

## Mini Édito

*Les dates de parution de votre journal préféré du DAPNIA vous semblent peut-être quelque peu erratiques. Que nenni ! Nul chaos n'affecte notre Département, mais le DAPNIA est en train d'accoucher de son Rapport d'Activités 95-96.*

*Or, notre Christine Marteau nationale, et talentueuse maquettiste de ce journal, est prise à temps plein par le Rapport. De ce fait, les deux derniers numéros de « ScintillationS » ont pris un retard certain. Mais votre « ScintillationS » favori reprend son rythme de croisière bimensuel compte tenu de la trêve des parasols : le n° 32 paraît à peine plus d'un mois après le n° 31 et le n° 33 paraîtra, cochon qui s'en dédit, fin septembre 1997. De sorte que vous aurez encore cette année, ô lecteurs insatiables, votre ration habituelle de « ScintillationS ».*

## DU NOUVEAU SUR LES FIBRES OPTIQUES PLASTIQUES

*Dans le numéro 30 de « ScintillationS », était annoncé un article de Michel Bourdinaud, le Monsieur FOP du DAPNIA. FOP, comme Fibres Optiques Plastiques, des fibres optiques suffisamment robustes et performantes pour assurer la transmission de vos gigabits, webeux ou autres, sur votre bretelle de dégagement de l'autoroute de l'information sans engorgement rédhibitoire. Chose promise...*

*La Rédaction*

### Le DAPNIA et les FOP.

Les Fibres optiques plastiques sous leur forme scintillante peuvent localiser des particules avec une précision d'un vingtième de millimètre à quelques milliardièmes de secondes près. Le DAPNIA, dont l'une des vocations consiste précisément à détecter des particules, a développé un procédé original de fabrication de telles fibres scintillantes ou non, breveté et transféré à l'industrie pour d'éventuelles applications grand public.

La technique des FOP scintillantes a trouvé son aboutissement dans le succès du « *Scintillating fiber Detector* ». Conçu et réalisé au DAPNIA pour contribuer à l'amélioration l'expérience UA2, ce détecteur a permis une meilleure identification des particules. Rappelons

que les deux expériences UA1 et UA2 au CERN ont mis en évidence les fameux bosons intermédiaires Z et W de l'interaction électrofaible.

D'autres technologies sont apparues, plus efficaces, plus performantes, et le Département a mis en sommeil ses activités FOP. Mais dans le cadre de la mission de diffusion de la technologie du CEA, le DAPNIA anime depuis l'origine le **Club des Fibres Optiques Plastiques**, structure informelle, sans droits d'entrée, qui regroupe l'ensemble des acteurs français du domaine, auxquels se sont associés quelques membres allemands, espagnols, italiens britanniques et hollandais.

Avec le soutien actif de ses deux parrains, le CEA et le Ministère de l'Enseignement et de la Recherche, le club FOP anime régulièrement (et allègrement...) des journées d'exposés et de discussions. Il mène aussi des actions comme la publication d'un ouvrage visant à guider pour les utilisateurs de FOP et organise des colloques spécialisés.

### Des progrès spectaculaires

Le club FOP fut ainsi, à Paris, le maître d'œuvre de POF' 96, cinquième conférence internationale sur les FOP où les Japonais présentèrent une nouvelle

génération de FOP capables de transmettre sur un kilomètre une dizaine de gigabits par seconde, débit à comparer aux valeurs habituelles de quelques centaines de mégabits sur cent mètres. De plus, cette transmission a lieu dans l'infrarouge jusqu'à 1,3 micromètres et non plus dans le visible, ce qui autorise l'emploi de composants déjà développés pour les fibres en silice (émetteurs et détecteurs de lumière).

Cette avancée remarquable est due :

- à la mise au point de fibres à indice de réfraction décroissant continûment de l'axe à la gaine de la fibre. De ce fait, les rayons lumineux sont incurvés comme dans un mirage et ondulent dans la fibre au lieu de subir de multiples réflexions. Deux avantages décisifs : une moins forte atténuation de la lumière donc une meilleure transmission, et une dispersion temporelle moindre : les signaux émis au même instant arrivent beaucoup mieux groupés dans le temps. Le peloton des informations s'étire beaucoup moins.

- à l'emploi d'un nouveau plastique où l'hydrogène est remplacé par le fluor, ce qui, en supprimant la forte absorption des rayons infrarouges par les chaînes chimiques carbone-hydrogène rentrant dans la composition des plastiques ordinaires, est un deuxième facteur d'une meilleure transmission.

Ces nouvelles FOP japonaises seraient proposées au public d'ici un ou deux ans avec de grandes chances de devenir standard pour le câblage local des bureaux et des habitations qui sera bientôt indispensable.

### Un torrent d'informations

En effet, chacun se voit submergé d'un flux d'informations en très forte croissance de sources variées et de « formats » différents. Quelles sont leurs origines ?

- les autoroutes de l'information qui véhiculent les pages web, le courrier électronique et les vidéo-conférences. La croissance du travail à domicile va créer une demande considérable de ces autoroutes.

- les serveurs centraux des TV numériques qui proposent un large éventail de chaînes et de services comme le télé-achat, le télé-chargement de films et de jeux vidéo ou encore la vision « à la demande » de manifestations sportives (suivez un Grand Prix de F1 depuis le cockpit de Villeneuve).

- les « foyers intelligents » : chez vous, un ordinateur interroge des capteurs et actionne en retour des servomécanismes pour ouvrir vos volets, régler le chauffage, activer l'alarme ou couper l'éclairage. Ces robots domestiques sont déjà une réalité.

### Le rôle-clé des fibres optiques

Dans les autoroutes proprement dites, pour la transmission à débit élevé sur des dizaines de kilomètres, les fibres optiques « classiques » en silice sont actuellement insurpassables. Mais la connexion de ces composants fragiles et coûteux reste extrêmement délicate. Leur utilisation lors de l'éclatement en connexions multiples vers les usagers est donc problématique.

A l'inverse, les FOP sont économiques, robustes et faciles à

connecter grâce à un diamètre utile de un millimètre, à comparer aux quelques microns des fibres en silice. Maintenant que les performances du plastique approchent celles de la silice, les FOP deviennent la bretelle de raccordement idéale et le véhicule idoine dans les réseaux locaux. À prix et commodité comparable, elles surclassent largement les conducteurs classiques en cuivre, par un débit cent fois plus élevé, une meilleure protection aux perturbations



Vasque décorée et éclairée par des (FOP) fibres plastiques à illumination latérale.

électromagnétiques et surtout une meilleure inviolabilité. D'où le regain d'intérêt des grands opérateurs en télécommunication français, japonais et allemands, présents à POF' 96.

### Pour l'éclairage aussi

Les progrès de FOP intéressent un tout autre domaine, celui de l'éclairage décoratif et architectural où il est appréciable de pouvoir concentrer la lumière sur les zones à mettre en valeur, discrètement et sans échauffement préjudiciable.

Les FOP sont bien adaptées à cet usage car on y peut injecter de fortes puissances lumineuses sous des angles importants et elles ne dénaturent pas les

couleurs même après un transport de plusieurs dizaines de mètres.

C'est ainsi que les vitrines du Grand Louvre comme la cathédrale de Nantes sont éclairées au moyen de FOP.

On peut aussi les utiliser en illumination latérale pour former des rubans lumineux souples grâce à des fuites de lumières volontairement pratiquées au travers de la gaine optique (*voir photo*). Elles concurrencent alors les tubes à décharges pour les enseignes publicitaires avec les avantages de la longueur, de la flexibilité et de la variation des couleurs.

Enfin, les FOP permettraient de réduire la dimension des phares d'automobiles. La plupart des constructeurs y songent fortement avec, plein leurs cartons, des projets de phares à fibres optiques qui devraient bientôt voir le jour.

Les FOP, ou : du bouquet numérique au bouquet de lumière...

### De grandes manœuvres pour un enjeu considérable

Selon une étude américaine, le marché mondial des FOP passerait de 59 millions de dollars, chiffre de 1993, à 265 millions de dollars en 2001, soit environ 1 million de kilomètres (25 tours de la Terre) avec une croissance annuelle de 20%.

Les USA en détiendront 45%, le Japon 39%, l'Europe ne ramassant que 12%.

D'où les mouvements que l'on observe dans les milieux industriels américains et japonais.

Les premiers ont lancé le programme **High Speed Plastic Network**, piloté par Boeing, Honeywell et Packard, visant à réaliser les composants pour réseaux locaux à FOP, en vue d'applications automobiles et aéronautiques.

La mobilisation des seconds est plus spectaculaire encore. Équivalent japonais du club FOP européen mais avec des moyens humains et financiers bien plus considérables, le **FOP Consortium**, regroupant des géants

comme Mitsubishi, NEC, Sharp, Sony etc... affiche clairement son objectif d'établir une société multimédia fondée sur les FOP. L'effort est complété par la création d'une **Photonic Valley** à Hokkaido qui formera dès 1998 plusieurs centaines d'ingénieurs et de chercheurs.

### Et l'Europe ?

L'Europe reste nettement en retrait

de ces grandes manœuvres alors qu'elle était de longue date très active dans le domaine des FOP.

En effet, le programme communautaire **Prometheus** destiné à l'amélioration du trafic routier intégrait des études de tenue thermique des FOP indispensables pour leur ouvrir le marché de l'automobile.

Son arrêt brutal a cassé un élan et peut-être même provoqué la méfiance des industriels qui seraient pourtant capables de maîtriser rapidement

la technologie des nouvelles FOP. Il serait absurde et profondément dommageable que l'Europe passe à côté de ce gigantesque marché au moment où il semble proche de la maturité.

Il est urgent de prendre conscience de l'importance de ces enjeux. C'est la priorité absolue du club FOP.

Michel Bourdinaud (SPP)

## Hale-Bopp, la comète du siècle

*Elle était annoncée dans un précédent numéro de « ScintillationS ». Voici plus de détails sur cette comète sur laquelle nos astrophysiciens comptent beaucoup (NDLR).*

**Tout le monde a pu voir de ses propres yeux la comète Hale-Bopp qui fut une comète d'une brillance exceptionnelle. Cette comète fut aussi scrutée par les astronomes. Le SAP a mené trois campagnes d'observations avec CAMIRAS, la caméra itinérante du SAP optimisée pour les observations dans l'infrarouge thermique à partir du sol (voir Photo 1). Deux des campagnes, (tout le mois de novembre 96 et 3 semaines en février 97), ont été effectuées à partir de TIRGO, le télescope italien de 1.5 m situé au Gornergrat en Suisse. La troisième campagne, (12 nuits en avril 1997), a été effectuée à partir du NOT (Nordic Optical Telescope), télescope de 2.5 m situé sur l'île de La Palma aux Canaries ; cette campagne s'est faite dans le cadre d'une demande de temps international qui regroupait tous les moyens d'observations (anglais, espagnols, scandinaves) disponibles sur les îles des Canaries. Nous présentons ci-après un petit aperçu des premiers résultats, en les replaçant dans le contexte général des comètes.**

### Petit historique

Les comètes ont de tout temps fasciné

les hommes ; mais ce n'est que récemment qu'elles sont devenues de véritables sujets d'études scientifiques. Jusqu'au xv<sup>e</sup> siècle, le système de Ptolémée, (établi au I<sup>er</sup> Siècle avant Jésus Christ), dominait l'astronomie. Dans ce système où la Terre était au centre du monde, il était impossible de rendre compte simplement du mouvement des comètes; ces objets furent alors relégués au rang de phénomènes atmosphériques sans intérêt pour les astronomes. Cette ignorance scientifique a laissé libre cours à l'imagination et les comètes ont été affublées de toutes sortes de pouvoirs, plutôt maléfiques d'ailleurs. Ce n'est qu'en 1577, (17 siècles après Ptolémée!) que Tycho-Brahé prouva que les comètes n'étaient pas liées à des phénomènes atmosphériques en montrant, à partir d'observations simultanées en deux endroits distants, que la distance Terre-comète était supérieure à la distance Terre-Lune. A la suite de la révolution copernicienne qui mis le soleil au centre du « monde », Halley montra en 1705 que les comètes avaient une trajectoire elliptique autour du Soleil et devaient donc être périodiques. Les comètes sont alors devenues des objets astronomiques à part entière.

### Taille et composition des comètes

Les comètes sont des objets de petite taille; leur noyau ne fait en général guère plus de quelques kilomètres de

diamètre. A cet égard Hale-Bopp est une grosse comète puisque son diamètre est estimé à 40 km, (environ 4 fois plus que celui de la comète de Halley). Les comètes sont schématiquement de grosses boules de glace et de poussières. Elles renferment aussi une faible quantité de molécules organiques, comme par exemple du méthanol(!), ou inorganiques, comme par exemple du H<sub>2</sub>S (!). Avant Hale-Bopp, une vingtaine de molécules avaient été détectées. Les observations d'Hale-Bopp ont permis d'en détecter une dizaine d'autres. Ces observations ont également permis de mesurer précisément plusieurs rapports isotopiques et notamment le rapport DHO/H<sub>2</sub>O, qui devrait permettre de savoir si vraiment l'eau sur Terre vient de comètes (*On le disait bien dans un précédent numéro : « Ah! les comètes coulent ! » NDLR*).

### Sublimation et queue des comètes

Quand une comète s'approche du soleil, la glace se sublime et s'échappe du noyau en entraînant les poussières. On dit que la comète devient active. La surface d'une comète n'est pas homogène; elle est composée de zones actives, et de zones inactives (sorte de croûtes qui empêchent la sublimation). Parfois ces croûtes craquent, ce qui se traduit par une augmentation de l'activité de la comète. Ce fut le cas à plusieurs reprises pour Hale-Bopp (voir Photo 2). Une autre cause d'augmentation d'activité pour une comète est sa fragmentation.





*Photo 1 : CAMIRAS montée sur le télescope de 1.5 m TIRGO, situé au Gornergrat en Suisse (altitude: 3100 mètres). La caméra est équipée d'une mosaïque de 192 x 128 détecteurs optimisés pour les observations dans l'infrarouge thermique à partir du sol. Ces détecteurs fabriqués au LETI/LIR du CEN Grenoble sont un sous-produit des développements de détecteurs conduit au LIR dans le cadre du projet ISOCAM. La plupart des observations de la comète ont été faites de jour. Les observations en infrarouge thermique se font aussi bien le jour que la nuit ! En effet, nous ne sommes pas gênés par la lumière du soleil, mais par l'émission thermique de la Terre (dont le maximum se situe dans l'infrarouge thermique) ; cette émission varie très peu entre le jour et la nuit. La sensibilité des observations à partir du sol est drastiquement limitée par ce fond terrestre. C'est pourquoi les observations d'objets faibles doivent être faites à partir d'ob-*

Les comètes sont fragiles, et certaines, comme la comète West en 1976, se cassent lorsqu'elles s'approchent du Soleil. Tout le monde se souvient encore de la comète Shoemaker-Levy 9 qui s'est brisée en plus de 20 fragments lors de son passage près de Jupiter en juillet 92 ; deux ans plus tard ces fragments s'écrasaient sur Jupiter. Ce ne fut pas le cas pour Hale-Bopp.

Le gaz et les poussières qui s'échappent du noyau engendrent les longues queues de comète qui font que ces objets sont si spectaculaires. Les queues de comète sont dirigées dans la direction opposée au Soleil, car la dynamique des poussières n'est pas dominée par

l'attraction gravitationnelle du soleil, mais par la force répulsive qu'exerce la radiation solaire. Il existe aussi une queue de plasma qui est rectiligne, car alignée avec le champ magnétique dans le vent solaire.

### Un réservoir de comètes

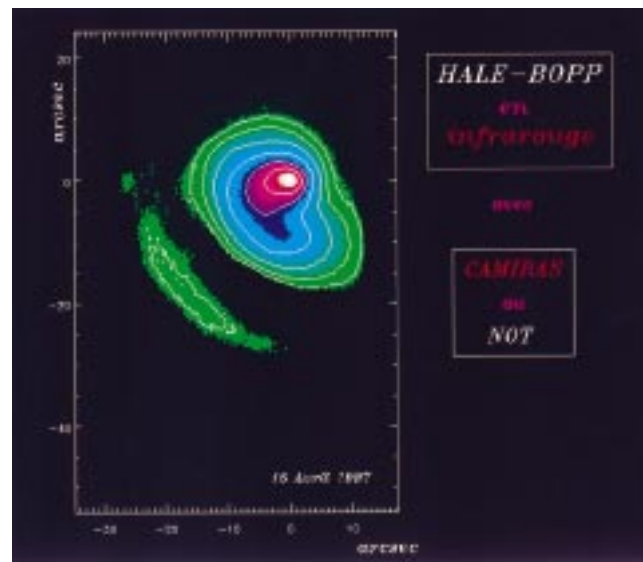
En gros, 1 mètre de comète est érodé à chaque passage près du soleil. Donc, grosso modo, après mille passages une comète disparaît. Alors pourquoi voit-on encore des comètes aujourd'hui ? Les comètes passent l'essentiel de leur temps bien au froid loin du soleil. On pense qu'il y a de l'ordre de  $10^{12}$  comètes, réparties dans un nuage de très grande dimension (40 000 - 100 000 Unités Astronomiques<sup>1</sup>), appelé nuage de Oort, (nom de l'astronome Hollandais qui le premier émit l'hypothèse de l'existence d'un tel nuage). Par perturbation gravitationnelle, (par exemple par les étoiles proches), l'orbite de certaines comètes est petit à petit modifiée pour finir par passer près du soleil. C'est ce qui est arrivé à Hale-Bopp.

### Pourquoi observer les comètes ?

Les comètes intéressent les astrophysiciens car ce sont des témoins privilégiés des conditions physico-chimiques qui régnaient lors de la formation du système solaire. Au SAp, nous nous intéressons plus particulièrement à déterminer la composition des poussières. Cette étude fait suite à nos travaux concernant l'étoile  $\beta$ -Pictoris (voir « ScintillationS »

$n^{\circ} 20$ ) qui est entourée d'un disque de poussières provenant probablement de la sublimation de comètes. Un autre but des observations est de comparer les poussières dans les comètes avec les micrométéorites qui tombent continuellement sur Terre, (environ 20 000 tonnes par an). Ces micrométéorites (taille inférieure à 500 microns) ont une composition en silicate très différente de celle des météorites (10 tonnes par an) et pourraient provenir de comètes.

Pour étudier la poussière nous utilisons la bande caractéristique des silicates que l'on voit en émission en infrarouge thermique, (longueur d'ondes autour de 10 microns). Lors de la mission à TIRGO en février 1997, nous avons clairement mis en évidence cette bande (voir Figure 3). Une première modélisation nous a permis de montrer qu'il fallait un manteau organique autour du noyau de silicate pour pouvoir expliquer la température élevée des grains (400 K), et qu'une partie des silicates était sous la forme d'olivine cristalline. La façon dont ces poussières se sont cristallisées reste une énigme.



*Photo 2 : Image de la partie centrale de la comète Hale-Bopp obtenue le 16 Avril 1997 avec la caméra CAMIRAS montée sur le NOT (Nordic Optical Telescope) situé sur l'île de La Palma aux Canaries. Le champ de vue par pixel est de 0.41 seconde d'arc, ce qui représente 400 km à la distance de la comète. Cette image a été filtrée pour mettre en évidence la présence d'une coquille « détachée ». Cette coquille illustre bien le caractère inhomogène de l'activité d'une comète; en effet, les poussières de cette coquille ont été éjectées lors du passage côté jour d'une région particulièrement active de la comète; la rotation de la comète sur elle-même se fait en un peu plus de 11 heures. Une autre coquille est en cours de formation.*

### À suivre

Environ un an de travail sera nécessaire pour traiter et interpréter l'énorme quantité de données que nous avons amassée. Heureusement Hale-Bopp ne reviendra pas de si tôt. Son prochain passage près du Soleil aura lieu dans... 2300 ans. Difficile d'imaginer comment sera l'humanité à ce moment là! (Vous le saurez en lisant le numéro 11531 de « *ScintillationS* »).

Un grand merci à René Jouan et Pierre Masse qui ont en charge les évolutions technologiques de CAMIRAS et qui assurent sans faille depuis 6 ans le succès technique des missions d'observations.

*Pierre-Olivier Lagage,  
Eric Pantin, Philippe Galdemard,  
Didier Dubreuil, (SAP).*

<sup>1</sup> Une unité astronomique représente la distance Terre-Soleil, en gros, 150 millions de kilomètres.

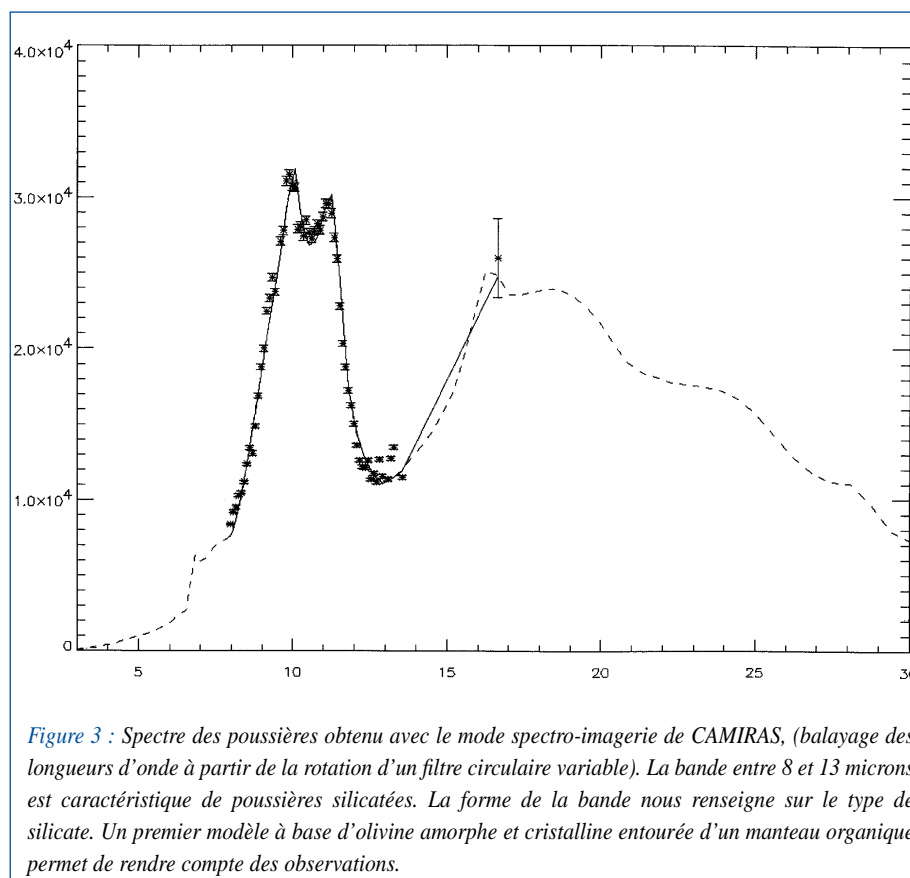


Figure 3 : Spectre des poussières obtenu avec le mode spectro-imagerie de CAMIRAS, (balayage des longueurs d'onde à partir de la rotation d'un filtre circulaire variable). La bande entre 8 et 13 microns est caractéristique de poussières silicatées. La forme de la bande nous renseigne sur le type de silicate. Un premier modèle à base d'olivine amorphe et cristalline entourée d'un manteau organique permet de rendre compte des observations.

## Histoire d'accélérateurs à l'Orme des Merisiers

*De 1965 à nos jours, de l'ALS\* à MACSE\* du cuivre au niobium, du DPhNAL\* au SEA, la saga de l'accélération à l'Orme des Merisiers ne fut pas toujours un long fleuve tranquille d'électrons perceurs de secrets du noyau atomique. Mais presque. Et l'on peut dire aujourd'hui que les équipes de l'Orme ont puissamment contribué à l'avènement de l'ère des accélérateurs supraconducteurs produisant des faisceaux plus énergiques, plus fins, plus lumineux, et considérablement plus économes. Claire Z. Antoine, du SEA, nous conte cette histoire. Les mots en rouge sont expliqués dans le glossaire.*

*La rédaction*

### 1 - LE PASSÉ ET LE PRÉSENT

L'histoire du SEA (Service d'Études des Accélérateurs) prend sa source à la fin des années 60 auprès de la physique nucléaire de Saclay où fut construit un accélérateur linéaire d'électrons (l'ALS) de 600 puis 730 MeV, à cavités accélératrices

en cuivre. La grosse équipe qui le fait fonctionner et l'améliore sans cesse peut en être fière : l'ALS présente un progrès décisif par rapport aux accélérateurs d'électrons de cette époque, essentiellement une luminosité environ mille fois plus forte. Ce super-microscope capable de « voir » des détails plus fins qu'un tiers de proton avec une finesse et une clarté sans précédent va permettre aux physiciens nucléaires du CEA de jouir pendant 20 ans d'une position privilégiée et d'engranger des résultats que la communauté internationale reconnaîtra comme majeurs (voir « *ScintillationS* » n°1). Autour de l'équipe de l'ALS vont se rassembler diverses composantes, venues parfois de domaines voisins. Cet ensemble forme aujourd'hui le SEA.

Mais très vite, il faut songer à l'avenir. Dès 1970, à la demande des physiciens qui souhaitent des faisceaux de quelques GeV et surtout de **cycle utile** 100%, l'équipe rêve d'une machine supraconductrice car la technique classique « chaude » aboutirait à des monstres dévoreurs d'énergie.

Mais, à l'époque, malgré le travail des pionniers de Stanford, en Californie, et les recherches d'autres laboratoires dans le monde, la technologie des cavités accélératrices supraconductrices était loin d'être maîtrisée.

Pourtant, vers 1978-1980, s'inspirant des avancées de Karlsruhe, une autre équipe de Saclay (dite de physique nucléaire à « basse énergie ») soutenue par Jules Horowitz entreprend de prolonger le Tandem Van-de-Graaff de Saclay par un post-accélérateur (Booster) supraconducteur. Les progrès sont lents, sans l'aide de Karlsruhe qui vient d'abandonner le domaine. Mais, bien que restreinte et relativement isolée, l'équipe avance.

Le démarrage et les progrès rapides du projet LEP2 supraconducteur relancent la filière. Vers 1985, une décision est prise aux États-Unis de construire CEBAF, une grande machine supra à électrons de 4 GeV et 100% de cycle utile. Et peu après, Roland Bergère donne mission à un Groupe d'Études des Cavités Supraconductrices

(GECS) de se mettre au niveau de ces labos de pointe. Une équipe de l'ALS suit une formation au CERN et se renforce de physiciens formés au Tandem. Un laboratoire est créé à l'Orme. En un peu moins de quatre ans, le GECS se hisse au niveau des meilleurs labos mondiaux.

Parallèlement, le premier faisceau post-accélééré sort du Tandem en 1989, avec des performances uniques en Europe. Succès technique malheureusement éclipsé par les remous qui agitent la Physique Nucléaire et ralentissent son activité.

En 1989-90, les équipes du Booster et de l'ALS sont regroupées avec mission de construire un prototype de machine pour la physique nucléaire : le module d'accélérateur à cavités supraconductrices d'électrons : MACSE. En décembre 1990, moins d'un an après l'arrêt et le démantèlement de l'ALS, est produit le premier faisceau continu d'électrons. Début 92, les performances atteignent 10 MeV et 100 micro ampères, avec un champ accélérateur moyen supérieur à 10 mégavolts par mètre. A l'époque, CEBAF visait un champ moyen de 5 MV/m.

Mais MACSE est surtout un remarquable banc d'essai pour les cavités supraconductrices. Progressivement, on élimine les instabilités thermiques dues à la distribution d'hélium, on surmonte certaines faiblesses des lignes de couplage, on teste les différents modes de distribution de la puissance H.F. (onde accélératrice) etc. On est en mesure d'étudier un faisceau d'électrons tel que peut en produire la technologie supra : faisceau continu (l'ALS était pulsé), extrêmement fin (un cheveu et demi) donc concentré, et hautement stable. On teste pour la première fois les cavités supra dans les conditions réelles d'accélération. On met ainsi en évidence les problèmes de faisceau qu'il faudra maîtriser dans les futurs très grands accélérateurs linéaires d'électrons : TTF puis TESLA. Parallèlement, un groupe se spécialise dans les problèmes de surfaces afin de faire avancer les connaissances de certains phénomènes qui limitent les performances des cavités. Ce groupe, entre autres, contribuera fortement à résoudre un problème qui paralysait plusieurs laboratoires vers 1990-1992 : « l'effet 100 K »

Entre temps, CEBAF, achevé, montre des performances meilleures que prévues, probablement grâce aux progrès accomplis par la communauté internationale pendant sa construction. Dans ce domaine de la supraconductivité, des résultats de recherche fondamentale ont souvent des retombées rapides.

Parallèlement, le projet français pour la physique hadronique (voir les n°21, 22) est devenu européen sous le nom de ELFE et vise les 15, voire les 30 GeV. C'est l'époque de la créa-

tion du DAPNIA et du SEA qui, fort de son expérience en matière de supraconductivité va pouvoir s'atteler à d'autres projets.

## 2 - LE PRÉSENT ET LE FUTUR

A ce jour, le SEA est essentiellement un service de R&D sur l'accélération par cavités supraconductrices (voir l'encadré et la photo) et leur environnement : injecteurs et optique de faisceau, vide et cryogénie, conduite de l'accélérateur. Ses travaux ont d'abord porté sur l'accélération d'électrons, mais les progrès accomplis par notre équipe nous permettent de nous lancer dans plusieurs domaines :

- supraconductivité H.F., domaine frontière entre la physique de la supraconduction et celle des très hautes fréquences (hyperfréquences)
- conception de systèmes hyperfréquence, cavités, coupleurs etc.
- caractérisation des matériaux supraconducteurs
- optimisation de la purification du niobium massif (propriétés supra et transfert thermique)
- élaboration de couches minces supraconductrices sur cuivre (économie de niobium, meilleur transfert thermique)
- état des surfaces (pour éviter l'émission d'électrons indésirables)
- maîtrise et pureté des matériaux (soudures, tenue mécanique au froid, au vide, aux hyperfréquences)
- mise en forme de cavités plus fiables et plus économiques (hydroformage)
- futurs accélérateurs (conception technique, spécifications, calculs)
- collisionneurs linéaires (TESLA) dans le domaine du TeV ( $10^{12}$  électrons-volt) destinés à la physique des particules
- sources lumineuses type lasers à électrons libres dans le domaine UV ou X
- sources lumineuses type anneaux de stockage (SOLEIL) fournissant du rayonnement synchrotron X intense en vue d'études de la structure des matériaux ou des protéines
- accélérateurs de protons de forte intensité pour produire des neutrons de spallation (voir « Scintillation » n° 22), neutrons destinés à :
- mesurer la probabilité de réactions de neutrons avec différents noyaux, prélude indispensable à l'étude de la transmutation des déchets nucléaires dans la filière mixte accélérateurs-réacteurs sous-critiques
- étudier comment l'apport de ces neutrons peut amorcer et entretenir une réaction en chaîne dans un réacteur sous-critique
- produire du tritium
- étudier la tenue des matériaux fortement irradiés
- conception et réalisation de prototypes

d'accélérateurs (MACSE, 100% Saclay, TTF, collaboration internationale à Hambourg)

## CONCLUSION

La supraconductivité apporte des avantages considérables aux accélérateurs de particules : énorme économie d'énergie, finesse des faisceaux (émittance réduite), bien meilleur gradient d'accélérateur (avec les performances actuelles, l'ALS n'aurait plus que 25 mètres de long au lieu de 200, pour la même énergie). Mais des progrès substantiels (certains sont en train d'être réalisés) sont nécessaires dans les domaines suivants :

- gradient accélérateur et dissipation d'énergie résiduelle dans les cavités
- maîtrise des transferts thermiques et de la puissance cryogénique
- maîtrise des méthodes ultra propre et d'ultravide
- conception des coupleurs de cavités en particulier pour les fortes puissances
- maîtrise du faisceau dans les très grands accélérateurs. Dans cette entreprise, le SEA s'appuie sur d'autres services du DAPNIA (SGPI, SIG, STCM). Nous collaborons avec l'IN2P3 et de nombreux laboratoires étrangers : CERN, Cornell, DESY, Fermilab, INFN...

*'Le gradient accélérateur conditionne l'accroissement de l'énergie des particules par unité de longueur. L'A. L. S. avait un gradient accélérateur de 3 MeV/m. On obtient actuellement plus de 5 MeV/m.*



Cavité 9 cellules 1,3 Gigahertz type TESLA



### FONCTIONNEMENT DES CAVITÉS SUPRACONDUCTRICES.

Une cavité hyperfréquence est comparable à une caisse de résonance comme celle d'un instrument de musique. Mais au lieu de molécules d'air, on y fait résonner une onde électromagnétique (comme celle d'un four à micro-ondes) dans un vide extrêmement poussé. Une cavité est en fait un système capable d'emmagasiner de l'énergie et de la transmettre aux particules. C'est le champ électrique, créé dans la cavité où résonne l'onde, qui accélère les particules et leur impose une trajectoire parallèle à sa direction (une particule dans un champ électrique est soumise à une force de même direction que le champ, tout comme une pomme dans le champ de pesanteur).

Or, plusieurs modes de résonance sont possibles et il faut de gros ordinateurs pour calculer la répartition du champ électrique dans les différentes structures envisagées. Ce calcul est indispensable car il permet de trouver la forme des cavités telle que le champ électrique soit maximum le long de l'axe du faisceau. Sinon les particules partiraient dans tous les sens, ce qui nuirait à la qualité du faisceau. Et comme le champ oscille, on n'injecte les électrons que lorsqu'il est dans le bon sens, sinon les électrons seraient ralentis au lieu d'être accélérés. On injecte donc les électrons par paquets aux moments adéquats. C'est une question de bon sens...

Il faut de plus que la taille des cavités soit accordée à la fréquence de l'onde. Plus la fréquence est élevée, plus la taille est petite (un violon est plus petit qu'une contrebasse). Pour une onde de 1,5 gigahertz (1,5 milliard de vibrations par seconde), la taille est d'environ 20 centimètres.

Les deux qualités essentielles d'une cavité



Cavité 9 cellules 1,3 Gigahertz type TESLA

accélétratrice sont le champ accélérateur (on arrive actuellement à 25 millions de volts par mètre) et le coefficient de surtension (ou facteur de qualité) qui mesure la capacité à emmagasiner l'énergie électromagnétique. Dans ces deux domaines où le SEA détient plusieurs records du monde (voir l'article de Jean-Marc Cavedon et Étienne Klein dans « ScintillationS » n° 3), les cavités supraconductrices en niobium ont une écrasante supériorité sur les cavités classiques en cuivre, surtout pour le coefficient de surtension, 10.000 à 100.000 fois plus élevé en supra. On peut théoriquement obtenir de hauts gradients accélérateurs avec des cavités en cuivre, mais c'est au détriment du **cycle utile** car l'échauffement par effet Joule pourrait faire fondre les structures, ce qui limite la puissance électrique injectable. Si l'on veut des faisceaux continus (100% de cycle utile), il faut recourir à la supraconductivité pour les hautes énergies et les hautes luminosités.

Toute médaille a son revers. La supraconductivité ne s'établit qu'à très basse température, pratiquement celle de l'hélium superfluide (1,8 degré Kelvin, soit en gros moins 269° C, Brrr !). Le refroidissement consomme beaucoup d'électricité. De plus, on est très sensible à des phénomènes parasites comme l'**émission de champ** qui, dans les cavités classiques « chaudes », sont complètement occultés par d'autres sources de pertes. D'autres phénomènes viennent limiter les performances « théoriques<sup>1</sup> », des cavités supra : défauts de surface, impuretés etc. Mais les immenses avantages de la supraconductivité l'emportent très largement sur ces inconvénients.

<sup>1</sup> Pour le niobium à 2K et 1,3 GHz : les limites théoriques sont pour le champ accélérateur : 50 MV/m, et pour le facteur de qualité : 1011.

## GLOSSAIRE

### Cycle Utile (C. U.) :

C'est la fraction du temps pendant laquelle les particules se présentent en paquets et sont accélérées. Les accélérateurs « chauds » ne pouvaient délivrer des faisceaux continus (100% de cycle utile) sous peine que la puissance délivrée ne fasse tout fondre. Dès 1969, l'ALS (1 à 2% de C. U.) avait déjà permis de gagner un facteur 10 par rapport à ses aînés, ce qui a rendu possible certaines expériences en coïncidences (où l'on détecte deux ou trois particules simultanément émises lors de la réaction étudiée) infaisables auparavant. L'avantage d'un cycle utile long est d'ouvrir plus longtemps la « porte temporelle » où s'engouffrent les couples ou trios de particules

attendues. Le signal est de ce fait moins brouillé par le « bruit de fond » constitué par les coïncidences fortuites, couples de particules se présentant fortuitement au même moment alors que leur arrivée simultanée n'a rien à voir avec la réaction.

**Effet « 100K »** (les méfaits de l'azote, NDLR) : Après un séjour plus ou moins long à la température de l'azote liquide d'environ 100 degré Kelvin, certaines cavités offraient des facteurs de qualité très dégradés. Seul coupable possible à cette température : l'hydrure de niobium, mauvais supraconducteur, qui arrivait à se former car, à cette température de 100K, les molécules d'hydrogène se rassemblent près de la surface (phénomène dit de « ségrégation »). Sans

cette concentration, il n'aurait pas assez d'hydrogène pour fabriquer de l'hydrure de niobium (En mettant en évidence cette concentration à laquelle personne ne s'attendait, Claire Antoine a résolu l'énigme, se révélant ainsi la Sherlock Holmes du SEA. Note du porte-parole). La région des 100K est donc un passage critique lors de la descente en température. Un traitement thermique adéquat permet de se débarrasser définitivement de ce phénomène indésirable.

### Émission de champ :

Lorsqu'une surface métallique est soumise à un champ électrique intense, des électrons en sont arrachés limitant le champ accélérateur du fait de chocs et d'échauffement sur les parois des cavités, et perturbant le faisceau (courant

d'obscurité). En traitant plus soigneusement les surfaces, nous avons pu repousser le seuil d'apparition de ce phénomène dont nous avons montré qu'il provenait de contamination par des particules.

#### Multipactor :

Phénomènes d'« avalanche » liés aux électrons secondaires émis lors de l'impact d'une particule sur une paroi de la cavité.

#### Lignes de couplage :

Guides conducteurs de l'onde H.F. dans les cavités. Ils doivent bien conduire l'électricité tout en étant de bons isolants thermiques, s'accommoder des chocs thermiques, être étanches au vide et supporter de grandes variations de champ électrique. Autant dire que leur conception est très difficile.

#### Résistance résiduelle en supraconductivité (voir « ScintillationS » n°3) :

En courant alternatif, le cas des ondes

hyperfréquence, la résistance d'un supraconducteur ne tombe pas rigoureusement à zéro sous la température critique, contrairement à ce qui se passe en courant continu. Une résistance résiduelle demeure, dont on élimine partiellement les effets dissipateurs d'énergie grâce à des traitements de purification. On augmente ainsi les performances des cavités.

On voit ici le rôle très important de la chimie (note du porte parole, qui rappelle que l'auteur de l'article est une distinguée chimiste qu'on applaudit bien fort!..)

#### Sonde électromagnétique :

Cette appellation désigne l'ensemble des faisceaux (électrons, photons, muons etc.) qui interagissent avec la matière étudiée par le biais de la force électromagnétique. Avantage : une interaction parfaitement connue dont les effets quantitatifs peuvent être prédits avec une précision de 10 décimales. Inconvénient : des probabilités

d'interaction une centaine de fois plus faibles qu'avec la sonde « hadronique », faisceaux de protons, deutons, ions lourds etc. ayant avec leur cible l'interaction forte, ce qui peut poser des problèmes d'interprétation puisque l'interaction agissante est celle qu'on étudie. Les accélérateurs d'électrons sont des super-microscopes permettant une vision particulièrement fine et limpide ; le revers de la médaille est qu'ils doivent être d'une très grande luminosité. D'où l'émergence des machines supraconductrices à faisceaux continus.

Claire Z. Antoine (SEA), avec la complicité,  
pour le glossaire, de Joël Martin (SPhN)

\* ALS : Accélérateur Linéaire de Saclay (voir « ScintillationS » n°1) ; MACSE : Module d'Accélérateur à Cavités Supraconductrices d'Electrons ; DPhNAL : Département de Physique nucléaire / Service de l'Accélérateur Linéaire (ancien nom du SEA avant restructurations).

## BRÈVES... BRÈVES...

### Les choses avancent au LHC

À la suite de la discussion minutieuse de l'état des expériences ATLAS et CMS du LHC par le conseil du CERN et de ses comités, la construction des expériences a été approuvée. Le coût de chaque expérience a été plafonné à 475 millions de francs suisses (un peu moins de deux milliards de francs français), prix de 1995. Les rapports techniques des deux expériences seront donc soumis à approbation dans les mois à venir.

Communiqué par  
Élizabeth Locci (SPP)

### Cassini

Deux ans après les dernières missions spatiales auxquelles le SAp a participé (ISO et SOHO), c'est au tour de CASSINI d'être lancé entre le 6 octobre et le 4 novembre prochain. A bord de cette sonde de la NASA destinée à l'observation de Saturne, ses anneaux et ses satellites, est embarqué le spectromètre infrarouge CIRS dont une des voies de détection a été étudiée et développée au DAPNIA.

Sur la base d'un détecteur HgCdTe en provenance du LETI, le SAp en collabora-

tion avec le SIG, a développé et étudié un préamplificateur froid bas bruit en technologie hybride, et un ensemble d'amplification et de filtrage de haute précision.

Avec ses 5650 kg (825 kg pour Voyager !), CASSINI est la sonde la plus lourde jamais envoyée en mission interplanétaire.

Franck Quatrehomme (SAp)

### L'incendie du SPS

Certains ont pu apprendre dans Le Monde, Libération, ou d'autres journaux, l'incendie qui a endommagé une unité d'alimentation des aimants du SPS, le 13 mai dernier au CERN. Contrairement aux annonces faites, le retard envisagé pour le démarrage de la campagne de prise de données du SPS et du LEP a pu être réduit, au prix d'un travail intense jour et nuit pour la remise en état de la salle abritant ces alimentations. Grâce à ce travail acharné, le LEP a pu redémarrer avant le 21 juillet, soit avec 50 jours d'avance sur la date annoncée dans les journaux. Les physiciens se réjouissent, et vont enfin pouvoir observer des collisions à une nouvelle énergie record, 184 GeV. La chasse au Higgs et aux squarks va reprendre !

Yves Sacquin (SPP)

### Va et vient

**Mai 1997** - Jacques Aiguepares (SPhN) part en retraite progressive. La transition n'en sera que plus douce pour ses amis tristes de le voir partir... Jean-Pierre Mouly et André Zakarian, mutés du SED viennent renforcer le noyau dur du SPhN. La plus cordiale bienvenue.

**Juin 1997** - Alain Aspart venu de la DCC et Serge Boiziau anciennement du DRECAM viennent renforcer le SEA. C'est une (deux) très bonne(s) chose(s) car le SEA perd son chef : Jean Gastebois qui part à la retraite. Bon vent, Jean ! (À « ScintillationS », on montre sa verve à tous les Jean, NDLR).

#### CEA - DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

##### DIRECTEUR DE LA PUBLICATION :

Joël FELTESSE

##### COMITÉ ÉDITORIAL :

Joël MARTIN (porte parole),

Claire ANTOINE,

Pierre BORGEAUD,

Michel BOURDINAUD,

François BUGEON, Rémi CHIPAUX,

Claude LESMOND, Elizabeth LOCCI,

Marc SAUVAGE, Yves SACQUIN, Jean-Claude

SCHEUER, Angèle SÉNÉ, Christian VEYSSIERES

##### RÉDACTION :

Maryline ALBÉRA

##### MAQUETTE :

Christine MARTEAU

##### MISE EN PAGE :

TOTEM

Dépôt légal août 1997