

Devant l'impossibilité de mettre Hipparcos sur son orbite géostationnaire, il a finalement fallu se résoudre à le laisser sur l'orbite elliptique. Ceci n'empêche pas fondamentalement Hipparcos de fonctionner, mais entraîne plusieurs inconvénients de gravités diverses.

Tout d'abord, le satellite n'est plus géostationnaire, donc il n'est plus en permanence en vue directe de la station au sol (Darmstadt, RFA) qui devait recevoir les mesures. Il a fallu y faire participer les 2 autres stations de télémétrie de l'ESA (l'une en Australie, l'autre à Kourou), mais même ainsi la totalité des mesures n'était pas récupérable. Par la suite la NASA a bien voulu participer à la réception de ces mesures, par une station située aux USA, et maintenant on peut recevoir la quasi-totalité des mesures.

Ensuite, le satellite traverse les ceintures de Van Allen, et les particules de haute énergie qui s'y trouvent ont un effet néfaste sur tout l'appareillage. Les couches sensibles des cellules photoélectriques sont petit à petit dégradées, les verres de l'optique sont attaqués et s'obscurcissent progressivement, l'électronique peut elle aussi se dégrader. En présence de ces agressions, quelle sera la durée de vie effective du satellite ? On ne le sait pas exactement.

De plus, lorsque le satellite passe près de la Terre, celle-ci masque une grande partie du ciel, et le balayage de grands cercles complets devient impossible. Le temps que le satellite passe aux environs de son périhélie est donc du temps perdu. Heureusement le passage près du périhélie se fait rapidement.

Enfin il arrive, deux fois par an, que le Soleil se trouve dans le plan de l'orbite, et que la Terre porte ombre sur un certain arc d'orbite, au voisinage soit du périhélie soit de l'apogée. Pendant ce temps les panneaux solaires ne fournissent plus d'énergie électrique au système, qui doit vivre sur ses batteries. Au périhélie cette éclipse est brève (un quart d'heure), ce qui n'est pas grave. Mais une fois par an, à l'éclipse d'apogée, le système est privé d'énergie pendant 2 heures. Cette durée est à peu près égale à l'autonomie des batteries, même en situation d'économie maximale, où tous les sous-systèmes non nécessaires à la survie du système sont arrêtés.

Une telle éclipse s'est produite en mars 1990 ; elle était attendue avec beaucoup d'inquiétude. Mais les batteries ont tenu, de justesse : à la fin de l'éclipse il ne leur restait que 5 minutes de charge.

**L'AVENIR D'HIPPARCOS**

Malgré tous ces handicaps, Hipparcos est entré en fonctionnement opérationnel en novembre 1989. Il faut dire tout d'abord qu'il fonctionne admirablement, mieux peut-être qu'on ne l'espérait. Notamment l'angle de 29° s'est montré tout particulièrement stable. Mais combien de temps fonctionnera-t-il ? C'est là tout le problème.

Si la durée de fonctionnement ne dépasse pas sensiblement 1 an, disons un an et demi, il ne sera pas question d'obtenir des parallaxes, et l'on pourra dire que la mission est

totallement manquée. Comme la moitié de cette durée est déjà couverte, on peut dire que l'espoir est permis.

Avec 2 ans de fonctionnement, l'objectif serait atteint, mais seulement de façon partielle. On estime que dans ce cas, 10 % seulement du catalogue d'entrée serait mesuré, et avec une précision deux fois moindre que prévu.

Avec 2,5 ans de fonctionnement, ou 30 mois, la durée prévue serait atteinte, mais seulement 30 % du catalogue sera mesuré – avec une précision approchant la précision nominale.

C'est seulement avec 40 mois de fonctionnement que la totalité du catalogue serait obtenue, avec une précision équivalente à ce qui était espéré. Mais Hipparcos vivra-t-il 40 mois ? Certains le croient, d'autres ne l'espèrent guère.

Quoi qu'il en soit de sa durée de vie, Hipparcos a d'ores et déjà fait la preuve qu'il était capable de fonctionner, et d'atteindre la précision recherchée; ce n'était pas tellement évident a priori. Ce bon fonctionnement est le meilleur argument pour en lancer un second, dans un délai plus ou moins long. Déjà Matra a proposé de fabriquer un autre Hipparcos, pour un coût égal à 40 % du premier. Et il est certain que si ce second Hipparcos est lancé, on surveillera tout particulièrement son moteur d'apogée...

Devant ce début de succès, des pays qui ne s'étaient pas associés à ce projet semblent maintenant vouloir s'y intéresser. Le prochain Hipparcos ne sera peut-être pas européen, mais américain ou russe. Mais même dans ce cas on ne pourra oublier que c'est en France, à Strasbourg, qu'il est né.

**VISITE A NANÇAY**

Un groupe de 54 membres de l'ADASTA, physiciens ou astronomes amateurs pour la plupart, on fait le déplacement à Nançay le 25 avril dernier.

Le voyage comportait d'abord la visite guidée de la Cathédrale de Bourges, et en particulier ses vitraux. Grâce à une érudite berruyère, nous pûmes apprécier toute la verve des artistes du Moyen-Age, qui ont su transposer des détails pleins de vie sur ces vitraux, dont on peut déplorer parfois, pour d'autres époques, le caractère figé et froid.

Après un repas en commun pris au restaurant administratif de la ville de Bourges, nous nous rendîmes en Sologne, sur le site – facilement identifiable par les imposantes superstructures des radiotélescopes – du Centre de Nançay. Grâce à l'obligeance et à la compétence de M. DARCHY, Ingénieur, nous avons pu comprendre la finalité et percevoir la difficulté des expériences de radioastronomie en cours. Et, malgré un orage qui nous surprit au cours de la visite, les participants à ce déplacement purent s'informer et se documenter largement. Vers 18 h, nous quittâmes à regret cet établissement passionnant, en remerciant très chaleureusement notre guide, qui avait passé tout l'après-midi à nous expliquer en détail le fonctionnement des appareils et l'exploitation des résultats obtenus, pour la compréhension de la structure de l'Univers qui nous entoure.

**L'OBSERVATOIRE RADIOASTRONOMIQUE DE NANÇAY**

Adresse : Centre radioastronomique de Nançay  
 18330 Neuvy-sur-Barangeon - Tél. 48 51 82 41

Rattaché administrativement à l'Observatoire de PARIS-MEUDON, c'est la plus importante installation de ce type en France : créé en 1953 par des spécialistes de l'E.N.S., sous la direction d'Yves ROCARD c'est aussi le plus récent observatoire construit dans notre pays.

Le site a été choisi pour des raisons économiques, géographiques et techniques, en particulier :

- sa proximité des laboratoires de recherche de Paris et sa banlieue ainsi que sa position centrale dans l'hexagone.
- son sol parfaitement plat, sans grande valeur agricole.
- le niveau très faible des parasites radioélectriques d'origine industrielle dans tout le secteur environnant.

Il y a en permanence une cinquantaine d'ingénieurs, techniciens ou personnels administratifs sur le site ; Le Centre reçoit environ 40 chercheurs spécialisés, qui y travaillent temporairement, en provenance de la région parisienne (CNRS, ENS, Universités) ainsi que de nombreux chercheurs français de province ou de l'étranger.

Les thèmes de recherche qui y sont développés portent sur :

- la structure de l'Univers, la formation et l'évolution des étoiles ou galaxies, la physique des comètes, les propriétés du milieu interstellaire, l'étude des pulsars, les éruptions solaires, etc...

Toutes ces recherches s'appuient sur les informations, en provenance des astres ou du ciel, reçues par ondes hertziennes, qu'il faut concentrer, amplifier et détecter. Il y a 3 grands instruments fixes qui reçoivent les ondes  $\lambda_1 = 9\text{ cm}$ ,  $\lambda_2 = 18\text{ cm}$ ,  $\lambda_3 = 21\text{ cm}$  (fréquences respectives 3,33 GHz ; 1,67 GHz, 1,43 GHz).

Il existe également un réseau de récepteurs travaillant en ondes décimétriques, réservé à l'observation spectrale hertziennes de Jupiter et de la haute couronne solaire ; enfin 2 montages spécifiques analysent les signaux émis par la couronne solaire : un radio-héliographe et un radiospectrographe, tout deux multicanaux, c'est-à-dire capable de recevoir une large gamme de fréquences, d'en faire l'analyse par bandes, et de fournir le spectre hertzien  $I = F(\lambda)$ .

Le Centre de Nançay est bien sûr associé aux grandes missions spatiales : CNES, Agence Spatiale Européenne, NASA, Centres soviétiques de Recherche spatiale. Des collaborations sont également en cours avec les pays européens de la CEE, la Suisse et le Japon.



### b) La vitamine D

Sous cette appellation, on trouve en fait une vitamine naturelle, D<sub>3</sub>, et des pré-vitamines, comme l'ergostérol. D<sub>3</sub> est le **cholécalférol** (Fig. 2).

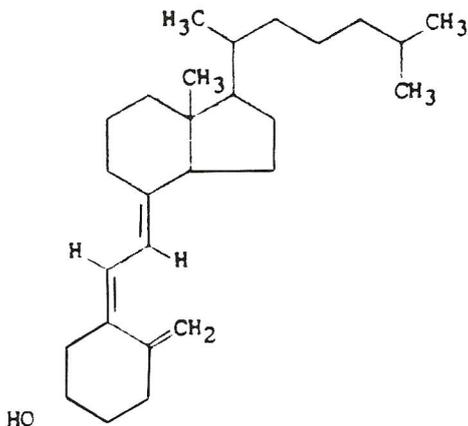


Figure 2

Ce composé se forme au niveau de la peau, sous l'effet des radiations solaires extérieures, puis se retrouve dans les lipides hépatiques (foie de poisson, par exemple). Elle existe dans le lait, le jaune d'œuf ou les huiles.

La vitamine D facilite l'absorption intestinale du calcium, d'où son nom « calciférol ». La carence en cette vitamine se traduit par le **rachitisme** chez les enfants : le squelette, insuffisamment développé, se déforme, les os sont fragiles. Les besoins sont de 2,5 µg/jour chez l'adulte, mais atteignant 10 µg/jour chez l'enfant ou la femme enceinte.

### c) La vitamine E

Elle appartient au groupe des TOCOPHOLS. La forme la plus active est l' $\alpha$ -tocophérol, de formule brute C<sub>29</sub>H<sub>50</sub>O<sub>2</sub> (Fig. 3).

Elle est le plus souvent d'origine végétale (germes de blé, de soja). Une carence en vitamine E se traduit par des symptômes d'**anémie** du sujet (ou encore myopathies chez certains animaux comme singes, cobayes, lapins). Le besoin normal de vitamine E chez l'homme est d'environ 2 mg par jour.

### d) La vitamine F

C'est en fait un ensemble d'acides gras insaturés voisins qui, comme l'acide **linoléique**, peuvent se transformer en **acide arachidonique** :

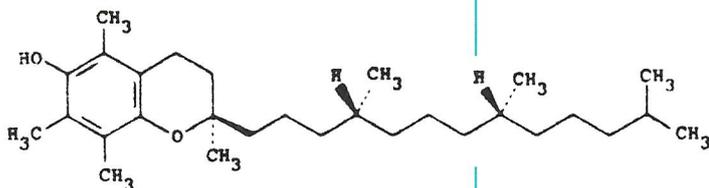
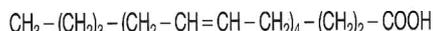


Figure 3

L'acide **linoléique** empêche cette transformation et doit être éliminé dans les huiles végétales de consommation. La carence en vitamine F pourrait provoquer des altérations de l'épiderme ; elle intervient en outre dans la régulation du métabolisme cellulaire.

### e) La vitamine K

Elle présente plusieurs formes chimiques, notées K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>... selon la nature de la chaîne C<sub>20</sub>H<sub>39</sub> greffée en bas à droite sur la naphthoquinone : (Fig. 4).

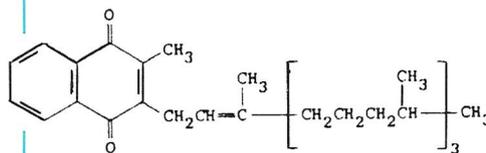


Figure 4

C'est une vitamine **antihémorragique**, car elle permet la synthèse, au niveau du foie, de la **prothrombine**, ainsi que d'un facteur antihémorragique. Des composés antagonistes, comme le **dicoumarol**, créent un équilibre délicat, surtout pour les ruminants : le dicoumarol se forme surtout lors de la fermentation de certaines plantes légumineuses. Chez l'homme adulte, le besoin en vitamine K est de l'ordre de 1 mg/jour.

## II - LES VITAMINES HYDROSOLUBLES

### 1) La vitamine C

Elle a été isolée pour la première fois par SZENT GYORGYI en 1928, à partir d'extraits de capsules surrénales, puis dans des végétaux frais, en 1932. C'est un dérivé des sucres, l'acide L-ascorbique : (Fig. 5).

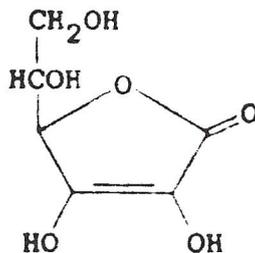


Figure 5

Un grand nombre d'animaux sont capables d'en faire la synthèse : seuls le cobaye, le singe et l'homme ne la réalisent pas. Les besoins diffèrent selon le climat : au moins 10 mg/jour en pays tempéré, mais 50 mg/jour pour une femme enceinte, et jusqu'à 250 mg/jour dans les régions très froides. On la trouve en quantité appréciable dans les agrumes, la salade verte, le persil, le foie des ruminants.

La vitamine C permet d'éviter les hémorragies des gencives (scorbut) ; elle intervient aussi dans la synthèse de la noradrénaline, la réponse instantanée aux agressions extérieures (stimulines hypophysaires) et dans la formation de l'acide follinique.

### 2) La vitamine B<sub>1</sub>

C'est la **thiamine**, comportant 2 hétérocycles, l'un de type pyrimidine, l'autre thiazol : (Fig. 6).

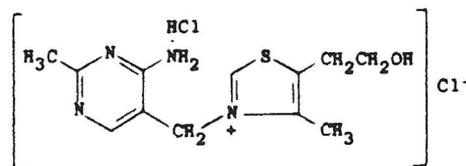


Figure 6

C'est la première substance découverte en tant que vitamine (Funk, 1914), et sa fonction amine a été à l'origine du nom générique de « vitamine ». Sa structure moléculaire a été déterminée en 1934 par R.R. WILLIAMS. On la trouve dans la viande, le poisson, les œufs, le lait, le beurre, le fromage, la levure de bière ou les graines germées.

Sa fonction est celle d'une co-enzyme, chargée en particulier de la décarboxylation de l'acide pyruvique.

Sa carence entraîne une accumulation de cet acide, responsable de troubles nerveux ou cardiaques chez l'homme (polynévrite, béri-béri). C'est une molécule essentielle dans le métabolisme des glucides : le besoin normal est de 0,40 mg pour 1000 calories d'aliments chez l'adulte.

### 3) La vitamine B<sub>2</sub>

C'est la **riboflavine**, isolée à partir du lait et encore appelée de ce fait **lactoflavine** (Kuhn, 1933) (Fig. 7).

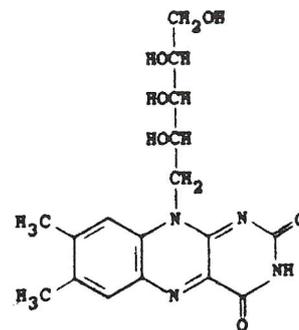
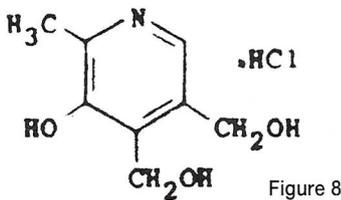


Figure 7

Elle joue un rôle important dans la déshydrogénation. La carence en vitamine B<sub>2</sub> se produit très rarement, car elle est répandue dans les aliments naturels. Les besoins chez l'adulte, 0,6 mg pour 1000 calories, sont très facilement couverts.

**4) La vitamine B<sub>6</sub>.**

C'est un dérivé du noyau pyridinique, la pyridoxine (Fig. 8).



Son rôle apparaît dans le métabolisme protéique. Les signes de carence sont des irritations du globe oculaire et des troubles nerveux. Chez l'adulte, il faut environ 2 mg/jour de vitamine B<sub>6</sub>.

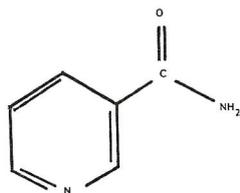
**5) La vitamine B<sub>12</sub>.**

C'est la plus récemment découverte (1948), et la plus compliquée sur le plan chimique. Elle contient du cobalt, bloqué dans un noyau tétrapyrrolique par des liaisons de coordination. C'est la cyanocobalamine. Son rôle biochimique paraît être celui d'une co-enzyme permettant des transferts de radicaux •H ou •CH<sub>3</sub>. Parmi les symptômes de carence, on trouve surtout la diminution du nombre des hématies, qui se renouvellent plus lentement.

La vitamine B<sub>12</sub> se trouve en très petites quantités dans les aliments ; le besoin humain est faible, de l'ordre de 1 µg/jour chez l'adulte. Mais, parfois, bien que présente dans l'alimentation, elle n'est pas assimilée et ne parvient pas à l'organisme : il faut alors l'introduire par injection.

**6) La vitamine PP.**

Elle fait partie du groupe des vitamines B de par sa structure. C'est l'amide correspondant à l'acide nicotinique (Fig. 9).



Indispensable pour réguler la respiration cellulaire, elle travaille encore comme co-enzyme. Sa carence se manifeste par la **pellagre** : signes cutanés (noircissement de la langue, par exemple), digestifs, nerveux et psychiques.

Il faut normalement 20 mg/jour de cette vitamine à un homme adulte.

**7) L'acide pantothénique** (parfois appelé B<sub>4</sub>).

Son nom rappelle son caractère universel. La carence de cet acide, de formule chimique C<sub>9</sub>H<sub>17</sub>NO<sub>5</sub> (Fig. 10), agit sur les poils pigmentés de certains animaux, mais pas de façon significative chez l'homme. Le besoin journalier est tout de même estimé à 10 mg (Fig. 11).

**8) L'acide folique.**

On le trouve dans les feuilles vertes (WILLIAMS, 1944), dans la levure, et dans certains organes, comme le foie.

C'est une **ptéridine** associée à l'acide glutamique par un pont paraminobenzoïque :

Son rôle est important dans la biosynthèse des acides nucléiques, et il facilite la multiplication cellulaire ; il en faut en particulier au cours de la grossesse. Sa carence freine la formation des hématies et conduit à une forme typique d'anémie.

Le besoin journalier de l'adulte avoisine 0,2 mg environ.

**CONCLUSION**

Il est évident que l'«étiquette» VITAMINES pourrait être attachée à beaucoup d'autres molécules biochimiques : la choline, les acides aminés, l'acide lipoiique pourraient présenter des comportements comparables. Mais il faut, pour qu'une substance soit considérée comme une vitamine, que sa carence entraîne un symptôme typique, ce qui n'est pas le cas des exemples ci-dessus. Son action est optimale à des doses toujours faibles, en général quelques milligrammes par jour.

En résumé, les vitamines doivent présenter des équilibres précis, entre elles et avec les autres constituants des aliments de chaque être vivant évolué. Elles sont fragiles et supportent mal la chaleur, la dessiccation ou l'oxydation. Ce sont des substances indispensables à la vie, et leur synthèse a été une étape essentielle dans l'évolution de la biochimie nutritionnelle.

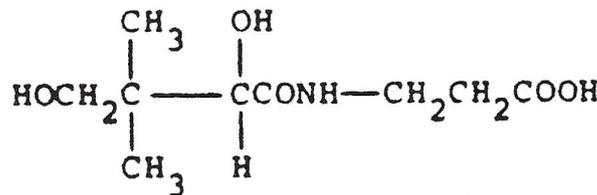
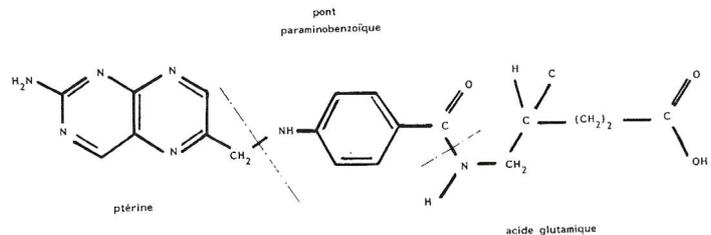


Figure 11



# librairie

# les Volcans

## d'auvergne

80, boulevard Gergovia

CLERMONT-FERRAND

## MUSÉE CROZATIER (LE PUY-EN-VELAY)

Exposition itinérante

## L'ACIER, NOUVEAU MATÉRIAU

21 septembre - 16 décembre 1990

La crise de la sidérurgie est souvent mal comprise par le grand public. En dehors des problèmes sociaux qu'elle a entraînés, cette crise est souvent assimilée à un recul définitif de l'acier dans la société d'aujourd'hui. Force est de constater que cette idée est fautive.

En fait, l'analyse de la production d'acier en Europe durant les dix dernières années fait apparaître l'impact important :

- du meilleur rendement de la chaîne de production, en particulier entre métal brut et demi-produit grâce à la généralisation de la coulée continue en substitution de la voie «lingot».
- de l'allègement continu du poids de métal dans les produits transformés grâce à l'évolution même des caractéristiques de l'acier.

C'est ce second phénomène que le Musée de l'histoire du Fer et Usinor - Sacilor ont choisi d'illustrer à travers une exposition itinérante destinée à un large public.

À l'aide de différents produits empruntés tant au quotidien (automobile, chemin de fer, boîte de conserve...) qu'à la haute technologie (aéronautique, spatiale, informatique...) l'exposition doit conduire les visiteurs à appréhender les matériaux en termes de caractéristiques spécifiques (module et limite d'élasticité), de mesure objective (M2 de tôle, longueur de poutrelle ou de rail), de valeur ajoutée nouvelle (revêtements et parachèvements) ou de structures composites (bimétal, tôle sandwich...).

Pour faire comprendre cette évolution, les produits exposés seront pris de façon comparative à un certain temps de distance.

Sait-on par exemple qu'en 20 ans, la quantité de métal nécessaire pour faire un tube de transport de gaz dans les mêmes conditions de débit et de pression a été divisée par deux ?

Cette exposition comprend onze modules :

**1 - Technologie :** de la voie lingot à la coulée continue. Des lingots, des brames ou blooms de coulée continue à la coulée continue en ébauche mince : une évolution technologique, des implications économiques.

*Objets présentés :* tableau d'animation lumineux qui va de la voie lingot aux produits avec apparition de nouveaux outils qui raccourcissent la ligne de production.

**2 - Automobile :** de la première voiture construite entièrement en acier (Traction Avant Citroën 1924) aux voitures de l'an 2000.

*Objets présentés :* deux ailes de voitures sur des balances : une aile d'une Renault KZ 10 CV 1930 et une aile de Peugeot 405 1989. Affiche de publicité 1930.

**3 - Mémoire de forme :** l'acier des arbres de moteurs de CFM (Airbus). L'arbre du moteur est en acier à mémoire de forme, c'est-à-dire qu'il peut se déformer pour laisser passer un objet volant sans pour autant se casser.

*Objets présentés :* une maquette d'Airbus et un schéma clignotant montrant la déformation possible de l'arbre du moteur ou des objets que l'on peut déformer sous l'influence de la chaleur.

**4 - Bâtiment :** longtemps dissimulé, l'acier devient un élément d'architecture montré et esthétique. Des nouveaux produits (poutrelles, tôles prélaquées, palplanches pour murs anti-bruits...) font que l'acier devient un signe d'architecture de haute lignée.

*Objets présentés :* un triangle de la Géode de la Vilette, une maquette de bâtiment, un nœud de la Pyramide du Louvre,

maquette d'une maison Phénix, armatures en béton de 1960 à 1989, poutrelles...

**5 - Mythologie :** Tour Eiffel : elle serait plus légère en acier. Pont sur la Severn, premier pont en fer, et les ponts sur la Seine. Beaubourg, la contestation des «tripes à l'air», Hong-kong la tour impossible, le projet de la tour de J. Nouvel...

*Objets présentés :* la robe «Tour Eiffel», des dessins d'architecture du nouveau pont du Havre, une cornière de la Tour Eiffel, une épée du IX<sup>e</sup> siècle, la puce informatique, jeux de Mécano de 1930 à 1989, rasoirs Gillette et Bic.

**6 - Emballant :** l'acier pour l'emballage, multi-forme, plus léger, plus conservateur. Les boîtes boissons : anciens et nouveaux emballants.

*Objets présentés :* des boîtes en acier, différentes étapes de la fabrication, boîte en fer blanc Kub de 1930, fac-similé d'une boîte de conserve de 1827, plaques d'acier pour emballage.

**7 - Ecologie :** l'acier se recycle par la propriété du magnétisme. Le matériau se recycle dans les centrales pour simple aimantation...

*Objets présentés :* un électro aimant, des produits mélangés dans une poubelle stylisée et mise en marche par le visiteur de l'aimant sélectionnant l'acier. Pots catalytiques.

**8 - Domestique :** entre la casserole en fonte de grand-maman et les casseroles en bi-métaux, la cuisine a bien changé. Résistant aux hautes pressions la cocotte-minute est d'usage courant, etc... Bientôt, les aciers iront dans les fours à micro-ondes.

*Objets présentés :* cocotte minute, casseroles sandwich, prototype four à micro-ondes «Brother», tôles insonorisées pour machines à laver, couverts, platerie, fer à repasser sécurité.

**9 - Transport :** personnes, matières, objets... TGV, bateaux, l'acier transporte plus vite et différemment.

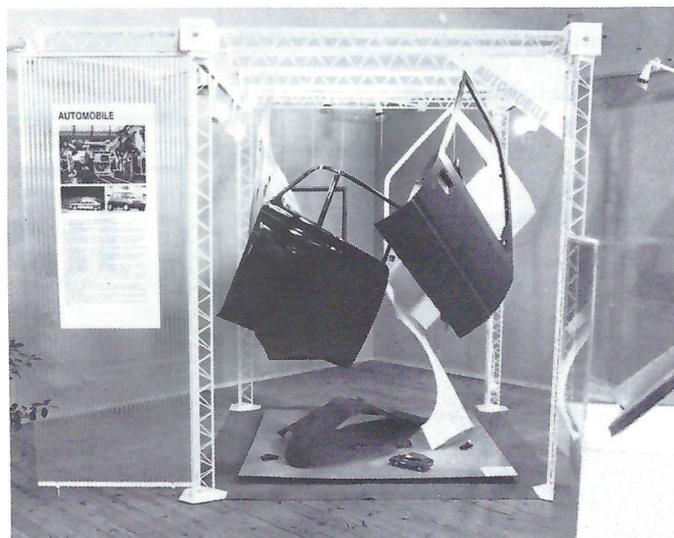
*Objets présentés :* rails de TGV, nouvelles roues, plaques pour le «Star Princess», petit train, vélo de Jean Prouvé, tubes.

**10 - L'acier star :** des sculpteurs aux bijoutiers, l'acier se porte...

*Objets présentés :* une œuvre en acier, des couverts en inox, un objet Cartier, une bouteille Morabito, des bijoux en acier XIX<sup>e</sup> s.

**11 - Haute technologie :** télévision haute définition : le téléviseur d'aujourd'hui est «plein d'acier»...

*Objet présenté :* un téléviseur en écorché.



Musée Crozatier :

Jardin Henri Vinay - 43000 Le Puy-en-Velay - Tél. 71 09 38 90  
 Ouvert de 10h à 12h et de 14h à 16h tous les jours sauf mardis.

## UNIVERSITE D'ETE : L'ENSEIGNEMENT EXPERIMENTAL DE L'OPTIQUE

L'optique est une science en perpétuel renouvellement. Depuis une vingtaine d'années grâce, en particulier, à l'invention du laser, des progrès considérables ont été réalisés, notamment dans le domaine des télécommunications.

L'enseignement expérimental de l'optique au collège et au lycée bénéficie de ces progrès technologiques et scientifiques. Par exemple, aujourd'hui, presque tous les établissements sont équipés de petits lasers.

Afin de former les professeurs à ces techniques nouvelles l'ADASTA a organisé, en liaison avec l'Université Blaise Pascal et la Mission Académique, une Université d'Été, qui s'est déroulée au Département de Physique du 27 août au 1<sup>er</sup> septembre. 26 stagiaires, (dont une roumaine), pour la plupart formateurs dans leur région, ont participé à cette réflexion.

L'équipe pédagogique de l'ADASTA a bénéficié pour la circonstance des compétences de plusieurs spécialistes.

Une visite des laboratoires de la Manufacture Michelin a permis aux stagiaires de mesurer l'importance de la recherche dans une grande industrie.

Les stagiaires ont visité également, sous la conduite du Professeur SOLE, le service d'ophtalmologie du CHRU ainsi que le centre audiovisuel rattaché à ce service.



Les stagiaires sont reçus à l'Hôtel de Région par M. CHIROUX.

(photo : «La Montagne»).

Ces journées studieuses ont été agrémentées par une sortie touristique dans la chaîne des Puys et une réception par le Conseil Régional d'Auvergne à l'Hôtel de Région, à Chamalières.

## MILLE MILLIARDS DE MICROBES

En 1987, l'Institut Pasteur célébrait avec éclat son centenaire. A cette occasion, une grande exposition, réalisée en collaboration avec le Palais de la Découverte, fut présentée dans divers pays du monde (dont le Brésil). En mars 1988, l'ADASTA présentait cette exposition à la Maison des Congrès de Clermont-Fd, où plus de 10 000 visiteurs (dont de nombreux scolaires) purent la voir. Ultérieurement, cette exposition fut présentée à Montluçon.

Une nouvelle exposition, consacrée aux microbes et aux biotechnologies a vu le jour, à l'initiative de la Région Franche-Comté. (Il ne faut pas oublier que Pasteur naquit à Dôle). «MILLE MILLIARDS DE MICROBES» a été réalisée par l'Institut Beecham et la Cité des Sciences et de l'Industrie. Après Rennes et Poitiers, Clermont-Fd accueillera cette exposition à la Maison Départementale de l'Innovation, à partir du 22 novembre, grâce à l'initiative du Conseil Général du Puy-de-Dôme.

## LA PHYSIQUE DES SONS

L'ADASTA a activement collaboré à la réalisation de l'exposition consacrée à l'acoustique et présentée au Centre Socio-Educatif du Chambon à Cusset (Allier).

Cette manifestation, organisée par l'association VEGA, sous le patronage de la municipalité de Cusset, s'est déroulée du 5 au 11 novembre. Elle avait pour objectif de montrer à un large public les rapports entre l'acoustique, science des sons, et la musique.

La partie scientifique comprenait une quinzaine d'expériences sur le son : origine, propagation, réflexion, réfraction, etc...

L'étude des phénomènes de résonance a permis de comprendre le mécanisme des cordes vibrantes et des tuyaux sonores. L'étude des battements explique pourquoi les musiciens peuvent accorder leurs instruments...

Une douzaine de professeurs de sciences physique du Lycée de Vichy-Cusset (Presles) se sont relayés pour exécuter les expériences et apporter les commentaires nécessaires.

Cette exposition était complétée par la présentation d'instruments et de concerts. Une excellente initiative qui a connu un grand succès.

## EXPOSITION : «DECOUVERTE DE L'UNIVERS»

Compte tenu du succès remporté par les activités dans le domaine de l'astronomie, l'ADASTA organise, en liaison avec la Mission Académique, au cours de l'année scolaire 1990-1991, un ensemble de stages et d'activités destinées essentiellement aux enseignants. Le détail de ces activités est publié dans le supplément pédagogique. Notons cependant que toutes les collectivités (associations, municipalités, etc...) peuvent emprunter l'exposition «Découverte de l'Univers». Cette exposition réalisée en collaboration avec l'Association des Astronomes Amateurs d'Auvergne comprend une cinquantaine de panneaux (format 60 x 100 cm) et des expériences de physique.

Pour les conditions de location, s'adresser à :

**ADASTA - UFR Sciences - 63177 AUBIERE CEDEX**



## APPAREILS DE MESURES ÉLECTRONIQUES

**P.B. MESURES**

### RÉPARATIONS - MAINTENANCE ÉTALONNAGE

*Toutes marques*

- ▶ CONTRÔLEURS - MULTIMÈTRES
- ▶ OSCILLOSCOPES
- ▶ ENREGISTREURS
- ▶ GÉNÉRATEURS BF
- ▶ ALIMENTATIONS
- ▶ APPAREILS DE LABORATOIRES

— Distributeur **A.O.I.P. Mesures** —

**64, av. Jean-Noëllet - 63170 AUBIÈRE - Tél. 73 27 61 31**  
**S.A.V. agréé : AOIP Mesures - AVANTEC/BIOBLOCK SCIENTIFIC**

## SEMAINE MINÉRALOGIQUE DE SAINT-GERMAIN-L'HERM (Puy-de-Dôme)

Pour la deuxième année consécutive s'est déroulée, du 20 au 26 août dernier, une semaine minéralogique en Livradois, sous l'égide de l'ADASTA.

C'est un aubergiste de Saint-Germain-l'Herm, M. Claude LANET, fervent minéralogiste et collectionneur avisé, qui en a eu l'idée. Il a fait part de son projet à deux de ses amis, également passionnés, M. Daniel BARRIER et moi-même. Nous avons tenté une première expérience en août 1989, avec sorties sur le terrain, à proximité du bourg, les après-midi ; conférences en soirées ; exposition permanente de posters sur les anciennes exploitations du Livradois avec les échantillons correspondants, et, en fin de semaine, une séance de projection en relief de minéraux régionaux préparée par M. VERNET, de Toulouse, une bourse d'échange et de vente de pièces de qualité. Ces actions, préparées de façon totalement bénévole, eurent un succès inattendu auprès d'un public varié, allant du vacancier novice en quête d'information à l'amateur averti.

L'accueil chaleureux reçu par cette manifestation purement locale nous a tout naturellement incités à la renouveler cette année, en lui donnant un peu plus d'ampleur. Ainsi, furent introduites deux excursions d'une journée, permettant de visiter des sites un peu plus éloignés : la région de Langeac pour l'une, la chaîne des Puys pour l'autre. Les sorties d'après-midi furent également diversifiées : l'une d'elles fut consacrée à une initiation à la batée dans l'Allier, au pont de Parentignat.

Le succès de ces manifestations fut énorme, puisque certaines regroupèrent plus de cent participants, posant ainsi de sérieux problèmes d'organisation et d'encadrement.

Grâce à l'efficace collaboration des animateurs déjà cités, d'un ingénieur au CNRS, Jean-Claude BERTHELAY, et d'un enseignant chercheur, Guy CAMUS, tous deux du Laboratoire de Géologie de l'Université Blaise-Pascal, les excursions ou les conférences ne furent pas limitées à une vulgarisation banale.

Signalons enfin que ces journées furent couronnées, le samedi 25 août, par la venue du Ministre de la Recherche et de la Technologie, M. le Professeur Hubert CURIEN, désireux de constater sur le vif l'importance de l'impact sur le grand public d'une science qui lui est particulièrement chère.

Le bilan de la semaine 1990 est éloquent ; en totalisant les participations individuelles à chaque manifestation, c'est près de 800 personnes qui ont suivi cette opération d'ampleur régionale.

Bien entendu, nous renouvelerons l'expérience en 1991, mais son succès, tant auprès du grand public que dans le milieu des connaisseurs, nous oblige à choisir une double orientation :

– d'une part, garder la vocation populaire, grâce à des excursions associant le passage par des sites minéralogiques connus à des parcours dans des paysages typiques de l'Auvergne ou à des visites de monuments remarquables (églises romanes, châteaux, etc...) ;



M. Curien examine en connaisseur un échantillon.

(Photo : «La Montagne»)

– d'autre part, intéresser les minéralogistes confirmés par des sorties spécialisées (par exemple orientées vers la collecte d'échantillons destinés au micromontage, ou consacrées à une espèce typique : fluorite, barytite, aragonite, ... avec, dans ce cas, un exposé à l'appui, fait par un spécialiste. Ainsi, pour la fluorite, M. CHERMETTE, de Lyon, a accepté de nous apporter une contribution inégalable de par sa compétence incontestable et sa connaissance exceptionnelle de la nature et de l'historique des gisements de la région.

Le programme détaillé de ces journées sera publié en avril 1991. Si vous souhaitez des informations générales sur leur déroulement, écrivez à :

**M. Claude LANET, Auberge des Cîmes, 63630 St-Germain-l'Herm,** qui se fera un plaisir de vous fournir les renseignements souhaités. St-Germain-l'Herm s'efforce de devenir un centre actif de la minéralogie de terrain en Auvergne : cet objectif sera atteint si vous participez nombreux à la semaine organisée en 1991.

M. MASSAUX - Maître de Conférences à l'Université Blaise-Pascal de Clermont-Fd

### VISITE DU CERN

*L'ADASTA organise, en collaboration avec le Laboratoire de Physique Corpusculaire de l'Université Blaise-Pascal, une nouvelle visite du Centre Européen de Recherche Nucléaire à Genève.*

*Cette visite aura lieu le samedi 8 décembre 1990. Elle comprendra l'expérience ALEPH sur le nouvel accélérateur géant ainsi qu'une visite générale du CERN.*

*Départ à 5 h 00. Retour vers 23 heures.*

*Renseignements / inscriptions auprès de l'ADASTA.*