

# Prospective IN2P3 DAPNIA

*Groupe Accélérateurs et Grands Instruments\**

Synthèse des Contributions

*Alex C. Mueller et Pascal Debu, éditeurs*  
*5 Octobre 2004*

**"DRAFT"**  
**Version préliminaire en cours d'édition**

\* Participants à l'élaboration: P. Bambade (LAL), S. Bousson (IPNO), S. Chel (SACM), J.M. De Conto, P. Debu (SACM), J.E. Ducruet (?), J. Gao (LAL), M. Jablonka (SACM), Y. Karyotakis (LAPP), F. Kircher, W. Kozanecki (?), B. Launé (IPNO), P. Lutz (?), F. Meot (SACM), M.H. Moscatello (GANIL), A.C. Mueller (IPNO), O. Napoly (SACM), L. Serin (LAL), A. Tkatchenko (IPNO), G. Wormser (LAL), .....**liste à compléter**

## "EXECUTIVE SUMMARY"

L'évolution et les résultats récents des recherches en physique nucléaire et physique des particules montrent la nécessité d'intensifier les efforts de R&D dans le domaine des accélérateurs et permettent de définir quelques axes majeurs pour répondre aux besoins des projets futurs. Les rapports récents des comités internationaux qui représentent les communautés des physiciens (notamment NuPECC et ECFA pour l'Europe) décrivent les perspectives scientifiques de ces deux domaines et fixent les priorités pour les futures grandes installations.

Ce besoin en R&D sur les accélérateurs a été pleinement reconnu par la Commission Européenne à travers l'acceptation de tous les projets soumis (I3 CARE et EURONS, DS EUROTEV, EUROFEL, EURISOL et IP EUROTRANS) dans lesquels le Dapnia et l'IN2P3 ont pris des engagements forts et des responsabilités importantes. Ce volet de R&D complète les grands programmes en cours (LHC, IPHI, ALTO, APD SPIRAL2, cavités supraconductrices).

Dans le domaine des collisionneurs e+e- dans la gamme du TeV, la recommandation de l'ITRP de la technologie supraconductrice, entérinée par l'ICFA, place les équipes françaises en situation favorable pour jouer un rôle visible dans le design d'un futur ILC. Cette décision de la communauté conforte les engagements pris dans le cadre du 6<sup>ème</sup> PCRDT, et motive les axes de développements présentés : électro-polissage des cavités haut gradient et transfert industriel, coupleurs de puissance, instrumentation faisceau, zones expérimentales, dynamique faisceau. Une bonne part de ce programme est aussi directement motivée par les projets de source de lumière de 4<sup>ème</sup> génération, ce qui le rend encore plus attractif et moins risqué.

Dans l'éventualité où l'exploration d'un domaine d'énergie allant jusqu'à plusieurs TeV apparaîtrait scientifiquement essentiel au vu des résultats qui seront obtenus auprès du LHC et au vu de la durée très longue des développements de nouvelles techniques, il est nécessaire de contribuer au programme de R&D sur la technique d'accélération à deux faisceaux (CLIC/CTF3) : photo-injecteur, structures accélératrices, stabilisation des structures mécaniques, injecteur du faisceau test, dynamique faisceau.

Un équilibre doit être défini pour développer ces deux axes.

Depuis maintenant de nombreuses années, l'importance du développement de machines de protons (et hadrons) de haute intensité est avéré (notamment pour la production d'ions lourds radioactifs et la production de neutrinos pour la physique fondamentale, et pour d'autres domaines, réacteurs hybrides, sources de neutron, production de radio-isotopes). Les thèmes de R&D pour les prochaines années sont pour la plupart structurés au sein des projets du 6<sup>ème</sup> PCRDT : cavités supraconductrices en mode continu et en mode pulsé, cryo-modules complets, sources de puissance, pilote numérique RF, diagnostics faisceaux, sources, fiabilité, optimisation des coûts. La conception des cibles de production représentant un défi majeur, il faudra y affecter des efforts adéquats.

On peut noter la force et la cohérence de notre positionnement "national" sur la technologie supraconductrice sur ces deux types de machines, accélérateurs linéaires à

électrons et à hadrons, respectivement. Ceci constitue un atout aussi bien pour le TDR du projet ILC que pour SPIRAL-2 dont la prise de décision de construction est attendue.

Dans le paysage des accélérateurs circulaires, deux projets motivent fortement des développements spécifiques en cryo-magnétisme : aimants pulsés pour le projet FAIR à GSI, aimants à champ fort utilisant le Nb<sub>3</sub>Sn pour l'augmentation de la luminosité du LHC, et peut-être à plus long terme les collisionneurs de très haute énergie. Par ailleurs, les applications des aimants Nb<sub>3</sub>Sn dépassent largement le cadre des accélérateurs pour la physique des particules.

Dans le domaine des applications médicales, nos équipes doivent continuer de jouer le rôle d'appui et de conseil (rédaction d'APS), en particulier afin de transférer la technologie acquise.

L'ensemble de ces activités s'appuie sur les équipes constituées et sur des infrastructures qu'il faut exploiter et développer (comme le GANIL ou la plate-forme de recherche technologique sur les cavités supraconductrices SUPRATECH en Ile de France). Ces infrastructures exigent des investissements importants. Une stratégie concertée entre les deux organismes permet la mutualisation de moyens lourds et facilite la recherche de financements externes, auprès des régions ou de la commission européenne.

Ces dernières années ont vu une décroissance forte du personnel dans le domaine des accélérateurs. Le programme bien ciblé des années à venir et les engagements déjà pris exigent cependant le maintien des compétences associées, ce qui, compte tenu des nombreux départs en retraite prévus, demandera un réel effort de redéploiements et de recrutements. Ces mesures volontaristes assureront la continuité des activités et pallieront la grande fragilité actuelle dans certains métiers qui reposent parfois sur une seule personne. Cet effort doit être soutenu en amont par une politique de formation de physiciens accélérateurs.

## 1. Introduction

De nombreux projets en physique fondamentale et dans d'autres domaines nécessiteront le développement et la réalisation de nouveaux accélérateurs de particules. Les grandes exigences sur les caractéristiques des faisceaux délivrés demandent un important effort de R&D dans les technologies associées afin de démontrer la faisabilité des machines envisagées. Un aspect essentiel est l'optimisation du coût.

Dans ce qui suit, nous rappelons les projets qui intéressent ou qui sont susceptibles d'intéresser nos organismes de recherche et nous examinons les développements techniques nécessaires. Nous distinguons quatre grands axes :

- Collisionneurs  $e^+ - e^-$
- Faisceaux intenses de protons et de hadrons
- Machines circulaires et aimants à champs forts
- Projets liés aux applications médicales, à la lumière synchrotron et aux nouvelles techniques d'accélération

Nous faisons le point sur les engagements actuels de nos organismes et proposons une analyse des ressources nécessaires à l'ensemble de ces activités.

## 2. Projets de physique et applications à moyen et long terme

### 2.1 Collisionneurs $e^+e^-$

Après l'arrêt du LEP et du SLC, les trois collisionneurs  $e^+e^-$  en opération dans le monde sont des collisionneurs circulaires de basse énergie et de haute luminosité (usine) : PEP-II (SLAC) et KEKB (KEK) mettent en collision des faisceaux à l'énergie du  $Y(4s)$  et étudient la violation de CP dans le secteur des B, alors que DAFNE (Frascati) fonctionne à l'énergie du  $\phi$  pour étudier la violation de CP dans le secteur de Kaons.

A cause du rayonnement synchrotron, à la frontière des hautes énergies, le prochain collisionneur  $e^+e^-$  ne peut être qu'un collisionneur linéaire. Les deux projets envisagés sont:

- Le LC-TeV, capable d'atteindre des énergies jusqu'à environ 1 TeV avec une luminosité de l'ordre de  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Une telle machine a été recommandée par les comités internationaux pour les futurs accélérateurs en Europe, en Asie et en Amérique, avec une période de fonctionnement recouvrant partiellement celle du LHC.
- Le LC-multiTeV : Un collisionneur linéaire multi-TeV permettra d'explorer directement les phénomènes dans toute la gamme d'énergie du LHC.

A la frontière des hautes luminosités, il existe des projets de 'super-usines' à B, charme,  $\tau$ , et K. Ici on espère réaliser des progrès technologiques qui permettraient d'envisager des anneaux de collisions de basse énergie avec un gain de 1 à 2 ordres de grandeur sur la luminosité.

## 2.2 Faisceaux intenses de protons et de hadrons

De nombreux projets en physique et dans d'autres domaines nécessitent des faisceaux de protons ou de hadrons de très forte puissance ("multi-mégawatt") :

- *Faisceaux Radioactifs* : en perspective, la construction de SPIRAL2, l'extension du complexe d'accélérateurs de GSI/Darmstadt, et le projet européen Eurisol.
- *Augmentation de luminosité du LHC*, à l'horizon 2015.
- *Réacteurs hybrides (Accelerator Driven Systems)* : dans le prolongement des R&D du 5<sup>ème</sup> PCRD, PDS-XADS (Preliminary Design Study for an eXperimental Accelerator Driven System), les études sur l'accélérateur proposées dans le cadre du 6<sup>ème</sup> PCRD sont à présent centrées principalement sur la fiabilité, en vue de la réalisation d'un démonstrateur dans le 7<sup>ème</sup> PCRD.
- *Super-Faisceau de Neutrinos* : remplacement de l'injecteur actuel de protons de 50 MeV au CERN par un injecteur de 120 MeV, "LINAC4", plus intense, et construction du SPL ("Superconducting Proton Linac") qui permettra aussi la production de faisceaux intenses de K,  $\mu$ , anti-protons et de faisceaux de  $\nu_e$  par désintégration  $\beta$  de noyaux comme le Ne<sup>18</sup> ou l'He<sup>6</sup>.  
A plus long terme, ces développements peuvent déboucher sur une usine à neutrinos et un collisionneur à  $\mu$ .

D'autres disciplines peuvent profiter directement de la faisabilité de tels faisceaux, selon la demande et le financement :

- *Sources de Neutrons* pour l'analyse moléculaire par diffraction et pour l'irradiation des matériaux. Pour les irradiations on distingue les sources de neutrons de spallation (comme SPALLAX) et de "break-up" (comme IFMIF).
- *Production de radio-isotopes* à usage médical et industriel.

Ces projets, dont les délais de réalisation sont très différents, ont cependant le point commun de nécessiter un accélérateur injecteur similaire. En effet, aux puissances évoquées, les accélérateurs linéaires permettent de mieux contrôler les effets de la charge d'espace et les pertes de faisceau.

Les paramètres typiques pour ces applications sont les suivants :

		Puissance [MW]	Énergie [GeV]
Faisceaux secondaires	Neutrinos, muons	4	2
Ions radioactifs	avec des protons	.2	>.2
	avec des neutrons	5	1
Irradiation des matériaux	par spallation	10	1
	par break-up ("IFMIF")	2 × 5.4	.04
Matière condensée	avec des neutrons	5	1.3
Transmutation	Démo 100 MW thermique	5	.6
	Système industriel	10 à 20	.8 à 1

### 2.3 Machines circulaires et aimants à champs forts

Nous distinguons trois thématiques qui nécessiteront une augmentation de performance des synchrotrons actuels.

*En physique des particules*, les premiers résultats du LHC attendus vers 2009 conditionneront très fortement les directions à prendre quant à l'amélioration ou à la construction de nouveaux accélérateurs de protons : augmentation de la luminosité du LHC (SLHC), augmentation de son énergie (EDLHC), nouveau collisionneur de très haute énergie (VLHC). Le tableau ci-dessous résume les différents scénarios envisagés.

Machine	Énergie [TeV]	Luminosité [ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	Masse accessible [TeV]
LHC	14	$10^{34}$	6.5
SLHC	14	$10^{35}$	8
EDLHC	28	$10^{34}$	10
VLHC	40	$10^{34}$	13
VLHC	200	$10^{34}$	75

*En physique des neutrinos*, une voie possible consiste dans le développement des "β-beams" (voir aussi section 2.2) ce qui inclut une post-accélération pour atteindre des énergies très élevées. Ceci peut impliquer des profondes modifications de synchrotrons existants (PS, SPS, LHC) et nécessiter des anneaux d'accumulation et de décroissance.

*En physique nucléaire*, dans la voie de production de faisceaux radioactifs par fragmentation du projectile à haute énergie (1 GeV/nucléon), la construction de nouveaux synchrotrons est programmée (GSI, SIS 300) afin d'atteindre des luminosités plus élevées par accélération de bas états de charge. On notera que cette installation ne sera pas uniquement consacrée aux faisceaux exotiques mais aura aussi pour but de produire des faisceaux stables à haute énergie (25 GeV/nucléon), des faisceaux d'antiprotons et des faisceaux pulsés de courte longueur (20 ns) pour la physique des plasmas et pour des expériences en anneaux de stockage.

## 2.4 Machines médicales, de lumière synchrotron et pour les nouvelles techniques d'accélération

### 2.4.1 Les machines médicales

Les faisceaux de hadrons (neutrons, protons ou carbone) permettent le traitement des tumeurs cancéreuses (et d'autres malformations) en particulier, si elles sont inopérables ou pour lesquelles la radiothérapie conventionnelle est inadaptée. En France, trois centres sont opérationnels à Orléans (neutrons), Nice (protons) et Orsay (protons). Trois projets de grande envergure sont proposés aujourd'hui :

- La rénovation du Centre de Protonthérapie d'Orsay (CPO).

Le CPO a été intégré à l'Institut Curie et propose une rénovation complète qui lui permettra de rester parmi les trois premiers centres mondiaux de référence pour la protonthérapie (3500 patients déjà traités). Cette rénovation est basée sur un nouvel accélérateur (de type à définir) qui remplacera l'ancien synchrocyclotron cédé par l'IN2P3. Il aura pour objectif le traitement de 1000 patients par an (350 aujourd'hui) afin de répondre à la forte demande clinique. L'équipement comprendra un bras isocentrique et 4 salles de traitement.

- Les projets ETOILE (Lyon) et ASCLEPIOS (Caen).

Ils proposent une thérapie à l'aide de faisceaux d'ions carbone, complémentaire de la protonthérapie. Ils sont basés sur des cahiers des charges très similaires et notamment sur l'accélération par un synchrotron. Cette machine, typiquement d'énergie variable, permet la distribution dynamique du faisceau et l'irradiation conformationnelle tridimensionnelle. Les projets visent tous deux, à terme, le traitement de 1000 patients par an. Pour cela, chacun propose 3 salles de traitement (une avec bras isocentrique, deux avec faisceau fixe) ainsi qu'une salle de radiobiologie.

### 2.4.2 Machines de lumière synchrotron

Alors qu'entraient en service ou se construisaient les plus récentes sources de lumière synchrotron dites de "3<sup>e</sup> génération" on a assisté, dans le monde, à une floraison de projets et de lancements de machines relevant du concept de la "4<sup>e</sup> génération". Il s'agit de machines qui se distinguent par des performances nouvelles telles que :

- impulsions très brèves, de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de femtosecondes
- cohérence longitudinale et temporelle
- brillances crête et moyenne élevées

Ces machines ne reposent plus sur un anneau de stockage mais sur un accélérateur linéaire, seul capable, grâce à un ensemble d'innovations technologiques, de fournir les faisceaux requis. Ces innovations sont l'aboutissement de travaux de R&D entrepris depuis plus de vingt ans tels que le photoinjecteur, la compensation de charge d'espace, la compression longitudinale des paquets, la supraconductivité HF, la récupération d'énergie. Ces projets peuvent se classer suivant deux concepts :

- *Le LEL "SASE"* : schématiquement on peut le décrire comme un accélérateur linéaire suivi d'un ou plusieurs onduleurs. L'accélérateur peut être à température ordinaire (RT)

ou supraconducteur (SC) et, dans ce dernier cas, la HF peut être pulsée (P) ou continue (CW).

Projet	Labo	Pays	Type SC/RT	Régime CW/pulsé	E [GeV]	$\lambda$ [nm]	Situation
TTF II	DESY	D	SC	P	1	6	en construction
X FEL	DESY	D	SC	P	20	0.1	60% financé
LCLS	SLAC	USA	RT	P	14	0.15	financé
SCSS	KEK	J	RT	P	1	3.	en construction
BESSY	BESSY	D	SC	P/CW	2.25	1.	projet
4GLS	Daresbury	GB	SC	CW	0.6	10	prototype
SPARC	Frascati	I	RT	P	0.15	10	financé
SPARX	Frascati	I	RT	P	2.5	1.	étude
FERMI	ELETTRA	I	RT	P	3	1.	étude
MIT	Bates	USA	SC	CW	4	0.	étude
ARCenCI		F	SC	CW	0.7	0.	étude

- *Les machines à récupération d'énergie "ERL" (pour "energy recovery linac")* : les accélérateurs linéaires de ces projets sont supraconducteurs. Le faisceau délivré passe par une série d'onduleurs avant d'être ramené dans l'accélérateur en opposition de phase. On peut ainsi augmenter l'intensité du faisceau sans augmenter la puissance des sources HF.

Projet	Labo	Pays	E [GeV]	I [mA]	Situation
IRFEL upgrade	JLAB	USA	0.2	10	En construction
CHESS prototype	Cornell	USA	0.1	100	Projet
CHESS	Cornell	USA	5	100	Étude
LUX	Berkeley	USA	2.5	0.01	Projet
4 GLS	Daresbury	GB	0.6	100	Étude
ARCenCIEL		F	1.4	0.01	Étude
ERLSYN	Erlangen	D	3.5	100	Étude
JAERI FEL	Tokai	J	0.017	5	Fonctionne
KAERI		K	0.04	10	En construction

### 2.4.3 Les nouvelles techniques d'accélération

Les techniques d'accélération par Laser et Plasma font l'objet d'études et d'expériences importantes dans plusieurs pays, depuis plus de 20 ans. Des grands progrès ont été accomplis. Différentes méthodes ont été validées. En France, le laser de l'École Polytechnique, a permis les premières démonstrations d'accélération d'électrons injectés dans une onde de plasma



créée par la technique du battement d'onde (1986) et par la technique du champ de sillage (1995). Aujourd'hui on peut dire, pour résumer, qu'il est possible d'obtenir dans un plasma des champs accélérateurs de 10 à 160 GV/m sur une longueur de l'ordre de 1 mm.

Les différents groupes proposent maintenant des installations qui visent à accélérer des faisceaux d'électrons, spécialement adaptés, sur des distances de 1 à 10 cm. L'ambition, à terme, est d'obtenir 20 GeV sur 1 m.

Le domaine a évolué au rythme des progrès accomplis sur les lasers, en particulier pour les techniques de sillage, sur leur capacité de délivrer des impulsions très courtes (quelques dizaines à quelques centaines de femtosecondes) avec des puissances crêtes allant du térawatt jusqu'au pétawatt.

Pour atteindre des distances d'accélération centimétriques il faudra utiliser le guidage du faisceau laser au moyen de tubes capillaires ou d'un canal de plasma, la technique du guidage laser ayant déjà été démontrée expérimentalement pour les intensités requises.

Les différentes méthodes étudiées sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Techniques	Sigle	Gradient [GV/m]	Distance [mm]	Labo (France)
Sillage par paquet d' $e^-$ ou $e^+$	PWFA	0,18	1400	
Sillage laser	LWFA	1	2	LULI
Sillage laser auto-modulé	SMLWFA	200	1	LULI, LOA
Sillage forcé	FLWF	200	1	LOA
Battement d'ondes laser	LBWA	1	1-10	LULI

Les projets visent des applications telles que des sources d'électrons relativistes ultra-brèves ( $< ps$ ), intenses ( $\geq nC$ ), de bonne émittance et compactes. D'autres visent 1 GeV, qui pourraient servir pour la calibration de détecteurs, pour des sources de rayonnement au THz intéressant les physiciens de la matière condensée.

Pour le long terme, on peut se poser la question si ces méthodes d'accélération peuvent également satisfaire les demandes de la physique des particules à très haute énergie (collisionneurs) ou de physique nucléaire (faisceaux radioactifs intenses de courte durée). Un réseau de laboratoires ("ANAD") a été formé sur le premier sujet, dans le cadre de CARE et d'ELAN (Electron Linear Accelerator Network), auquel participent 4 groupes français avec 7 laboratoires européens. Au SLAC on étudie une expérience de "post-accélération" par plasma qui porterait l'énergie des faisceaux de 50 à 100 GeV.

### 3. Engagements actuels IN2P3 et DAPNIA

Le grand intérêt scientifique ou la forte "demande sociale" des projets évoqués ci-dessus ont depuis longtemps motivé des programmes dans lesquels les équipes "accélérateur" de l'IN2P3 et du DAPNIA sont déjà investis. Ci-dessous, nous distinguons les projets de machine et les travaux de R&D génériques. Ensuite, nous établissons la liste des Contrats Européens qui recouvrent complètement ou partiellement ces activités.

#### 3.1 Les projets de machine

- *LHC* : Les équipes du CEA et de l'IN2P3 participent très fortement à sa construction (210 hommes.ans), dans le cadre de quatre accords techniques :
  - *Accord 1* (DAPNIA), étude et réalisation de prototypes des masses froides des sections droites courtes, ainsi que transfert technologique et le suivi industriel de la fabrication des 400 éléments de série dans la société allemande ACCEL.
  - *Accord 2* (IPN Orsay): étude, conception et réalisation des plans d'ensemble des cryostats des sections droites courtes (360 unités pour les arcs, 64 unités pour les sections de suppression de dispersion, 50 unités pour les sections d'adaptation aux zones d'interaction), étude et conception des outillages d'assemblage des dipôles, suivi de la construction des enceintes à vide des dipôles
  - *Accord 3* (IPN Orsay) : sélection du capteur et étalonnage de 6000 thermomètres cryogéniques de contrôle.
  - *Accord 4* (CEA Grenoble) : Usines cryogéniques
  
- *IPHI* : injecteur de protons de haute intensité (jusqu'à 100 mA). Il est en cours de construction. Des tests de fiabilité pour application aux ADS sont prévus en 2006 et le transfert au CERN du "RFQ" (quadripôle radiofréquence) est prévu en 2007 comme élément du LINAC4 (DAPNIA, IPN Orsay, LPSC).
  
- *SPIRAL-II* : l'objectif actuel est la rédaction de l'APD afin de permettre une décision sur la construction dès 2004 (LPC, LPSC, DAPNIA, IPN Orsay, CENBG, IreS, CSNSM, GANIL).
  
- *TTF-2* : Électronique digitale rapide pour la protection de la machine, caractérisation et utilisation des signaux HOM, amélioration des systèmes d'accord à froid, moniteur de position et coupleurs de puissance (DAPNIA, LAL)
  
- *CTF-3* : Construction du Photoinjecteur et de l'injecteur de faisceau principal, contributions encore en cours de discussion (DAPNIA, LAL,...)
  
- *ALTO* : reconstruction d'une partie du préinjecteur du LEP sur le site du Tandem d'Orsay. Faisceau de 50 MeV pour le début 2006 (IPN Orsay, LAL)
  
- *SOLEIL* : Construction du module accélérateur supraconducteur, étude de l'installation cryogénique (DAPNIA)
  
- *INPHO* : Modifications de l'accélérateur linéaire SAPHIR utilisé pour des expériences d'interrogation photoniques sur des fûts de déchets (DAPNIA)
  
- *ARC-EN-CIEL* : Projet de source de rayonnement de 4<sup>ème</sup> génération (DAPNIA)

### 3.2 R&D générique

- Cavités supraconductrices et équipement RF associé :
  - *Pour les électrons* les objectifs sont le gradient accélérateur et l'industrialisation. Diverses optimisations sont recherchées : l'électro-polissage, le système d'accord à froid, les moniteurs de position, les coupleurs de puissance. Ces programmes sont motivés par TESLA/TTF et par les lasers à électrons libres en général
  - *Pour les protons*, dans le cadre de plusieurs projets (EURISOL, " $\beta$ -beam", SPL, XT-ADS, usines à neutrinos), l'IPN Orsay et le DAPNIA développent, dans un programme coordonné, deux types de structure : cavités elliptiques et cavités "spoke"

Ces programmes sont des axes stratégiques inscrits dans le 6<sup>ème</sup> PCRD (voir ci-dessous).

- Sources  $H^-$  et ions légers dans cadre du 5<sup>ème</sup> PCRD, notamment pour le SPL et SPIRAL-2 (DAPNIA)
- Bancs de cible-sources (SIRa, PARRNe), développements de faisceaux radioactifs (GANIL, IPN Orsay)
- Cibles de production des faisceaux secondaires de  $\pi$ , K,  $\mu$ , n
- "Work Package accélérateur" dans le programme "PDS-XADS" du 5<sup>ème</sup> PCRD, qui doit se prolonger jusqu'en 2005.
- JRA HIPPI, SRF, PHIN et NED dans I3 "CARE" : l'activité intégrée « Coordinated Accelerator Research in Europe » a démarré début 2004 et comprend notamment 4 "Joint Research Activities" pertinentes pour les accélérateurs d'électrons et de protons/hadrons de haute intensité :
  - *JRA "High Intensity Pulsed Proton Injector"*, dont l'objectif est l'établissement d'une technologie européenne dépassant les performances actuelles des injecteurs de protons de haute intensité pulsés.
  - *JRA "Superconducting Radio Frequency"*, pour l'accroissement des gradients et des facteurs de qualité des structures accélératrices supraconductrices pour les faisceaux d'électrons, et pour la recherche d'une plus grande fiabilité et pour le développement de techniques de fabrication fiables et moins coûteuses.
  - *JRA "Charge production with Photo-injectors"* pour le développement de photo-injecteurs pour les collisionneurs
  - *JRA "Next European Dipole"*, pour le développement de la technologie Nb<sub>3</sub>Sn en vue de la réalisation d'aimants d'accélérateurs à champ très élevé.
- JRA ISIBHI, SAFERIB et "Charge Breeding" dans I3 EURONS: l'activité intégrée European Nuclear Structure, est en instance de démarrage. Parmi ses 12 JRA, trois intéressent la R&D accélérateur:
  - *JRA "Innovative Sources for Intense Beams of Heavy Ions"*, pour le développement de sources ECR supraconductrices très performantes (intensités, états de charges) ou de coût réduit (aimants haut  $T_c$ )
  - *JRA "Safe Radioactive Ion Beams"* pour l'élaboration de critères et de mesures pratiques en vue de la radioprotection des nouvelles machines

- *JRA "Charge Breeding"* les multiplicateurs de charge derrière la source d'ions radioactifs sont essentiels pour l'optimisation des post-accélérateurs, et ce JRA vise l'augmentation de leur efficacité.

Encore dans le cadre du 6<sup>ème</sup> PCRD, nos laboratoires ont contribué à l'élaboration des propositions EUROFEL (Source de rayonnement de 4<sup>ème</sup> génération), EUROTEV (Etude générique de Collisionneur Linéaire), EURISOL (European Separation On Line, Radioactive Ion Beam Facility) et EUROTRANS (European Transmutator), et pour les deux dernières en tant que coordinateurs des tâches relatives à la R&D accélérateurs.

## 4. R&D identifiés dans les années à venir

### 4.1 Développements techniques pour les collisionneurs $e^+e^-$

*Les collisionneurs linéaires* : Les technologies des systèmes accélérateurs développées depuis 15 ans pour le LC-TeV, avec des buts ambitieux, sont maintenant jugées assez mûres pour être industrialisables et pour que les projets, avec des performances crédibles, soient chiffrables. Deux voies ont été étudiées en parallèle, basées respectivement sur des cavités accélératrices à température ordinaire en bande X (projets NLC-GLC) et supraconductrices en bande L (projet TESLA). Un processus pour choisir entre ces deux voies, mis en place suivant la feuille de route proposée par l'ICFA, vient d'aboutir à un choix en faveur de la technologie supraconductrice. Les efforts internationaux sur les collisionneurs linéaires vont maintenant être réunis et une équipe mondiale chargée de finaliser la conception doit être formée sous peu. La soumission d'un projet de collisionneur aux gouvernements est envisagée peu de temps après le démarrage du LHC.

*La technique d'accélération 'à deux faisceaux'*, basée sur l'utilisation d'un faisceau auxiliaire pour produire la puissance HF à 30 GHz, est développée au CERN (projet CLIC). Un programme de R&D y est mené dans le cadre d'une collaboration internationale. Le CERN, très mobilisé par la construction et par la préparation du démarrage du LHC, propose de renforcer cette collaboration pour avancer à 2010 la démonstration de faisabilité.

*Les anneaux de collision* ont énormément progressé ces dernières années, grâce d'abord à des prouesses technologiques (notamment dans le domaine de l'ultravide, de la radiofréquence et des asservissements), mais aussi grâce à une meilleure compréhension de nombreux phénomènes limitant leur performance (par exemple les optiques à fort couplage transverse, l'effet faisceau-faisceau ou celui des nuages d'électrons). Des projets d'amélioration visent à une augmentation significative de la luminosité : ainsi deux projets d'usine à B, 50 à 100 fois plus lumineuse que KEKB, sont étudiés aux États-unis et au Japon

Les activités prioritaires de plusieurs groupes pour les quatre années à venir sont déjà fixées par leurs engagements dans deux contrats européens du 6<sup>ème</sup> PCRD, CARE (activité intégrée, 2004-2008, approuvée) et EuroTeV (étude de conception, 2005-2007, en cours d'examen). D'autres sont indiquées ci-dessous dans l'esprit de ce qui précède.

#### 4.1.1. Contributions aux "linacs" supraconducteurs

*Pour les cavités supraconductrices* : IN2P3-LAL, IN2P3-IPNO, DAPNIA

- Optimisation de l'électro-polissage sur le plan de l'opérabilité, des coûts et des

- performances en gradients accélérateurs.
- Etudes des propriétés RF des matériaux supraconducteurs
- Optimisation des systèmes d'accord piézo-électriques.
- Conception RF des modules accélérateurs à base de superstructures (2 cavités par coupleur).

*Pour les coupleurs : IN2P3-LAL (financement CARE)*

- Développement de prototypes en vue de meilleures performances.
- Études de méthodes de conditionnement plus rapides.
- Études de techniques de réalisations industrielles économiques.

*Participation à TTF2 : DAPNIA*

- Électronique digitale rapide pour les systèmes de protection machine
- Caractérisation et utilisation des signaux HOM pour le contrôle des trajectoires.

*Instrumentation faisceau (DSM/DAPNIA) :*

- Moniteur de position RF de haute résolution et large bande, compatible avec un cryomodule accélérateur.

#### **4.1.2. Contributions aux zones expérimentales**

*Quadripôles supraconducteurs (DSM/DAPNIA) :*

- Conception d'une quadripôle supraconducteur Nb<sub>3</sub>Sn de large ouverture pour la focalisation finale.

*Interface détecteur-machine (IN2P3-LAL, DSM/DAPNIA) :*

- Il s'agit d'optimiser l'intégration entre la ligne de faisceau et le détecteur en vue de maîtriser le bruit de fond machine, favoriser les diagnostics nécessaires au réglages des paramètres du faisceau et assurer au détecteur les meilleures conditions. Les différents sujets d'étude couvrent une partie du programme du groupe de travail sur l'interface machine-détecteur de l'atelier européen de l'ECFA chargé d'étudier la physique au LC. Les trois premiers projets ci-dessous font partie intégrante de deux tâches de l'étude de conception EuroTeV.
- Validation des simulations existantes de la collision faisceau-faisceau (Guinea-pig, Cain) en comparant les ingrédients et algorithmes employés aux résultats de logiciels développés pendant la période de fonctionnement de l'accélérateur LEP-2 au CERN.
- Conception du transport optique permettant d'obtenir des dimensions transversales de l'ordre du nanomètre au point de collision et de l'algorithme et des diagnostics de la ligne en amont pour optimiser la luminosité et minimiser les différentes sources de bruit de fond, tels que le rayonnement synchrotron dans les derniers quadripôles de focalisation ou la rétro-diffusion des photons émis par les particules pendant la collision. Un programme de calcul matriciel et des simulations Monte Carlo sont utilisés. Cette tâche nécessite aussi d'étudier l'utilisation de collimateurs pour éliminer le halo du faisceau.
- Conception de la ligne d'extraction du faisceau après collision. Celle-ci est difficile car le faisceau est profondément dégradé en énergie et dans son espace de phase

transversal par l'interaction avec le faisceau adverse. Il est aussi très souhaitable de pouvoir extraire du faisceau sortant après collision des informations sur les conditions de l'interaction. Celles-ci sont importantes non seulement pour pouvoir mesurer les propriétés du faisceau en vue de faire de réglages, mais aussi pour estimer et réduire les systématiques dans certaines des mesures de physique très précises prévues au LC.

- Conception et étude en faisceau de l'instrumentation spécifique mise en œuvre dans la partie très à l'avant du détecteur, pour mesurer les propriétés du faisceau à travers des observables associées à l'interaction faisceau-faisceau, notamment le luminomètre à très petit angle.
- Polarimétrie: La connaissance précise de la polarisation des électrons est fondamentale pour les Futurs Collisionneurs Linéaires. Elle peut être mesurée par interaction Compton des électrons avec les photons d'un laser pulsé de grande énergie. Cette grande énergie peut être obtenue par résonance des photons dans une cavité Fabry-Pérot, dont le gain pourrait atteindre 10000, comme cela a été fait à HERA. Ceci pourrait aussi être une approche pour la conversion des électrons en un faisceau de photons, ou de positrons polarisés. Le travail de R&D proposé consiste à faire résonner une cavité avec un laser dont les pulses ont une largeur temporelle de l'ordre de la centaine de femto-secondes dans une cavité de grand gain. Cela n'a encore jamais été réalisé. Nous allons aussi étudier et mettre en œuvre les asservissements nécessaires pour maintenir la résonance dans une configuration géométrique proche de l'instabilité pour réduire au maximum la taille du faisceau laser dans la cavité. L'ensemble de ces réalisations se déroulera au LAL/Orsay.

#### **4.1.3. Contributions à la R&D sur le CLIC**

*Photo-injecteur (IN2P3-LAL, financement CARE) :*

- Étude et réalisation d'un photo-injecteur de forte intensité.
- Mesures des caractéristiques des faisceaux fournis par le photo-injecteur.

*Structures accélératrices de hauts gradients (DSM/DAPNIA) :*

- Méthodes de fabrication et de préparation de structures à hauts gradients : traitement thermiques de métaux réfractaires, ultra-vide
- Caractérisation des phénomènes de désorption en phase de conditionnement RF
- Technique du vide

*Dynamique Faisceau*

- Stabilité du faisceau secondaire de haute intensité en phase de décélération.

*Contribution à CTF3*

- Injecteur de 200 MeV du faisceau diagnostic.

#### **4.1.4. Développements intéressant tous les types de collisionneurs linéaire**

*Stabilisation structures mécaniques (IN2P3-LAPP)*

- Une luminosité supérieure à  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  ou même  $10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  ne pourra être atteinte que grâce à une taille de faisceau verticale très petite,  $\sigma_y = 1 \text{ nm}$  pour le CLIC, ou  $5 \text{ nm}$  pour TESLA. Les erreurs d'alignement des aimants, dues aux mouvements du sol ou aux vibrations induites par l'environnement, contribuent à augmenter l'émittance et à réduire la luminosité. Ces erreurs sont corrigées par un mécanisme de feedback basé sur le faisceau. Grâce à son timing, une machine froide est moins sensible qu'une machine chaude. Dans ce dernier cas, la tolérance sur la stabilité (au-delà de  $4 \text{ Hz}$ ) et l'alignement des deux derniers quadripôles sont très sévères dans le plan vertical, environ  $1/3$  de la taille des faisceaux, soit  $\sim 0.3 \text{ nm}$  pour le CLIC ! Une telle précision ne peut être atteinte que par une stabilisation active. Dans le cas d'une machine à technologie froide, plusieurs éléments critiques de l'optique doivent être alignés rapidement et aussi stabilisés afin d'assurer une grande luminosité intégrée. Le design du doublet final de quadripôles doit tenir compte du bruit culturel afin d'en minimiser les effets. Au LAPP, en collaboration avec les laboratoires de l'ESIA, le CERN, DESY, et SLAC un programme de R&D a démarré pour étudier ces problèmes de stabilisation. Il inclut l'étude de la réponse de capteurs sismiques commerciaux ou fabriqués maison, les algorithmes de feedback et les actionneurs. La stabilisation et l'alignement sont l'objet d'un des "work-package" de l'étude de conception EuroTeV. Le travail du LAPP est intégré dans cet effort.
- *Dynamique des faisceaux* (IN2P3-LAL, IN2P3-IPNO, DSM/DAPNIA) : Les calculs analytiques et les simulations de dynamique des faisceaux dans les différents projets de LC seront poursuivis en nous concentrant sur les instabilités (collectives ou non) dans les anneaux d'amortissement, sur la préservation de l'émittance dans l'accélérateur principal ainsi qu'au niveau du photo-injecteur. Le compétence dans ce domaines est actuellement constituée de quelques personnes dispersées dans plusieurs laboratoires. Il faut regrouper les efforts et encourager les collaborations autour de questions concrètes.

## 4.2 Contributions aux développements de super-usines

En ce qui concerne des projets de 'super-usines' à B, charme,  $\tau$ , et K, il n'y a pas de projet concret à signaler à l'heure actuelle. Le moment venu on devra s'interroger sur une participation à une R&D technologique permettant un gain important en luminosité pour des anneaux de collisions de basse énergie.

## 4.3 Développements techniques pour les machines à protons de haute intensité

Dans les années à venir de nombreux développements techniques et la réalisation de prototypes sont indispensables pour garantir les performances requises, voire la faisabilité même de ces futures machines. Une partie importante de la R&D sera également concentrée sur l'optimisation des aspects économiques et sur la minimisation des interruptions intempestives des faisceaux. Les activités identifiées de R&D sont :

- *Dynamique Faisceau* : les exigences de plus en plus grandes sur les caractéristiques des accélérateurs nécessitent le perfectionnement des codes actuels, et notamment de codes multi-particules performants.
- *Cavités fort champ en mode continu et en mode pulsé* : il s'agit en particulier de préciser le choix de la technologie des structures accélératrices parmi plusieurs types de cavités en cours de développement suivant les projets envisagés.
- *Cryomodules* : la construction de prototypes est nécessaire pour en démontrer la fiabilité et en mesurer les performances.
- *RF de puissance et coupleurs* : la question est ici de connaître le niveau de puissance réellement accessible.
- *Diagnostics* : des systèmes adaptés aux fortes puissances doivent être développés.
- *Pilote Numérique de RF* : il est important d'élargir nos compétences vers le pilotage numérique de la RF qui apporte une plus grande souplesse et de nouvelles fonctionnalités.
- *Cibles de production* : la conception de cibles pouvant supporter les puissances de faisceau envisagées est un défi majeur pour tous les projets. Le volume de cette activité dans nos laboratoires est pourtant assez faible (inexistante au Dapnia).
- *Collection et tri des particules secondaires* : problème très lié au sujet précédent.
- *Sources de particules chargées* :
  - H- : le développement d'une source ECR H- est original et mérite d'être poursuivi au vu des retombées potentielles (source permettant le fonctionnement sans interruptions fréquentes de l'accélérateur).
  - Ions lourds : développement de sources d'ions intenses et diversifiées pour les besoins de la physique nucléaire.

#### 4.4 Développements techniques pour les machines circulaires

- *Aimants à fort champ* : les accélérateurs de forte intensité, et notamment l'augmentation de luminosité du LHC, nécessitent, en particulier, une meilleure focalisation des faisceaux. La R&D Nb<sub>3</sub>Sn est pertinente pour le développement des accélérateurs futurs, entre autres nombreuses applications potentielles. La fabrication d'un prototype de dipôle devrait compléter le programme NED.
- *Aimants pulsés*: Si quelques prototypes d'aimant supraconducteurs pulsés ont été développés par les laboratoires européens au début des années 70, le seul accélérateur supraconducteur pulsé en fonctionnement est le Nucléotron à Dubna (Russie). La réalisation du complexe d'accélérateurs pulsés GSI à Darmstadt nécessite donc des développements conséquents, qui portent en particulier sur la réalisation d'un conducteur à faibles pertes, des modes d'échange thermique entre le bobinage et l'hélium très performants et sur la tenue mécanique des matériaux dans des structures soumises à un cyclage quasi permanent.

#### 4.5 Développements techniques pour les machines médicales, les machines de lumière synchrotron, les projets laser-plasma

##### 4.5.1 Développements techniques pour les machines médicales



Bien que reposant sur des techniques conventionnelles et bien maîtrisées, les machines médicales dans tous les cas feront fortement appel à l'expertise des organismes de recherche sur les points délicats que sont :

- *La cavité accélératrice* : Celle du projet de Heidelberg a fait l'objet d'un appel d'offre de GSI auprès de l'IN2P3 et sera réalisée par HITACHI. Celle du projet italien CNAO a été achetée au Laboratoire National Saturne
- *Le système d'extraction lente* par noyau bêta-tron (hadronthérapie) a été développé à Saturne. Son alimentation est un point délicat ainsi que sa réalisation
- *Les diagnostics*, afin de garantir le dépôt de dose en temps réel.
- *Les bras isocentriques* qui doivent intégrer la fonctionnalité du balayage latéral, pour lesquels des structures supraconductrices pourront être étudiées
- *Le système de délivrance du faisceau au niveau du patient* qui doit garantir un dépôt de dose localisé et homogène. A titre de d'exemple, le système dit "actif", qui seul permet des précisions submillimétriques, a été conçu en Allemagne et mis au point en plusieurs années sur l'établissement pilote de Darmstadt. En outre, l'accélérateur devra présenter une fiabilité et une disponibilité remarquables pour atteindre ses objectifs. Il devra disposer de réglages prédéfinis parfaitement reproductibles de manière à minimiser le temps de traitement.

#### **4.5.2 Développements techniques pour les machines de lumière synchrotron**

Les développements techniques qui ont permis l'éclosion des projets de source de quatrième génération sont loin d'être achevés. La principale raison en est que les demandes des utilisateurs continuent d'évoluer vers des impulsions plus courtes, des brillances et des courants moyens plus élevés, des longueurs d'onde plus courtes, des machines plus fiables et moins coûteuses. Le "design study" EUROFEL du 6<sup>e</sup> PCRD se donne précisément comme objectif d'aborder les différents problèmes posés :

- *Les photoinjecteurs* : Les lasers de commande auxquels on demande de fournir des impulsions rectangulaires en section transverse et en temps, une meilleure fiabilité; des matériaux des photocathodes à meilleure efficacité quantique et plus grande durée de vie. Les cavités des canons à courant d'obscurité réduit, à dissipation thermique plus élevée. Les canons HF supraconducteurs qui seuls permettront des courants moyens et donc des brillances moyennes élevés
- *La compression HF de paquet* qui permet de faire l'économie d'une chicane magnétique tout en préservant l'émission transverse.
- *Les diagnostics* de précision adaptés à des faibles émissions et à des paquets très courts
- *Les codes de calcul* qui prennent en compte avec une bonne précision les effets du rayonnement synchrotron cohérent, des champs de sillage, de la charge d'espace et soient correctement validés. Des codes aussi qui permettent de prédire les limites de stabilité dans les boucles de récupération d'énergie ou de réaccélération en tenant compte des modes supérieurs dans les cavités accélératrices.
- *Les cryomodules pour régime de HF continue* : Il s'agit d'augmenter d'un facteur de plusieurs dizaines la capacité de dissipation des cryomodules en service aujourd'hui et de même la tenue en puissance des coupleurs HF de modes fondamental et supérieurs.

#### **4.5.3 Développements techniques pour les expériences laser-plasma**

Dans un document de décembre 2003, B. Cros (LPGP) et J.-R. Marquès (LULI) ont présenté un projet basé sur deux installations :

- *Un laser dédié* au développement d'un accélérateur laser-plasma, consacré uniquement à la R&D sur ces techniques, tel que celui du Lawrence Berkeley National Laboratory (USA), unique exemple au monde. Il s'agirait d'un système laser multi-faisceaux, multi-térawatt avec une puissance crête de 100 TW et un taux de répétition de 10 Hz. Les compétences existent en France dans plusieurs laboratoires.
- *Un injecteur* aux performances optimisées pour injecter dans un module d'accélérateur laser-plasma. Il devra produire des faisceaux dans la gamme de 10 à 100 MeV avec une charge par paquets dans la gamme de 10 à 1000 pC et de durée de l'ordre de 50 fs. Il pourrait s'agir d'un photo-injecteur, à la limite de la technologie existante, par exemple selon un schéma nouveau proposé à l'Université de Eindhoven, dans lequel une impulsion de tension élevée et continue est appliquée entre une photocathode et la cavité accélératrice. Ce pourrait aussi être un système laser-plasma en régime non-linéaire.

Aucune de ces deux techniques n'est disponible "clefs en main" et des travaux de R&D seront nécessaires pour comparer leurs performances.

Le but de l'ensemble est de réaliser des expériences de validation des structures plasma pour l'accélération jusqu'au GeV, sur une distance de l'ordre de 10 cm. Il faudra étudier les oscillations transverses dans l'onde de plasma, l'effet de la charge du faisceau sur l'onde de plasma, les gradients focalisateurs et accélérateurs, l'émittance et la durée du faisceau. Indépendamment pourront aussi être étudiées des sources de rayonnement femtoseconde dans le domaine X (diffusion Thomson, émission synchrotron) ainsi que le domaine THz. L'investissement total est évalué par les auteurs à 10 M€.

Tout à fait indépendamment, dans le cadre du projet ARC-EN-CIEL, dans sa phase prototype comme dans sa phase complète, il est proposé d'utiliser à la fois le faisceau d'électrons et le laser de puissance comme une installation de test d'accélération laser-plasma.

## 5. Infrastructures

Cette recherche technologique s'appuie fortement sur des infrastructures techniques des laboratoires de l'IN2P3 et de la DSM : DAPNIA, GANIL, IPNO, LAL, LPSC, ...

Au GANIL : le banc de test SIRa permet le développement de cibles et de sources pour production de faisceaux radioactifs pour méthode ISOL et le Hall D contient l'infrastructure pour ions stables.

En région Île-de-France, une longue tradition de collaboration IN2P3/DAPNIA a conduit à l'installation d'infrastructures exploitées communément (autour de CRYHOLAB, grand cryostat horizontal de laboratoire) pour la R&D cavités. Cette situation évolue vers la mise en place d'une "plateforme de recherche technologique (SUPRATECH)", unique en Europe. Cette plateforme pourrait englober des infrastructures situées au DAPNIA, à l'IPNO, et au LAL. Son financement pourrait être assurée par les organismes, les fonds européens, des fonds régionaux, et une contribution du département. La plateforme réunit un laboratoire de traitement chimique et de rinçage haute pression des cavités, des salles blanches, des sources de puissance, un laboratoire pour le développement de coupleurs, des cryostats verticaux et CRYHOLAB.

D'autres infrastructures importantes complètent cette liste : Le pôle accélérateur du LPSC possède une infrastructure permettant tout développement de sources ECR, et de la R&D en dynamique faisceau et RF non-supra en s'appuyant sur l'ensemble des services techniques du laboratoire.

## 6. Ressources

Les forces existantes dans le domaine des accélérateurs ne sont plus aussi importantes que dans le passé. Elles sont aujourd'hui inégalement réparties sur 6 laboratoires : le DAPNIA/SACM (Saclay), l'IPNO (Orsay), le LAL (Orsay), le LPSC (Grenoble), le GANIL (Caen)

De très fortes compétences ont été acquises ou consolidées dans les techniques cryogéniques au cours des dix dernières années. Elles sont essentiellement regroupées au DAPNIA, et à l'IPNO mais il faut aussi mentionner le LAL qui s'est doté d'une nouvelle installation pour le développement de coupleurs de puissance pour TESLA et le LPSC qui contribue à l'étude des coupleurs de SPIRAL2. Elles concernent :

*Le cryomagnétisme* : le DAPNIA a perfectionné un savoir-faire acquis de longue date à Saclay et déjà mis en œuvre dans le passé pour la construction de l'anneau à protons de DESY ainsi que pour les grands détecteurs de LEP. C'est aujourd'hui un domaine d'excellence du DAPNIA. Les activités actuelles concernent en particulier une forte participation au LHC, avec dans le cadre de l'accord cadre numéro 1, l'étude et la réalisation de prototypes des masses froides des sections droites courtes, ainsi que le transfert technologique et le suivi industriel de la fabrication des 400 éléments de série dans la société allemande ACCEL. Le DAPNIA a aussi une contribution conséquente dans l'étude et le suivi de réalisation des deux grands aimants supraconducteurs pour les expériences ATLAS et CMS.

*La supraconductivité HF* : une collaboration DAPNIA-IPNO-LAL développe depuis plusieurs années les techniques d'accélération par cavités supraconductrices. L'effort porte sur les cavités d'accélérateurs linéaires (TESLA, EURISOL, XADS, SPIRAL 2) mais aussi sur les cavités d'anneau de stockage (SOLEIL, SLS, ELETTRA).

*Les techniques des basses températures* (cryostats et installations cryogéniques) associées à ces 2 domaines sont parfaitement maîtrisées ainsi que le démontrent la réalisation de CRYHOLAB (une installation de test des cavités), les contributions à l'APD SPIRAL 2 et les importantes contributions de l'IPNO à la construction du LHC.

La politique de relance de la R&D accélérateurs ne pourra être réellement mise en œuvre que par un effort concret pour maintenir les compétences nécessaires. Avec les nombreux départs récents et prévus dans les trois années à venir, plusieurs métiers risquent de disparaître, ce qui empêcherait même l'exécution des engagements actuels et réduiraient de façon majeure toute ambition future.

La pénurie dans certains métiers touche aussi bien le Dapnia que l'IN2P3. C'est le cas de spécialités telles que la RF de puissance (alors qu'elle est au cœur d'une R&D accélérateurs planifiée dans les contrats Européens du 6<sup>ème</sup> PCRD qui est très orientée vers les tests en puissance de modules accélérateurs), qui repose désormais sur un très petit nombre d'ingénieurs, ce qui fragilise les projets. La même situation existe pour l'ultravide ou la chimie des cavités. Par ailleurs, un fort déficit en physiciens accélérateurs généralistes se fait gravement sentir, ce qui risque de pénaliser nos organismes dans la mise sur pied de nouveaux programmes.

La nature des activités qui ont été décrites exige un support technique spécialisé. Ici, la situation au Dapnia s'est récemment dégradée avec le départ massif de techniciens dans le cadre des nouvelles conditions de départ à la retraite. Le recrutement rapide de techniciens dans plusieurs métiers est indispensable : mécanique, métrologie et vide pour les cavités, imprégnation/bobinage, mesures physiques pour les aimants d'accélérateurs. L'IN2P3 est un peu moins touché par ce déficit de techniciens spécialisés, mais il doit par ailleurs faire face à

une situation de manque important dans des domaines tels que le magnétisme et le contrôle-commande, métiers pourtant indispensables pour le développement des accélérateurs.

Ici, seront mis les tableaux faisant figurer les engagements actuels et une synthèse sur les ressources humaines par métiers et par projets. Les tableaux en cours d'élaboration sont pour le moment mis "en annexe" après la conclusion.

## 7. Positionnement de la communauté française (DAPNIA et IN2P3)

### 7.1 Les collisionneurs $e^+e^-$

L'effort de R&D accélérateur dans le domaine des collisionneurs  $e^+e^-$  doit s'inscrire dans le cadre de la stratégie mondiale pour construire le futur collisionneur. Le choix de technologie en faveur de la solution supraconductrice est idéal pour exploiter et valoriser notre important savoir-faire au niveau des cavités et des coupleurs, développé et mis en œuvre sur TTF mais aussi sur les modules RF pour SOLEIL et Super3HC. Nous pourrions également avoir un rôle important au niveau d'autres systèmes tels que les anneaux d'amortissement, les sources, la stabilisation des structures mécaniques, l'instrumentation, la dynamique faisceau, la focalisation finale, les asservissements et l'interface machine - détecteur.

Participation à la conception détaillée du LC-TeV :

Il est prévu qu'une équipe mondiale soit formée à la fin de l'année pour concevoir le LC-TeV de manière détaillée sur une période de plusieurs années. La communauté française doit s'intégrer de façon cohérente dans cette équipe dès le début. Cela favorisera notre participation au projet global et nous permettrait également d'accéder plus facilement aux importants financements européens, suivant l'exemple de CARE et d'EuroTeV. En contribuant au niveau de l'état de l'art mondial dans le domaine des collisionneurs  $e^+e^-$ , nous bénéficierons également d'une bonne préparation en vue d'une participation à un projet LC-multiTeV futur.

Participation à la R&D sur le LC-multi-TeV :

Même si la R&D sur le CLIC est un programme à plus long terme, il est important de continuer de le soutenir. Il est également souhaitable de concentrer nos efforts sur les domaines comportant des synergies, par exemple ceux qui ne sont pas directement liés à la technologie de l'accélérateur principal. Cette stratégie, déjà adoptée dans l'étude de conception EuroTeV, favorise les échanges d'idées, les transferts de technologies et le développement d'outils communs au sein de la communauté impliquée dans les deux projets.

Interface machine - détecteur :

Ce domaine, dans lequel nous sommes déjà actifs, présente un intérêt particulier car il permet assez facilement d'engager des physiciens des particules sur des activités proches de la machine. Il contribue ainsi à la formation de chercheurs avec une double compétence "physicien machine – physicien des particules" importante dans ce type de projet où l'accélérateur fait dans une large mesure partie de l'environnement expérimental qu'il faut maîtriser pour mener à bout les analyses de physique. Plus généralement il permet une plus grande pluridisciplinarité dans notre communauté et peut favoriser certaines mobilités thématiques.

Projets de super-usines à B, charme et K :

Les laboratoires de l'IN2P3 et du DAPNIA n'ayant pas contribué à la dernière série d'anneaux construits, nos équipes ont beaucoup perdu de leur savoir-faire dans ce domaine. Ces compétences existent néanmoins toujours en France dans la communauté de lumière synchrotron. La préparation d'une nouvelle usine à B aux performances inédites pourrait être l'occasion de faire rattraper une partie du retard à nos équipes. Une participation à la construction, conditionnée à une forte priorité de physique et à l'engagement d'une communauté française importante dans les expériences, n'est pas envisagée aujourd'hui. Par contre, il serait utile de s'associer à ces projets dans une perspective de

collaboration/formation, en ciblant les actions autour de projets à haute valeur technologique, impliquant du personnel en nombre limité, mais jeune et qualifié. On pourrait également envisager des thèses en co-tutelle. Cela permettrait un fort enrichissement de ces jeunes, d'autant plus que ces projets de super-usines sont accolés à des machines en cours de fonctionnement, permettant donc un contact direct avec la réalité opérationnelle. Des exemples possibles de collaboration sont la dynamique faisceau, l'ultra-vide et la HF. Les compétences acquises profiteraient aussi à d'autres domaines, par exemple les anneaux de refroidissement du collisionneur linéaire ou les sources de lumière synchrotron.

## **7.2 Les faisceaux intenses de protons et de hadrons**

Les études de machines à protons de forte puissance ont, dans un passé récent, constitué une activité importante de nos laboratoires (ASH, CONCERT/ESS). De plus, les développements et études auxquels nous participons dans le cadre de programmes européens (CARE/HIPPI, PDS-XADS, EUROTRANS, EURISOL) nous ont permis et nous permettront de maintenir les compétences pour les quelques années à venir. Il s'agit donc d'un axe fort de nos laboratoires. La plupart de ces acquis pourraient être valorisés -immédiatement pour certains- dans le cadre de projets tels SPL et EURISOL. Nos équipes pourraient fortement collaborer à ces projets (design de machine, livraison de sources de protons intenses, conception et réalisation du linac supraconducteur, régulation HF, participation à l'élaboration de certains diagnostics faisceau et des systèmes de protection de la machine, ...). Une implication d'envergure dans de tels projets -outre qu'elle est un aboutissement naturel des travaux entrepris depuis plusieurs années dans ce domaine,- permettrait là encore de proposer des sujets de thèse et de post-doctorat afin de former de nouveaux spécialistes, et participerait bien évidemment au maintien de compétences dans nos laboratoires. Le projet national de construction de SPIRAL-II s'inscrit évidemment dans cette logique de manière parfaite.

## **7.3 Les machines circulaires et aimants à champs forts**

L'augmentation des performances du LHC ainsi que la production de faisceaux intenses de neutrinos au CERN ou de noyaux radioactifs et d'antiprotons à GSI vont nécessiter des développements technologiques comme la réalisation d'aimants supraconducteurs à haut champ ou rapidement pulsés mais aussi imposer de pousser à leur limite les capacités des accélérateurs injecteurs existants ou de les remplacer. De plus, de nouveaux problèmes de dynamique liés à la forte intensité ou à la grande émittance des faisceaux devant être stockés devront être surmontés.

En ce qui concerne le LHC, la seule amélioration qui semble réalisable dans une dizaine d'années est l'augmentation de la luminosité (SLHC). Elle imposera un accroissement du nombre et de l'intensité des paquets accélérés et l'utilisation de nouvelles générations d'aimants à fort champ dans les zones d'interaction pour réduire la valeur du  $\beta^*$ .

Dans la suite de ce qui a été fait pour le LHC et dans le prolongement du programme européen NED, le DAPNIA et l'IN2P3 pourraient prendre en charge les développements et le suivi de réalisation industrielle de ces nouveaux aimants.

Le projet FAIR (Facility for Antiprotons and Ion Research) de GSI implique la construction de 5 nouveaux anneaux pour lesquels un programme important de R&D a été entrepris. L'effort majeur porte sur l'étude des aimants supraconducteurs rapidement pulsés devant équiper les anneaux SIS 100 et SIS 300 mais aussi sur la définition des systèmes de refroidissement par électrons de haute énergie.

Le DAPNIA est intéressé par la prise en charge des quadrupôles supraconducteurs pulsés de ces anneaux, sa prestation comprendrait une phase de développements, la construction et les essais de quelques prototypes puis le transfert technologique et le suivi de la réalisation industrielle. Des discussions dans ce sens sont actuellement en cours avec GSI. Mettant à profit l'expérience acquise à l'occasion de sa contribution à la construction du LHC, l'IN2P3 pourrait de son côté intervenir au niveau de la conception et du suivi de réalisation des cryostats et des systèmes cryogéniques.

En matière de conception de machines et de dynamique des faisceaux, les contributions de l'IN2P3 et du DAPNIA seront au cours des prochaines années essentiellement orientées vers les études de la facilité " $\beta$ -beam" envisagée auprès d'EURISOL. Il serait souhaitable de former de nouveaux spécialistes dans le domaine des machines circulaires pour pouvoir contribuer à des études pour le SLHC ou pour FAIR.

## **7.4 Les machines médicales, de rayonnement, de nouvelles techniques d'accélération**

### **7.4.1 Machines médicales**

Le projet du CPO se base sur une maîtrise d'œuvre déléguée pour la partie accélérateur et l'achat "clés en mains" à un industriel, car de telles machines existent déjà. Pour les autres projets (ASCLEPIOS et ETOILE), il n'existe pas de produit industriel, bien que SIEMENS se positionne sur le marché (via le projet d'Heidelberg).

Chaque projet nécessitera donc l'expertise du CEA et/ou du CNRS, et une collaboration étroite sera requise en phase APS (pour le CPO) et APD (pour les 3 projets) puis, notamment, au niveau des cahiers des charges, de l'expertise des solutions, du traitement des appels d'offres, du suivi de réalisation et de la recette.

Il serait souhaitable de préserver les compétences acquises sur les synchrotrons à ions (le dernier construit en France étant MIMAS), notamment sur la dynamique de faisceau, la RF ou les diagnostics.

Un suivi des projets en cours de réalisation doit être proposé, par le biais de collaborations, afin de former les jeunes ingénieurs aux machines médicales, et sur les thèmes évoqués plus haut (cavité, diagnostics et contrôle de dose, extraction lente, bras rotatif). Ceci permettrait de faire bénéficier les projets français de l'expérience déjà développée par ailleurs en Europe.

### **7.4.2 Machines de lumière synchrotron**

Il faut admettre qu'en ce qui concerne la 4e génération la France a pris du retard. Les derniers programmes en date dans le domaine des photo-injecteurs furent CANDELA au LAL et ELSA au CEA/DAM et remontent à près de 10 ans. La participation depuis plus de dix ans du DAPNIA, du LAL, de l'IPN aux programmes TTF et TESLA a permis malgré tout d'acquérir une expérience non négligeable des problèmes et des techniques en jeu.

Le tout récent projet ARC-EN-CIEL a permis de cerner les demandes de la communauté des utilisateurs et propose en conséquence des paramètres pour une machine. En revanche, le travail de conception n'a pas commencé et aucune équipe n'est encore constituée pour le faire.

La grande question qui va se poser dans l'année à venir est celle de la participation demandée par l'Allemagne à la construction de X-FEL. Techniquement ce projet est controversé. Une machine plus modeste pourrait peut-être mieux convenir aux utilisateurs qui

ne sont pas tous demandeurs de si courtes longueurs d'ondes (0,1 nm) et de brillance aussi élevée. La technique du HGHG (high gain harmonics generation), encore en développement, pourrait peut-être permettre d'obtenir les mêmes performances avec une machine plus petite. Surtout, X-FEL risque d'absorber à lui seul tous les financements envisageables.

Ainsi, si la France décidait de le financer, un projet comme ARC-EN-CIEL aurait peu de chance de voir le jour. Au mieux, un programme de R&D limité à une dizaine de M€ pourrait être lancé comme en Italie et en Angleterre. Ces deux pays auront aussi sans doute à se déterminer entre leur participation à X-FEL et la poursuite de programmes nationaux comme SPARX et 4GLS.

L'idéal serait de parvenir à un consensus sur un projet européen et qu'un programme de R&D concerté soit lancé en conséquence. Mais la décision finale risque bien d'être aussi politique.

#### ***7.4.3 L'accélération par plasma***

Ce domaine est resté, au moins en France, à l'écart des autres domaines d'activité dans les accélérateurs. La raison en est sans doute que les perspectives qu'il offrait étaient lointaines. Ce n'est semble-t-il plus le cas. De plus, les sources d'électrons, les techniques de transport et d'analyse de faisceau offrent des possibilités de collaboration.

Le DAPNIA et l'IN2P3 devraient considérer leur participation à une entreprise où la France a été au premier rang et qui se propose d'aborder une phase de développements très intéressants et prometteurs.



## 8. Conclusions

1) Les priorités scientifiques en physique nucléaire et physique des particules pour les 20 ans à venir, formulées par les différentes instances scientifiques nationales et internationales, nécessitent la construction d'accélérateurs extrêmement performants. L'importance de la R&D dans le domaine des accélérateurs est donc primordiale et de plus en plus reconnue comme telle.

2) La R&D accélérateur constitue également une interface toujours plus fertile vers d'autres disciplines ou applications, qu'il s'agisse de la transmutation des déchets nucléaires, de nouvelles méthodes de traitement des cancers, de sondes pour l'étude des réactions chimiques à l'échelle de la sub-picoseconde, de faisceaux de taille submicronique pour des études de radiobiologie ou de nouvelles sources de lumière à la brillance extrême.

3) De très nombreuses compétences dans ce domaine existent au sein de nos instituts qui constituent la principale "force de frappe" dans le domaine des accélérateurs au niveau national. Plusieurs centres d'excellence sont internationalement reconnus, notamment dans la conception de nouveaux ensembles accélérateurs et dans le domaine des cavités supraconductrices, des canons HF, des grands aimants supraconducteurs, des sources d'ions, de l'interface machine-détecteur,...

4) Les tâches actuelles correspondent à une superposition (souhaitable) d'études génériques, de projets issus de nos propres disciplines, de commandes extérieures. Les activités ont un spectre très étendu: études de conception, réalisation de prototypes, industrialisation de composants, construction d'accélérateurs ou de sous-ensemble d'accélérateurs. Les ressources humaines et matérielles disponibles sont entièrement mobilisées pour permettre de faire face à l'ensemble des engagements actuels ou programmés.

5) Comment trouver des ressources pour s'impliquer dans des nouveaux projets attractifs, qui ne sont pas pris en compte dans la programmation actuelle?

Une partie de ces ressources supplémentaires pourra être trouvée par l'optimisation du potentiel existant, en développant au maximum les synergies disponibles au niveau des infrastructures. Mais une politique volontariste devra également être menée pour renforcer le potentiel humain, améliorer le recrutement et la formation, (utiliser au mieux les accélérateurs existant en France ou à l'étranger) en parallèle avec une clarification des objectifs dans le respect des priorités scientifiques.

Deux pistes génériques devront être suivies pour définir un engagement :

- s'appuyer sur nos domaines reconnus d'excellence
- s'inscrire dans les priorités européennes et internationales tant sur les futurs accélérateurs que sur la R&D proprement dite

6) La recherche de nouveaux moyens financiers pourra s'appuyer en bonne partie sur des financements régionaux, européens, ou provenant de conventions, dont l'importance va croissant grâce en particulier à une très forte implication du 6ème programme cadre dans la R&D accélérateur. Il faut noter cependant les engagements forts découlant de ce type de soutien.

**SACM: personnel technique R&D accélérateurs (actuellement hors aimants)**

Annexe	Spécialité	2004	Commentaire	Evolution 2004-2008
A1	Conception (électromag., thermique, méca., électrostat.)	6	Cœur de métier	
	Chef de projet	6		
	Cryogénie	1		
	Mécanique appliquée	3		- 2
	Dynamique faisceau	6	Cœur de métier	- 1
	Conception cavités HF	3	Cœur de métier	
	Electronique HF	4	Cœur de métier	
	Ultravide	1		- 1
	Chimie	1	Spécificité du Dapnia	- 1
	Puissance RF	1	Essentiel, à maintenir	
A2	Mesures physiques (thermiques, mécaniques, électriques)	3		
	Mesures BF	1		
	Mesures HF	3		
	Mécanicien soudeur	1	A maintenir	
	Mécanicien monteur, prototypes	4		
	Vide	0		
	Chimie	2	Spécificité Dapnia	
	Electronique HF	3	A maintenir	- 1
	Electrotechnique	3	A maintenir	
	Réfrigération, fluides	2	Au moins 1 agent	- 1

## IPNO-DA : personnel technique R&D accélérateurs

Attention : Tableau selon définitions de métiers du SACM – Transposition « hasardeuse »

Corps	Spécialité	2004	Commentaires	Evolution 2004-2008
<b>Ingénieurs</b>	Conception (électromag., thermique, méca., électrostat.)	12		- 2
	Chef de projet	5		- 2
	Cryogénie	5		
	Mécanique appliquée	4		
	Dynamique faisceau	5		
	Conception cavités HF	4		
	Electronique HF	4		
	Ultravide	1		
	Chimie	0		
	Puissance RF	0	<b>A renforcer !</b>	
	Exploitation accélérateur	2		
		<b>42</b>		
<b>Techniciens</b>	Mesures physiques (thermiques, mécaniques, électriques)	6		- 2
	Mesures BF	0		
	Mesures HF	1		
	Mécanicien soudeur	1		
	Mécanicien monteur, prototypes	12		
	Vide	3		
	Chimie	0		
	Electronique HF	8	<b>Inclus, Electroniciens Tandem (4)</b>	
	Electrotechnique	6		- 2
	Réfrigération, fluides	1		
	C & C	5		
	Projeteurs	8		
		<b>52</b>		

### Répartition par projet (FTE):

ALTO	19	C & C Tandem	3
IPHI	13.5	LHC	6
Cavités	14.5	CPO	3
SPIRAL 2	6	Cryogénie	7
XADS & EURISOL	2	Divers	2.5
Tandem	10.5	Mngt et Enseignement	7