

PUCES, ÉTOILES ET PARTICULES

Manteau lunaire

Le cosmos ou les faisceaux hyper intenses d'un grand accélérateur, autant d'univers impitoyables pour l'électronique d'un satellite ou d'un détecteur. Dans leur quête toujours plus fouillée des deux infinis, les (astro)physiciens ont besoin d'appareillages toujours plus résistants. Il est donc crucial de protéger toujours plus efficacement le centre nerveux de leurs détecteurs.

Soumis sans cesse et sans fin au bombardement de particules de très haute énergie, semi-conducteurs, thyristors et autres puces aux pattes trop tendres subissent parfois d'irréparables outrages et c'est la fin prématurée des manips. Mémoires, transistors à effets de champ et autres fragiles bestioles électroniques doivent être de moins en moins vulnérables aux radiations qu'elles encaissent.

Des technologies de plus en plus performantes et fiables sont mises au point pour créer des composants « durcis » capables de tenir sous des Niagaras de particules ultra pénétrantes. Le nec-plus-ultra actuel : la filière DMILL. Elle a été mise au point et livrée à l'industrie en quelques années. Maître d'œuvre : le Service d'Électronique et d'Informatique du DAPNIA.

Le coordinateur technique de ce projet, Martin Dentan, du SEI, nous conte cette épopée dont les protagonistes venant d'horizons différents ont prodigué sans compter sueur, talent, esprit d'équipe, camaraderie et chaleur humaine pour mener à bien ce magnifique projet.

DMILL 1, l'odyssée de l'espace...

Autre aventure humaine qui appartient déjà à l'Histoire : l'épopée de Mirabelle. Trente ans après, les anciens de la grande chambre à bulles retournent sur les lieux de leurs exploits. Josette Le Bars et Daniel Cacaut (STCM) égrènent leurs souvenirs.*

*La nostalgie n'empêche pas l'efficacité. Comme annoncé dans le n° 42, Jean Pierre Jacob et Jean-Marc Joly, associées à Claire Antoine (SEA), présentent leur nouveau Service de Déclassement des Accélérateurs, le SDA. Tout en gardant le souvenir de Saturne** et de l'ALS***, il est salubre d'effacer toute trace (radioactive) de leur passage en ce bas monde. Encore faut-il retrouver la totalité de ces traces. Travail de scientifiques mais aussi d'archéologues car ces deux mammoths de l'accélération des particules longtemps préservés de tout dégraissage ont servi respectivement quarante et vingt-cinq ans. Ère fructueuse qui vit l'apparition d'une discipline nouvelle, la physique hadronique****.*

*Ils ont eu plus de chance que leur jeune cousin mort-né au nom d'étoile dont ce numéro offre la couronne sous son manteau lunaire*****.*



Le SDA fait des étincelles (page 5)

Joël Martin (SPhN et ScintillationS)

* Voir ScintillationS n° 26 et 27.

** Voir n° 25, 28, 30, 34, 39

*** N° 1

**** N° 42.

***** Ce n'est pas une NDLR. C'est un faire-part.

DMILL, une aventure technique et humaine exceptionnelle

Les technologies des composants micro-électroniques durcis aux radiations ont été développées au cours des 20 dernières années pour l'espace ou la défense. Limités à l'exécution de fonctions numériques, les plus durcis de ces composants pouvaient supporter jusqu'à 1 million de rads (Mrad) (encadré). Mais aucune de ces technologies n'avait été conçue pour réaliser des circuits analogiques ni pour supporter plusieurs Mrad. Or, les expériences de physique au LHC (Large Hadron Collider, voir *ScintillationS* n° 3, 9, 17, 18, 22, 32) requièrent des technologies micro-électroniques mixtes analogique-numérique pouvant résister à des doses dépassant 10 Mrad et à des flux neutroniques atteignant cent mille milliards de neutrons par centimètre carré (10^{14} n/cm²), le tout cumulé sur 10 ans. Des besoins comparables en électronique analogique-numérique sont apparus au début des années 90 dans l'industrie spatiale en « moyennement durci » (quelques 100 krad) et dans l'industrie nucléaire civile en « très fortement durci » (plusieurs dizaines de Mrad).

Pour répondre à tous ces besoins, le CEA a développé avec ses partenaires entre 1990 et 1998 la filière micro-électronique mixte analogique-numérique très fortement durcie aux radiations ionisantes et aux neutrons, l'a industrialisée et mise à la disposition de la communauté des physiciens des particules, mais aussi de l'industrie spatiale, l'industrie nucléaire civile, et autres applications. C'est la filière DMILL (Durcie Mixte Isolée Logico-Linéaire).

GENÈSE ET PÉRIODE PRÉINDUSTRIELLE

Formation et conduite du projet pendant la R&D

Début 1990, des ingénieurs du SEI étudient les propositions d'expériences au LHC et comprennent les besoins en électronique durcie. En l'absence de solution industrielle adaptée aux besoins du LHC ils concluent à la nécessité de développer une nouvelle filière technologique.

Une étude de marché conduite par le SEI montre en outre des besoins en électronique très hautement durcie dans l'industrie nucléaire civile et des besoins en électronique mixte

analogique-numérique moyennement durcie dans l'industrie spatiale.

Courant 1990, le SEI apprend du LETI et de la DAM (Bruyères-le-Châtel) l'existence d'un projet embryonnaire de filière durcie mixte analogique-numérique. Le SEI propose alors de former un consortium rassemblant DSM, DAM et LETI pour faire évoluer cette filière afin de répondre à la fois aux besoins du LHC et à ceux des autres demandeurs. La Direction du CEA approuve ce projet.

Le SEI, maître d'œuvre du projet, veille d'emblée à ce que ce développement soit conduit en étroite relation avec les laboratoires partenaires du LHC, et associé à un partenaire industriel.

En 1991, le CEA et l'industriel Thomson-TCS (Grenoble) forment un consortium pour le développement et l'industrialisation de DMILL et signent un accord définissant les objectifs, le planning et les moyens matériels associés à ce programme.

L'union faisant la force, le CEA propose début 1992 à deux laboratoires de l'IN2P3 (l'homologue CNRS du DAPNIA) : le CPPM à Marseille et le LAL à Orsay, de s'associer au projet. En mai 1992, le consortium ainsi constitué présente pour la première fois DMILL au comité compétent du CERN, qui approuve et recommande de stabiliser puis industrialiser la filière DMILL, et de mettre dès que possible DMILL à la disposition des physiciens des particules.

Progression technique et stabilisation de DMILL avant son transfert industriel

La filière DMILL est partie des connaissances acquises par la DAM, le LETI et TCS de 1980 à 1990, en développant et industrialisant de précédentes filières micro-électroniques moyennement durcies (1 Mrad).

DMILL démarre en 1988 par l'étude de faisabilité d'un procédé de fabrication de circuits analogiques sur substrat isolant avec des composants faible bruit, durcis, et intégrables à des éléments logiques. Cette étude de faisabilité initiée par la DAM et le LETI aboutit début 1989 à un premier type de transistor. Les premières structures sont réalisées en technologie « méso » : îlots de silicium sur isolant en silice obtenues par gravure en pente

du silicium de surface (voir l'encadré), et donnent au cours de l'année 1989 des premiers résultats encourageants tant du point de vue électrique que radiatif.

Au printemps 1990, on définit une technologie à trois types de composants, chacun disponible dans une version complémentaire « N » et « P », soit 6 composants actifs. Des premiers lots intégrant ces 6 types de transistors sont lancés en fabrication mi-1990 ; résultat : des composants électriquement fonctionnels mais un durcissement restant à optimiser.

En 1991, le LETI lance la fabrication de nouveaux lots intégrant un ensemble de corrections et comportant des circuits complets qui seront optimisés et maintenus dans les lots ultérieurs. On pourra ainsi juger des performances de la technologie lors du développement puis du transfert industriel. Afin d'accélérer la mise au point, on décide, après consultation d'experts, de réduire le nombre de types de transistors de 6 à 4. D'où une simplification sensible du procédé par réduction du nombre d'étapes.

1992 est l'année charnière du projet : le LETI décide de passer de la technologie « méso », trop particulière, à une technologie d'isolation par tranchées diélectriques (*encart*). Cette évolution implique une redéfinition complète des structures de chaque transistor, des règles de dessin et des paramètres de simulation, mais permet d'entamer l'industrialisation de cette technologie « planarisée ».

Début 1993, à partir des résultats obtenus en technologie planarisée, les partenaires CEA et IN2P3 organisent un premier prototype aux propriétés électriques et aux caractéristiques

L'auteur tient à rendre hommage à Pierre Bargeaud, chef du SEI jusqu'en 1996, initiateur et coordinateur général du projet, à Robert Truche, chef du projet DMILL au LETI et responsable de la mise au point du procédé de fabrication, à Olivier Flament, chef du projet DMILL à la DAM et responsable de la mise au point du durcissement de la filière et à Christian le Mouëllic, chef du projet DMILL chez MHS et responsable de l'industrialisation du procédé de fabrication. Que toutes les personnes qui ont collaboré à ce projet ou qui l'ont soutenu, dont il n'est pas possible de donner la liste ici, sache que cet hommage s'adresse aussi pleinement à elles.

de bruit proches des spécifications visées ; toutefois le niveau de durcissement de certains composants, bien qu'honorable (supérieur à 1 Mrad), reste inférieur aux objectifs.

En 1993 et 1994, la DAM et le LETI analysent systématiquement chaque procédé à l'aune du durcissement obtenu. Ce travail permet d'optimiser le procédé de fabrication et d'obtenir sur les lots fabriqués à partir de 1994 des performances compatibles avec l'objectif de 10 Mrad et 10^{14} n/cm². Dès la fin 1993, les premiers résultats de cette optimisation, permettent au CEA d'ouvrir l'accès de la filière aux équipes du LHC.

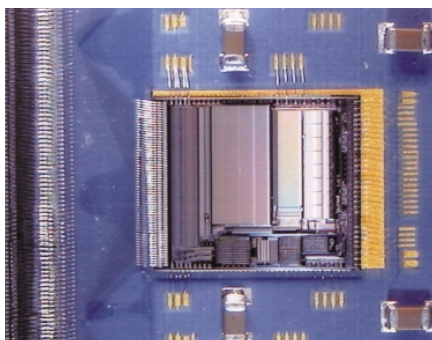


Figure 4 : Circuit ABCD (ATLAS Binary Chip in DMILL) hybridé sur un support céramique (bleu). Ce circuit comportant 128 canaux a été développé par la collaboration SCT (Semi-Conductor Tracker) pour la lecture des détecteurs à rubans de silicium "Silicon Strip" qui équiperont le SCT de l'expérience ATLAS. En dix années de fonctionnement, les circuits ABCD devront supporter plus de 10 Mrad et plus de 10^{14} n/cm².

Au début de 1994, démarre la stabilisation de la filière au LETI. Les prototypes fabriqués en 1994 et 1995 démontrent la robustesse du procédé et fournissent l'ensemble des données statistiques nécessaires au transfert industriel.

Action commerciale préindustrielle

Parallèlement aux travaux de R&D, le consortium mène une action d'information soutenue auprès des laboratoires de physique : comptes-rendus d'avancement réguliers lors de séminaires au CERN, multiples présentations et communications dans les congrès internationaux. Cette politique contribue à resserrer les liens entre consortium et physiciens des particules et suscite des développements destinés à l'espace ou au nucléaire civil.

En décembre 1993, le consortium organise un cours de formation pour les utilisateurs œuvrant au LHC. Début 1994, le CEA fournit le premier lot « durci » à la communauté LHC, sous une forme qui permet de partager la surface d'un lot entre de nombreux utilisateurs. Succès de ce premier lot. Un second est fabriqué courant 1994, puis trois en 1995 et

encore trois autres en 1996, lots sur lesquels 21 laboratoires européens, américains et japonais conçoivent et testent des composants ou circuits. Dès la fin 1996, certaines architectures développées par ces laboratoires sont proches de leur version définitive et certains circuits intègrent jusqu'à 1 million de transistors sur des surfaces atteignant 85 mm².

TRANSFERT INDUSTRIEL ET STABILISATION

Mi-1995, la filière DMILL est stabilisée au LETI ; il est temps de la transférer vers l'industrie. Mais en 1994, en proie à des problèmes internes, Thomson-TCS s'est retiré du consortium. Le CEA, parmi plusieurs industriels intéressés, sélectionne l'industriel nantais Matra-MHS, avec lequel il signe en septembre 1995 un accord de transfert industriel et de licence d'exploitation de DMILL. MHS s'engage à fabriquer cette filière, à la commercialiser et la maintenir en production jusque en septembre 2005 au moins.

Pourquoi MHS ? C'est un fondeur spécialisé dans la production de circuits durcis et sa dimension est bien adaptée aux marchés visés par DMILL. Il s'intéresse à DMILL pour ses applications LHC, mais également pour ses applications dans l'industrie spatiale, nucléaire civile et de défense. Enfin, il peut implanter DMILL sur une chaîne de fabrication standard. Le transfert industriel et la stabilisation de DMILL chez MHS devaient durer 18 mois. Ce sera plus long car MHS, nouvel arrivant, doit faire son apprentissage.

Au printemps de 1997, la stabilisation est acquise à 95%, et les résultats sont suffisamment probants pour que MHS ouvre DMILL aux laboratoires de physique afin qu'ils puissent poursuivre le développement de leurs circuits avant de les faire produire en grande série.

Fin juin 1998, plusieurs lots utilisant le procédé final sont achevés. Le CEA et MHS réalisent sur ces lots destinés à l'acceptation finale du transfert de la technologie un ensemble de tests approfondis donnant entière satisfaction. La compilation du résultat de ces tests et de ceux effectués sur l'ensemble des 43 lots réalisés par MHS entre le printemps 1996 et l'été 1998 confirme que la filière DMILL est parfaitement stabilisée et adaptée aux besoins du LHC.

Il est ainsi possible d'annoncer en septembre 1998 lors du Workshop LEB, à Rome, l'aval par le CEA du transfert industriel et de la stabilisation de DMILL chez MHS.

DMILL est né.

CONCLUSION

DMILL est un projet né du « terrain » et développé par des hommes « de terrain » en vue d'applications demandées par le « terrain ». Les directeurs du CEA ont compris l'intérêt de ce projet. Ils ont fait confiance à ses initiateurs, leur ont apporté les ressources matérielles et humaines nécessaires, et prodigué conseils et soutien. Le CEA a apporté à ce projet l'organisation et le terreau scientifique et technique indispensable.

Pour les techniciens, ingénieurs et physiciens qui l'ont vécu, ce projet a été une aventure technique et humaine exceptionnelle. Aventure technique extrêmement délicate consistant à développer puis industrialiser une filière améliorant de plus d'un facteur 10 les meilleurs durcissements connus. Aventure humaine édifiante, car il fallut construire une unité de vue, un respect et une camaraderie indispensables pour rassembler, canaliser, faire fructifier compétences et créativité de chacun. Ainsi furent vaincus doutes et difficultés techniques puis vint le succès.

DMILL s'est fait une large place au LHC. MHS fabrique et commercialise DMILL pour la physique des particules, l'industrie aéronautique et spatiale et l'industrie nucléaire civile en Europe, aux États-Unis et au Japon. MHS a par ailleurs récemment démontré que DMILL présente des performances exceptionnelles à haute température qui devraient lui ouvrir de nouveaux marchés dans l'industrie des pétroles et dans l'industrie automobile. Mais avant de placer des puces DMILL sous le capot de nos voitures, MHS devra parvenir, tout en conservant leurs performances exceptionnelles à haute température, à supprimer le durcissement aux radiations pour ne pas disséminer des composants durcis aux quatre coins de la planète !

Martin Dentan (SEI)

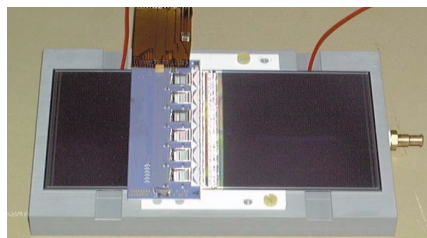


Figure 5 : Module de test du détecteur « Silicon Strip » du SCT de ATLAS. Le détecteur « Silicon Strip » (en noir sur la photo) est formé de deux parties mises bout à bout ; il rassemble 6 x 128 diodes ruban de 12 cm de long et 16 microns de large, disposées parallèlement avec un pas de 80 microns. Six circuits ABCD (en blanc) sont hybridés sur ce détecteur via un support céramique (en bleu). Le SCT comportera 8176 détecteurs « Silicon Strip » et rassemblant au total 49056 puces ABCD.

EFFETS DES RADIATIONS ET DURCISSEMENT

EFFETS D'IRRADIATION SUR LES CIRCUITS INTÉGRÉS

• Effets cumulés :

- Les rayonnements ionisants produisent dans les oxydes des charges électriques qui modifient les caractéristiques de transistors et entraînent des courants de fuite parasites. Les circuits se dégradent puis cessent de fonctionner.

- Les particules lourdes (neutrons, protons, ions) provoquent des défauts cristallins dans les semi-conducteurs qui modifient certaines caractéristiques de transistors.

• Effets transitoires :

Les forts flux de particules chargées engendrent des « photocourants » dans les circuits intégrés.

• Effets de particules individuelles fortement ionisantes :

Une particule unique très ionisante (proton ou ion) produit le long de sa trace un plasma conducteur responsable d'effets isolés : claquages ou courts-circuits, tous deux destructifs ; basculement d'un point mémoire (SEU), ou erreur dans un circuit logique, etc., non destructifs mais entraînant des erreurs graves au niveau système.

• Unités :

- La *dose* est l'énergie déposée dans la matière par unité de masse. Unité officielle : le Gray (1 Gy = 1 joule par kilogramme). Unité usuelle : le rad (1 rad = 0.01 Gray).

- La *fluence neutron équivalent 1 MeV* représente la quantité de neutrons d'énergie exactement égale à 1 MeV qui produirait dans le silicium la même densité de défauts cristallins que celle produite par une fluence donnée de particules lourdes quelconques (neutrons, protons, ou autres).

DEUX APPROCHES COMPLÉMENTAIRES POUR DURCIR UN CIRCUIT

Au niveau technologique : choix d'une technologie durcie aux radiations ;

• Le durcissement vis-à-vis des effets cumulés résulte de procédés de fabrication spéciaux (composition chimique et mode d'obtention des matériaux constitutifs) et de structures de composants spéciales.

• Le durcissement vis-à-vis des effets transitoires et individuels est obtenu principalement par l'isolation diélectrique entre composants et par la réduction du volume de silicium contenant les composants. L'isolation latérale entre composants, autrefois obtenue avec un procédé « mesa » (de l'espagnol « plateau ») au moyen de gravures

larges entre composants (*figure 1*), est aujourd'hui obtenue avec un procédé « planar » standard au moyen de fines tranchées diélectriques séparant les composants (*figures 2 et 3*). L'isolation verticale est obtenue par l'emploi d'un substrat dans lequel une mince couche d'oxyde sépare la couche de silicium de surface contenant les transistors (épaisse de 0,5 à 1 micron) du reste du silicium (environ 500 microns).

Au niveau circuits : emploi d'architectures conçues pour être peu sensibles aux effets cumulés ou aux erreurs logiques, et optimisation de l'implantation des circuits pour réduire les risques de courts-circuits.

Terminologie

• Le terme « *durcissement aux radiations* » peut concerner aussi bien la résistance à la dose, au débit de dose, aux particules lourdes, ou aux effets isolés. Il s'emploie indifféremment pour des composants tenant 1 Mrad comme pour ceux qui tiennent plusieurs dizaines de Mrad.

• Le terme « *tolérance aux radiations* » concerne les technologies dont le durcissement est de l'ordre de 100 krad (applications spatiales).

• Certaines technologies non intentionnellement durcies peuvent présenter une résistance à certains effets d'irradiation. Cette robustesse fournie permet la sélection de composants commerciaux tolérants aux radiations destinés à des applications faibles doses. La tolérance aux radiations de tels composants n'est l'objet d'aucune garantie ; elle est aléatoire et fluctue de lot à lot. Leur utilisation présente donc un risque qui doit être évalué par des tests radiatifs complets effectués sur chaque lot.

Martin Dentan (SEI)

Se renseigner soigneusement sur la signification de ces termes, pour chaque technologie !

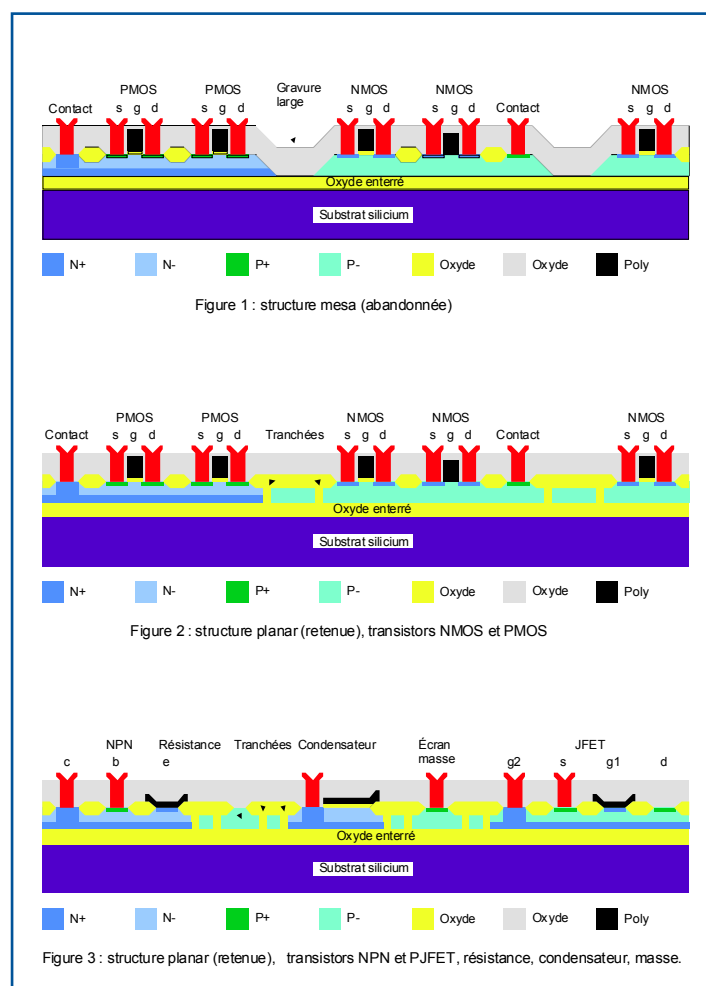


Figure 1 : Structure " Mesa " (abandonnée)

Figure 2 : Structure planar (retenue), transistors NMOS et PMOS

Figure 3 : Structure planar (retenue), transistors NPN et PNP, résistance, condensateur, masse

Le SDA : un nouveau service qui fait (déjà) des étincelles

Un nouveau service du DAPNIA, le SDA (Service de Déclassement des Accélérateurs, voir ScintillationS n° 42), vient d'être créé cette année. Sa mission « officielle » : le déclassement de deux « Installations Nucléaires de Base » : les INB 43 (l'ALS, voir ScintillationS n° 1) et 48 (Saturne, voir n° 28, 30, 34, 39).

Mais au delà de ce déclassement qui regroupe tout un ensemble d'activités se profilent d'importants enjeux pour l'avenir de notre département. Environ 20 personnes du SDA se consacrent à cette tâche, sans compter une partie du personnel du SEA encore attachée aux installations de l'Orme des merisiers.

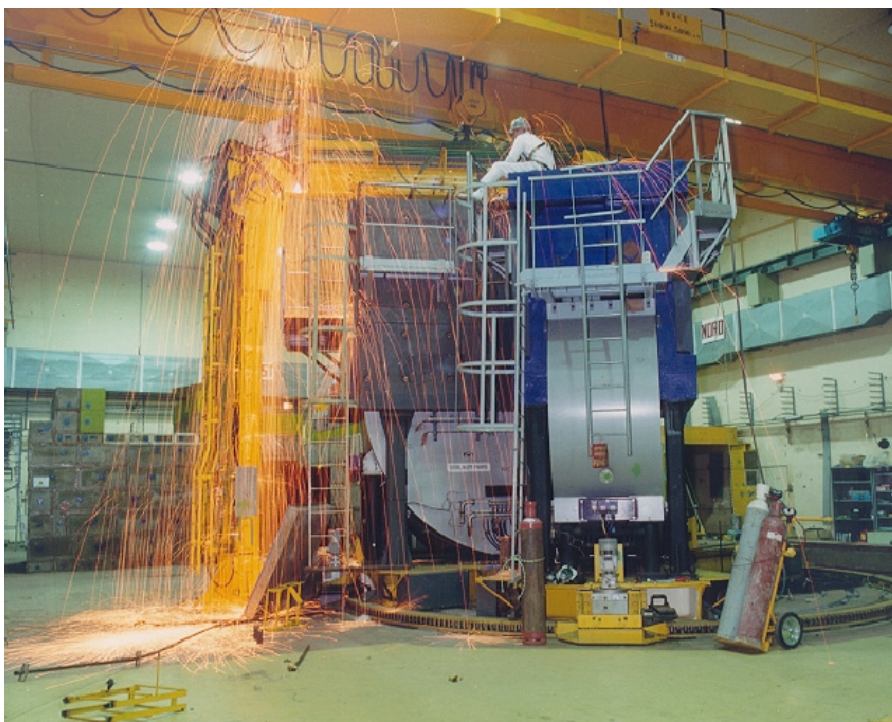
Pourquoi des INB dans un département de recherche fondamentale en physique ?

En fait, les accélérateurs, à cause des rayonnements engendrés par le faisceau, sont assujettis à la réglementation des installations classées, au même titre qu'un réacteur nucléaire. C'est entre autres l'assurance que tous les déchets qui sortiront de ces installations seront contrôlés et suivront les bonnes filières d'élimination. Cela était particulièrement vrai pour deux « gros » accélérateurs comme Saturne ou l'ALS il y a une trentaine d'année, mais de nos jours, des projets plus petits comme MACSE ou IPHI ne seraient pas tenus à une démarche aussi lourde. La législation a heureusement évolué et prévu des cas intermédiaires, aux noms tout aussi indigestes (par exemple « Installation Classée pour la Protection de l'Environnement, à Caractère Radioactif »), mais à la gestion administrative plus légère. Tout est une question d'intensité et de puissance du faisceau !

Les enjeux du déclassement

C'est la première fois au DAPNIA, et même à la DSM, que l'on doit démanteler d'un coup deux gros accélérateurs. Apporter les preuves que l'on est capable de le faire, et de bien le faire, est une véritable assurance pour l'avenir et concerne tout nouveau projet (comme IPHI par exemple, voir ScintillationS n° 39), car désormais nous sommes tenus de prévoir cette opération dès la conception des installations. Autant dire que le retour d'expérience sera important, tant sur le plan de l'estimation des coûts que sur la conception même des nouveaux accélérateurs.

Autre problème concret : bien que l'ALS ne soit plus en fonctionnement depuis 1990, son « INB » héberge encore un grand nombre de manip, qui n'ont d'ailleurs pas toutes trait aux accélérateurs puisqu'en plus des expériences du SEA, ces bâtiments reçoivent celles du SPhN, du SAp ou du LSCE. Tous les fluides (eau, gaz, électricité) sont également gérés par les agents de l'INB, mais leur rôle ne se borne pas à jouer les « hôteliers » : ils



La Salle HE3 en cours de déclassement (photo prise en juin 1999)

sont en charge de tout l'aspect sécurité et sûreté. Label « nucléaire » oblige, nous sommes soumis à des règlements très contraignants, et le démarrage de toute nouvelle expérience devient très lourd.

Pour ce qui est de la conception de ces deux machines voici un exemple de détails auxquels on n'a pas pensé dans le passé : l'INB de l'ALS regroupait généreusement toute une série de bâtiments comme la chaufferie par exemple, qui étaient séparés du tunnel de l'accélérateur par l'équivalent de deux étages de béton, terre, ... et même par une route. Même chose pour la plupart des bureaux. Il en est de même à Saturne : le magasin lui-même fait officiellement partie de l'INB. Imaginez le casse-tête lorsqu'on veut sortir le moindre bout de ferraille : il faut faire les mesures, les faire valider, demander les autorisations, attendre les signatures... La leçon est vite tirée : à l'avenir mieux vaut choisir un périmètre d'installation un peu plus réaliste !

En trente et quelques années, bien des choses ont bougé, et il y a toute une histoire

à reconstituer. L'aspect technique de ce travail d'« historien » est on ne peut plus sérieux puisqu'une thèse en cours sur ce sujet semble appelée à devenir un document de référence. Voyons les choses plus en détail.

Le « Zonage déchets » : exercices et applications

La première chose à faire pour entreprendre la « déconstruction » d'une INB en général, et d'un accélérateur en particulier est d'établir un zonage : on ne va pas traiter de la même façon un collimateur exposé au faisceau basse énergie de l'injecteur et les fentes d'analyses des salles d'expériences, soumises à la pleine puissance du faisceau. En général on détermine trois zones : « contaminante », « non contaminante » et « sans radioactivité ajoutée ». Le mieux, on l'a vu, c'est de le prévoir dès la conception de l'installation pour n'avoir à gérer avec les procédures les plus lourdes que des zones restreintes et bien déterminées. Il faut ensuite s'assurer que rien ne change de

Les différentes filières de traitement des déchets suivant la zone

	Zone contaminante	Zone non contaminante	Zone sans radioactivité ajoutée
Type de contrôle	Mesures par le SRI ou le SDA	1 ^{er} contrôle par le SDA, 2 ^e contrôle par le SPR	Simple contrôle par le SDA
Si non radioactif	Stockage sur le site	Déchet conventionnel après 2 ^e contrôle	Déchet conventionnel après 2 ^e contrôle
Si radioactif	Mesure par le SRI ou le SDA Filière 1, 2 ou 3 selon l'activité	Fiche d'anomalie, Mesure par le SRI Filière 1, 2 ou 3 selon l'activité	Fiche d'anomalie, Mesure par le SRI Filière 1, 2 ou 3 selon l'activité

Filière 1 : 1,2 fois le bruit de fond du détecteur < Activité mesurée < 1 Bq*/g : stockage sur le site

Filière 2 : 1Bq/g < Activité mesurée < 100 Bq/g : « TFA » (très faible activité) : stockage à Cadarache

Filière 3 : Activité mesurée > 100 Bq/g : stockage géré par l'ANDRA

zone sans la procédure adéquate. Dans les cas qui nous préoccupent (ALS et Saturne) ce travail n'a pas été fait ; il faut donc reconstituer les conditions de l'époque, puis délimiter les trois zones pour chaque site. Ainsi, les gens du SDA vont d'abord se transformer en historiens, voire en archéologues. Beaucoup de traces écrites ont disparu, la plupart des acteurs sont partis, et pourtant nos archivistes maison sont en train de reconstituer l'histoire de tout ce qui se trouve dans les tunnels et alentours. À partir de ce scénario, on peut estimer les doses reçues, la radioactivité des divers composants et équipements qui en découle, et avancer un premier classement dans l'une des trois zones. Bien sûr, des mesures viennent corroborer ces estimations, et jusqu'à présent elles ont toujours confirmé les prédictions. A ce stade, le découpage par zone a été soumis aux autorités de sûreté, qui doivent l'accepter avant que ne puisse commencer le démontage.

Règlements, qualité et tournevis...

Le démontage d'une INB, ce n'est pas seulement prendre son tournevis et sa scie à métaux. Les règles de sûreté nous obligent à le faire dans le cadre d'une « démarche qualité », sous la contrainte de règlements très exigeants. Tout doit être fait selon des procédures rigoureuses qui auront fait l'objet d'acceptation par les autorités de sûreté. Arriver à rédiger des procédures simples qui soient, « utiles, utilisables, et utilisées », et qui soient compatibles avec l'ensemble de la réglementation, relève de la gageure. Mais il semble que l'équipe qualité du SDA s'en tire parfaitement, de l'avis même des utilisateurs des procédures.

Où en est-on aujourd'hui ?

- On reconstruit le toit de Saturne effondré sous la neige fin 1998 : avant de pouvoir déclasser une installation, il faut remettre les murs (le toit !) en état.

- On assainit « HE3 », ancienne salle d'expérience « haute énergie » de l'ALS.

MIRABELLE 98... UN AN DÉJÀ

Par une chaude après-midi, il y a un an, des anciens de Mirabelle (voir n° 26 et 27) et leur famille débarquaient à l'aéroport Sheremietievo 2 près de Moscou. Après les incontournables et toujours aussi longues formalités de débarquement, nous retrouvions nos hôtes dont Isabelle notre première interprète. Le trajet Moscou-Protvino nous sembla aussi long qu'il y a 30 ans, mais les bus de l'Institut ne sont pas de la première jeunesse et la circulation sur le périphérique de Moscou ce vendredi soir n'avait rien à envier à celui de Paris.

Malgré une arrivée tardive à Protvino, nous étions attendus impatiemment : banderoles de bienvenue, drapeaux, nos amis russes d'hier et d'aujourd'hui. De jeunes Russes étudiant le français aidèrent chacun à remplir sa fiche d'hôtel et à trouver sa chambre dans les douze étages de l'hôtel Protva. Après une rapide collation, tout le monde partit se coucher, les organisateurs fort tard dans la nuit car ils devaient avec nos collègues Russes mettre la touche finale au séjour des 91 personnes du groupe.

Le lendemain, pendant que certains prenaient dès l'aube la longue route pour

- On prépare tous les dossiers « CDA » (Cessation Définitive d'Activité) et « MAD »** (Mise à l'Arrêt Définitif) de Saturne (1999) et de l'ALS (2000).

Conclusion

Démarrer un démantèlement d'accélérateur est une première au DAPNIA ; c'est une expérience que l'on peut d'ores et déjà intégrer dans la conception de machines futures. La démarche qualité requise pour le déclassement de ces deux INB, constituera en soi un retour d'expérience dont notre département saura recueillir les fruits.

Claire Z. Antoine (ScintillationS),
Jean Pierre Jacob et Jean-Marc Joly (SDA)

* Bq : abréviation de becquerel, unité de radioactivité.

Un becquerel représente une désintégration par seconde.

** Pour le Module d'Accélération par Cavités Supraconductives pour des Electrons, c'est MAD MACSE (Ce n'est pas une NDLR).

Moscou, les autres flânaient dans Protvino, la comparant à leurs souvenirs, visitant l'immeuble et les hauts lieux de leurs exploits d'antan, traversant la Protva sur le fameux pont toujours en service... Suivirent deux jours d'activités « officielles ». D'abord une grande « shachlik-party » réunissant tous les anciens de Mirabelle, russes et français, chaleureuse malgré un temps maussade, pleine de souvenirs et de confidences. Le lendemain, ce fut la réception officielle avec inauguration du souvenir de Mirabelle : le Piston Froid* « cœur de Mirabelle » comme l'indique la plaque soudée dessus. Après force discours, Pierre Prugne fut fait docteur Honoris Causa de l'IPHE (Institut de Physique des Hautes Énergies). Le tout fut couronné par un spectacle des jeunes de l'école de danse et naturellement par un grand banquet.

Le reste de la semaine passa bien trop vite en visites diverses : Moscou, Zagorsk, Toula, Serpoukhov, avec un temps fort : la « Cité des Étoiles » dans la banlieue de Moscou. Cette visite rarement accordée fut rendue possible grâce à nos amis de l'IPHE. Elle restera pour beaucoup un événement exceptionnel. Certains aperçurent

notre cosmonaute nationale Claudie Andrée-Deshays en vélo. Une dernière réunion amicale avec nos amis russes et c'est le cœur un peu gros et quelques larmes au coin des yeux que nous sommes repartis vers Paris après cette semaine bien remplie laissant certains d'entre nous visiter Saint-Petersbourg.

Quel bilan dresser un an après ce mémorable voyage ?

Ce voyage entièrement financé par les participants a permis, grâce à une gestion rigoureuse et surtout un change des plus avantageux, de faire venir en France en juillet dernier aux frais du groupe cinq jeunes de Protvino avec leurs accompagnateurs dont Georgy Malitsky, notre « GO » russe. Ce séjour de trois semaines leur a



permis de visiter Paris accueillis et guidés par des familles de jeunes Français étudiant de Russes au lycée d'Antony puis de découvrir la Bretagne, la Normandie et l'Auvergne dans des familles d'anciens de Mirabelle.

Autre retombée : le parc en face de la Maison de la Culture de Protvino s'appelle désormais « Parc Mirabelle ». Le Piston Froid (photo) y a été installé sur un socle ainsi que deux plaques émaillées comme celles des rues de Paris pour rappeler en français et en russe la mission Mirabelle en URSS de 1968 à 1984.

Cet article est dédié à Lily et François Florès récemment disparus.

Josette Le Bars et Daniel Cacaut
(STCM)

* Le Piston Froid est celui qui fut utilisé en premier sur Mirabelle puis devenu pièce de rechange.

Va-et-vient

Mai 1999 - Paul Delecroix (STCM) et Michel Mottot (SEA) partent en retraite. On la leur souhaite longue et pleine d'activités joyeuses. Michel Arnaud (SED au STCM) et Charles Lyraud (STCM au Sap) mutent dans les joies du changement (NDLR).

Juin 1999 - Par une lettre de mission datée du 29 juin 1999, Michel Spiro est chargé de mettre en place une organisation mixte DSM-IN2P3 dans le domaine des astroparticules et des neutrinos. Pascal Debu lui succède à la tête du SPP. Bonne chance à tous deux

Juillet 1999 - Félicitations à Muriel Boyer (DAPNIA/DIR) et à Philippe Briet (SEI) qui passent annexe 1. Les retraités du mois à qui l'on souhaite plein de félicités : Claude Auerbach (SEI), René Bernard (SEI) Paul-André Chamouard (SDA) et Jean-Claude Sellier (SIG). Daniel Calet (SDA) et Bernard Tournesac (SEA) ont négocié leur départ. Tous nos vœux de réussite.

Cinq mutations ce mois, toutes en provenance de DSM/UGS : Catherine Desailly-Guyard va à la DIR du DAPNIA, Jean-Louis Laclare et Alban Mosnier, au SEA, Phu Nghiem, au Sap, et Malgorzata Tkatchenko au SGPI. Bienvenue à toutes et à tous et bonne chance aux agents qui mutent.

BRÈVES ... BRÈVES ... BRÈVES

Dix bougies pour 200 GeV (LEP « Phase 2 »)

Le 14 juillet 1989, le premier faisceau circulait dans le « Large Electron-Positron » (LEP) au CERN (voir *ScintillationS* n° 12). Un mois plus tard, on observait la première désintégration d'une particule Z (messager neutre de l'interaction faible, voir *ScintillationS* n° 42). Rappelons que dans ce gigantesque anneau, le plus grand du monde (27 km de tour), un faisceau d'électrons croise un faisceau de positons (électrons d'antimatière) de même énergie qui tourne en sens inverse*.

Dix ans plus tard, le 2 août 1999 à 11 heures 15 les deux faisceaux se croisaient avec chacun une énergie de 100 GeV (10^{11} eV), ouvrant ainsi un plus vaste domaine pour la chasse aux bosons de Higgs et aux particules supersymétriques. Le défi de l'an

2000 : optimiser l'énergie et la luminosité de la machine. Valeurs les plus probables : une énergie de 101 GeV par faisceau pour une luminosité de $1.2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Il est conseillé de relire l'article de Brigitte Bloch-Devaut : « Le LEP, Phase 1.5 » (n° 26 de *ScintillationS*) et joyeux anniversaire au LEP !

Source : *Élizabeth Locci (SPP)*

* Rappelons aussi que le même tunnel abritera un deuxième accélérateur de même taille, le Large Hadron Collisionner (LHC pour les intimes), où dans les débuts du troisième millénaire, des protons de 7 Téraélectronvolt (7×10^{12} eV) entreront en collision avec d'autres protons tournant dans l'autre sens avec la même énergie.

LA SCIENCE EN FÊTE

On remet ça les 23-24 octobre prochain. Des points de visites sont prévus dans tout le DAPNIA. Se renseigner auprès du correspondant communication de son service. Idées et bonnes volontés sont les bienvenues.

UNE FORMATION À L'INFORMATION

Des formations aux outils d'information professionnelle pour le scientifique sont actuellement proposées à Saclay et Grenoble, par la DIST et l'INSTN (formations IST). Objectif : familiariser le scientifique avec les multiples moyens d'informations actuelles, indispensables à toute stratégie et projet de recherche.

Au programme : exploitation des outils récents de navigation et bases de données sur les réseaux, choix des sources en fonction de la nature de l'information ciblée, formulation de requêtes, et valorisation des résultats.

Les prochaines sessions ouvertes devraient se dérouler du 29 novembre au 1er décembre prochains à Saclay. Notez que des sessions concernant les projets et la veille scientifique (formations ISP) sont également envisagées cette année, les dates ne sont pas encore définies.

Angèle Séné (DIR)

« PHYSIQUE 99 », 83^e Exposition de Physique

(du mardi 5
au jeudi 7 octobre 1999 à Paris
Expo - Porte de Versailles)

Depuis plus d'un siècle, l'Exposition de Physique est un succès et une référence pour l'innovation. La première eut lieu en 1877, exposant des appareils construits exclusivement dans les laboratoires. Le millésime 99 propose toute l'instrumentation de pointe issue des développements scientifiques les plus récents, de la physique en particulier, ainsi que tous les appareils utilisés dans la R&D des laboratoires publics et de l'industrie. Rendez-vous privilégié entre chercheurs et industriels pour échanger de l'information scientifique, technique et commerciale, déclencher de nouveaux projets, enrichir les projets en cours, l'exposition n'est pas qu'une offre étendue en matière d'instrumentation. C'est aussi des manifestations :

- Au stand de la SFP : *le Point Sciences* où des scientifiques de la SFP ou d'autres sociétés savantes présentes répondent aux

questions des visiteurs et, coordonné par la SFP, un *point d'information pour les jeunes physiciens* avec le concours de l'Association Bernard Grégory, un *Bar des Sciences*, animé par Marie-Odile Monchicourt (France-Info) et un *Cybercafé*.

- Des expériences sur le stand de la SFP et à proximité, avec le concours de plusieurs Écoles et Laboratoires : microscope à effet tunnel, ferrofluides, couches minces optiques, mesure de viscosité sans contact par lévitation, dépôt par évaporation dans l'ultravide...

- La remise du *Prix Yves Rocard*.

- Une *Table Ronde sur les Transferts Technologiques en Europe*, mardi 5, animée par Bruno Rougier (Radio France).

Des invitations circuleront dans les laboratoires. N'hésitez pas à les diffuser et à nous en demander si nécessaire. Il est fortement recommandé de se faire préenregistrer. Sans invitation, l'entrée est payante et le catalogue de l'exposition ne sera gratuit que sur présentation de la contremarque envoyée avec le badge. Après l'exposition, il sera payant.

L'Expo est sur le Web :

www.in2p3.fr/SFP/ et

www.electrophy.com

Sotiris Loucatos, (Ex-SPP, Commissaire
Général de l'Exposition)

DU NOUVEAU SUR LA MATIÈRE SOMBRE

Notre galaxie baigne dans un invisible halo dix fois plus massif qu'elle. Ces dernières années, deux équipes internationales : EROS (Expérience de recherche d'objets sombres) associant DAPNIA, Université d'Orsay, CNRS, Chili, Danemark, USA, et MACHO (Massive compact halo objects) américano-australienne (voir *ScintillationS* n° 16, 31 et 38), ont observé l'amplification temporaire de la lumière d'étoiles d'autres galaxies (petit et grand Nuages de Magellan). Cause possible : des objets sombres et massifs du halo agiraient comme des « loupes gravitationnelles » amplifiant la lumière d'étoiles extragalactiques lorsqu'ils s'interposent entre elles et la Terre au cours de la rotation de notre galaxie. Ces objets seraient des étoiles avortées, des « naines brunes », trop petites pour que leur chaudière thermonucléaire s'auto-entretienne, mais

assez massives pour dévier notablement les rayons lumineux. Le halo de notre Voie Lactée serait une sorte de clafoutis entièrement fait de naines brunes.

Accumulant les résultats depuis cette hypothèse, EROS s'est aperçu que si elle était exacte, on observerait trois fois plus de cas de surbrillance stellaire. Donc soit le halo est fait aussi d'autres objets ou particules, soit d'autres corps célestes étrangers au halo jouent à la loupe gravitationnelle. On soupçonne de petites étoiles des nuages de Magellan eux-même. Mais on envisage d'autres hypothèses.

La lumière n'est pas encore faite sur la matière obscure.

UNE COURONNE POUR UN SOLEIL

Avant d'aller fêter à Épernay tout proche (« Pop ! ») le rendez-vous du Soleil avec la Lune, l'envoyé spécial de *ScintillationS* a eu la chance, les nuages ayant eu l'amabilité de s'écarter pendant les deux minutes fatidiques, d'immortaliser sur sa pellicule le soleil noir couronné de lumière. Ni fleurs ni couronne, en revanche, pour son homonyme à particules sur lequel se sont accumulés nuages et propos nébuleux jusqu'à l'éclipser totalement. Mais peut-être pas définitivement ? *

* « Où trouver la lumière ? » angoisse un chercheur désynchronisé.

À « LURE », ah !, aigri ! (NDLR)



Joël Martin

CEA - DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : Joël FELTESSE

COMITÉ ÉDITORIAL : Joël MARTIN (porte-parole),
Claire ANTOINE, Pierre BORGÉAUD, François
BUGÉON, Rémi CHIPAUX, Nathalie COLOMBEL,
Thierry FOGLIZZO, Elizabeth LOCCI, Marc PEY-
ROT, Franck QUATREHOMME, Yves SACQUIN,
Angèle SÉNÉ, Thierry STOLARCZYK,
Christian VEYSSIÈRE

SECRÉTAIRE DE RÉDACTION : Maryline BESSON

MAQUETTE : Christine MARTEAU

MISE EN PAGE : TOTEM

CONTACT : Joël MARTIN

Tél. 01 69 08 73 88 - Fax : 01 69 08 75 84

E.mail : jmartin@cea.fr

Dépôt légal septembre 1999

6 !

