

# **PROSPECTIVES**

**DSM/DAPNIA – CNRS/IN2P3**

**2006 - 2015**



## Avant-propos

Les journées de prospective conjointes entre la DSM/ DAPNIA et l'IN2P3 se sont déroulées du 11 au 16 octobre 2004 à La Colle sur Loup (arrière pays niçois). Les directions de l'IN2P3 et de la DSM/ DAPNIA ont souhaité que les réflexions menées à cette occasion soient suivies d'un travail de synthèse sous la forme d'un document écrit, à paraître dans un délai de quelques mois, présentant notre prospective d'ensemble pour les dix prochaines années. Cet exercice devait aussi comporter une réflexion sur les moyens, financiers et humains, nécessaires pour ces programmes scientifiques élaborée dans un cadre réaliste.

Cette ambition confère certes une importance particulière à l'édition 2004 des Rencontres, mais surtout requiert un travail important qui devra dégager une vision de l'évolution souhaitable de notre discipline et des moyens qui l'accompagnent.

Dans ce but un Comité d'Organisation d'une douzaine de personnes issues des Conseils Scientifiques de la DSM/DAPNIA, du Département PNC et de l'IN2P3 a été mis sur pied ; les directions de la DSM/DAPNIA et de l'IN2P3 ont souhaité me confier la coordination de ce Comité.

Les premières tâches ont été définir très rapidement les thématiques à aborder et de constituer un groupe de travail pour chacune d'elles. Les présentations et discussions qui ont eu lieu à la Colle sur Loup ont pleinement confirmé la justesse de cette démarche. Le travail préparatoire réalisé par plus d'une centaine de collègues de notre communauté, les textes ,les présentations ont grandement contribué à la réussite de ces journées.

Vous trouverez dans ce premier document les résumés des textes produits par les groupes de travail thématiques ainsi que des tableaux synthétiques indiquant les priorités et les moyens humains et financiers nécessaires à la réalisation des projets et programmes de recherches pour les dix prochaines années.

Ces textes et tableaux serviront de base à l'élaboration du document de synthèse final par les directions des deux organismes

Pour le comité d'organisation des journées de prospectives

Sydney Galès



## **Composition du Comité d'organisation**

### Conseil Scientifique de Département PNC/CNRS

C. Le Brun (Pt)

Y. Blumenfeld

A. Rouge

T. Suomijarvi

### Conseil Scientifique de l'IN2P3

S. Gales (Pt)

Ph. Chomaz

J. Dumarchez

M. Winter

### DSM/DAPNIA

J. Feltesse (Pt)

F. Auger

V. Rulhmann-Kleider

S. Turck-Chieze

# Table des matières

I - Origine de la masse et physique au-delà du modèle standard .....	7
II - Violation de CP .....	21
III - Propriétés des neutrinos.....	27
IV - Le plasma de quarks et gluons .....	33
V - Structure interne des hadrons.....	43
VI - Terra Incognita pour les noyaux.....	55
VII – Astrophysique nucléaire.....	75
VIII – Cosmologie et matière noire.....	91
IX - Astrophysique de haute énergie .....	101
X - Ondes gravitationnelles.....	111
XI - Physique et chimie pour le nucléaire et l'environnement.....	117
XII - Interface avec les sciences de la vie .....	127
XIII - Accélérateurs et grands instruments.....	135
XIV - Instrumentation et détecteurs.....	141
XV - Enseignement et formations .....	149
XVI - Recherches interdisciplinaires auprès des accélérateurs et sources d'ions.....	153
XVII – QCD sur réseau .....	161
XVIII - Autres contributions sans executive summary.....	173



## **I - Origine de la masse et physique au-delà du modèle standard**



16 décembre 2004

## **Journées de Prospective DAPNIA-IN2P3**

# **Groupes de travail L'origine de la masse et Au delà du modèle standard**

### **AUTEURS**

Daniel BLOCH (IRES-Strasbourg)  
Maarten BOONEKAMP (DAPNIA-CEA)  
Jean-Claude BRIENT (LLR-Ecole Polytechnique)  
Lucia DI CIACCIO (LAPP-Annecy)  
Abdelhak DJOUADI (LPT-Orsay/LMPT-Montpellier)  
Emilian DUDAS (LPT-Ecole Polytechnique)  
Suzanne GASCON-SHOTKIN (IPNL-Lyon)  
Philippe GRIS (LPC-Clermont-Ferrand)  
Jean-François GRIVAZ (LAL-Orsay)  
Lydia ICONOMIDOU-FAYARD (LAL-Orsay)  
Arnaud LUCOTTE (LPSC-Grenoble)  
Rosy NICOLAIDOU (DAPNIA-CEA)  
Melissa RIDEL (LPNHE-Jussieu)  
Sylvie ROSIER-LEES (LAPP-Annecy)  
Alexandre ROZANOV (CPPM-Marseille)  
Vanina RUHLMANN-KLEIDER (DAPNIA-CEA)  
Laurent SERIN (LAL-Orsay)  
Yves SIROIS (LLR-Ecole Polytechnique)  
Boris TUCHMING (DAPNIA-CEA)  
Guillaume UNAL (LAL-Orsay)  
Henri VIDEAU (LLR-Ecole Polytechnique)  
Dirk ZERWAS (LAL-Orsay)

Cette synthèse s’articule en deux parties. La première expose les grandes questions de la physique des particules sur accélérateurs et compare les apports possibles des différents instruments. La seconde partie résume les recommandations du groupe de travail et discute des moyens humains et financiers associés à chacun des projets.

### **Enjeux scientifiques et panorama expérimental**

Au cours des trois dernières décennies s’est édifée et confirmée la théorie des particules élémentaires connue sous le nom de Modèle Standard. Les constituants de la matière sont les quarks et les leptons, groupés en trois familles, le plus lourd d’entre eux, le quark top, ayant été observé en 1995 au cours du Run I du TeVatron de Fermilab. Si l’on met à part la gravitation, leurs interactions résultent de l’invariance par rapport au groupe de jauge  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ . La symétrie de couleur  $SU(3)_C$  est conservée, le gluon de masse nulle étant le médiateur de l’interaction forte associée. La symétrie électrofaible  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  est par contre spontanément brisée, laissant l’électromagnétisme comme symétrie  $U(1)_{EM}$  résiduelle. Les bosons de jauge associés sont, outre le photon, les bosons vecteurs faibles  $W$  et  $Z$ , observés au Sp $\bar{p}$ S du CERN en 1983 dix ans après la découverte inaugurale des courants faibles neutres par Gargamelle en ce même laboratoire.

Le mécanisme de brisure de la symétrie électrofaible n’est à ce jour pas établi avec certitude. Dans le cadre du Modèle Standard minimal, un doublet de champs scalaires est introduit, dont une composante neutre développe une valeur moyenne dans le vide non-nulle. Trois des composantes de ces champs scalaires sont alors absorbées sous forme de degrés de liberté longitudinaux des bosons  $W$  et  $Z$ , leur permettant d’acquérir une masse, alors que la dernière composante survit sous la forme d’une particule scalaire neutre, le boson de Higgs  $H$ . Ce mécanisme, connu sous le nom de mécanisme de Higgs, préserve la renormalisabilité de la théorie qui n’est *a priori* assurée qu’en l’absence de masse. Des interactions de Yukawa entre le champ de Higgs et les fermions chargés permettent également de leur conférer une masse.

Le Modèle Standard détermine l’ensemble des propriétés du boson de Higgs, à l’exception de sa masse  $m_H$ . Le fait que le Modèle Standard soit une théorie renormalisable permet de calculer de manière précise les corrections radiatives électrofaibles à des quantités mesurables telles que masses et largeurs du  $W$  ou du  $Z$ , violation de la parité, etc... Le LEP (“Large

electron-positron Collider”) du CERN, a fonctionné de 1989 à l’an 2000, et l’une de ses contributions majeures a été de mettre en évidence ces corrections radiatives, confrontant avec une extrême précision les prédictions du modèle aux mesures expérimentales. C’est ainsi que les contributions virtuelles du quark top ont permis de déterminer sa masse avant qu’il ne soit mis en évidence au TeVatron. Quoique à un degré moindre que le top, le boson de Higgs participe aussi aux corrections radiatives, et sa masse peut donc être contrainte dans le cadre du Modèle Standard. Une limite supérieure de 260 GeV est ainsi obtenue, à 95% de niveau de confiance. Les recherches directes au LEP ont par ailleurs permis d’établir une limite inférieure de 114 GeV, quelques événements suggestifs ayant été observés à une masse d’environ 115 GeV. La découverte et l’analyse des propriétés du boson de Higgs constituent à ce jour le défi essentiel auquel est confronté le Modèle Standard.

Le premier acteur dans cette quête est le TeVatron de Fermilab. Il s’agit d’un collisionneur  $p\bar{p}$  fonctionnant à une énergie dans le centre de masse de 1.96 TeV, qui devrait pouvoir accumuler une luminosité intégrée de  $4 \text{ fb}^{-1}$  d’ici 2007, année prévue pour le démarrage du LHC, et de  $8 \text{ fb}^{-1}$  à la fin de son Run II en 2009. Ces luminosités intégrées devraient permettre la mise en évidence d’un boson de Higgs de masse inférieure à 120 ou 130 GeV, respectivement. En tout état de cause, la précision accrue sur les masses du  $W$  et du top permettra d’affiner les contraintes indirectes sur la masse d’un boson de Higgs standard.

La relève sera prise par le LHC (“Large Hadron Collider”) du CERN, qui produira des collisions  $pp$  à une énergie de 14 TeV dans le centre de masse. Une augmentation progressive de la luminosité devrait mettre à la disposition de chacune des deux expériences généralistes ATLAS et CMS quelque  $30 \text{ fb}^{-1}$  en 2010, et  $300 \text{ fb}^{-1}$  en 2013. Les études effectuées au sein des deux collaborations indiquent que la découverte du boson de Higgs standard est assurée avec  $10 \text{ fb}^{-1}$  dans toute la gamme de masse autorisée. Outre la mesure de la masse de ce boson de Higgs, des premières estimations de sa largeur, des rapports d’embranchement de ses diverses voies de désintégration, et de certains de ses nombres quantiques pourront être obtenus au LHC.

Pour déterminer avec précision les propriétés du boson de Higgs, tout particulièrement son autocouplage, il faudra avoir recours à un collisionneur  $e^+e^-$  de haute luminosité, ainsi qu’il fut fait avec le LEP pour le boson  $Z$  après sa découverte au Sp $\bar{p}$ S. Un tel ”International Linear Collider” (ILC), dont le développement devrait s’accélérer après le choix récent d’une technologie supraconductrice, pourrait voir le jour vers 2015, et fonctionner

à des énergies allant de la masse du  $Z$  jusqu'au TeV, accumulant une luminosité intégrée pouvant atteindre  $1 \text{ ab}^{-1}$ . Ce collisionneur devrait disposer d'électrons polarisés à plus de 80 %, et éventuellement d'une polarisation des positons voisine de 60 %.

S'il devait cependant apparaître au cours de la prochaine décennie que le boson de Higgs échappe à la recherche, ou même, s'il était observé, que sa masse excède significativement les quelque 300 GeV, de nouveaux phénomènes absents dans le cadre du Modèle Standard devraient se manifester à une échelle d'énergie accessible au LHC, et jouer le rôle d'un boson de Higgs léger ou être combinés avec ceux d'un Higgs lourd pour préserver l'accord de la théorie avec les mesures de précision.

D'ores et déjà, un certain nombre d'arguments conduisent à penser que le Modèle Standard n'est qu'une théorie effective, autrement dit la réalisation à basse énergie d'une théorie plus fondamentale. Les constantes de couplage associées aux trois groupes de jauge évoluent avec l'énergie conformément aux équations du groupe de renormalisation, et convergent approximativement à haute énergie. Ceci, ainsi que la quantification des charges électriques des quarks et des leptons, suggère une "Grande Unification" des interactions forte et électrofaible au voisinage d'une énergie de  $10^{16}$  GeV.

En présence d'une grande échelle telle que celle de Grande Unification, la masse du boson de Higgs reçoit des corrections radiatives quadratiquement divergentes dans la valeur de cette échelle, et ne peut être stabilisée qu'au prix d'ajustements fins. Ce problème, connu sous le nom de problème de hiérarchie de jauge, trouve une solution naturelle dans le cadre des théories de "supersymétrie" dans lesquelles à chaque fermion ou boson du Modèle Standard est associé un boson ou fermion de même masse et portant les mêmes nombres quantiques, à l'exception du spin. L'absence dans la nature de tels doublets fermion-boson de même masse indique que la supersymétrie est brisée. La solution du problème de la hiérarchie nécessite cependant que les partenaires supersymétriques des particules standard aient des masses n'excédant pas quelques TeV. Une conséquence de la présence à cette échelle de ces nouvelles particules est que la convergence des constantes de couplage à haute énergie est grandement améliorée. Par ailleurs, la particule supersymétrique la plus légère apparaît comme un candidat idéal pour constituer la matière sombre de l'univers.

On s'attend à ce que les partenaires supersymétriques des quarks et des gluons soient plus lourds que ceux des leptons et des bosons de jauge électrofaibles, mais aussi à ce qu'ils soient produits en plus grande abondance par interaction forte dans un collisionneur hadronique

tel que le LHC (voire le TeVatron si leurs masses n'excèdent pas quelque 300 GeV). Une étude délicate de leurs désintégrations en cascade vers la particule supersymétrique la plus légère pourrait alors fournir des indications précieuses sur les masses des autres particules supersymétriques. Ces dernières devraient être aisées à observer et à étudier avec précision auprès d'un collisionneur  $e^+e^-$  tel que l'ILC. La complémentarité des deux types de machine apparaît de manière évidente dans ce contexte, un fonctionnement simultané du LHC et de l'ILC permettant d'optimiser les stratégies de découverte et d'analyse.

Les théories supersymétriques prédisent par ailleurs un secteur de Higgs enrichi, comportant au moins deux doublets de champs scalaires. Le modèle minimal (MSSM, pour "Modèle Standard Supersymétrique Minimal") comporte exactement deux tels doublets, et prédit que le boson de Higgs neutre le plus léger doit avoir une masse inférieure à 140 GeV environ. Des masses inférieures à quelque 90 GeV ont été exclues au LEP pour la plupart des configurations de paramètres du MSSM. L'élucidation de la nature, éventuellement supersymétrique, du secteur de Higgs constitue l'un des objectifs majeurs des futurs collisionneurs. Au TeVatron, une exclusion à 95% de niveau de confiance pourra être obtenue dans l'essentiel de l'espace des paramètres, mais il faudra attendre le LHC pour une découverte à  $5\sigma$  d'au moins un des bosons de Higgs du MSSM. Comme pour le boson de Higgs standard, c'est l'ILC qui mesurera les rapports d'embranchement avec une précision suffisante pour éventuellement distinguer bosons de Higgs standard et supersymétrique dans le cas où un seul de ces bosons serait observé au LHC.

Le fait qu'aucune indication expérimentale directe ne soit venue corroborer à ce jour l'hypothèse d'une réalisation à basse énergie de la supersymétrie, ainsi que le fait que le domaine de masse encore disponible pour la découverte d'un boson de Higgs du MSSM tende à se rétrécir, conduisent à considérer des alternatives non-perturbatives pour le mécanisme de brisure de la symétrie électrofaible. A la différence de la supersymétrie, cependant, la compatibilité de ces alternatives avec les mesures de précision est difficile à préserver de façon naturelle, et ces théories revêtent ainsi souvent un caractère assez artificiel. La phénoménologie de ces alternatives (technicolore, modèles de "petit Higgs", voire "sans Higgs"), qui comporte en général des résonances larges au delà du TeV, est totalement différente de celle de la supersymétrie et, à défaut d'être prédictive, offre un vaste champ à la recherche de particules ou de phénomènes nouveaux auprès des accélérateurs présents et futurs. Il s'agit là *a priori* d'un domaine où le LHC est sans rival pour les recherches

directes, mais, par l'observation de déviations au Modèle Standard, l'ILC peut contribuer à la mise en évidence de phénomènes résonants de haute énergie.

Au cours de ces dernières années est apparue une approche radicalement nouvelle du problème de la hiérarchie, dans laquelle l'échelle de la gravitation elle-même est ramenée au voisinage de l'échelle électrofaible. Dans cette approche la gravitation se propage dans des dimensions compactes supplémentaires, de sorte qu'ainsi diluée elle apparaît faible dans nos trois dimensions d'espace habituelles. Les manifestations expérimentales de ces dimensions supplémentaires seraient l'émission de gravitons de Kaluza-Klein, se manifestant dans nos trois dimensions sous la forme d'énergie manquante, ou l'échange de tels gravitons virtuels modifiant les sections efficaces standard. Dans d'autres variétés de modèles à dimensions supplémentaires, les niveaux de Kaluza-Klein sont séparés de telle sorte que le graviton se manifeste sous forme de résonance étroite aux environs du TeV. Il est enfin possible, par exemple, de permettre aux bosons de jauge de se propager dans la ou les dimensions supplémentaires, ce qui modifierait à nouveau le comportement des sections efficaces standard et conduirait à des récurrences de Kaluza-Klein de ces bosons de jauge. De telles résonances étroites, ainsi que celles qui apparaissent dans des modèles comportant des extensions des symétries de jauge, seront observables jusqu'à une masse de l'ordre du TeV au TeVatron, de 5 TeV environ au LHC, et, par le biais de mesures d'effets d'interférence et d'asymétrie, jusqu'à une dizaine de TeV à l'ILC.

### **Recommandations**

Toutes les extensions du Modèle Standard compatibles avec les observations expérimentales ont ceci de commun que "quelque chose" doit se passer à une échelle d'énergie de l'ordre du TeV. L'élucidation de ce "quelque chose" est l'enjeu de la prochaine décennie. A la lumière des études effectuées en vue des Journées de Prospective DAPNIA-IN2P3 de La Colle-sur-Loup (Octobre 2004), les conclusions et recommandations des groupes "Origine de la masse" et "Au-delà du Modèle Standard" sont les suivantes.

Jusqu'à la mise en service du LHC, le TeVatron restera l'unique machine dédiée à l'exploration de la frontière des hautes énergies. Il est important que la communauté de physiciens français travaillant auprès de ce collisionneur puisse maintenir sa présence et utiliser pleinement le potentiel du TeVatron en vue de la mise en évidence possible d'un

boson de Higgs léger ou d'une éventuelle découverte de nouvelles particules. Quels que soient les résultats de ces recherches, le Tevatron est assuré d'améliorer d'un facteur deux la précision sur les masses du  $W$  et du top, ce qui permettra d'affiner la valeur prédite pour la masse du boson de Higgs standard, et de tester la cohérence du Modèle Standard ou de ses extensions.

Le LHC est la première priorité de la communauté. Si le mécanisme de Higgs, dans sa version standard, est à l'origine de la brisure de la symétrie électrofaible, l'observation et l'étude du boson de Higgs sont garanties au LHC. Si la supersymétrie est réalisée à basse énergie, nombre de ses manifestations devraient être observées. Mais que la nature soit supersymétrique ou non, des phénomènes nouveaux sont attendus dans le domaine de masse accessible au LHC, qui pourraient néanmoins nécessiter plusieurs années de fonctionnement à haute luminosité pour être élucidés. Des améliorations possibles du LHC, en énergie ou en luminosité, seule la montée en luminosité est envisagée dans ce rapport et il ressort des cas étudiés ici que cette option n'offre qu'un gain limité en sensibilité.

A l'horizon 2015, il est souhaité que la communauté dispose d'un collisionneur  $e^+e^-$  pouvant accumuler de l'ordre d'un  $\text{ab}^{-1}$  à des énergies s'étendant de la masse du  $Z$  à 1 TeV environ, avec un (voire deux) faisceaux polarisés. La possibilité de choisir l'énergie de collision permettra notamment l'étude précise du secteur de Higgs. De plus, un fonctionnement avec faisceaux polarisés au pic du  $Z$  et aux seuils  $WW$  et  $t\bar{t}$  et à l'énergie maximale permettra un gain d'un ordre de grandeur en précision sur les mesures électrofaibles, et ainsi de pousser les tests de cohérence de la théorie sous-jacente au-delà de ce qu'auront apporté le Tevatron et le LHC, tout particulièrement en l'absence de signal clair au LHC. Enfin, si la supersymétrie est réalisée à basse énergie, la complémentarité d'un tel collisionneur et du LHC rend particulièrement attractif un fonctionnement simultané des deux machines.

A plus long terme, des technologies plus agressives, telles que celles envisagées en collisions  $e^+e^-$  pour le CLIC ou pour un collisionneur à muons, pourront conduire à une nouvelle génération de machines dont les paramètres seront guidés par les observations effectuées d'ici là.

Nom	LHC	ILC	SLHC
priorité	1	2	3
Type	détecteurs Atlas et CMS	accélérateur et détecteur	accélérateur et détecteurs
Etat	construction	avant-projet détaillé	R et D
Pays partenaires	monde	monde	monde
Nb phys. fr.	2005-2008	2005-2008	2005
Dapnia (FTE)	30 h.an	2 h.an	0
	2004	2004	2004
IN2P3 (non FTE)	90	34	0
Nb tech./ing. fr.	2005-2008	2005-2008	2005
Dapnia (FTE)	29, 15, 6, 1 h.an	11, 9, 9, 1 h.an	0
	2004	2004	2004
IN2P3	?	42	0
Début/fin des investissements	1994/2006	acc. 1990/2007 dét. 2002/à définir	à définir
coût total	500 MFSx2	3000 Meuros	500 MFS ?
contribution			
Dapnia (Meuros)	16	acc.5, dét. 2,5	0
IN2P3 (Meuros)	?	?	0
commentaires	Les coûts sont hors personnel		

TABLE I: Moyens humains et financiers pour les trois projets, discutés dans ce document, dont le démarrage est prévu entre 2006 et 2015.

### Moyens

La Table I résume les moyens financiers et humains prévus par le DAPNIA et l'IN2P3 pour chacun des projets en cours de construction ou de conception. Cette table appelle les commentaires suivants.

La communauté de physiciens français travaillant actuellement sur ces thématiques et membres de collaborations ATLAS et CMS comporte environ 120 personnes. Pour que la participation française à l'exploitation des données soit à la hauteur des investissements consentis sur les détecteurs, la communauté devrait compter au moins 200 chercheurs (permanents ou non permanents) à terme.

L'activité ILC reste encore sous-dimensionnée. Il serait souhaitable qu'elle puisse se développer, surtout si le contexte international évolue rapidement dans un sens favorable.

## Volet humain

	<i>Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015</i>	<i>accélérateur, détecteur, calculateur.....</i>	<i>Etude de faisabilité, avant projet détaillé, construction....</i>				<i>Autant que possible détailler par année et par organisme ( IN2P3 et CEA )</i>	
<b>Priorité</b>	<b>Nom du projet</b>	<b>Type de projet</b>	<b>Etat d'avancement</b>	<b>Années de début et de fin des investissements</b>	<b>Pays partenaires</b>	<b>Nombre de physiciens français participant au projet</b>	<b>Nombre de techniciens et ingénieurs français participant au projet en nombre d'hommes par an.</b>	<b>Commentaires</b>
<b>1</b>	<b>LHC</b>	détecteurs Atlas et CMS	construction	1994/2006	monde	période 2005-2008 Dapnia 30 h.an année 2004 In2p3 90	années 2005-2008 Dapnia 29, 15, 6, 1 h.an In2p3 ?	Les projections des nombres de physiciens du Dapnia sur la période 2005-2008 sont stables d'une année sur l'autre. Tous les chiffres Dapnia sont des FTE. Les chiffres In2p3 ne sont pas des FTE.
<b>2</b>	<b>ILC</b>	accélérateur et détecteur	avant-projet détaillé	acc 1990/2007 dét 2002/à déf	monde	période 2005-2008 Dapnia 2 h.an année 2004 In2p3 34	années 2005-2008 Dapnia 11, 9, 9, 1 h.an année 2004 In2p3 42	
<b>3</b>	<b>SLHC</b>	accélérateur et détecteurs	R&D	encore à définir	monde	année 2004 Dapnia 0 pour l'instant In2p3 0 pour l'instant	années 2005-2008 Dapnia 0 pour l'instant In2p3 ?	

## Volet financier

Priorité	Nom du projet	Type de projet	Etat d'avancement	Années de début et de fin des investissements	Coût total hors personnel (en M€)	Coût total en incluant le personnel (en M€)	Contribution IN2P3+CEA (hors personnel) en M€	Contribution IN2P3+CEA (en incluant le personnel) en M€	Autres contributions Françaises en M€
1	LHC	détecteurs Atlas et CMS	construction	1994/2006	500MFSx2		Dapnia 16 In2p3 ?		0
2	ILC	accélérateur et détecteur	avant-projet détaillé	acc 1990/2007 dét 2002/à déf	3000 Meuros		Dapnia acc 5, dét 2.5 In2p3 ?		0
3	SLHC	accélérateur et détecteurs	R&D	encore à définir	500MFS ?		Dapnia 0		0



## **II - Violation de CP**



# La violation de CP et la matrice CKM

(Journées de prospective DAPNIA/IN2P3 pour les années 2004-2014)

## Groupe de travail :

D. Bernard (LLR), J. Charles (CPT), A.-I. Etievre (DAPNIA/SPP), A. Höcker (LAL), R. Le Gac (CPPM), D. Lhuillier (DAPNIA), O. Naviliat (LPC-Caen), P. Perret (LPC-Clermont), B. Peyaud (DAPNIA), O. Pène (LPT), I. Ripp-Baudot (IReS Strasbourg), A. Stocchi (LAL), G. Wormser (LAL)

La-Colle-sur-Loup, Octobre 2004

## Synthèse

L'étude de l'asymétrie matière-antimatière, ou violation de CP, est un domaine de recherche en pleine effervescence, au coeur de la physique des particules et de la cosmologie. Découverte en 1964 dans le système des kaons neutres, la violation de CP directe a été mise en évidence en 1999 et les collaborations *BABAR* et Belle ont observé pour la première fois la violation de CP dans le système du méson  $B_d^0$  en 2001. L'ensemble de ces mesures, incluant la première mesure de  $\alpha$ , est en accord avec les prédictions du modèle standard. *BABAR* a mis en évidence cette année une asymétrie CP directe dans la désintégration  $B_d^0 \rightarrow K^+\pi^-$  qui confirme également le mécanisme CKM du modèle standard.

- L'expérience *BABAR* prévoit de prendre des données jusqu'à la fin de la décennie, quintuplant la statistique acquise à ce jour ( $0.25 \rightarrow 1.25 \text{ ab}^{-1}$ ). Il est important que les groupes français puissent participer à l'analyse de ces données, utilisant au maximum l'investissement passé sur ce détecteur pour affiner la métrologie du modèle standard, et profiter au mieux du potentiel de découverte (ou d'exclusion), de nouvelle physique.

Les projets qui seront encore en construction en 2006 et les projets qui vont commencer d'ici à 2015 sont tabulés en table 1.

L'expérience LHCb, qui sera installée auprès de l'anneau de collision proton-proton, le LHC, au CERN à Genève, étudiera la violation de CP dans le système des mésons  $B_d^0$  et  $B_s^0$  avec une précision inégalée, en utilisant une approche dédiée (par rapport à D0; ATLAS et CMS). Les mesures de précision de  $\beta, \gamma, \delta\gamma$  et de  $\Delta m_s$  associées aux spectres en masse de nouvelles particules, à la mesure des rapports d'embranchement des désintégrations rares et aux tests de

Nom	LHCb	Super-usine à B	nEDM	$K^+$ decays
Type	détecteur	détecteur+MDI	détecteur	détecteur
Etat	construction	études préparatoires	prép. APD	SPSC-LOI-2004-001
Début/fin investissement	2002/2006	2009/2013	2006/2008	2006/2009
Pays	nombreux ...	Japon, USA, Europe	Suisse, Pol, De, Ru	Bul, De, It, Ru, UK, USA, CERN.
Nbre Phys. Fr.	28	de 10 à 30	9	2
Nbre Ing. & Tech.	19	50 (en pointe)	1	1
Commentaires	Hors Thésards 2007→ 2017	Démarrage progressif Décision vers fin 2005		
Coût total (M€) hors personnel	50	70 (det) + 500 (acc)	2.5	13
Coût total (M€) incl personnel				
IN2P3+CEA (M€) hors personnel	5	4	0.5	
IN2P3+CEA (M€) incl personnel				
Autres contributions Françaises				

TAB. 1 – Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015.

cohérence des triangles d'unitarité permettront d'appréhender les détails de la nouvelle physique éventuelle.

- Il est essentiel que la France se donne les moyens d'une participation majeure à LHCb.

La recherche de moments électriques dipolaires (EDM) permanents dans divers systèmes microscopiques (molécules, atomes, nucléons, leptons) s'est fortement diversifiée au cours des dernières années. Cette observable fournit une fenêtre très sensible à de nouveaux mécanismes de violation de T, complémentaire aux recherches effectuées dans les processus de décroissance impliquant les saveurs lourdes. Des progrès considérables ont été réalisés récemment et des nouvelles limites supérieures ont été obtenues sur les EDM de plusieurs particules, en particulier celle du neutron. Des améliorations ambitieuses de ces limites, relevant des nouveaux défis, sont actuellement envisagées auprès des sources de neutrons ultra-froids (UCN) de nouvelle génération et de très haute densité, en construction ou en développement dans plusieurs laboratoires.

- La participation des groupes de l'IN2P3 et du DAPNIA à une nouvelle mesure du EDM du neutron est fortement recommandée.

L'étude de la violation de CP dans le secteur des kaons neutres a dominé ce secteur de recherche pendant plus de trente-cinq ans. Après la découverte de la violation directe, cette communauté s'est tournée vers l'étude des désintégrations ultra-rares comme  $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  et  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ . La mesure de ces rapports d'embranchement est un outil privilégié pour mettre en évidence une nouvelle physique à grande échelle qui ne pourrait pas être observée au LHC. Avec la fin de l'expérience NA48, la communauté française a délaissé ce secteur au profit du secteur du  $B$ , alors que des projets existent, Kopio et J-PARC, et qu'un nouveau projet émerge.

- Il serait souhaitable d'explorer une participation française dans ce secteur qui a un grand potentiel de découverte.

Les progrès de la théorie, et en particulier de la QCD sur réseau, sont indispensables pour une exploitation fructueuse des futures mesures expérimentales. L'augmentation prévue des moyens de calcul devrait fournir une précision théorique comparable à celle de la précision expérimentale, dans une première étape grâce aux ordinateurs multiteraflops d'aujourd'hui (résultats attendus à partir de 2007) et ensuite grâce à la génération du petaflop (résultats espérés à partir de 2012).

- Une montée en puissance de l'implication française dans les calculs théoriques de haute précision, au rythme des autres pays, est indispensable, comme elle l'est dans les expériences de nouvelle génération.

Le superbe succès des usines à  $B$  ouvre la réflexion sur une machine environ 50 fois plus performante qui verrait le jour à l'horizon 2012. La question d'une participation française se posera avec intérêt d'ici un ou deux ans. Dans le scénario où la physique au-delà du modèle standard serait mise en évidence par les collaborations BaBar/Belle ou au LHC, cette machine aurait un potentiel pour faire la métrologie de cette nouvelle physique dans le secteur de la saveur. Dans le scénario contraire, une telle machine permettrait d'explorer indirectement des échelles de masse très élevées de nouvelle physique.

- Deux projets sont à l'étude, centrés l'un sur KEK l'autre sur SLAC. Un seul survivra probablement, en anti-corrélation géographique avec l'ILC : une décision pourrait être prise dès fin 2005. L'Europe et la France en particulier peuvent jouer un rôle positif pour faciliter une éventuelle prise de décision sur un projet international.



### **III - Propriétés des neutrinos**



# Document du groupe de travail

## Propriétés des neutrinos

### *Groupe de travail*

Dario Autiero (IPNL, Lyon), Alain Méric de Bellefon (PCC, Paris), Jacques Bouchez (DAPNIA, Saclay), Jean-Eric Campagne (LAL, Orsay), Christian Cavata (DAPNIA, Saclay), Hervé De Kerret (PCC, Paris), Dominique Duchesneau (LAPP, Annecy), Jacques Dumarchez (LPNHE, Paris), Ioannis Giomataris (DAPNIA, Saclay), Thierry Lasserre (DAPNIA, Saclay), Stéphane Lavignac (SPht, Saclay), Thomas Patzak (PCC, Paris), Fabrice Piquemal (CENBG, Bordeaux), André Rougé (LLR, Palaiseau), Xavier Sarazin (LAL, Orsay), Sylvaine Turck-Chièze (DAPNIA, Saclay), Cristina Volpe (IPNO, Orsay)

### Synthèse

La physique des neutrinos vient de connaître une décennie riche en découvertes. Alors que le Modèle Standard, le paradigme actuel de la physique des particules, impose des neutrinos de masse nulle, les observations combinées des déficits de neutrinos solaires, atmosphériques, de réacteurs et d'accélérateurs conduisent à l'affirmation aujourd'hui solide que les 3 neutrinos connus ont des masses non nulles, différentes entre elles et très petites. Loin d'être un aboutissement, cette découverte est en réalité le point de départ d'un très riche programme de recherches et de mesures pour élucider les nombreuses inconnues restant dans ce chapitre de la physique et passer des indications actuelles à des mesures de précision.

Les questions soulevées par ce premier signe d'une physique au delà du Modèle Standard sont nombreuses et fondamentales:

Les neutrinos n'ont pas des masses nulles, mais quelles sont ces masses? Combien de saveurs de neutrinos participent aux oscillations observées? Les neutrinos ont-ils leurs propres anti-particules? Y-a-t-il, comme dans le secteur des quarks, violation de CP dans le secteur leptonique? Quel est le mécanisme générateur des masses des neutrinos? etc ...

Le programme de recherche des 10 ans à venir doit tenter de répondre à ces questions.

Les expériences d'oscillation n'étant sensibles qu'à des différences de masses carrées, la réponse à la première question ne peut être abordée directement que par 2 types de mesure: l'étude précise de la fin du spectre de désintégration  $\beta$  du tritium ou la recherche de double désintégration  $\beta$  sans neutrino. Près de 30 ans de recherches sur le spectre  $\beta$  du tritium ont abouti aux meilleures limites actuelles  $m(\nu_e) < 2.3$  eV (en fait une moyenne pondérée des masses des neutrinos). Des projets existent pour gagner un ordre de grandeur en sensibilité, mais comme aucune équipe française n'a jusque là été impliquée dans ces recherches à l'instrumentation très délicate, il n'est pas souhaitable d'engager aujourd'hui un effort en ce sens.

La recherche de double désintégration  $\beta$  sans neutrino a l'avantage non seulement de tester l'échelle de masse absolue des neutrinos (la période des processus est inversement proportionnelle à la masse effective des neutrinos, une autre moyenne pondérée des masses des neutrinos), mais surtout elle est la seule capable de répondre à la question de savoir si les neutrinos ont leurs propres antiparticules. Et cette réponse est essentielle non seulement pour notre compréhension des neutrinos mais aussi

pour notre compréhension de l'origine de la masse. Deux classes de techniques expérimentales sont utilisées ou envisagées: les expériences calorimétriques (semi-conducteurs ou bolomètres) et les expériences de tracking. Les expériences en cours (en particulier NEMO3 en France) sont de taille modeste (quelques kg d'isotope double  $\beta$ :  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{100}\text{Mo}$  ...) et atteignent ou vont atteindre des sensibilités de 0,2 à 0,5 eV. Pour descendre vers 0,05 - 0,1 eV et tester l'hypothèse d'un spectre quasi-dégénéré de masse des neutrinos, il est nécessaire de passer à des expériences incluant de l'ordre de 100 kg d'isotope double  $\beta$ , avec une réduction associée des bruits de fond. Cette étape nécessite une phase de R&D, mais peut être atteinte dans les 10 ans que couvre cette prospective. En Europe le réseau ILIAS/IDEA coordonne les développements et il est sans doute souhaitable de maintenir les 2 techniques complémentaires, et dont l'expertise est européenne, opérant sur différents isotopes: bolomètres segmentés (ex. CUORE) et tracking (ex. SuperNEMO). L'effort français doit être soutenu dans ce cadre. Pour aller au delà et tester le scénario de hiérarchie de masse inverse à l'échelle suggérée par les neutrinos atmosphériques (20 à 50 meV) il faut envisager des expériences sur au moins une tonne d'isotope double  $\beta$ : cela nécessitera une importante R&D sur la production des isotopes et sur les techniques expérimentales.

Les expériences d'oscillations ont établi le fait que les neutrinos ont des masses non nulles et se mélangent: plus de 30 ans d'expérimentations délicates ont permis ces découvertes majeures. Majeures mais encore imprécises et incomplètes : les différences de masses carrées mesurées avec les neutrinos solaires et atmosphériques ne permettent pas de préciser la hiérarchie dans le spectre des neutrinos, et seuls 2 des 3 angles de la matrice de mélange ont été déterminés. Le programme des 10 ans à venir doit donc confirmer et compléter notre compréhension du mélange des neutrinos et de leur hiérarchie de masse, et déterminer si la symétrie CP est violée par les neutrinos, comme elle l'est par les quarks.

Une confirmation directe et sur accélérateur du résultat obtenu avec les neutrinos atmosphériques fait l'objet d'une expérience majeure (OPERA) dans laquelle des groupes français sont très engagés: elle a pour but d'observer l'apparition de  $\nu_\tau$  dans le faisceau de  $\nu_\mu$  envoyé du Cern vers le Gran Sasso. Cette expérience, technologiquement très difficile, est en phase de construction et doit bénéficier d'un soutien continu. Ses premiers résultats sont attendus avant 2010. Dans le domaine des neutrinos solaires, les résultats récents ont donc tranché en faveur d'une solution où les oscillations ont lieu de façon résonante dans le soleil (effet MSW) avec un grand angle de mélange. Une ultime confirmation devrait venir de la mesure de la raie du  $^7\text{Be}$ : c'est l'objet de l'expérience Borexino, à laquelle participe une équipe française. Au delà, une mesure précise de l'ensemble du spectre des neutrinos solaires (en particulier les neutrinos pp) reste à réaliser. Elle permettrait de mettre des contraintes sur des phénomènes secondaires comme l'influence du champ magnétique solaire sur le moment magnétique du soleil. Si des progrès astrophysiques dans ce domaine sont attendus dans les 5 prochaines années, l'investissement des physiciens des particules français est peu important et le restera sans doute.

La première pièce manquante de la matrice de mélange des neutrinos est l'angle  $\theta_{13}$ , pour lequel nous savons seulement qu'il est plus petit que  $10^\circ$  (résultat de l'expérience CHOOZ). Sa valeur est non seulement importante en soi, mais elle conditionne l'observabilité d'une éventuelle violation de la symétrie CP par les neutrinos. Différentes approches sont possibles, voire complémentaires, pour mesurer ce paramètre.

- D'une part, les expériences de confirmation sur accélérateur des oscillations de neutrinos atmosphériques atteindront une sensibilité de l'ordre de  $5^\circ$  (vers 2010).
- D'autre part une expérience auprès d'un réacteur nucléaire (de type CHOOZ améliorée) peut gagner jusqu'à un ordre de grandeur en sensibilité sur  $\sin^2 2\theta_{13}$  à échéance assez courte (vers 2010). Plusieurs projets sont à l'étude dans le monde, dont un sur le site de CHOOZ et qui a fait l'objet

d'une proposition d'expérience: Double-CHOOZ, avec la participation de groupes français. Bâti sur l'expérience acquise avec CHOOZ, en particulier sur la maîtrise et la réduction des bruits de fond, le projet peut assez rapidement déboucher, s'il bénéficie d'un bon soutien d'EDF et d'une collaboration renforcée.

- Plus sensibles mais à un peu plus long terme (premiers résultats attendus vers 2012 pour le projet T2K au Japon), les projets de recherche d'oscillations à grandes distances avec des superfaisceaux ouvrent la possibilité, en cas de résultat positif, d'une étude plus détaillée ouvrant la voie à la mesure de la violation de CP. Deux projets se développent dans le monde: T2K au Japon et NUMI-off axis aux Etats Unis. Les groupes européens ont majoritairement privilégié T2K dont la dynamique et le calendrier semblent plus fiables.

Avant même de connaître le résultat de ces projets, il est clair que la meilleure sensibilité à l'ensemble des paramètres des oscillations sera obtenue grâce à des expériences alliant un détecteur de la classe megatonne à un faisceau alimenté par un proton driver de quelques megawatts. Des R&D intenses sont nécessaires (et entamées au Japon, aux USA et en Europe) sur les faisceaux de protons, d'ailleurs communs à d'autres domaines de physique nucléaire et de physique des particules. De même des R&D sont indispensables pour les détecteurs souterrains qui devront être polyvalents et se préoccuper de durée de vie du proton, de neutrinos solaires, de neutrinos de supernovae ou de neutrinos atmosphériques. Là encore des études sont menées au Japon, aux USA et en Europe. En Europe, le Cern décidera en 2010 de l'opportunité de se doter d'un faisceau de protons de très haute intensité et d'un superfaisceau de neutrinos et les foreuses devraient achever le percement du tunnel de secours du Fréjus en 2009 ... et être disponibles pour y creuser la caverne d'un détecteur megatonne. Il est donc essentiel que les groupes européens - en particulier français - consacrent un effort soutenu à la préparation de ces possibilités.

Si l'angle  $\theta_{13}$  est trop petit et pour une étude détaillée de la violation de CP, seules des machines plus performantes comme les usines à neutrinos et les beta-beams (faisceaux d'ions radioactifs) permettront de bien séparer les effets de matière des oscillations proprement dites. Ces machines ultimes doivent être inscrites dans un programme de développement international: en Europe, le réseau CARE (et ses branches BENE ou HIPPI) coordonne cet effort. Il est important que les groupes français continuent d'y collaborer.

L'ensemble des programmes défendus ci-dessus est placé dans un cadre à 3 neutrinos actifs: il ignore donc l'indication positive d'une oscillation vue par l'expérience LSND et qui ne serait compatible avec les autres résultats qu'au prix d'un neutrino stérile supplémentaire. Ce résultat est actuellement en cours de vérification par l'expérience MiniBooNE à Fermilab. Aucun groupe français n'y est associé, mais il est évident que si le résultat de LSND était confirmé, il bouleverserait complètement le paysage et les groupes français s'associeraient pour participer à caractériser ce phénomène.

Au delà de leurs propriétés intrinsèques, l'étude et la détection des neutrinos permet d'aborder d'autres domaines comme la physique nucléaire, l'astrophysique ou la cosmologie. Les neutrinos solaires ont été à cet égard particulièrement riches. L'étude des supernovae, de ce point de vue multidisciplinaire, pourrait dans les 10 ans qui viennent se révéler aussi productive. Il n'existe pas de modèle viable d'explosion de SN de type II et l'observation des spectres précis en temps et en énergie des quelques  $10^5$  neutrinos d'une SN galactique dans un détecteur megatonne serait cruciale pour contraindre ces modèles. Mais des mesures spécifiques d'interactions de neutrinos avec des noyaux d'intérêt astrophysique sont aussi nécessaires pour progresser sur la compréhension de la nucléosynthèse des éléments lourds par exemple. Des faisceaux d'ions radioactifs intenses seront

disponibles dans les années à venir et devraient être utilisés à cet effet. Les faisceaux et les détecteurs restent à concevoir.

Enfin, il faut rappeler que l'effort théorique a joué un rôle fondamental dans la physique du neutrino (développement du formalisme des oscillations incluant les effets de propagation dans la matière, calcul du flux des neutrinos solaires, effet des neutrinos sur la nucléosynthèse primordiale ...). Dans une période expérimentale à venir très dense, ces efforts doivent être soutenus voire même amplifiés, en particulier en France, autour de la phénoménologie des neutrinos (oscillations, mais aussi calcul des éléments de matrice nucléaire pour la double désintégration  $\beta\beta$ ), de la connection des masses des neutrinos avec l'asymétrie matière-antimatière de l'univers (à travers la leptogénèse) ou du mécanisme de génération des masses. Les échanges avec les expérimentateurs, par exemple à travers la structure d'un GDR doivent être renforcés pour permettre l'intégration des résultats et développements à l'ensemble des disciplines touchées par la physique du neutrinos.

## **IV - Le plasma de quarks et gluons**



# **Plasma de Quarks et de Gluons**

**(Prospectives DAPNIA/IN2P3 pour les années 2004 - 2014)**

## **Groupe de Travail**

Laurent Aphetche (SUBATECH, Nantes), François Arleo (LPTHE, Jussieu),  
Patrick Aurenche (LAPTH, Annecy), Nicole Bastid (LPC, Clermont-Ferrand),  
Jérôme Baudot (IReS, Strasbourg), Marc Bedjidian (IPN, Lyon),  
Hervé Borel (DAPNIA, Saclay), Guy Chanfray (IPN, Lyon),  
Marie-Pierre Comets (IPN, Orsay), Philippe Crochet (LPC, Clermont-Ferrand), Olivier Drapier  
(LLR, Palaiseau), Christian Finck (SUBATECH, Nantes),  
Frédéric Fleuret (LLR, Palaiseau), Walter Geist (IReS, Strasbourg),  
François Gelis (SPhT, Saclay), Michel Gonin (LLR, Palaiseau),  
Jean Gosset (DAPNIA, Saclay), Raphaël Granier de Cassagnac (LLR, Palaiseau), Denis Jouan  
(IPN, Orsay), Christian Kuhn (IReS, Strasbourg),  
Ginès Martinez (SUBATECH, Nantes), Jean-Yves Ollitrault (SPhT, Saclay),  
Fouad Rami (IReS, Strasbourg), Philippe Rosnet (LPC, Clermont-Ferrand),  
Christelle Roy (SUBATECH, Nantes), Dominique Schiff (LPT, Orsay),  
Yves Schutz (SUBATECH, Nantes), Florent Staley (DAPNIA, Saclay),  
Christophe Suire (IPN, Orsay), Raphaël Tieulent (IPN, Lyon).

## **Executive Summary**

## Synthèse

Forte d'une cinquantaine de physiciens permanents, la communauté française des ions lourds ultra relativistes est riche d'une expérience de longue date qui a commencé avec les expériences auprès de l'AGS de Brookhaven (Etats-Unis) dans les années 80 et s'est poursuivie peu après à plus haute énergie avec plusieurs expériences du SPS au CERN. La plupart de ces expériences étant arrivées à leur terme, les physiciens qui s'y étaient engagés, en collaboration avec leurs collègues étudiant les collisions d'ions lourds à plus basse énergie, se sont investis dans la réalisation des expériences auprès des collisionneurs RHIC à Brookhaven (opérationnel depuis 2000) et LHC au CERN (démarrage prévu en 2007). Par ailleurs, une partie de la communauté réfléchit aujourd'hui à une participation, à l'horizon 2012, à une expérience auprès d'un futur complexe d'accélérateurs, FAIR au GSI.

L'objectif de ces expériences d'ions lourds aux énergies ultra relativistes du RHIC et du LHC est de caractériser un nouvel état de la matière nucléaire. En effet, les prédictions de la chromodynamique quantique (QCD) suggèrent qu'à très haute température, la matière confinée subit une transition de phase vers un état où les quarks et les gluons évoluent librement : le Plasma de Quarks et de Gluons (QGP). De façon complémentaire, FAIR permettra l'étude de la transition de phase dans la région des hautes densités baryoniques offrant ainsi l'opportunité d'une exploration complète du diagramme de phases de la matière nucléaire.

Ce document se propose de résumer la situation actuelle puis les objectifs à court et moyen termes (de 2004 à 2008) et enfin les perspectives à 10 ans de notre communauté. Un bilan des moyens humains révèle la sous criticité du nombre de physiciens engagés pour mener à bien l'ensemble des programmes possibles.

### **Situation actuelle et à moyen terme**

Les résultats remarquables obtenus auprès du SPS, notamment dans les collisions Pb-Pb, ont conduit à l'annonce, en février 2000, de l'obtention de « preuves décisives de l'existence d'un nouvel état de la matière nucléaire dans des collisions entre ions lourds », sans toutefois offrir l'opportunité de pleinement le caractériser.

#### **RHIC (implication de 6 laboratoires français)**

Le programme de recherche du RHIC s'inscrit dans la continuité des études précédemment menées au CERN et à l'AGS et s'est donné comme objectif d'observer et de caractériser la production de QGP. Contrairement aux programmes du CERN qui opéraient en mode « faisceau sur cible fixe », RHIC fonctionne en mode collisionneur pouvant accélérer divers ions du proton à l'or et permettant d'atteindre des énergies dans le système du centre de masse nucléon-nucléon ( $\sqrt{s_{NN}}$ ) plus de dix fois supérieures à celles du SPS.

Des physiciens français sont impliqués dans trois des quatre expériences implantées auprès du RHIC, les expériences BRAHMS, PHENIX et STAR. Au bout de quatre années de fonctionnement, les expériences du RHIC, grâce à leurs nombreuses données de grande qualité, ont ouvert une nouvelle ère dans l'étude de la matière nucléaire sous des conditions extrêmes. Il faut, à ce propos, souligner la convergence de leurs résultats sur tous les principaux points de physique.

Les groupes français ont choisi, à l'instar des expériences du RHIC, de se diversifier dans l'étude des différentes observables pouvant signer la formation d'un QGP. En effet, ils se sont impliqués

dans l'étude des sondes relatives à la production d'étrangeté, des particules de grande impulsion transverse ou encore des saveurs lourdes (charmonium, charme et beauté "ouverte"). Les deux premières ont permis de mettre en évidence, respectivement, la présence d'un écoulement collectif à un degré partonique et la perte d'énergie dans un milieu extrêmement dense, phénomène appelé *jet quenching*. Quant aux mesures préliminaires du charme, sur la base des faibles statistiques collectées lors des premières années de fonctionnement du RHIC, elles ont montré que la production de charmonia n'est pas compatible avec la forte augmentation prévue par certains modèles de recombinaison. Cette étude sera intensivement menée avec l'analyse des données prises en 2004 qui offrent une statistique suffisante pour.

Les données ainsi analysées, largement par les physiciens français, indiquent que le système généré dans les collisions d'ions lourds les plus violentes, est proche de l'équilibre thermodynamique et atteint une densité à laquelle il n'est plus concevable que les hadrons soient les degrés de liberté du système. Les phénomènes observés s'expliquent par la création d'un plasma au RHIC qui, contrairement à ce qui était attendu, n'est pas un gaz parfait mais plutôt un fluide quasi parfait caractérisé par une viscosité très faible et un degré d'équilibre thermique qui pourrait être important. Un nouvel acronyme est apparu pour qualifier ce plasma particulier : sQGP pour *strongly interacting QGP*.

L'analyse des données collectées en 2004 devrait permettre de confirmer ces interprétations et de conclure de manière significative sur l'augmentation ou la suppression de la production des charmonia. Mais elle devrait aussi et surtout les enrichir par l'étude d'observables complémentaires, accessibles aujourd'hui grâce aux grandes luminosités atteintes par RHIC et la disponibilité de nouveaux détecteurs.

Il est important de rappeler que la participation aux analyses des données collectées s'est réalisée parallèlement aux développements instrumentaux, en particulier la construction du détecteur SSD pour STAR qui s'achève cet été. La maintenance de l'électronique des deux bras dimuon de PHENIX est à la charge de nos laboratoires ainsi que celle des chambres à projection temporelle de BRAHMS.

### **LHC (implication de 6 laboratoires français)**

Parallèlement à leurs activités auprès des expériences du RHIC, les physiciens sont, pour la majorité d'entre eux, également impliqués dans la conception, la construction et les développements de logiciels de reconstruction et d'analyse de deux expériences du LHC : ALICE et CMS. Avec une énergie  $\sqrt{s_{NN}}$  presque trente fois supérieure à celle du RHIC, le LHC permettra d'explorer un terrain vierge pour l'étude du QGP ou sQGP, avec des températures, pressions, temps de vie de la phase déconfinée plus élevés qu'au RHIC.

En résumant les diverses activités, on peut constater que la plupart des physiciens français participent à la construction du bras dimuon d'ALICE. Ayant été à l'initiative de ce projet, l'IN2P3 et le DAPNIA contribuent très largement à cette réalisation (chambres de trajectographie, système de contrôle de l'alignement, système de déclenchement, détecteur V0, acquisition, activités logicielles). Au plan de la physique, le domaine étudié sera dans la continuité du programme suivi au SPS puis au RHIC, celui de la production des quarkonia (charmonia et bottomonia) et des saveurs lourdes "ouvertes".

La contribution de l'IN2P3 se situe également dans sa participation à la conception et la réalisation des couches externes de l'ITS d'ALICE, composées de détecteurs au silicium à micropistes. Là, les physiciens impliqués poursuivront l'investigation des particules étranges, bénéficiant du savoir-faire qu'ils ont acquis dans STAR.

De plus, toujours au plan de la physique, les chercheurs qui se sont investis dans les études relatives aux phénomènes de *jet quenching* au RHIC poursuivront leurs investigations aux énergies du LHC. Enfin, des physiciens français ont démontré l'importance et l'intérêt d'étudier la production de quarkonia auprès de l'expérience CMS. Des simulations ont permis de justifier que cette physique soit considérée comme un programme à part entière dans CMS, qui apparaît aujourd'hui comme un axe tout à fait complémentaire du programme dimuons d'ALICE.

## **Perspectives**

Dans une perspective à dix ans, la physique des ions lourds aux énergies ultra relativistes au RHIC, et ensuite au LHC, aura d'abord pour objectif de valider le scénario d'une collision d'ions lourds, élaboré à partir des données accumulées au RHIC puis d'évoluer d'une compréhension qualitative vers une physique quantitative.

## **RHIC**

Depuis deux années, les physiciens français tendent à réduire, voire cesser, leurs activités au RHIC afin de concentrer leurs efforts sur la préparation des expériences à venir, en particulier ALICE. Les effectifs des physiciens travaillant au RHIC ont baissé de manière importante et cette tendance ne fera que s'accroître jusqu'au démarrage du LHC. Ceci est d'autant plus dommageable que, comme nous l'avons écrit, les résultats obtenus au RHIC sont riches d'informations nouvelles, donnant toujours plus d'intérêt aux investigations théoriques et expérimentales autour du QGP. De plus, les développements instrumentaux arrivant à leur terme, les physiciens pourront se concentrer pleinement sur la physique de qualité faite au RHIC, tout en assurant bien évidemment, la maintenance de leurs réalisations techniques. Il est évident que si nous voulons dans les années à venir poursuivre notre effort au RHIC, il sera nécessaire de tenter de conserver des effectifs adéquats : soit en renforçant les groupes, soit en concentrant les forces sur une seule expérience au RHIC.

## **LHC**

La communauté française d'ALICE s'investi dans la construction des détecteurs depuis de nombreuses années. Elle ne pourra faire fructifier ses efforts et acquérir une visibilité dans la physique lors du démarrage du LHC que si les groupes de physiciens se renforcent et accueillent de nouveaux entrants.

La situation du groupe CMS ions-lourds en France est difficile. Le trop faible nombre de chercheurs impliqués met en danger la poursuite de leur recherche.

Par ailleurs, au-delà des thèmes de physique déjà prévus pour les premières années du LHC, un programme d'upgrade, qui se précisera avec les premiers résultats, ne manquera d'intéresser la communauté.

## **CBM**

CBM est l'une des expériences majeures planifiées auprès de l'accélérateur FAIR au GSI-Darmstadt (Allemagne). Elle propose, de façon pleinement complémentaire aux activités du RHIC et du LHC, d'étudier la matière nucléaire dans la région des hautes densités baryoniques nettes notamment aux alentours du point tri-critique du diagramme de phases. Si les premières données ne sont pas collectées avant 2012, la R&D autour de capteurs à pixels devant équiper le détecteur de vertex de CBM, a débuté avec notamment l'implication d'un physicien. Celle-ci peut évoluer vers de plus grandes responsabilités selon le degré de renforcement de cette activité.

## **Théorie**

Plusieurs thèmes importants de la physique des collisions d'ions lourds

ultrarelativistes et de la chromodynamique quantique sont développés par des théoriciens français. Que ce soit à la lumière des résultats récents des expériences du RHIC ou à la demande des futures expériences ALICE, CMS ou CBM, il apparaît crucial de renforcer une collaboration entre les expérimentateurs et les théoriciens. Afin de concrétiser ce besoin, il nous paraît judicieux et indispensable de créer une structure semblable à celle d'un GDR autour de notre thématique.

### *Liste des acronymes figurant dans le document*

AGS	Alternating Gradient Synchrotron
ALICE	A Large Ion Collider Experiment
ATLAS	A Toroidal LHC Apparatu
BNL	Brookhaven National Laboratory
BRAHMS	Broad Range Hadron Magnetic Spectrometers
CBM	Compressed Baryonic Matter experiment
CGC	Color Glass Condensate
CMS	Compact Muon Spectrometer
FAIR	Facility for Antiproton and Ion Research
FOPI	FOur PI experiment
ITS	Inner Tracking System
LHC	Large Hadron Collider
PHENIX	Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment
RHIC	Relativistic Heavy Ion Collider
QCD	Quantum ChromoDynamics
QGP	Quark Gluon Plasma
sQGP	Strongly coupled QGP
SIS	Schwer Ionen Synchrotron
SPS	Super Proton Synchrotron
SSD	Silicon Strip Detector
STAR	Solenoidal Tracker At Rhic

## Volet humain

	<i>Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015</i>	<i>accélérateur, détecteur, calculateur....</i>	<i>Etude de faisabilité, avant projet détaillé, construction ....</i>				<i>Autant que possible détailler par année et par organisme (IN2P3 et CEA)</i>	
Priorité	Nom du projet	Type de projet	Etat d'avancement	Années de début et de fin des investissements	Pays partenaires	Nombre de physiciens français participant au projet	Nombre de techniciens et ingénieurs français participant au projet en nombre d'hommes par an.	Commentaires
	ALICE (LHC)	Détecteur	Construction	2001-2005	30 pays (90 Instituts)			Le domaine QGP va perdre en France 10 personnes équivalent temps-plein entre 2004 et 2008 (en l'absence d'embauche)
1	ALICE-MUON	Détecteur	Construction	2001 - 2005	6 pays (15 Instituts)	IN2P3: 23 CEA: 3	IN2P3: 15 CEA: 5(2005), 4(2006), 2(2007)	Plusieurs activités s'arrêtent entre 2004 et 2008, en partie au profit du regroupement vers Alice.
2	ALICE-ITS	Detecteur	Construction	2004 - 2005	13 pays (27 Instituts)	IN2P3:5	IN2P3:13 (2006) 0,35 (années suivantes)	Les activités au RHIC se réduisent mais ne s'arrêtent pas, du moins entre 2004 et 2008
	CMS	Detecteur	Construction		36 pays (156 Instituts)			
2	CMS-Ions Lourds	Detecteur	Simulation			IN2P3 : 2		L'activité CMS-Ions Lourds ne pourra continuer seulement et seulement si un renforcement arrive, de 5 à 6 physiciens.
3	CBM	Detecteur	Projet			IN2P3 : 2		5 physiciens seraient souhaités pour que ce projet soit viable ainsi que 10 techniciens par an pendant la durée du projet.

## Volet financier

	<i>Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015</i>	<i>accélérateur, détecteur, calculateur .....</i>	<i>Etude de faisabilité, avant projet détaillé, construction....</i>			<i>Cette colonne sera consolidée par les directions de l'IN2P3 et du CEA</i>		<i>Cette colonne sera consolidée par les directions de l'IN2P3 et du CEA</i>	
Priorité	Nom du projet	Type de projet	Etat d'avancement	Années de début et de fin des investissements	Coût total hors personnel (en M€)	Coût total en incluant le personnel (en M€)	Contribution IN2P3+CEA (hors personnel) en M€	Contribution IN2P3+CEA (en incluant le personnel) en M€	Autres contributions Françaises en M€
	ALICE (LHC)	Détecteur	Construction	2001 - 2005					
1	ALICE - Dimuon	Détecteur	Construction	2001 - 2005	15		IN2P3 : 5,23 CEA : 0,96		
2	ALICE - ITS	Détecteur	Construction	2004 - 2006	6,5		IN2P3: 1,55		
	CMS (LHC)	Détecteur	Construction						
2	CMS-Ions Lourds	Détecteur	Simulations	1995 - 2006					
3	CBM (FAIR)	Détecteur	Projet en discussion Etude de faisabilité pour le détecteur de vertex (R&D, simulations)	R&D : en cours Construction : 2008-2013 Exploitation > 2013	3 (coût global du détecteur de vertex)		1,2	0	
	<b>Pour information Projets en cours</b>								
	PHENIX (RHIC)	Détecteur	Prise de données Analyses						

	PHENIX- Muon	Détecteur	Prise de données Analyses	Investissements terminés	0,31		IN2P3 : 0,23 CEA : 0,08		
	STAR (RHIC)	Détecteur	Prise de données Analyses						
	STAR - SSD	Détecteur	Construction achevée Prise de données Analyses	1998 - 2004	2,9		IN2P3 : 1,16		1,45

## **V - Structure interne des hadrons**



## Groupe de travail

# Structure Interne des Hadrons

Auteurs :

Nicole Bastid (LPC, Clermont)  
Jaume Carbonell (LPSC, Grenoble)  
Georges Cozzika (DAPNIA/SPP)  
Nicole d'Hose (DAPNIA/SPhN)  
Jean-Pierre Didelez (IPN, Orsay)  
Hélène Fonvieille (LPC, Clermont)  
Michel Garçon (DAPNIA/SPhN)  
Pierre Guichon (DAPNIA/SPhN)  
Michel Guidal (IPN, Orsay)  
Thierry Hennino (IPN, Orsay)  
Serge Kox (LPSC, Grenoble)  
Fabienne Kunne (DAPNIA/SPhN)  
Jean-Marc Le Goff (DAPNIA/SPhN)  
David Lhuillier (DAPNIA/SPhN)  
Alain Magnon (DAPNIA/SPhN)  
Bernard Michel (LPC, Clermont)  
Robi Peschanski (DSM/SPhT)  
Christophe Royon (DAPNIA/SPP)  
Franck Sabatié (DAPNIA/SPhN)  
Laurent Schoeffel (DAPNIA/SPP)  
Egle Tomasi (DAPNIA/SPhN)

## ***SYNTHÈSE DU RAPPORT***

La communauté française en physique hadronique a une expertise internationalement reconnue depuis plus d'une trentaine d'années sur la structure du nucléon, l'étude des baryons, mésons et résonances ainsi que sur QCD. La fermeture des accélérateurs français, puis de l'abandon du projet ELFE, ont conduit à un redéploiement des physiciens vers des machines extérieures, notamment JLab (19 physiciens), CERN/COMPASS (12 physiciens), GSI (9 physiciens) et MaMi (5 physiciens). Après un exposé des objectifs à court et moyen terme et de l'évolution alarmante des moyens humains (12 départs en retraite), nous présentons les perspectives à 10 ans.

### **I. La recherche en physique hadronique à court et moyen terme (2004-2009) :**

Actuellement les physiciens expérimentateurs travaillent avec une palette diversifiée de faisceaux: électrons à MaMi (1 GeV), photons à GRAAL (1,5 GeV), hadrons à GSI (2 GeV), électrons et photons à JLab (6 GeV), muons au CERN (200 GeV), collisionneurs de haute énergie à DESY et au Tevatron. Les thèmes de physique sont les suivants :

#### **1. Distributions de partons (20 physiciens)**

- La mesure de la polarisation des gluons ( $\Delta G$ ) dans le nucléon est l'objectif principal de COMPASS, mais plusieurs autres aspects de la structure en spin du nucléon sont également étudiés comme les distributions de partons polarisés longitudinalement ou transversalement. En particulier, des mesures de  $\Delta s$  (saveur étrange) et de la fonction de structure dépendant du spin transverse  $h_1$  sont réalisées. Un autre volet de physique concerne la production de mésons et d'hypérons, la spectroscopie des hadrons charmés, la mesure des polarisabilités du pion et du kaon ainsi que la recherche d'états exotiques, glueballs ou pentaquarks. Depuis l'origine de la collaboration, le SPhN a des responsabilités très importantes dans la réalisation de détecteurs, l'implication dans la cible polarisée, l'analyse des données et l'encadrement de la collaboration. Un investissement de l'ordre de 0.6 M€ est prévu en 2004-2006 pour compléter la détection par une grande chambre à dérive et améliorer l'électronique du RICH. Le programme ainsi défini continuera au moins jusqu'en 2009.
- Les distributions de partons généralisées (GPD) ont récemment émergé comme un thème nouveau de la physique hadronique. Grâce au dynamisme des théoriciens, la France a pris une position d'avant-garde dans ce domaine. Les premières données ont été fournies par les expériences H1, ZEUS et HERMES à DESY et CLAS à JLab. L'expérience H1 (avec une collaboration IN2P3-SPP) continuera jusqu'en 2007. Plusieurs groupes français (IPNO, LPC, LPSC, SPhN) sont les promoteurs de trois expériences à JLab (2004-2007). Les réalisations techniques correspondantes (mécanique, électronique, cryomagnétisme) se terminent cette année. La montée en énergie de JLab à 12 GeV permettra d'étendre considérablement le domaine cinématique. Des études sont également en cours au SPhN pour effectuer de telles mesures à COMPASS dans le futur avec les faisceaux de muons de 100-190 GeV. Etant données les énergies très différentes des faisceaux disponibles à JLab et COMPASS les 2 expériences futures sont tout à fait complémentaires pour leurs domaines cinématiques explorés.

2. **Facteurs de forme et polarisabilités** (14 physiciens, i.e. 4 PVA4 + 1 HAPPEX + 1 polar. + 8 G0)

- Les facteurs de forme étranges sont extraits des mesures d'asymétrie en diffusion élastique d'électrons polarisés, dans des cinématiques complémentaires auprès des expériences HAPPEX et G0 à JLab, PVA4 à MaMi. Les laboratoires français (SPhN et LPC-Clermont pour la 1<sup>ère</sup>, IPN-Orsay et LPSC-Grenoble pour la 2<sup>ème</sup> et IPN-Orsay pour la 3<sup>ème</sup>) ont un rôle fondamental dans ces expériences, tant du point de vue scientifique que technique (les derniers investissements concernent les compteurs Cerenkov pour la deuxième phase de G0 ; ceux-ci, réalisés à Grenoble, seront achevés en 2005). HAPPEX et PVA4 seront terminées dans les deux prochaines années, tandis que G0 continuera jusqu'en 2009, avec cependant une participation française réduite.

- Les polarisabilités généralisées du proton sont étudiées à MaMi avec la diffusion Compton virtuelle. Le groupe français (SPhN et LPC-Clermont) a toujours eu un rôle moteur dans ces expériences, qui continueront encore pendant environ quatre années, sans engagement technique.

3. **Baryons, mésons et résonances** (6 physiciens)

- L'étude de la photo-production des résonances du nucléon et des mésons a été menée auprès de GRAAL et JLab. Les physiciens et les techniciens du LPSC et de l'IPNO ont eu un rôle fondamental dans la mise en œuvre du dispositif GRAAL (photons polarisés) auprès de l'ESRF à Grenoble et la mise en œuvre de la cible HD polarisée. L'activité expérimentale des groupes français à GRAAL sera poursuivie jusqu'en 2005 avec notamment la vérification de la règle de somme GDH grâce aux premières mesures sur faisceau avec la cible polarisée.

Un des volets de la physique de COMPASS et de CLAS recouvre ce programme.

4. **Propriétés des hadrons dans la matière nucléaire** (9 physiciens):

- Le programme HADES à GSI étudie la modification des propriétés des mésons vecteurs et cherche des signatures de la restauration partielle de la symétrie chirale dans la matière nucléaire. Il sera poursuivi encore sur les 5 années à venir avec une communauté française (IPNO) qui s'est engagée dans d'importantes réalisations techniques et dans des responsabilités d'encadrement de la collaboration.

- Les objectifs scientifiques de l'expérience FOPI à GSI concernent essentiellement l'étude de l'équation d'état de la matière nucléaire et des effets de milieu nucléaire sur la production et la propagation des particules étranges. Une origine possible de ces effets de milieu est liée à la restauration partielle de la symétrie chirale. Les groupes français du LPC Clermont-Ferrand et de l'IReS Strasbourg sont impliqués depuis de nombreuses années dans ce programme, qu'ils continueront pendant environ 2 à 3 ans. Au delà de 2006, la participation à ALICE (Clermont-Ferrand) devrait entraîner une réduction de l'activité sur FOPI. Le groupe de Clermont-Ferrand est responsable d'un des cinq sous-détecteurs de FOPI.

5. **Etude de QCD**

- L'étude des densités de partons (quarks et gluons) comme moyen d'étude de QCD dans le régime perturbatif est un domaine où le DAPNIA et l'IN2P3 ont aussi contribué et pris des responsabilités (H1 et D0). Ce programme se prolonge naturellement de H1, qui s'arrêtera en 2007, à D0 puis auprès des expériences ATLAS et CMS au LHC.

En résumé, les physiciens français ont une expertise incontestable dans les expériences mentionnées et jouent un rôle moteur dans la plupart des collaborations : porte-parole, compétence souvent enviée dans les réalisations techniques, excellence dans l'analyse des résultats et leur interprétation ainsi que dans l'encadrement des étudiants.

Il faut souligner le support important offert par les théoriciens français dans tous ces domaines, ce qui permet aux expérimentateurs d'avoir un impact plus grand dans la définition des expériences et l'exploitation des résultats. Sur les distributions de partons, mesurés dans les expériences à HERA, à JLab et COMPASS, les premiers moments des distributions peuvent être obtenus dans des calculs sur réseau (Lattice QCD) et comparés aux mesures. Il en est de même pour les distributions de partons généralisées. Le spectre des résonances du nucléon ainsi que le spectre des mésons, objet de découvertes récentes spectaculaires et de recherches futures est évidemment un des champs d'action privilégié des calculs sur réseau, tant dans la région des quarks légers que dans le secteur des mésons charmés.

Il est fondamental de **maintenir le support théorique au niveau national** et de lui donner tous les moyens nécessaires à son développement. Un tel effort doit permettre de passer des calculs fait à ce jour dans le cadre de l'approximation des quarks passifs à des calculs réalisés avec des quarks dynamiques. Les calculs sur réseau jouent un rôle essentiel dans notre compréhension de la théorie quantique des champs dans le régime non perturbatif. Ils constituent en particulier le moyen privilégié pour résoudre les systèmes régis par les interactions fortes (chromodynamique quantique) au niveau nucléaire et sub-nucléaire. Il serait souhaitable que la communauté française puisse bénéficier d'une structure de collaboration solide – type GDR – regroupant les théoriciens des laboratoires où cette activité se développe et gardant des liens étroits avec la communauté expérimentale concernée. Leur désir et leur besoin de rester compétitif par rapport aux autres pays européens doivent absolument être accompagnés d'une dotation en moyens de calcul spécialisé performant, dépassant le Teraflop en régime soutenu (voir les Proceedings du Workshop « Lattice QCD : présent et futur » organisé au LAL en avril dernier, disponible à l'adresse <http://events.lal.in2p3.fr/conferences/lqcd> ).

## II. Evolution des effectifs et évolution thématique :

Hors H1 et D0<sup>1</sup>, 49 physiciens expérimentateurs travaillent actuellement sur les programmes cités plus haut. Ils sont répartis de la manière suivante auprès des différents accélérateurs (règle de somme pas respectée, certains physiciens se partageant sur plus d'une activité):

19 à JLab :	6 LPSC + 5 IPNO + 5 SPhN <sup>2</sup> + 3 LPC
12 sur CERN/COMPASS :	12 SPhN <sup>2</sup>
9 à GSI :	4 IPNO + 4 LPC + 1 IReS <sup>3</sup>
6 sur Graal :	3 LPSC + 3 IPNO
5 sur MaMi <sup>4</sup> :	4 IPNO + 1 LPC

Tandis que la répartition par thèmes est la suivante :

Facteurs de forme étranges :	14 physiciens (6 LPSC + 7 IPNO + 1 SPhN)
Polarisation des gluons :	12 physiciens (12 SPhN <sup>5</sup> )

<sup>1</sup> Les physiciens IN2P3 travaillant sur H1 et D0 n'ont pas répondu au « recensement » que nous avons organisé.

<sup>2</sup> Dont 2 physiciens sur 2 programmes JLab et COMPASS.

<sup>3</sup> Ce physicien a son activité principale dans la thématique Plasma quark-gluon

<sup>4</sup> 3 physiciens du SPhN sont également dans ce programme, mais ce n'est pas leur activité principale

GPD : 12 physiciens (6 SPhN<sup>5</sup> + 3 LPC + 2 IPNO + 1 LPSC)  
 Hadrons dans les noyaux: 9 physiciens (4 IPN + 4 LPC<sup>6</sup> + 1 IReS<sup>7</sup>)  
 Baryons, mésons, résonances : 6 physiciens<sup>8</sup> (3 LPSC + 3 IPNO<sup>9</sup>)  
 Polarisabilités généralisées<sup>4</sup> : 1 LPC

Et enfin celle par institut de recherche :

34 IN2P3 : soit 16 IPNO, 9 LPSC, 8 LPC, 1 IReS  
 15 DAPNIA/SPhN

L'évolution dans les prochaines années est dominée d'une part par la fin des programmes de mesure des facteurs de forme étranges du proton, d'autre part par un **départ massif en retraite** : 12 physiciens, **dont 11 de l'IN2P3**, auront plus de 65 ans avant 2014, et pour la plupart d'ici 2008. Elle est aussi en partie la conséquence du trop faible niveau d'embauches pendant les années précédentes, de l'abandon du projet ELFE, et de l'éloignement géographique de JLab. **Un niveau significatif d'embauches** est obligatoire pour pallier les départs en retraite mentionnés plus haut. C'est un enjeu national que de conserver la visibilité actuelle des groupes français dans les collaborations internationales sur des thèmes de recherche novateurs en physique hadronique.

10 physiciens choisissent de se réorienter à court terme vers des thèmes à la frontière de la physique hadronique (2 sur le moment électrique dipolaire du neutron, 5 sur ALICE, 1 sur ATLAS ou CMS, 1 sur les neutrinos et 1 sur GSI/CBM).

**A l'horizon de 2010, sans tenir compte d'embauches futures, la communauté restante d'au moins 21 physiciens se répartira sur les trois axes de recherche suivants:**

- CERN/COMPASS : spin et GPD et autres distributions de partons à petit  $x_B$ , ...
- JLab/CLAS++ : GPD et autres distributions de partons à grand  $x_B$ , ...
- GSI/PANDA : Mésons dans les noyaux, facteurs de forme du nucléon, ...

auxquels il faut rajouter pour la communauté (non recensée) de physique des particules :

- CERN/LHC : QCD dans le régime perturbatif

Nous développons ces programmes ci-dessous.

### III. Les programmes vers 2010 et les moyens requis :

- Après le programme muon et hadron de COMPASS décrit en partie I, 11 physiciens du DAPNIA (J. Ball, Y. Bedfer, E. Burtin, N. d'Hose, M. Garçon, J.M. Le Goff, C. Marchand, J. Marroncle, D. Neyret, S. Platchkov, L. Schoeffel) ont exprimé leur intérêt pour l'étude des distributions de partons généralisées à COMPASS via la diffusion Compton virtuelle et la production de mésons. Ces expériences ne peuvent être réalisées qu'à partir de 2010 et pourraient bénéficier de l'augmentation de l'intensité des faisceaux de protons du SPS au CERN. Au moins un détecteur de recul est nécessaire pour compléter le spectromètre actuel COMPASS et détecter les protons aux angles arrière. Un prototype est en cours de réalisation

<sup>5</sup> 4 physiciens sur 2 thématiques,  $\Delta G$  et GPD

<sup>6</sup> environ 1.5 équivalent plein temps, le reste de l'activité étant sur la thématique Plasma quark-gluon

<sup>7</sup> environ 0.3 équivalent plein temps, le reste de l'activité étant sur la thématique Plasma quark-gluon

<sup>8</sup> auxquels il faut ajouter les communautés COMPASS et CLAS sur ces aspects

<sup>9</sup> un physicien est à mi-temps sur cette activité, le reste étant sur la thématique Plasma quark-gluon

dans le cadre des projets JRA du 6<sup>ème</sup> PCRD. Il faut ensuite prévoir un investissement français d'environ 0,8 M€ pour ce projet. Une telle expérience sera discutée lors du comité scientifique du SPS qui se tiendra à Villars du 22 au 28 Septembre 2004 et qui examinera le futur de la physique sur cible fixe au CERN.

•• Un groupe de 8 physiciens (J. Ball, C. Ferdi, M. Guidal, M. Garçon, J. Marroncle, B. Michel, F. Sabatié, E. Voutier) du SPhN et de l'IN2P3 souhaite bénéficier de son expertise et de la montée en énergie à 12 GeV de l'accélérateur CEBAF pour développer son activité à JLab sur l'étude des distributions de partons généralisées dans le domaine des quarks de valence. Un projet de trajectographe est en pré-étude au DAPNIA/SEDI. Le groupe prévoit de s'intéresser aussi à d'autres éléments du détecteur central de CLAS++. Cela représenterait un investissement français total d'environ 1,6 M€. La montée en énergie à 12 GeV ouvre aussi d'autres champs de recherche novateurs, mais une participation à CLAS++ ([http://www.jlab.org/div\\_dept/physics\\_division/p\\_CDR\\_public/pCDR\\_final/pCDR\\_final\\_Equipment.pdf](http://www.jlab.org/div_dept/physics_division/p_CDR_public/pCDR_final/pCDR_final_Equipment.pdf) pages 33-65) a été identifiée comme fédératrice et particulièrement bien adaptée aux objectifs décrits ci-dessus. Le premier faisceau sur cible est attendu en 2011.

•• Actuellement une réflexion pour une participation au programme PANDA installé sur l'anneau d'antiprotons du projet FAIR de GSI est entreprise à l'IPNO par M. Guidal, T. Hennino, M. Mac Cormick, S. Ong, B. Ramstein et J. Van de Wiele, auxquels s'ajouteraient 2 autres physiciens (H. Fontvieille du LPC et E. Voutier du LPSC). Ces physiciens, aujourd'hui sur des projets différents, souhaitent se regrouper sur des expériences qui pourront être réalisées sur le futur détecteur PANDA, lequel entrera en fonctionnement à GSI au début de la décennie prochaine. Le programme s'articulera autour la structure du nucléon (facteurs de forme dans la région temps par exemple) et les effets de milieu. La contribution technique associée portera principalement sur le calorimètre électromagnétique.

•• L'étude de QCD et de ses limites grâce aux faisceaux de haute énergie (physique des jets, diffraction dure) évoluera naturellement de DESY (H1) au Tevatron (D0) puis au LHC (ATLAS et CMS). Le groupe français de taille assez modeste (M. Boonekamp, C. Royon, L. Schoeffel pour le SPP, ...pour l'IN2P3) travaille en étroite collaboration avec plusieurs théoriciens français et souhaite garder cette expertise très bien reconnue sur le plan international. Le groupe a besoin d'éléments spécifiques dans la détection des protons à l'avant (« pots romains »).

Les perspectives des physiciens de physique hadronique seront discutées et précisées au cours des prochains mois (meeting de Villars pour les activités au CERN, partage des responsabilités dans la construction de CLAS++ à JLab, définition d'un programme auprès de PANDA à GSI). Notre volonté de permettre à des pans essentiels de la recherche française de continuer à rayonner dans le paysage scientifique mondial doit s'appuyer sur un **plan de recrutement vigoureux et planifié**.

Le trépied qui se dessine ainsi (COMPASS/CLAS++/PANDA) est de nature à assurer un programme riche et cohérent, ainsi qu'un grand impact de la recherche française en physique hadronique. Il répondra aux questions clés soulevées par la Chromodynamique Quantique dans le régime non perturbatif qui régit la structure des hadrons.

Au delà de 2015 de nouvelles perspectives s'ouvriront aussi auprès de EIC (collisionneur électrons-ions aux USA) ou auprès de nouvelles machines (neutrinos ou muons) au CERN. Notre

communauté, reconnaissant l'intérêt de ces futures possibilités pour notre domaine, les étudiera avec la plus grande attention.

## Volet humain

	<i>Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015</i>	<i>accélérateur, détecteur, calculateur .....</i>	<i>Etude de faisabilité, avant projet détaillé, construction....</i>				Nombres de physiciens français participant au projet hors embauches futures			<i>Autant que possible détailler par année et par organisme ( IN2P3 et CEA )</i>	
Priorité	Nom du projet	Type de projet	Etat d'avancement	Années de début et de fin des investissements	Pays partenaires	Nombre de physiciens français DAPNIA+IN2P3 participant au projet hors embauches futures	total	IN2P3	DAPNIA	Nombre de techniciens et ingénieurs français participant au projet en nombre d'hommes par an.	Commentaires
A+	<b>CERN COMPASS phase 3 phase 2</b>	upgrade de COMPASS	en cours de construction	2004-2007	CERN: Allemagne, France, Italie, Japon, Pologne, Russie...	12=12+0	12	0	12		programme expérimental approuvé pour les années 2006-2010
A+		détecteur de recul	étude de faisabilité, réalisation d'un prototype	prototype: 2004-2006 détecteur final: 2007-2010	CERN: Allemagne, France, Italie, Japon, Pologne, Russie...	10=10+0	11	0	11		expression d'intérêt de la collaboration COMPASS pour un programme expérimental après 2010
A+	<b>JLab GPD 12 GeV 6 GeV</b>	solénoïde supra et calorimètre	en cours de construction	2002-2005	USA, France, Italie, Russie...	11=3+7	10	6	4		programme expérimental approuvé pour les années 2004-2007
A+		CLAS++	étude de faisabilité, avant projet du trajectographe central	2005-2010	USA, France, Italie, Russie...	7=3+4	8	4	4		les participations techniques des différentes composantes de la collaboration doivent être définies en 2005. La possibilité d'un regroupement géographique de certains physiciens IN2P3 est envisagée
A+	<b>GSI PANDA</b>	PANDA	étude de faisabilité d'un calorimètre	2005-2010	GSI, Allemagne, Italie, Russie, Suède...	7=0+7	8	8	0		la contribution à la phase de construction sera rediscutée en 2006, après la phase de R&D de 3 ans (2005 à 2007)

## Volet financier

	<i>Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015</i>	<i>accélérateur, détecteur, calculateur.....</i>	<i>Etude de faisabilité, avant projet détaillé, construction...</i>			<i>Cette colonne sera consolidée par les directions de l'IN2P3 et du CEA</i>		<i>Cette colonne sera consolidée par les directions de l'IN2P3 et du CEA</i>	
Priorité	Nom du projet	Type de projet	Etat d'avancement	Années de début et de fin des investissements	Coût total hors personnel (en M€)	Coût total en incluant le personnel (en M€)	Contribution IN2P3+CEA (hors personnel) en M€	Contribution IN2P3+CEA (en incluant le personnel) en M€	Autres contributions Françaises en M€
A+	<b>CERN COMPASS phase 3 phase 2</b>	upgrade de COMPASS	en cours de construction	2004-2007	~6 M€		0.5 M€		
A+		détecteur de recul	étude de faisabilité, réalisation d'un prototype	prototype: 2004-2006 détecteur final: 2007-2010	~3 M€		0.8 M€		
A+	<b>JLab GPD 12 GeV 6 GeV</b>	solénoïde supra et calorimètre	en cours de construction	2002-2005	2 M€		0.8 M€		
A+		CLAS++	étude de faisabilité, avant projet du trajectographe central	2005-2010	15M€		1.2 M€		
A+	<b>GSI PANDA</b>	PANDA	étude de faisabilité d'un calorimètre	2005-2010	~ 45M€		~1.5 M€		



## **VI - Terra Incognita pour les noyaux**



# Structure et dynamique nucléaire

(15 décembre 2004)

## Prospective à dix ans DSM/DAPNIA - IN2P3

### Personnes ayant participé à la réflexion :

A. Astier, F. Auger, F. Azaiez, C.O. Bacri, G. Ban, K. Bennaceur, B. Blank, Y. Blumenfeld, D. Boilley, B. Borderie, A. Boudard, R. Bougault, B. Bourriquet, C. Canchel, J. Carbonel, A. Chbihi, M. Chevallier, P. Chomaz, D. Curien, D. Dauvergne, J.C. David, R. Dayras, G. de France, J.P. Delaroche, P. Dessagne, O. Dorveaux, A. Drouart, J.E. Ducret, J. Dudek, T. Duguet, D. Durand, X. Fléchar, J. Frankland, B. Gall, A. Gillibert, J. Giovinazzo, A. Goeregn, D. Guinet, F. Gulminelli, F. Hannachi, K. Hauschild, C. Jollet, E. Khan, A. Korichi, W. Korten, V. Lapoux, P. Lautesse, F. Le Blanc, N. Le Neindre, D. Lacroix, S. Leray, E. Liénard, O. Lopez, A. Lopez-Martens, D. Lunney, F. Maréchal, J. Margueron, F. Mauger, J. Meyer, M. Morjean, W. Mittag, L. Nalpas, O. Naviliat-Cuncic, N. Orr, M. Parlog, J. Péter, E. Pollacco, N. Redon, F. Rejmund, M.F. Rivet, M. Rousseau, P. Roussel-Chomaz, B. Roussière, J. Sauvagne, H. Savajols, P. Schuck, C. Simenel, C. Stodel, L. Stuttgé, B. Tamain, C. Theisen, C. Thibault, N. Van Giai, P. Van Isacker, A. Villari, C. Volant, C. Volpe, J.P. Wieleczko.

### Correspondants du groupe :

F. Auger, Y. Blumenfeld, P. Chomaz

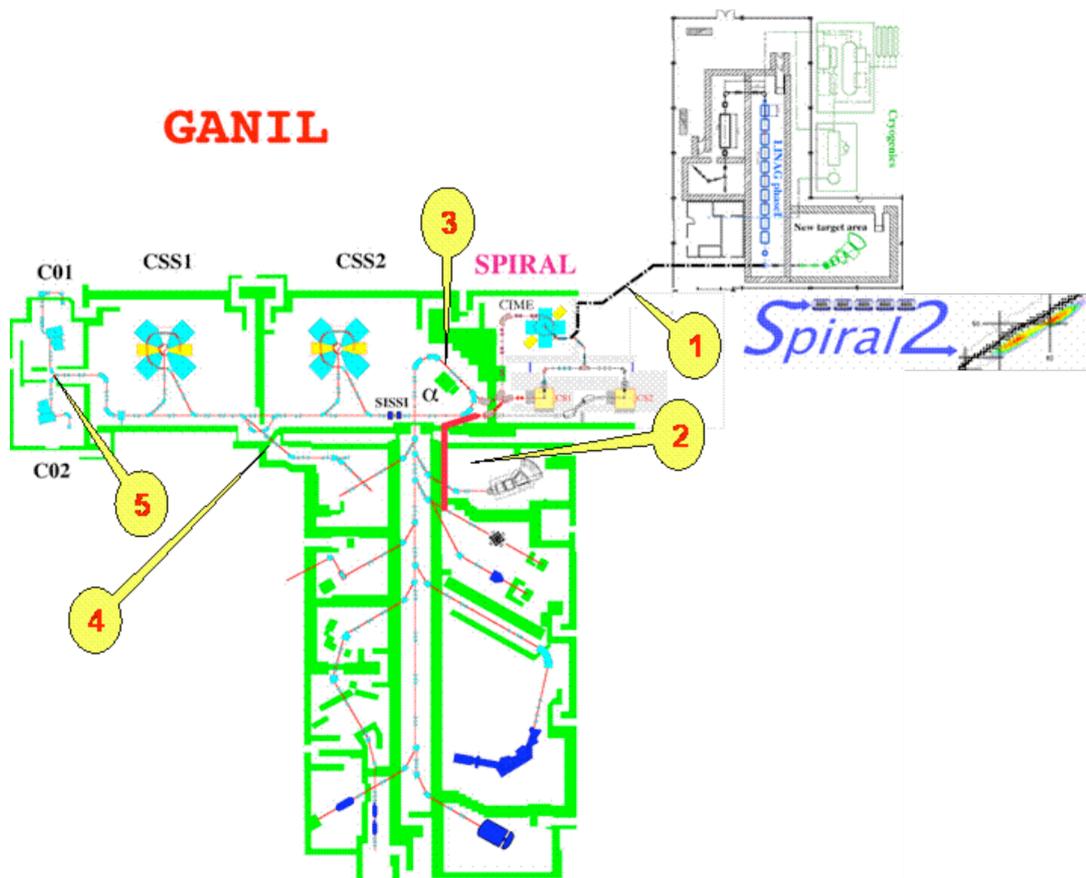
### Responsables du document :

R. Bougault, W. Korten

### Responsables des sous-groupes :

- *Théorie* : N. Van Giai, P. Van Isacker
- *Structure vers les drip-lines* : F. Azaiez, J. Giovinazzo, P. Roussel-Chomaz
- *Collectivité, formes et appariements* : J. Dudek, W. Korten, N. Redon
- *Matière, noyaux, transport et transition* : A. Chbihi, O. Lopez, J.P. Wieleczko
- *Noyaux lourds et super-lourds* : A. Drouart, C. Stodel, L. Stuttgé
- *Réactions nucléaires* : J. E. Ducret, F. Rejmund
- *Interactions fondamentales* : D. Lunney, O. Naviliat-Cuncic
- *Nouvelles sondes* : F. Hannachi, C. Volpe

# GANIL/SPIRAL-2 (2009) : une installation « multi-faisceaux » pour la physique européenne



**Exemple de 5 faisceaux en parallèles :**

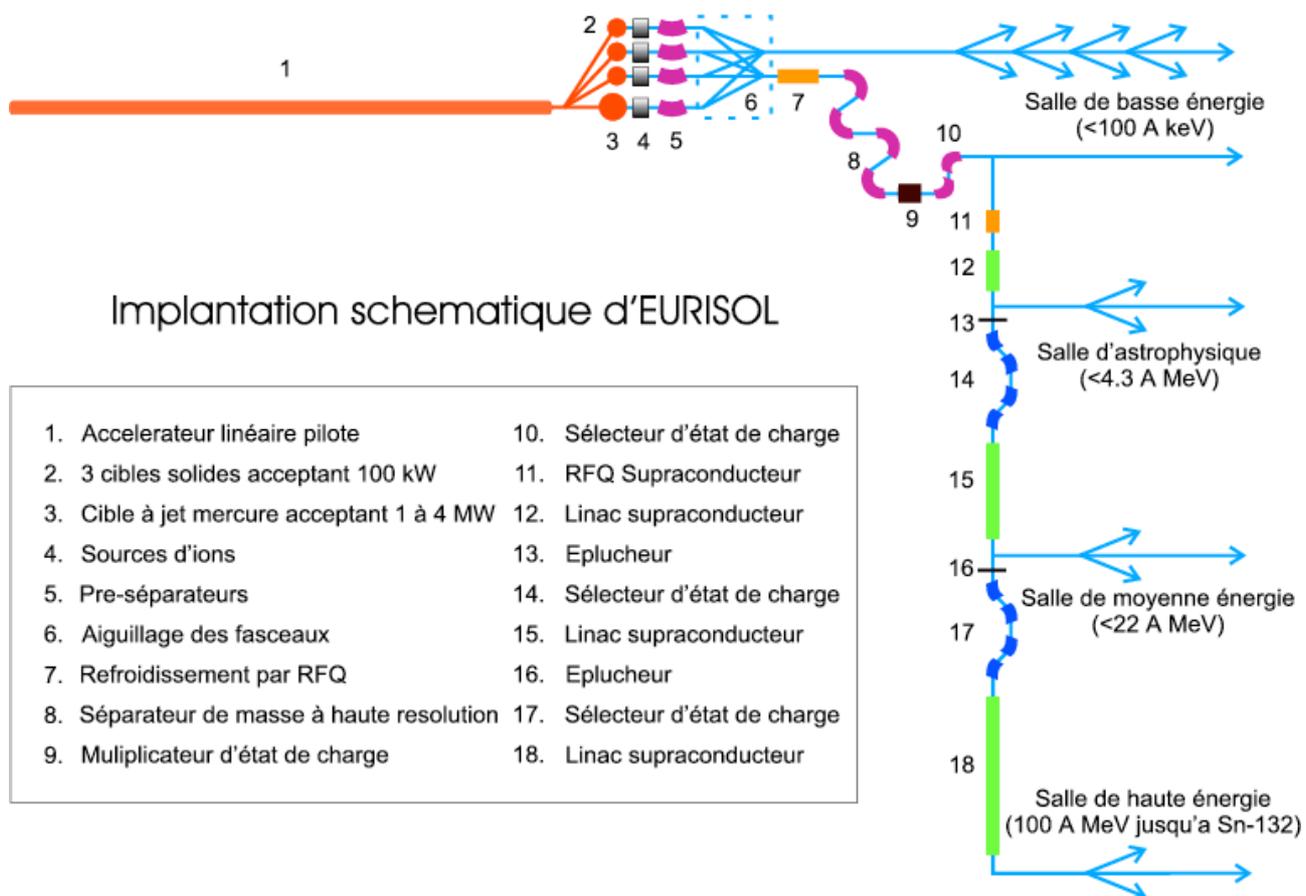
**SPIRAL-2 : 40 MeV deutons et production des fragments de fission**

- 1) RIB de basse énergie (LIRAT)**
- 2) RIB à 6 A.MeV de CIME vers VAMOS ou EXOGAM**

**GANIL Standard**

- 3) Faisceau stable ou RIB à 50-100 A.MeV (CSS1/2 et SSSI)**
- 4) Faisceau stable à 1 A.MeV pour irradiation (C0 et IRRSUD)**
- 5) Faisceau stable à 8-10 A.MeV (SME)**

# EURISOL (2016) : la future installation ISOL en Europe

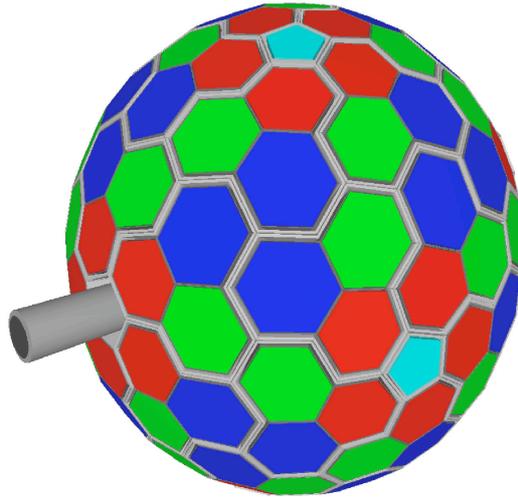


Implantation schematique d'EURISOL

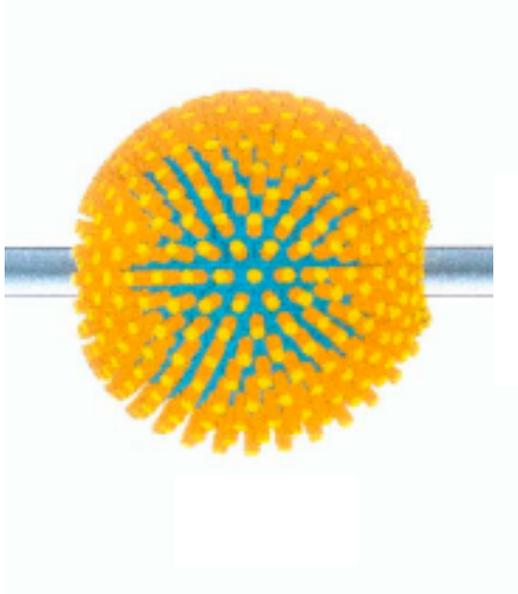
1. Accelérateur linéaire pilote	10. Sélecteur d'état de charge
2. 3 cibles solides acceptant 100 kW	11. RFQ Supraconducteur
3. Cible à jet mercure acceptant 1 à 4 MW	12. Linac supraconducteur
4. Sources d'ions	13. Eplucheur
5. Pre-séparateurs	14. Sélecteur d'état de charge
6. Aiguillage des faisceaux	15. Linac supraconducteur
7. Refroidissement par RFQ	16. Eplucheur
8. Séparateur de masse à haute résolution	17. Sélecteur d'état de charge
9. Multiplicateur d'état de charge	18. Linac supraconducteur

Instrumentation pour la structure et  
dynamique nucléaire, deux projets  
« phare »

**AGATA** (A**A**dvanced **G**amma **T**racking **A**rray)



**FAZIA** (F**o**ur p **A** and **Z** **I**dentification **A**rray)



## *Structure et dynamique nucléaire : la quête des extrêmes*

Le noyau atomique se trouve au cœur de l'univers et constitue plus de 99% de sa masse visible. Comprendre ses propriétés est un des enjeux de la recherche fondamentale. L'étude du noyau atomique, système fini de fermions en interaction dont les propriétés sont gouvernées à la fois par l'interaction forte et les interactions faibles et électromagnétiques, offre un potentiel de connaissance approfondie de notre univers car elle met en jeu un très grand nombre de phénomènes fondamentaux.

Dans les dernières années la physique nucléaire s'est orientée vers l'étude de la réponse des noyaux à des sollicitations extrêmes : rotations rapides, compressions et températures élevées, grande dissymétrie neutron-proton. La décennie à venir devrait être celle de la quête des limites de stabilité du noyau : limite en isospin grâce à l'approche des drip lines, limite en déformation avec la recherche de l'hyper-déformation, limite en masse avec la poursuite de l'aventure des noyaux super-lourds, limite en température et transition de phase.

### **Du problème à N-corps à l'univers complexe**

Les deux questions centrales de la physique nucléaire sont : comment un système complexe comme le noyau se construit-il à partir de quelques ingrédients simples et comment les régularités observées émergent-elles de ces systèmes complexes ? La physique nucléaire a su développer différentes réponses à ces questions contribuant ainsi à l'étude des systèmes quantiques fortement corrélés. Sa tâche essentielle est d'établir, à partir de l'interaction forte qui existe entre mésons et nucléons, les différents mécanismes conduisant aux propriétés statiques et dynamiques observées dans les noyaux, ainsi que leurs comportements au cours des collisions nucléaires. Ce sont in fine, les propriétés microscopiques ou mésoscopiques de ce système quantique, gouvernées par l'interaction forte et de sa dépendance en densité et en moment angulaire, qui sont l'objet des études menées en physique nucléaire. L'expérimentation et la modélisation de ces propriétés contribuent largement à la compréhension des systèmes quantiques dans de nombreux domaines.

Grâce aux développements de faisceaux de noyaux de plus en plus éloignés de la vallée de stabilité, notre connaissance du noyau s'étendra aussi bien du côté des noyaux riches en protons que du côté des noyaux riches en neutrons. En particulier, la compréhension de la structure et des mécanismes de production des noyaux super-lourds, la détermination des pressions et des énergies d'excitation limites en fonction du rapport  $N/Z$  représentent des enjeux majeurs de la physique nucléaire. Des phénomènes propres aux noyaux très instables comme les systèmes borroméens, les halos et peaux de neutrons, la structure des états faiblement liés et résonants près des drip-lines, les décroissances exotiques, l'émergence de nouveaux nombres magiques, de nouvelles excitations collectives, la multifragmentation à haut rapport  $N/Z$  doivent être étudiées expérimentalement pour donner de nouveaux points d'ancrage aux modèles. Un effort considérable est en cours pour repenser la nature de l'interaction effective utilisée dans ces modèles et pour les étendre de façon à mieux décrire les états faiblement liés des noyaux instables et leur couplage aux états du continuum. Il faut également progresser dans la compréhension des divers signaux de la transition de phase nucléaire et dans l'affinement des théories statistiques des systèmes finis.

Ces études concernent des domaines autres que la physique nucléaire. L'astrophysique (réactions nucléaires à basse énergie, dépendance en densité de l'énergie d'asymétrie), la mécanique statistique hors équilibre des femto-systèmes (transition de phase), l'étude des nano-grains métalliques ou les atomes froids dans les pièges magnétiques (RPA et au-delà) sont des disciplines

où les concepts développés en physique nucléaire sont mis à contribution. La physique nucléaire est donc communicable vers la physique des clusters métalliques, des supraconducteurs à haute température (condensats de Bose-Einstein), vers les modèles pour systèmes à faible nombre de particules, largement utilisés en physique atomique et moléculaire, vers les questions d'astrophysique liées aux scénarios des processus de nucléosynthèse et de structure des étoiles à neutrons, vers les études des interactions fondamentales, vers les problèmes de société (applications, retraitement des déchets nucléaires). Tous ces liens montrent que la physique nucléaire propose un « discours » sur la réalité de l'univers complexe.

### **Limites d'existence du noyau atomique**

Les concepts traditionnels de la structure et des propriétés du noyau atomique sont depuis quelques années remis en cause par des résultats expérimentaux inattendus. Cet ensemble de données sur les noyaux loin de la vallée de stabilité, sur les noyaux super-lourds, sur les états nucléaires très excités, très déformés et/ou en rotation rapide, sur les états isomériques constitue un énorme bras de levier pour modéliser cet ensemble fini constitué de protons et neutrons. C'est ainsi que l'avènement de machines fournissant des faisceaux de noyaux encore plus exotiques et plus intenses que ceux aujourd'hui disponibles est crucial pour ces études.

### **Les drip-lines**

Les noyaux très riches en neutron constituent une zone où la proximité des états liés et des états du continuum peut entraîner des modifications profondes des propriétés du noyau. La zone de la drip-line proton offre, quant à elle, la possibilité unique d'observer de nouvelles formes de radioactivité permettant de pousser à l'extrême les modélisations traditionnelles. L'accès aux drip-lines offre donc d'une part la possibilité d'accéder à de nouvelles propriétés du noyau et d'autre part l'opportunité de tester les modèles nucléaires à leurs limites. Donc d'une part, la question de l'existence d'un noyau très exotique est une question fondamentale, c'est ainsi que la nature des noyaux à halos, la réalité éventuelle du quadri-neutron, les radioactivités exotiques sont des défis pour les modélisations. D'autre part, la spectroscopie de ces noyaux très exotiques, de part l'extension de la gamme en isospin, fournit des tests puissants pour les méthodes de modélisation. La connaissance de l'évolution de la structure en couches du noyau avec le nombre de constituants est un objectif phare de la discipline. L'apparition de nouvelles fermetures de couches, la disparition des nombres magiques connus pour les noyaux stables, l'existence des îlots de stabilité des noyaux super-lourds sont autant de signaux expérimentaux attendus.

Ainsi l'objectif de la Physique de « Structure aux drip-lines » pour les dix ans à venir est de progresser dans la connaissance des noyaux exotiques loin de la stabilité, pour mieux comprendre l'interaction nucléaire, des limites de cohésion des noyaux et pour pouvoir prédire l'ensemble de leurs propriétés statiques et dynamiques sur toute la table de masse. Les faisceaux radioactifs remettent en cause notre compréhension de l'architecture des noyaux qui reposait essentiellement sur des études de noyaux stables ou proches de la vallée de stabilité. Un effort théorique important est en cours pour expliquer les nouveaux phénomènes et améliorer la fiabilité des modèles sur toute la carte des noyaux. Pour mieux appréhender cet objet à multiples facettes qu'est le noyau, des nouvelles données sont nécessaires qui requièrent une grande diversité des faisceaux exotiques disponibles (nature et énergie) et une variété d'approches expérimentales complémentaires via les projets instrumentaux (AGATA, EXABENE, GRAPA,...).

**SPIRAL-2** est le projet phare de la communauté française pour étudier la structure des noyaux exotiques. Il permettra d'explorer de nouvelles régions de la table des noyaux et de tester les prédictions des modèles théoriques. Avec les faisceaux stables délivrés par les cyclotrons, les faisceaux secondaires légers de SISSI à énergie intermédiaire et de SPIRAL à basse énergie, et les nouveaux faisceaux exotiques de SPIRAL-2, le GANIL fournira toute une palette de noyaux en

parfaite complémentarité avec GSI. Face à l'augmentation du temps de faisceau nécessaire pour réaliser une expérience avec des faisceaux radioactifs, la disponibilité de deux machines multi-faisceaux, **GANIL/SPIRAL-2** à partir de 2009, et **GSI/FAIR** à partir de 2012 est essentielle pour que les physiciens européens et en particulier français puissent garder un rôle prédominant en structure et dynamique nucléaire, dans un contexte de très forte compétition internationale (USA, Japon).

L'infrastructure en place au GANIL, avec les équipements expérimentaux existants et en projet et la qualité du support technique, est un atout supplémentaire pour que le laboratoire joue pleinement son rôle de pôle d'excellence européen en structure et dynamique nucléaire.

Par ailleurs, **SPIRAL-2** représente un défi technologique qui contribue à la R&D nécessaire pour **EURISOL** et permet à la France de se positionner pour accueillir cette future installation européenne à l'horizon 2015-2020.

## Formes et symétries

La structure fondamentale du noyau peut être comprise grâce à l'identification et la caractérisation des états nucléaires en fonction de l'énergie d'excitation et du moment angulaire. Les noyaux en rotation rapide peuvent changer de forme sous l'action des forces d'inertie. C'est ainsi qu'en tournant à très grande vitesse, un noyau peut se déformer et adopter différentes formes puis en quelques milliardièmes de seconde, il se désexcite et récupère sa forme initiale. L'étude de ces formes extrêmes éphémères conduit à une meilleure connaissance de l'interaction forte qui lie entre eux les nucléons. L'étude du phénomène de super-déformation qui a permis un test primordial des différents modèles nucléaires en est un bel exemple. L'utilisation de faisceaux très exotiques permettra d'effectuer des tests plus approfondis du noyau à des états extrêmes en moment angulaire en variant aussi son rapport proton sur neutron.

Les techniques expérimentales utilisées jusqu'à présent, en particulier les faisceaux stables et les multi-détecteurs à rayonnement gamma, ont permis d'importantes avancées dans la compréhension de la cohésion des noyaux à très haut spin ou très déformés mais il subsiste de nombreuses questions concernant le comportement collectif ou individuel des nucléons, l'évolution de l'appariement à très haut spin ainsi que le spin maximum que peut supporter un noyau. Des progrès spectaculaires sont attendus dans ce domaine grâce d'une part, au développement, dans un cadre européen, d'un nouveau spectromètre de rayonnement gamma, (**AGATA** pour "Advanced GAMMA Tracking Array") et de détecteurs associés de particules chargées ou de noyaux de recul, et d'autre part, de nouveaux accélérateurs de **faisceaux stables de haute intensité** et de faisceaux radioactifs (**SPIRAL**, **EURISOL**) d'énergies se situant autour de la barrière coulombienne. En effet, le gain en efficacité de détection attendu et la possibilité de produire, par réactions de fusion-évaporation induites par des faisceaux radioactifs, des états de très haut spin avec une stabilité accrue dans des noyaux stables ou riches en neutrons ouvriront la voie à la recherche de nouveaux phénomènes très rares, prédits par les calculs théoriques mais non encore observés expérimentalement, telle la transition de Jacobi, l'hyper-déformation ou l'existence de niveaux supérieurs de symétries. Les développements de ces instruments et de ces accélérateurs sont en cours principalement dans le cadre de projets européens et les physiciens français y sont fortement impliqués.

## Du liquide au gaz de nucléons

En augmentant l'énergie de bombardement, les collisions nucléaires permettent de fabriquer des noyaux de plus en plus excités jusqu'à n'obtenir au final qu'un gaz de nucléons. D'un état liquide, en augmentant son énergie d'excitation, le noyau subirait une transition de phase dont le signal caractéristique serait la multifragmentation (production multiple de fragments). Les enjeux de physique sont ici : 1) la mesure de grandeurs nucléaires fondamentales comme les densités de niveaux ou l'équation d'état ; 2) l'étude des limites d'existence des noyaux soumis à des contraintes

thermiques (température limite) ou mécaniques (rupture et déformation dynamiques). Pour comprendre la compatibilité théorique des différents signaux déjà observés, une large collaboration internationale s'est engagée autour d'une initiative de comparaisons critiques des différents modèles théoriques ainsi que des données expérimentales (World Consensus Initiative). Ce domaine a une place charnière entre la structure nucléaire et la physique des phénomènes critiques. Les résultats expérimentaux récents alliés au développement de nouveaux concepts théoriques le placent au premier plan pour répondre aux préoccupations actuelles de la physique des phénomènes à l'équilibre et hors équilibre des systèmes transitoires de taille finie. L'exploitation future de faisceaux très exotiques renforcera la spécificité et l'originalité de ce thème qui réside dans le fait que le noyau est un fluide à deux composants (les protons et les neutrons).

Les multi-détecteurs de grande efficacité comme INDRA sont incontournables pour cette physique qui nécessite des mesures exclusives. C'est parce qu'elle s'est fédérée autour d'un tel outil et qu'il existe une forte synergie entre théorie et expérience que la communauté française a atteint un niveau d'excellence dans la compétition internationale. Les expériences futures auront pour objectifs d'évaluer les contraintes imposées par la dynamique de la collision sur le processus de multifragmentation et de déterminer les caractéristiques thermodynamiques du système dans le diagramme de phase (volume de freeze-out, température, potentiel chimique). L'utilisation des faisceaux exotiques fournira des informations décisives sur le diagramme des phases et de nouvelles observables pour la détermination de l'équation d'état pour des valeurs extrêmes du rapport N/Z où la multifragmentation est attendue pour des excitations relativement faibles.

La problématique requiert dès maintenant un système de détection performant, permettant de gagner en granularité, de diminuer les seuils de détection, de mesurer précisément les distributions isotopiques sur une large gamme de fragments, de mesurer les vecteurs vitesses des produits libérés. Ces améliorations permettront une exploitation optimale des potentialités offertes par les faisceaux radioactifs de **SPIRAL-2** et **EURISOL**. Le détecteur 4p de 3<sup>ème</sup> génération indispensable apparaît être le concept européen **FAZIA** décrit dans le document « instrumentation for EURISOL ». La thématique nécessite de maintenir la disponibilité des faisceaux du GANIL et la compétitivité des installations LISE et SISSI jusqu'à l'arrivée de faisceaux exotiques d'énergies équivalentes délivrées par une installation ISOL. Des expériences complémentaires pourront être menées auprès d'autres installations (par exemple GSI) pour peu que les faisceaux délivrés par la machine soient adaptés à notre thématique. Ces outils expérimentaux donneront à la communauté française et européenne les moyens d'acquérir une position dominante dans la physique des collisions d'ions lourds aux énergies intermédiaires et dans la physique statistique des systèmes finis.

## Les super-lourds

La quête des noyaux super-lourds entend répondre à un ensemble d'interrogations fondamentales : quelle est la masse limite des noyaux, quels sont les éléments chimiques qui peuvent exister et quelles sont leurs propriétés chimiques ? L'existence des noyaux super-lourds repose sur une stabilisation accrue des noyaux par des effets de couche quantiques de couche qui contrent la répulsion coulombienne. Selon les modèles, cet îlot de stabilité serait localisé à N=184 autour de Z=120-126. Les études spectroscopiques des super-lourds permettent de mieux cerner cet îlot tout en nous renseignant sur la structure de la matière nucléaire à ses limites. La compréhension et surtout l'optimisation de la synthèse des super-lourds passe aussi par l'étude des mécanismes qui y participent : fusion, quasi-fission, fission, évaporation... et de leur compétition.

Dans le monde, les expériences de synthèse d'éléments super-lourds se déroulent sur des machines quasiment dédiées à cet effort : GSI (Z=112 par fusion dite froide), Dubna (Z=118 par fusion dite chaude), RIKEN (confirmation du Z=112 et peut-être Z=113). La communauté française est impliquée dans des études de mécanismes réalisées à Dubna, à Legnaro et dans des études spectroscopiques à Jyväskylä ainsi que dans celles en projet à Dubna. Au GANIL ont eu lieu des

expériences de synthèse ( $Z=108$ ), de spectroscopie ( $^{251}\text{Md}$ ) et de mécanismes (mesure des temps de fission du noyau composé  $Z=120$ ).

Dans le futur, il conviendra de confirmer les résultats obtenus par Dubna (avec des cibles d'actinides), en mettant en œuvre de nouvelles techniques d'identification non ambiguës des noyaux formés : pièges à ions, séparation chimique... De nouvelles voies de synthèse peuvent être explorées : fusion symétrique, utilisation de faisceaux de noyaux riches en neutrons. La spectroscopie des super-lourds légers ( $Z<109$ ) reste à faire. Elle exploitera les instruments les plus récents (**AGATA**) ainsi que de nouvelles méthodes comme la spectroscopie laser (**EXABENE**). Compte tenu des grandes incertitudes qui demeurent sur les processus mis en jeu, les études de mécanisme doivent se poursuivre : mesures des temps de fission permettant la localisation directe de l'îlot, backtracing neutron (**SATAN**), détection de gammas. En outre, à terme, la progression vers l'îlot de stabilité passera nécessairement par l'utilisation d'un **accélérateur de faisceaux stables de très haute intensité** avec une ligne dédiée à la synthèse des super-lourds possédant un **spectromètre de grande acceptance** ( $>70\%$ ) et un fort pouvoir de réjection ( $>10^{12}$ ).

## **Les réactions nucléaires**

Les réactions nucléaires sont un outil pour fabriquer des états nucléaires, elles sont donc intimement liées à l'étude du noyau et de ses limites. L'autre facette des réactions nucléaires est de permettre d'étudier la dynamique des collisions qui intègre une phase de transport, la voie d'entrée, et une phase de désexcitation, la voie de sortie. La détection des produits de réaction fournit des informations sur toute cette chaîne complexe qu'il faut ensuite démêler. L'étude de ces deux phases donne un accès complémentaires aux propriétés macroscopiques des noyaux.

### **Mécanismes de désexcitation**

L'étude des mécanismes des réactions permet d'accéder aux propriétés macroscopiques du noyau telles que, par exemple, l'émission de fragments, les barrières et les temps de fission, la viscosité de la matière nucléaire et, enfin, l'influence de la structure en couches des noyaux sur ces grandeurs. Si des progrès très importants dans ce domaine ont été obtenus récemment sur les réactions de spallation au GSI, il n'en demeure pas moins que les observables expérimentales dépendent de la combinaison des effets des voies d'entrée (propriétés de la sonde utilisée) et de sortie (désexcitation du noyau composé). L'étude des mécanismes de réaction doit se poursuivre par la mesure d'observables plus sensibles au noyau composé formé dans les réactions, ce qui permettra de mieux séparer ce qui dépend de la voie d'entrée et ce qui est lié à la désexcitation.

Plusieurs méthodes expérimentales sont envisagées :

- la mesure la plus exclusive possible, en cinématique inverse, des produits de réactions et la reconstruction cinématique la plus complète possible du noyau composé, sur le modèle de ce qui a été fait avec INDRA (au GANIL et au GSI). Mais comme dans l'expérience SPALADIN (GSI), les nouvelles mesures doivent être faites en association avec un spectromètre de recul pour reconstituer l'énergie dissipée dans le système lors de la collision et signer le mode de désexcitation (fission, fragmentation, évaporation) ;
- la variation des modes d'excitation du noyau, certaines réactions à basse énergie comme la fusion ou le transfert forment un noyau dans un état bien défini tout en offrant des voies de sorties très diverses, de la fission à la formation de « clusters » ;
- un programme sur la mesure des temps longs de fission par blocage dans des cristaux, comme cela a été initié au GANIL, ou par spectrométrie X, et de l'excitation résonnante des noyaux.

L'ensemble de ce programme nécessitera la réalisation d'expériences de fission, de fusion à basse énergie au GANIL avec les faisceaux exotiques de **SPIRAL**, **SPIRAL-2** et au **GSI/FAIR** avec des faisceaux stables pour l'étude de la spallation et de la fission et avec des faisceaux radioactifs pour les expériences de fission. Des expériences de canalisation sont prévues auprès des

deux accélérateurs et nécessiteront la construction de deux installations expérimentales. Les études de spallation nécessiteront des développements techniques autour d'un nouvel aimant de grande acceptance et à fort pouvoir de déviation magnétique (**GLAD/R3B**). Dans ce cadre le développement de détecteurs multi-trace pour les particules chargées de grande résolution et de grande dynamique de signal est envisagé.

### **Dynamique de la voie d'entrée**

La stratégie adoptée ici ne repose pas seulement sur la sélection de certaines collisions pour lesquelles la dynamique peut être contrôlée par quelques variables collectives, mais aussi sur l'utilisation de situations expérimentales présentant des signaux clairs d'effets dynamiques dominants. Ces situations expérimentales, ensembles projectile, cible et énergie de bombardement, sont connues grâce aux résultats obtenus notamment avec INDRA. L'utilisation de faisceaux exotiques permettra de fournir des contraintes sévères sur les modèles de transport et leurs ingrédients fondamentaux. Les processus en jeu sont « l'émission au col » dont la formation pourrait être le résultat combiné d'instabilités de surface et de volume, la fission dynamique alignée, le « flow », la transparence, ... autant de processus qui permettent de quantifier les propriétés de transport de la matière nucléaire (compressibilité, viscosité, ...) en disposant d'une large panoplie de faisceaux. La complémentarité avec l'étude des mécanismes de désexcitation est évidente ainsi que le lien avec l'étude des limites extrêmes des noyaux.

A partir des expériences futures, différents scénarios seront explorés pour caractériser la dynamique de la voie d'entrée et pour évaluer ses contraintes sur le processus de multifragmentation. L'analyse croisée des conditions d'apparition des signatures de transition et de criticité permettra de vérifier si ces signatures correspondent à des explorations différentes du diagramme des phases. L'utilisation des faisceaux radioactifs fournira une contrainte supplémentaire en étudiant entre autres l'équilibration en charge, et permettra par exemple de déduire le terme d'asymétrie de charge de l'équation d'état.

Cette problématique intimement liée à l'étude de la multifragmentation comme limite extrême des noyaux demande les mêmes ressources expérimentales. Les maîtres mots sont, une fois encore, **FAZIA**, disponibilité des faisceaux du GANIL et la compétitivité des installations LISE et SISSI jusqu'à l'arrivée de faisceaux exotiques d'énergies équivalentes délivrées par une **installation ISOL**.

### **Interactions fondamentales et symétries**

Les études des interactions fondamentales ont pour but une description unifiée des quatre forces fondamentales. Les symétries, responsables notamment des lois de conservation, y jouent un rôle important. C'est à travers la décroissance beta, que le noyau fournit un laboratoire privilégié pour l'étude des interactions fondamentales et des symétries. L'avènement des machines à faisceaux exotiques permettra d'étendre les mesures et de réduire les erreurs expérimentales.

En France, de telles études sont réalisées auprès d'accélérateurs de physique nucléaire de basse énergie via deux approches : mesurer les propriétés des transitions beta super-permises (par la spectroscopie en masse et la spectroscopie nucléaire) et mesurer les observables de corrélation (en étudiant la cinématique de la décroissance). Dans la première approche les équipes nationales jouent un rôle de premier plan. Ceci grâce à une forte tradition en spectroscopie de masse construite sur des développements d'instruments, des programmes expérimentaux établis et sur l'évaluation globale des données mondiales au sein d'une table de masses atomiques qui constitue une référence dans le monde entier et, pour ce qui concerne la spectroscopie nucléaire, des développements techniques originaux qui ont été effectués dans le cadre de programmes expérimentaux reconnus. Dans la deuxième approche, la communauté a désormais les moyens techniques d'étudier les observables de corrélations grâce à la réalisation d'une trappe de Paul entourée de détecteurs qui est

opérationnelle. Il est à noter également la participation à des mesures de précision concernant la violation du renversement du temps dans la décroissance de neutrons libres polarisés.

Les données actuelles sur les transitions super-permises doivent (1) être étendues vers des masses élevées et (2) améliorées en précision. La réduction des incertitudes demandera un effort important en instrumentation. Pour ce qui concerne les mesures des coefficients de corrélation, cette amélioration de la précision passera aussi par la réalisation de mesures indépendantes. L'extension vers des noyaux plus lourds demandera l'utilisation de réactions de fusion évaporation pour les produire et un accent doit être mis sur la production de faisceaux purs et la qualité. Ces conditions devraient être satisfaites par une prochaine génération des équipements (**EXABENE**) liés aux installations ISOL (**SPIRAL-2**, **EURISOL**) et ceux développés pour la ligne à très basse énergie de **GSI-FAIR**. L'utilisation de tels appareillages auprès des prochaines machines à haute intensité demandera le développement en parallèle de faisceaux et de techniques de discrimination. Ce point a été souligné dans le rapport « EURISOL Design Study ». Avec l'accroissement nécessaire du nombre d'approches expérimentales et d'observables, les expériences dans ce domaine qui nécessitent une grande statistique et une systématique (quelquefois redondante) souffrent désormais d'un manque de temps faisceau. Ceci ne pourra être surmonté que par l'utilisation des différentes installations européennes.

## **Nouvelles sondes**

### **Lasers Ultra Haute Intensité (UHI)**

Les années 1990-2000 ont vu l'émergence de lasers Ultra Haute Intensité (puissances crêtes de l'ordre de la dizaine de terawatts (TW) et des intensités sur cible de  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>).

L'interaction d'un tel laser avec la matière se traduit instantanément par la formation d'un plasma dense et chaud. Les perturbations locales de la charge électrique et de la densité sont à l'origine de différents mécanismes d'accélération des particules chargées dans l'interaction laser plasma. Des faisceaux d'électrons rapides peuvent être créés et il a été montré que les lasers UHI pouvaient également être utilisés pour produire des faisceaux de H<sup>+</sup> et d'ions lourds sous un potentiel moyen de 10 MV. L'utilisation de lasers pétawatts permettrait d'envisager des potentiels d'accélération de 100 MeV/unité de charge. Ces faisceaux présentent des caractéristiques en temps très différentes de celles des faisceaux conventionnels de physique nucléaire (durée des impulsions de l'ordre de quelques dizaines de femtosecondes, taux de répétition du hertz au kilohertz, nombre de particules/pulse très élevé  $>10^{10}$ ). Ils offrent de plus la possibilité de produire en parallèle avec le faisceau de particules chargées des plasmas qui peuvent servir de cibles pour des réactions nucléaires ouvrant ainsi un nouveau domaine d'investigation des propriétés nucléaires dans les conditions plasma.

### **Faisceaux de neutrinos de basse énergie**

Des études peuvent être réalisées avec faisceaux de neutrinos de basse énergie, et de faisceaux où l'énergie peut être variée facilement. Une nouvelle méthode pour la production des neutrinos a été introduite: les « beta-beams ». Elle consiste à utiliser la désintégration beta des noyaux accélérés pour produire des faisceaux purs de neutrinos et d'anti-neutrinos. L'Helium-6 et le Neon-18 sont les meilleurs candidats en tant qu'émetteurs « beta-beam ». L'énergie des neutrinos peut être modifiée en variant l'énergie des ions.

Une installation « beta-beams » de basse énergie offrirait l'opportunité unique de réaliser des études systématiques des interactions neutrino-noyau ainsi que des modes d'isospin et de spin-isospin de haute multipolarité. D'autres propriétés des neutrinos comme leur moment magnétique pourraient être étudiées. La production des ces faisceaux pourrait se faire dans le cadre d'une extension du projet **EURISOL** et d'une installation « beta-beam » de haute énergie au CERN qui aurait pour but, entre autre, d'étudier la violation de CP dans le secteur des leptons. L'étude de

faisabilité d'une installation beta-beam de basse énergie sera réalisée - conjointement au projet de haute énergie - au sein du « Design Study » de EURISOL.

### **Conclusion et moyens pour un objectif de performance**

La France occupe depuis longtemps une position de premier plan en structure et dynamique nucléaire dans un contexte de très forte compétition internationale. En ce qui concerne les programmes expérimentaux la communauté française est notamment impliquée dans la recherche des noyaux aux états extrêmes (spin, énergie d'excitation, rapport proton/neutron, super-lourds). Récemment un effort considérable a été mené en France pour construire SPIRAL et dans le développement des nouveaux instruments (EXOGRAM et VAMOS au GANIL par exemple). Les potentialités des installations actuelles doivent être utilisées en développant de nouveaux faisceaux SPIRAL et en augmentant les intensités des faisceaux primaires du GANIL. Pour l'avenir à plusieurs années, l'effort doit être axé dans un contexte européen vers la construction de SPIRAL-2 et vers une implication importante dans l'instrumentation basse-énergie, les spectromètres et les multidétecteurs de nouvelle génération qui permettront de franchir des étapes cruciales dans la détection des gammas (AGATA), des particules chargées (FAZIA, GRAPA) et des neutrons (SATAN). En parallèle, la communauté doit contribuer aux études des futurs accélérateurs Européens EURISOL et FAIR-GSI. Pour ce qui est de la théorie, la situation française actuelle se caractérise par une forte activité dans le domaine de la théorie du champ moyen et ses extensions, les calculs de modèles en couches pour les noyaux lourds et les enjeux liés aux réactions nucléon-noyau et noyau-noyau. Pour l'avenir, la forte synergie avec l'expérience doit continuer et les succès reposeront sur le développement d'outils théoriques novateurs. Toutefois seul un investissement humain et financier au moins égal à l'investissement actuel permettra à la physique nucléaire théorique et expérimentale française de conserver sa place de premier plan et de réaliser ses objectifs.

On trouvera en annexe un tableau résumant les projets du groupe « structure et dynamique nucléaire ». Les priorités indiquées dans ce tableau ont été établies en tenant compte de l'importance scientifique, du calendrier de réalisation et de la force des communautés impliquées.

## Volet humain

Priorité	<u>Grande infrastructure</u> Nom du projet	Type de projet Lieu d'Installation	Etat d'avancement	Années de début et de fin des investissements	Pays partenaires	Nombre de physiciens français participant au projet	Nombre de techniciens et ingénieurs français participant au projet en nombre d'hommes par an.	Commentaires
1 court terme	<b>SPIRAL2</b>	accélérateur GANIL	construction prête à débiter	2005 - 2009	EUROPE	140 (exploitation)	388 h.a. intégré sur 5 ans (2005-2009)	Construction d'un site multi-faisceau; nouvel ensemble cible-source (1 <sup>+</sup> - n <sup>+</sup> )  construction de l'injecteur etc.
1 long terme	<b>EURISOL</b> <i>European ISOL facility</i>	accélérateur lieu à définir	"design study" en cours	2005 - 2008	EUROPE	140 (exploitation)	GANIL 18.5 IN2P3 41 CEA 18 intégré sur 4 ans (2005-2008)	EURISOL DS ("design study") (2005 - 2008) inclu l'étude d'une installation "beta- beams" (haute et basse énergie)
			Projet de construction	2011 - 2016				à définir
2	<b>Faisceaux stables de très haute intensité</b>	accélérateur lieu à définir	Evaluation des besoins ; Cahier des charges et de la R&D nécessaire	2008 - 2010	Allemagne, Italie, Finlande, Royaume-Uni et autre	30 (APS)	à définir	Selon l'évaluation des besoins (au niveau Européen) il s'agit soit d'une nouvel acc. soit de l'upgrade d'un acc. existant
2	<b>FAIR</b> <i>(Super-FRS)</i>	accélérateur GSI	APD en cours, construction débuterait à partir de 2006	2007 - 2012	EUROPE	30	à définir	MoU en cours de signature, contribution française à FAIR à négocier avant fin 2006
Priorité	<u>Instrumentation</u> (> 1 M€) Nom du projet	Type de projet Lieu d'Installation	Etat d'avancement	Années de début et de fin des investissements	Pays partenaires	Nombre de physiciens français participant au projet	Nombre de techniciens et ingénieurs français participant au projet en nombre d'hommes par an.	Commentaires
1	<b>AGATA</b> <i>Advanced Gamma Tracking Array</i>	détecteur gamma GANIL, SPIRAL, SPIRAL2, GSI, Lengaro	phase 1 en cours - construction du démonstrateur	2003 - 2007	10 pays Européens ~120 personnes	R&D: ~25 (démonstration)	40 h.a (IN2P3) 4 h.a (DAPNIA) intégré sur 4 ans	EURONS JRA (2005-2008)

		<i>Legnaro, EURISOL et autres</i>	APD en cours pour la phase 2 - construction	2008 - 2012	EUROPE, ~350 personnes	Exploitation: ~100	à définir	Proposition en tant qu' "infrastructure Européenne" prévue en 2007
1	<b>FAZIA</b> <i>Four-p A and Z Identification Array</i>	détecteur LCP et fragments <i>GANIL, SPIRAL, SPIRAL2, Legnaro, Catane, GSI, EURISOL</i>	R&D faisabilité  Projet de construction	2001 - 2006  2007 - 2009	Italie, Pologne, Roumanie	R&D: 15  Exploitation > 25	12 h.a. intégré sur 2 ans (2005/6) ; 12 h.a. intégré sur 3 ans (2007-2009)	détecteur pour (thermo)-dynamique nucléaire ; jusqu'à 2007: R&D et prototype (R&D utile à GRAPA et SATAN) ; 2007 - 2009 : construction
1	<b>EXABENE</b> <i>Expériences à Basse Énergie pour SPIRAL-2</i>	instrumentation <i>SPIRAL, SPIRAL2</i>	Etude de faisabilité	2006 - 2010	Allemagne, Belgique, Espagne, France, Pays-Bas	30	à définir	instrumentation de la nouvelle ligne à basse énergie du GANIL pour SPIRAL-1/2: mesures de masses, spectroscopie laser, études d'interactions fondamentales, spectroscopie nucléaire
1	<b>Spectromètre de haute réjection</b>	spectromètre de particules <i>SPIRAL2</i>	Projet	possible à partir de 2007	à définir	15	à définir	Instrumentation pour les faisceaux d'ions lourds de SPIRAL2 ; R&D dans le EURONS-JRA INTAG (2005-2008)
2	<b>GRAPA</b>	détecteur LCP <i>SPIRAL, SPIRAL2, GSI, EURISOL,...</i>	Etude de faisabilité	2007 - 2010	plusieurs pays Européens	R&D: 10 Exploitation: ~60	40 h.a. intégré sur 4 ans ; répartis à égalité CEA-IN2P3	détecteur LCP pour spectroscopie nucléaire
2	<b>NUSTAR (LEB, R3B, STORIB)</b>	instrumentation <i>GSI-FAIR</i>	APD en cours (jusqu'en 2006), construction à partir de 2007	à partir de 2007	EUROPE	R&D : ~20	R3B : 65 h.a (DAPNIA) pendant 5 ans (2005-2009) ; autres contribution à définir	R&D dans plusieurs EURONS JRAs (2005-2008)
2	<b>SATAN</b>	détecteur de neutrons <i>SPIRAL2 et autres</i>	Projet	2005 - 2009	Belgique, Russie, Angleterre, Italie, Finlande, Suède	R&D : ~10	30 h.a (IN2P3) intégré sur 5 ans (2005-2009)	Nouveau multi détecteur (nouveau matériau de détection et électronique digitale) en liaison avec FAZIA et nH4p EURISOL
<b>Priorité</b>	<b>Projets encore en construction en 2006</b> <i>Nom du projet</i>	<b>Type de projet</b> <i>Lieu d'Installation</i>	<b>Etat d'avancement</b>	<b>Années de début et de fin des investissements</b>	<b>Pays partenaires</b>	<b>Nombre de physiciens français participant au projet</b>	<b>Nombre de techniciens et ingénieurs français participant au projet en nombre d'hommes par an.</b>	<b>Commentaires</b>

en cours	<b>ALTO</b>	accélérateur <i>IPN Orsay</i>	en construction	2002 - 2006	Allemagne, Brésil, Canada, Espagne, France, Russie	50	40 h.a. intégré sur 3 ans (2003-2005)	Physique basse énergie, noyaux riches en neutrons R&D SPIRAL-2, EURISOL
en cours	<b>GABRIELA</b> <i>Gamma Alpha Beta Recoil Investigation with the Electrostatic Analyser</i>	instrumentation <i>Dubna</i>	Phase I : en cours	2004 - 2005	Russie Norvège Belgique	13	30 h.a. intégré sur 5 ans (2004-2008)	Projet de spectroscopie (phase I: plan focal ; phase II : "prompt") avec des détecteurs Ge d'Euroball et les détecteurs BaF2 du Château de Cristal.
			Phase II : Étude de faisabilité effectuée	2006 - 2008				
en cours	<b>Laboratoire des cibles</b>	infrastructure <i>GANIL</i>	en construction	2004 - 2007	Allemagne	-	16 h.a. intégré sur 4 ans (2004-2007)	

## Volet financier

Priorité	<u>Grande infrastructure</u> Nom du projet	Type de projet Site d'Installation	Etat d'avancement	Années de début et de fin des investissements	Coût total hors personnel (en M€)	Coût total en incluant le personnel (en M€)	Contribution IN2P3+CEA (hors personnel) en M€	Contribution IN2P3+CEA (en incluant le personnel) en M€	Autres contributions Françaises ou Européennes en M€
1 court terme	<b>SPIRAL2</b>	accélérateur GANIL	Construction prête à débiter	2005 - 2009	82,8	117,8	28,8	63,8	Région basse normandie: 32.6 Plan état région : 1.4 Partenaires européens : 20
1 long terme	<b>EURISOL</b> <i>European ISOL facility</i>	accélérateur	"Design study" en cours	2004 - 2008	6,9	33	2,7	8,2	Contribution Européenne : U.E. 9,2 partenaires européens 15,6
			Projet de construction	2011 - 2016	env. 600	non précisé	à définir	non précisé	
2	<b>Faisceaux stables de très haute intensité</b>	accélérateur <i>à préciser</i>	Evaluation des besoins ; Cahier des charges et de la R&D nécessaire	à partir de 2008	env. 30	non précisé	à définir	non précisé	
2	<b>FAIR (Super-FRS)</b>	accélérateur GSI	APD en cours, construction débuterait à partir de 2006	2006 - 2012	~1000	non précisé	à définir	non précisé	Coût pour l'ensemble de FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research), contribution française à négocier avant fin 2006
Priorité	<u>Instrumentation</u> (> 1 M€) Nom du projet	Type de projet Lieu d'Installation	Etat d'avancement	Années de début et de fin des investissements	Coût total hors personnel (en M€)	Coût total en incluant le personnel (en M€)	Contribution IN2P3+CEA (hors personnel) en M€	Contribution IN2P3+CEA (en incluant le personnel) en M€	Autres contributions Françaises ou Européennes en M€
1	<b>AGATA</b> <i>Advanced Gamma Tracking Array</i>	détecteur gamma GANIL, SPIRAL, SPIRAL2, GSI, Legnaro, EURISOL et autres	Phase 1 en cours - construction du démonstrateur	2003 - 2007	~5	non précisé	1,3	non précisé	Contribution par le EURONS-JRA: 1.050 total (0,2 pour labo. Français)
			APD pour la phase 2 - construction	2008 - 2012	env. 40	non précisé	env. 10	non précisé	
1	<b>FAZIA</b> <i>Four-p A and Z Identification Array</i>	détecteur LCP et fragments GANIL, SPIRAL, SPIRAL2	R&D faisabilité	2001 - 2006	env. 9	non précisé	env. 4	non précisé	env. 1 (fonds régionaux) env. 4 (partenaires européens)

		<i>SPIRAL2, Legnaro, Catane, GSI, EURISOL</i>	Projet de construction	2007 - 2009					européens)
1	<b>EXABENE</b> <i>Expériences à Basse Energie pour SPIRAL-2</i>	instrumentation <i>SPIRAL, SPIRAL2</i>	Etude de faisabilité	2005 - 2009	Total : 6.8 Masses: 1.0 Laser: 2.5 Int. fond.: 0.8 Spectrosc.: 2.5	non précisé	à définir	non précisé	R&D soutenu par EURONS dans les activités: LASER (0.43), TRAPSPEC (0.37)
1	<b>Spectromètre de haute réjection</b>	spectromètre de particules <i>SPIRAL2</i>	Projet	à partir de 2007	4 - 5	non précisé	à définir	non précisé	R&D soutenu par EURONS dans l'activité INTAG : 0.67 total (0.17 pour labo. Français)
2	<b>GRAPA</b>	détecteur LCP <i>SPIRAL, SPIRAL2, GSI, EURISOL et autres</i>	Etude de faisabilité	2007 - 2010	5	non précisé	1.5	non précisé	Partenaires européens : 3.5
2	<b>NUSTAR (LEB, R3B, STORIB)</b>	instrumentation <i>GSI-FAIR</i>	APD en cours	à partir de 2007	R3B : 20 HiSpec : 6 DeSpec : 5 LaSpec : 0.5 MATS: 1.6 EXL: 6	non précisé	en cours d'évaluation	non précisé	R&D soutenu par EURONS dans les activités: EXL (0.45), LASER (0.43), RHIB (0.7), TRAPSPEC (0.37)
2	<b>SATAN</b>	détecteur de neutrons <i>SPIRAL2 et autres</i>	Projet en cours de soumission	2005 - 2009	2	non précisé	à définir	non précisé	
<b>Priorité</b>	<b>Projets encore en construction en 2006</b> <i>Nom du projet</i>	<b>Type de projet</b> <i>Lieu d'Installation</i>	<b>Etat d'avancement</b>	<b>Années de début et de fin des investissements</b>	<b>Coût total hors personnel (en M€)</b>	<b>Coût total en incluant le personnel (en M€)</b>	<b>Contribution IN2P3+CEA (hors personnel) en M€</b>	<b>Contribution IN2P3+CEA (en incluant le personnel) en M€</b>	<b>Autres contributions Françaises ou Européennes en M€</b>
en cours	<b>ALTO</b>	accélérateur <i>IPN Orsay</i>	En construction	2003 - 2005/6	1,085	non précisé	0.44 (2003-2004) 0.15 (2005/6)	non précisé	Région Ile de France : 0.375 Essonne : 0.12
en cours	<b>GABRIELA</b> <i>Gamma Alpha Beta Recoil Investigation with the Electrostatic Analyser</i>	instrumentation	Phase I : en cours Phase II : Étude de faisabilité effectuée; en cours de construction	2004 - 2008	0.4	non précisé	0.4	non précisé	
en cours	<b>Laboratoire des cibles</b>	infrastructure <i>GANIL</i>	En construction	2004 - 2007	env. 0.4	à évaluer	env. 0.4	à évaluer	infrastructure initiée avec équipements de l'IREs Strasbourg et cibles de Saclay (SPhN)

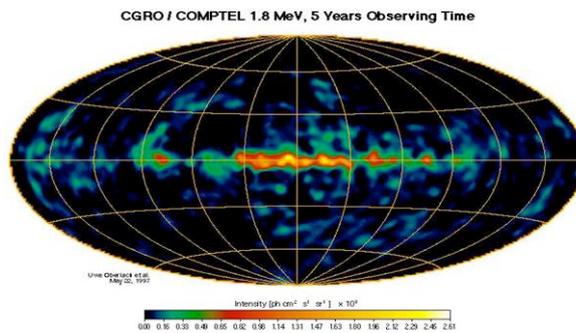
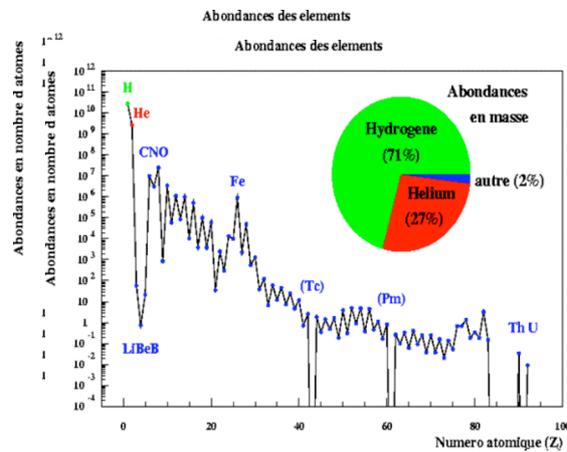
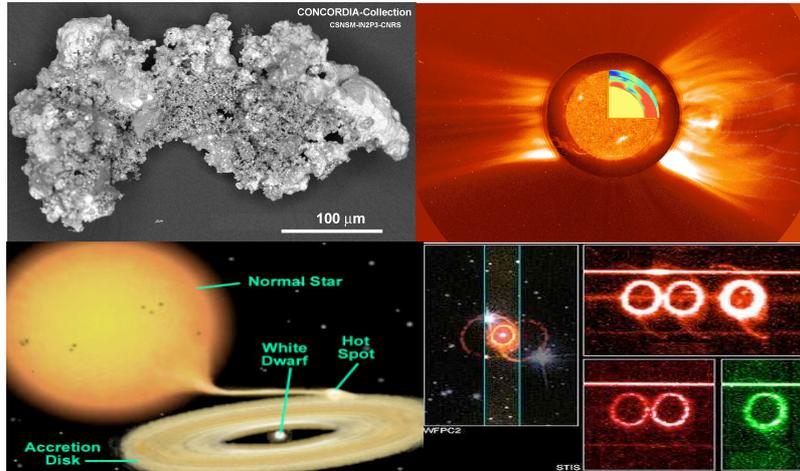


## **VII – Astrophysique nucléaire**



# Astrophysique Nucléaire

## Prospective à 10 ans DAPNIA-IN2P3 Novembre 2004



### Composition du groupe de travail :

Laurent Audouin, Didier Beaumel, Marianne Dufour-Fournier, Jean Pierre Chièze, Alain Coc, Jean Duprat, Cécile Engrand, Faïrouz Hammache, Matthieu Gounelle, Elias Khan, Jürgen Kiener, Anne Lefebvre-Schuhl, Dave Lunney, Jérôme Margueron, Francois de Oliveira-Santos, Nicolas Prantzos, Olivier Sorlin, Jean-Pierre Thibaud, Vincent Tatischeff, Sylvaine Turck-Chièze, Cristina Volpe.

## Synthèse de l'analyse

Interdisciplinaire par excellence, l'astrophysique nucléaire s'enrichit du fruit des recherches en physique nucléaire, en modélisations astrophysiques et en observations astronomiques allant des ondes radio jusqu'aux rayonnements  $\gamma$ , cosmiques, à la détection de neutrinos et à l'étude des météorites. Grâce à l'interaction entre différentes communautés, l'astrophysique nucléaire a déjà répondu, au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, à bien des questions liées à l'origine des éléments. On sait qu'il existe trois grands sites de nucléosynthèse: deux thermiques, le Big Bang et les étoiles, et un non thermique, le milieu interstellaire (rayons cosmiques). Si la nucléosynthèse primordiale et les phases successives de combustion hydrostatique dans les étoiles sont aujourd'hui bien connues, de grandes inconnues en revanche persistent concernant les sites de combustion explosive comme les novae, les sursauts X et les supernovae, la nucléosynthèse des éléments lourds et la matière dense.

En France, l'astrophysique nucléaire trouve ses racines dans les années soixante grâce aux travaux d'Hubert Reeves et de Jean Audouze sur la nucléosynthèse due aux réactions de spallation induites par les noyaux du rayonnement cosmique. Elle s'est caractérisée dès le début par une synergie étroite entre astrophysiciens et physiciens nucléaires des deux organismes CNRS (IN2P3, INSU) et CEA (DAPNIA), qui s'est poursuivie jusqu'à nos jours. Voici trois thèmes où des collaborations ont conduit à des résultats majeurs et à des avancées:

- les neutrinos solaires : l'explication du déficit des neutrinos détectés passait par des progrès dans la connaissance des réactions thermonucléaires opérant au cœur du soleil et dans la modélisation du soleil. L'astrophysique nucléaire en France a joué un rôle crucial dans cette aventure. Le modèle solaire du SAp-DAPNIA, enrichi de l'héliosismologie déduite de SoHO conduit aujourd'hui à des flux de neutrinos en parfait accord avec les détections et avec l'hypothèse d'oscillation de neutrinos LMA, alors que le modèle standard est en difficulté, l'IN2P3 a participé à la compilation européenne de réactions thermonucléaires NACRE et à la mesure précise de la section efficace de la réaction clé  ${}^7\text{Be}(p,\gamma)$  pour la production des neutrinos associés.
- l'astronomie  $\gamma$  : en prévision du lancement d'INTEGRAL et de Rhesi, des études de modélisation et des mesures en laboratoire ont été réalisées en collaboration entre l'IN2P3, le DAPNIA, l'Espagne et les USA, pour l'émission  $\gamma$  des novae et des éruptions solaires. Des physiciens ont ainsi mené à bien des projets cohérents, dans ces deux domaines, impliquant mesures de sections efficaces, calibration d'instrument (SPI), modélisation astrophysique *et* observations sur INTEGRAL (actuellement dans le cas d'une éruption solaire).
- la nucléosynthèse primordiale: une nouvelle analyse cohérente de toutes les réactions thermo-nucléaires intervenant dans la nucléosynthèse primordiale a été entreprise par une collaboration franco-belge regroupant physiciens nucléaires expérimentateurs, théoriciens et astrophysiciens. Les prédictions avec les nouveaux taux sont aujourd'hui confrontées avec les résultats de WMAP.

Actuellement de nouvelles questions et défis sont posés dans ces champs d'études où la communauté française devrait fortement s'impliquer. Ainsi la précision des prédictions de la nucléosynthèse primordiale et des résultats de WMAP fait apparaître un désaccord significatif entre le lithium déduit du big bang et les observations des premières générations d'étoiles. Les progrès considérables de l'observation du soleil encourage aujourd'hui l'introduction de processus nouveaux pour répondre aux verrous qui entachent les modélisations stellaires, liées au traitement de la convection, et aux effets de la rotation et du champ magnétique. En conséquence, des efforts grandissants se portent, en France, sur l'étude des stades avancés de l'évolution stellaire et des sites de combustion thermonucléaire explosive. Si des modèles

arrivent à expliquer au moins qualitativement la nucléosynthèse et la dynamique de l'explosion des novae, il n'existe aujourd'hui aucun modèle capable de décrire correctement les supernovae thermonucléaires (SN de type Ia) ou à effondrement gravitationnel (SN Ib, Ic SN II) ou les sursauts gamma, probablement liés à l'un des types de SN Ib, Ic. Le site du processus r (capture rapide de neutrons), responsable pour la synthèse d'environ la moitié des éléments lourds au-delà du fer, reste un mystère, même si tout indique qu'il est lié aux SN gravitationnelles. L'origine et le mécanisme d'accélération du rayonnement cosmique galactique sont, presque un siècle après sa découverte, toujours inconnus, mais très probablement aussi liés aux SN.

La communauté française a acquis une maturité qui lui permet de s'attaquer à ces questions. Elle bénéficie de nouveaux moyens d'observation et de mesure et d'une implication grandissante de théoriciens. Les principaux sujets de la communauté française qui se dessinent pour les dix années à venir ont été rassemblés en 3 grands volets :

## I Nos origines

- **Nucléosynthèse primordiale**

Le lancement de Planck en 2007 constituera une relance des problématiques liées à la nucléosynthèse primordiale et au problème du lithium qui s'enrichira de nouvelles observations au VLT d'étoiles de première génération. Une meilleure compréhension de la destruction du lithium dans les étoiles devrait permettre de contraindre la nucléosynthèse primordiale. La collaboration existante entre des chercheurs de l'IN2P3, l'INSU, Bruxelles et les USA poursuivra ce thème, la nucléosynthèse primordiale restant un moyen précieux pour contraindre la nouvelle physique au-delà du modèle standard (quintessence, branes,...).

- **Micrométéorites**

La thématique développée au CSNSM englobe de nombreux aspects d'astrophysique nucléaire. Des collaborations avec d'autres groupes travaillant dans cette thématique ont été formées sur l'irradiation de la nébuleuse protosolaire ou sont en discussion au CSNSM et à l'IPN sur les abondances isotopiques témoignant de sites de nucléosynthèse particuliers. A l'IN2P3, cette thématique s'effectue autour du développement de la Spectrométrie de Masse à haute résolution spatiale du CSNSM : la microsonde ionique IMS-ORSAY. Des collaborations sont engagées avec différentes équipes de INSU. Les problématiques abordées s'insèrent dans le cadre de Programme National de Planétologie (INSU) et d'une ACI : *Consortium Poussières Cosmiques, STARDUST*. L'originalité des thèmes développés est une source de richesse potentielle pour l'astrophysique nucléaire dans les années à venir et de nouvelles collaborations au sein de l'IN2P3 et du DAPNIA sont souhaitées.

## II L'univers calme

- **L'évolution stellaire et l'astérosismologie**

Le développement de la sismologie avec SoHO (héliosismologie jusqu'en 2008) puis avec COROT (astérosismologie, lancement prévu pour 2006) suivi de GOLFNG et SDO (à partir de 2008) permet d'avoir une vision observationnelle interne des étoiles. Ceci permet de dépasser le cadre limité de l'évolution stellaire actuelle. Des progrès sur de nombreuses questions comme l'âge des étoiles, leur taux de rotation interne et leur déformation, l'extension convective, le champ magnétique et les vents stellaires conduisent au développement d'activités magnéto-hydrodynamiques (MHD) et créent aussi les conditions idéales pour relancer l'évolution stellaire vers les phases avancées. Ces études seront principalement poursuivies au SAp-DAPNIA (codes 1D CESAM, 3D ASH) et à l'INSU. Elles seront utiles pour aborder les supernovae de type Ia, Ib, Ic et II, en parallèle de codes spécifiques 3D MHD.

- **Réactions nucléaires directes et indirectes**

Certaines sections efficaces de réactions nucléaires des cycles pp, CNO et de la combustion de l'hélium vont certainement devoir être précisées pour accompagner les progrès en observation et en modélisation. Citons les réactions  ${}^3\text{He}(a,\gamma){}^7\text{Be}$  et  ${}^{22}\text{Ne}(a,n){}^{25}\text{Mg}$ . Ceci sera accompli par des collaborations internationales entre théoriciens français (IReS) et belges (Bruxelles) pour améliorer les extrapolations de sections efficaces vers les énergies stellaires des expériences auprès de l'accélérateur LUNA en Italie, qui risque de devenir le seul instrument européen dédié et adapté à de telles études qui nécessitent des faisceaux de particules légères (p, d, a) de basse énergie très intenses.

Une approche très récente d'extraction des sections efficaces pour l'étude des réactions nucléaires non radiatives à basse énergie est la méthode du Cheval de Troie. Elles seront étudiées auprès du Tandem d'Orsay, Spiral II et plus tard Eurisol et bénéficieront de la mise en œuvre d'instruments en cours de réalisation tel que MUST 2 ou Exogam.

- **Nucléosynthèse d'éléments lourds, processus s**

Dans les étoiles de la branche des géantes asymptotiques (AGB), la combustion pulsée de l'hélium dans les couches convectives situées juste au-dessus du cœur de C/O libère de grandes quantités de neutrons, principalement par la réaction  ${}^{13}\text{C}(\alpha,n){}^{16}\text{O}$  (en cours d'étude au sein de l'IN2P3). La détermination des sections efficaces de capture de neutrons (processus s) sur des noyaux instables offre l'accès à des informations clés sur ces étoiles : densité de neutrons, température, densité de matière. SPIRAL-II pourrait devenir un site majeur pour ces études, la production de cibles radioactives et leur irradiation sous un haut flux de neutrons y étant possibles (synergie unique en Europe). Un groupe de réflexion s'est mis en place entre l'IN2P3 et le CEA afin de rapidement établir un projet détaillé, en collaboration étroite avec le groupe astrophysique de Karlsruhe. De plus, des mesures systématiques sur cibles stables ou d'activité modérée, utiles aux développements théoriques, seront conduites au CENBG et auprès de n-TOF.

### III L'Univers violent

- **Nucléosynthèse et astronomie gamma**

Avec le satellite INTEGRAL, l'astronomie gamma est clairement un thème fédérateur actuel pour l'astrophysique nucléaire en France. Les observations d'isotopes radioactifs dans la galaxie devraient permettre d'éclaircir et de tester en particulier la nucléosynthèse des étoiles massives et des sites explosifs novae et supernovae. De nouvelles questions touchant l'astrophysique nucléaire sont déjà apparues : citons l'origine de la formidable quantité de positrons dans le bulbe galactique, révélée à travers l'émission d'annihilation à 511 keV. Dans le futur une sensibilité accrue dans le domaine des rayons gamma (Advanced Compton telescope, lentille g, MAX) devrait ouvrir de nouveaux horizons.

L'interaction des particules accélérées lors des éruptions solaires et surtout l'origine et la distribution spatiale du rayonnement cosmique galactique est un autre objectif de l'astrophysique nucléaire d'INTEGRAL, qui observera jusqu'en 2008 et du satellite GLAST (lancement prévu en 2006). Ces projets regroupent une fraction importante d'astrophysiciens au SAp-DAPNIA ainsi que plusieurs groupes à l'INSU (CESR, IAP) et des physiciens nucléaires à l'IN2P3 (CSNSM, IPN, LLR-> voir astroparticules). Il est indispensable que, dans le cadre d'un lien étroit entre l'IN2P3, le DAPNIA et l'INSU, une collaboration forte demeure avec le programme d'astroparticules avec lequel l'astrophysique nucléaire partage de nombreux intérêts communs dans cette thématique. Cette communauté est structurée à l'heure actuelle dans le GDR PCHE. Pour une interprétation pertinente des observations, certaines mesures de sections efficaces seront indispensables, en particulier pour des voies de réaction

synthétisant les émetteurs  $\gamma$  dans les novae. La définition des réactions importantes à étudier doit provenir de l'utilisation de modèles astrophysiques évolués (Barcelone pour les novae). De telles mesures nécessitent une expertise étendue, existant au CSNSM et à l'IPN, sur des méthodes directes et indirectes pour déterminer des sections efficaces extrêmement faibles impliquant des noyaux stables ou proche de la stabilité comme pour les réactions  $^{18}\text{F}(p,a)^{15}\text{N}$  et  $^{21}\text{Na}(p,g)^{22}\text{Mg}$ . Une autre voie est fournie par la théorie : modèle en couche, et modèle en amas (IReS). L'émission induite par les particules énergétiques des éruptions solaires et du rayonnement cosmique est seulement partiellement connue, et une série de mesures sur des accélérateurs d'ions légers de type tandem et cyclotron est nécessaire.

- **Nucléosynthèse d'éléments lourds, processus r**

La moitié environ des éléments au-delà du fer sont produits par capture de neutrons dans des environnements stellaires en présence de flux de neutrons très importants. Les pics d'abondance solaires r, dont la position est corrélée avec les fermetures de couche en neutrons témoigne du fait que les captures de neutrons se sont déroulées loin de la vallée de stabilité nucléaire et que la structure nucléaire joue un rôle important. Diverses observations (étoiles pauvres en métaux du halo galactique, grains pré-solaires issus de supernovae) indiquent que différents types de processus existent. Le(s) site(s) du processus r reste(nt) donc un des grands mystères de l'astrophysique même si tout indique qu'il est lié aux supernovae de type Ib, Ic et II. Le nombre de noyaux impliqués peut se chiffrer par milliers et le flux nucléaire s'approche *parfois* de la limite de liaison vis à vis de l'émission de neutron qu'aucun accélérateur ne sera jamais capable d'atteindre. Les données nucléaires requises sont multiples (masses atomiques, sections efficaces de capture de neutron, périodes  $\beta$ , interaction neutrino-noyau...). Des études ciblées, visant d'abord à asseoir la validité des modèles théoriques, sont nécessaires. De telles études ont débuté auprès de SPIRAL1 et se poursuivront auprès des futurs accélérateurs de noyaux exotiques lourds comme Alto, Spiral-II, GSI et surtout Eurisol en étroite collaboration entre expérimentateurs et théoriciens. Des collaborations internationales sont en place entre laboratoires de l'IN2P3, de Bruxelles, de Bâle et de Mayence.

- **Sursauts X et processus rp**

Le processus rp se développe lors d'accrétions violentes de matière hydrogénée sur une étoile à neutrons. Il en résulte des captures rapides de protons sur des noyaux riches en protons allant jusque  $Z=50$ . Ces réactions débutent par un échappement du cycle CNO chaud qui reste à éclaircir, avant d'enchaîner des captures de protons et décroissances  $\beta^+$ . Le profil énergétique des sursauts X qui résulte de ces réactions nucléaires est partiellement lié à la structure nucléaire des noyaux proches de la limite de stabilité proton. L'IN2P3 et le CEA possèdent en ce domaine de structure nucléaire des spécialistes mondialement reconnus. On peut cependant regretter que, contrairement à ces pays, il n'existe en France pas d'astrophysicien qui modélise ces phénomènes complexes.

- **Supernovae de type Ia**

Une collaboration d'une vingtaine de personnes se met en place entre le DAPNIA, l'équipe de M. Arnould à Bruxelles et plusieurs laboratoires de l'Institut Lasers Plasmas pour étudier l'explosion des supernovae de type Ia. La structure de naine blanche, l'accrétion de la matière d'une étoile compagnon, l'équation d'état, le réseau de réactions nucléaires sont inclus dans un code hydrodynamique. Les étapes suivantes de ce projet bénéficieront de l'interaction des différentes communautés rassemblées à l'IPN et à Bruyères-le-châtel. Des extensions pourront être envisagées pour faire le lien avec les observations faites par la communauté française à l'IN2P3 et au DAPNIA, dans le cadre cosmologique.

- **Supernovae Ib, Ic et II et objets compacts**

L'évolution des étoiles massives jusqu'au stade pré-supernova, la physique de l'effondrement du cœur de fer et du rebond qui initie l'explosion des supernovae sont aujourd'hui très mal comprises. En fait, aucune modélisation n'est actuellement capable de produire une explosion réussie. Beaucoup de pistes sont à explorer, notamment les captures d'électrons précédents l'effondrement, l'équation d'état de la matière dense, l'interaction des neutrinos avec la matière et les effets de la rotation et du champ magnétique qui nécessitent des codes 2D et 3D. Des progrès substantiels sont attendus par l'astronomie X et g, qui a déjà mis en évidence l'inhomogénéité des éjecta, mais aussi par une implication importante de la physique nucléaire théorique. Ces dernières années un groupe important de théoriciens s'est formé à l'IPN, à Meudon et au CEA, qui étudie la propriété des noyaux exotiques impliqués dans le processus r, la structure et la dynamique des objets compacts et l'interaction des neutrinos avec la matière et les noyaux. L'étude de l'interaction des neutrinos avec la matière dense de l'étoile de neutron en formation et avec l'éjecta s'avérera certainement indispensable pour la compréhension du mécanisme d'explosion des SN de type gravitationnel. Ces études bénéficieront du développement des « b beams » de basse énergie dans un domaine d'énergie d'intérêt astrophysique pour améliorer notre connaissance des propriétés des neutrinos et de l'interaction neutrino-noyau. Le refroidissement des étoiles à neutrons intéresse aussi les communautés de physique nucléaire et d'astrophysique. Il est important d'étudier l'écoulement du superfluide de neutrons à travers le réseau formé par de très gros noyaux. Ces noyaux servent de point d'ancrage à un réseau de vortex, dont le réarrangement soudain provoque le phénomène de glitches. Ces études permettent de relier les observations aux modèles d'étoiles compactes.

La difficulté de certains de ces projets, la masse critique française actuelle et la complémentarité des approches nécessitera un effort de la communauté pour se structurer et pour partager son expertise. **Au vu des convergences d'intérêt des disciplines de physique nucléaire et d'astrophysique et du nombre de thématiques décrites, le secteur de l'Astrophysique Nucléaire doit certainement prendre de l'importance, en France, dans la décennie à venir.** Elle doit continuer d'associer étroitement les astrophysiciens, les physiciens nucléaires et les théoriciens (INSU, IN2P3, SPM et DAPNIA). L'ensemble des thématiques présentées succinctement ici sont reprises de façon plus détaillée dans le corps du texte, avec les références des équipes françaises principalement.

## **Besoins humains et instrumentaux en Astrophysique Nucléaire**

Au stade de notre réflexion de prospective et avec l'objectif de la préparation d'un GDR, il est prématuré d'exprimer dans ce rapport des priorités, soit parce que certaines émanent plutôt de la discipline mère soit parce qu'il est trop tôt pour interclasser des activités spécifiques. Nous présentons les projets qui se structurent et de définir globalement nos besoins en personnel. la liste de nos projets ou les instruments qui serviront notre problématique, sera complétée dans les deux années à venir.

### ***Structuration et Evolution***

La recherche en astrophysique nucléaire est attractive par sa diversité et parce qu'elle requiert des interactions entre disciplines. La communauté d'Astrophysique Nucléaire est donc une communauté variée qui est aujourd'hui structurée dans différents programmes nationaux : Astroparticules, PNP, PNPS, PNC, et dans le GDR PCHE.

Le bilan humain est compliqué par le fait que certains membres de cette communauté travaillent à plein temps pour des activités d'Astrophysique Nucléaire tandis que d'autres n'y

consacrent qu'une fraction de leur activité. Toutefois nous avons souhaité identifier ici un volume de personnes concernées par cette problématique.

Le tableau ci joint résume l'état présent et les souhaits à 5 ans et 10 ans, il concerne principalement le DAPNIA et l'IN2P3 mais il convient d'y rajouter une **quinzaine de nos collègues de l'INSU**. En plus du nombre de permanents, sont indiqués les nombres d'étudiants et post-doctorants présents dans nos laboratoires ou à l'étranger. On peut constater que certains secteurs sont des spécialités françaises établies de longue date (LiBeB, cœur solaire, novae...); il est important de maintenir leurs effectifs, les augmenter si nécessaire et de prévoir les remplaçants des seniors. D'autres secteurs sont juste en train de se mettre en place, d'autres enfin doivent se structurer dans les années à venir. En effet, depuis une décennie environ, de nouveaux thèmes émergent, principalement liés à l'étude des phénomènes stellaires explosifs. La raison de cette émergence puise son origine en partie dans le fait que de grandes énigmes sont rattachées à ces phénomènes (explosion de supernovae, compréhension des sursauts X et g, nucléosynthèse des éléments lourds, composition des étoiles denses). Egalement, les progrès techniques, liés aux observables astrophysiques, à la production de noyaux radioactifs, et théoriques liés à la physique nucléaire et à la modélisation complexe de phénomènes explosifs connaissent un essor important, laissant augurer des progrès importants dans ces domaines. Il existe un nombre non négligeable de jeunes, d'étudiants en thèse, de postdoctorants formés à ces problématiques qui méritent une attention particulière, si l'on souhaite enrichir rapidement ce domaine, et rattraper le retard français, par rapport à nos collègues européens, lié à l'absence de soutien et de structuration sur cette thématique.

Sans perdre les relations évidentes que cette communauté a acquises avec ses partenaires, **une partie de la communauté souhaite un regroupement à travers un GDR**. Ce regroupement pourrait d'abord se faire au niveau français, ce qui permettrait aux participants de mieux se connaître et de bâtir des projets nouveaux de manière concertée. Ce GDR devrait naturellement et rapidement se transformer en **GDR européen** car la plupart des activités envisagées se fait avec des partenaires de l'Union Européenne déjà identifiés et déjà collaborateurs de longue date. D'autres participants pensent qu'il faudrait viser aussitôt le niveau européen pour les raisons indiquées ci-dessus. Il faut noter l'existence du réseau CARINA 2005 – 2009 (<http://www.cyc.ucl.ac.be/CARINA/>), dont le but est d'harmoniser la recherche européenne en astrophysique nucléaire et qui regroupe actuellement 24 laboratoires dont 3 français.

Il nous paraît très important aussi que la communauté Astrophysique Nucléaire, dans son aspect pluridisciplinaire, soit représentée au sein du conseil de la commission inter disciplinaire CID 47 si elle est reconduite.

PERSONNELS en ASTROPHYSIQUE NUCLEAIRE

Labo	N o s origines	Univers calme	Nucl. Explosive	Matière dense	Total Experim/théorie.	Total à 5 ans, et à10 ans
IPN		3 + 1 étudiant	2 +1 étudiant	3	3 exp./ 5 th. 2 étudiants	9, 10
CSNSM	4p+1pdoc	3	4		11 exp +1 postdoc	12, 15
GANIL			2 / 1 doc, 1 pdoc		2 exp + 1 étu +1pdoc	4, 6
IAP	3				3 th	4, 5
Meudon				3	3 th	5, 6
DAPNIA		3+1étudiant +2 postdoc	5 + 1 étudiant		8 th / obs +2 étu +2 postdoc	13, 12
Ires		2 + 3			2 exp. + 3 th	5, 7
CEA/DAM			3 th		3th	3 3
Total labos					<b>43+ 9 étudiants postdocs</b>	<b>52 64</b> +étud. et postd

**Moyens expérimentaux**

La plupart des installations nécessaires pour réaliser ce programme seront déjà utilisées à d'autres fins soit en physique nucléaire, soit dans le domaine du spatial soit en terme de moyens de calcul. Il faut citer :

- le tandem d'Orsay avec des détecteurs spécifiques
- l'IMS d'Orsay (voir fiche) avec un développement envisagé
- ARAMIS, pour caractériser les cibles
- Van de Graaf de Bordeaux
- GANIL avec SPIRAL I et II
- Eurisol...
- b beams

Et dans le domaine spatial

- SOHO/GOLF (1995-2009), INTEGRAL(2001-2007), RHESSI
- COROT (2006-...)
- GOLFG (voir fiche) phase 0 CNES
- MAX (voir fiche **Astrophysique de Haute Energie**) phase 0 CNES,
- Advanced Compton Telescope

Toutefois des besoins spécifiques seront envisagés, comme la participation partielle de la communauté à un satellite ou du stockage de programmes ou de données ainsi que des machines dédiées.

Ces activités d'Astrophysique Nucléaire ont l'énorme avantage de valoriser la science extraite des installations en construction et de contribuer à la formation des jeunes.

Elles devront être accompagnées de demande de missions pour se former dans divers domaines et discuter les résultats obtenus, celles-ci devront être estimées annuellement. Nous envisageons aussi la possibilité de faire des mini sessions d'ateliers pour prendre le temps de démarrer certains nouveaux projets. Ces activités correspondent bien au cadre d'un GDR.

Liste à compléter des projets de la communauté

<b>Nom</b>	IMS-ORSAY
<b>Buts scientifiques</b>	Analyse isotopique <i>in-situ</i> de matière extraterrestre. Analyses de micrométéorites, de Poussières Interplanétaires (IDPs), de phases réfractaires dans les météorites primitives. Recherches d'anomalies isotopiques liées à une nucléosynthèse par Irradiation dans le système solaire primitif. Recherche et caractérisation de matériau cométaire. Recherche de grains pré-solaires.
<b>Description</b>	Spectromètre de masse à haute résolution spatiale ou "microsonde ionique" : analyses à l'échelle du micron. Technique employée : SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry) Impact d'un faisceau d'ions primaire (O, Cs,) de basse énergie (10 keV) sur la surface de l'échantillon solide à analyser. Emission d'ions secondaires analysés par un spectromètre de masse, puis par comptage avec un multiplicateur d'ions. Mesures <i>in situ</i> sur des volumes de matière de l'ordre de $50 \mu\text{m}^3$ (quelques ng). Les précisions atteintes sur les systèmes isotopiques développés (Si, O,...) est de l'ordre de 0.1 %.
<b>Laboratoire Maître d'oeuvre</b>	CSNSM (ORSAY)
<b>Collaborations</b>	NHM Londres, NHM Wien, CRPG (Nancy), Univ. de Lille I, Orsay Terre, MNHN Paris.
<b>Participation française</b>	L'instrument a été réalisé sur la base d'une machine de type IMS4F CAMECA. Les développements technologiques ont été au LPS (ORSAY) par l'équipe du Pr. G. Slodzian (concepteur de la technique SIMS).
<b>Particularités technologiques</b>	Système de commutation électrostatique (« peak switching » de l'énergie des ions : possibilité d'analyser un système isotopique donné à champ magnétique constant. Possibilité de faire de l'imagerie isotopique
<b>Calendrier proposé</b>	2003-2004 : Installation et mise en service du spectromètre au CSNSM. Premières résultats du Si sur des standards terrestres. Réalisation d'une nouvelle acquisition. 2004-2005 : Mesures isotopiques du Si sur des échantillons extraterrestres (micrométéorites CONCORDIA-Collection, CAI et chondres dans les météorites primitives). Développements d'un nouveau système de détection/comptage d'ions de basse énergie (collaboration avec l'industriel PHOTONIS). Modulation la tension d'accélération de l'ion lors de sa détection sur le multiplicateur : contrôle du fractionnement isotopique à la détection.. 2006-2008 : Implémentation d'une détection par cage de Faraday. Extension du domaine de la commutation électrostatique (possibilité d'analyse de D/H, Terres Rares). Analyse d'échantillons cométaires (retour de la mission spatiale STRADUST, NASA)
<b>Budget</b>	Fonctionnement et maintenance : 45 kE/an

<b>Nom</b>	GOLFNG
<b>Buts scientifiques</b>	<p>GOLFNG mesurera les modes acoustiques et certains modes de gravité du Soleil par spectrométrie à résonance sur la raie D1 du sodium. Il a pour objectif scientifique d'améliorer notre connaissance des processus magnétiques internes du cœur Soleil et leur évolution temporelle. Les processus magnétiques sont en effet à l'origine des phénomènes magnétiques, cycliques ou non, visibles à la surface. Ce projet apportera de fortes contraintes sur la répartition de matière et la dynamique du cœur solaire. Il permettra de correctement définir le transport de moment angulaire dans le Soleil et servira de modèles pour les autres étoiles, il sera le point de départ pour résoudre des problèmes d'abondances comme celui du lithium.</p> <p>Le couplage de GOLFNG et HMI, instrument américain de sismologie à haute résolution de SDO (2008-2013), permettra pour la première fois un bilan énergétique complet. GOLFNG nous permettra de mieux comprendre la formation du système solaire par l'étude du résidu d'un cœur en rotation rapide. Ce projet, couplé aux détecteurs de neutrinos, mettra de nouvelles contraintes sur le moment magnétique du neutrino. Il mettra aussi, par la résolution spatiale obtenue dans le cœur, des limites sur les paramètres de matière noire. Il sera la première étape vers une vision dynamique complète d'une étoile et permettra de valider in situ les modèles multidimensionnels.</p> <p>A terme GOLFNG contribuera à préciser le véritable rôle du Soleil dans l'évolution climatique</p>
<b>Classe de mission</b>	<p>Prototype sol 2006</p> <p>Micro-satellite, mini-satellite si regroupement de plusieurs missions solaires</p> <p>Ou partie de la charge utile de ILWS</p>
<b>Orbite</b>	Orbite synchrone solaire entre 730 et 750 km, peu de contrainte sur le pointage 36 arcsec ou point de Lagrange L1
<b>Description</b>	<p>Spectromètre à résonance sur le même principe que GOLF.</p> <p>Polarisateur d'entrée à cristaux liquides</p> <p>Lecture simultanée de 8 points le long de la raie du sodium grâce à la présence d'une cellule de vapeur de sodium située dans l'entrefer</p> <p>d'un aimant permanent à champ variable de 2 à 8 kG.</p> <p>Détecteur photodiodes ou CCD (choix en 2004). Gain d'un facteur 10 en efficacité quantique, augmentation de la statistique de comptage pour baisser le bruit instrumental.</p>
<b>Collaboration</b>	IAC (Spain), USA (Los Angeles),
<b>Laboratoire Français</b>	CEA-Saclay (PI), Observatoires Bordeaux , Nice, Université Nice; DESPA, IAS à l'étude
<b>Participation française</b>	Réalisation de l'ensemble de l'instrument Maîtrise d'œuvre CNES

<b>Coût de la partie française</b>	10-15 M€
<b>Particularités technologiques</b>	Choix d'un sélecteur magnétique et d'un polariseur à cristaux liquides. Mesures en vitesse et calibration en intensité (2 filtres) Redondance d'un facteur 4 des détecteurs. Détecteurs compacts. Grande stabilité instrumentale=> nécessité d'une bonne connaissance périodique de la thermique du satellite dans la gamme de quelques minutes à quelques heures.
<b>Calendrier proposé</b>	Début Phase A dernier trimestre 2004. Phase raccourcie par la réalisation d'un prototype sol Mise en observation du prototype sol (1999-2005) à Ténérife fin 2005 Réalisation 2005-2008 de la version spatiale Lancement 2010-2012
<b>Remarques</b>	La plupart des points durs spatiaux sont étudiés sur le prototype qui est un pré MQ Des bancs de performances sont en place au DAPNIA pour l'optique, la thermique, la détection. L'équipe est constituée. L'étude de la partie électronique spatiale démarre en 2005.

<b>Nom</b>	Campagnes de mesures en astrophysique nucléaire
<b>Buts scientifiques</b>	Il s'agit de mesurer des propriétés des noyaux et des sections efficaces des réactions nucléaires importantes pour la compréhension de la nucléosynthèse et les sites possibles. Ceci englobe des réactions thermonucléaires entre particules chargées, des réactions thermonucléaires impliquant des neutrons et des réactions induites par les particules accélérées dans le rayonnement cosmique (RC) et des éruptions solaires.
<b>Description</b>	<p>Le grand nombre de noyaux stables et radioactifs impliqués dans des sites de combustion hydrostatiques et surtout dans les sites explosifs de nucléosynthèse, les sections efficaces souvent extrêmement faibles et les différentes gammes d'énergie (du thermique jusqu'aux énergies relativistes pour le RC) étudiées font appel à une grande variété de méthodes de mesures, directes et indirectes (réactions de transfert, ANC, méthode du cheval de Troie, dissociation coulombienne), et par conséquent nécessitent des dispositifs expérimentaux divers sur différents accélérateurs.</p> <p>Les études doivent se faire par des campagnes de mesures sur des accélérateurs de noyaux stables (Van-de-Graaff, Tandem, GANIL, GSI) et radioactifs (SPIRAL, Louvain-la-Neuve, GSI) avec des dispositifs expérimentaux existants de physique nucléaire, parfois légèrement modifiés.</p> <p>Les dispositifs spécifiques à l'étude sont: 1) une ligne spécifique à l'astrophysique nucléaire au tandem; 2) l'amélioration de la détection au splitpole du tandem; 3) préparation de l'irradiation de neutrons pour Spiral 2; 4) détecteurs annulaires à pistes pour expériences de breakup ou de transfert.</p>
<b>Laboratoire Maître d'oeuvre</b>	Les laboratoires avec des groupes travaillant dans l'astrophysique nucléaire expérimentale
<b>Collaborations</b>	Tout laboratoire européen possédant des accélérateurs ouverts à la communauté scientifique
<b>Calendrier proposé</b>	fonctionnement continu
<b>Budget</b>	<p>Surtout missions de travail de typiquement 5-10 personnes pendant une semaine sur le site de l'accélérateur, location de détecteurs.</p> <p>Ultérieurement des dispositifs expérimentaux comprenant détecteurs, vide, électronique, cités ci-haut.</p> <p>Les priorités et les chiffres doivent être discutés dans une structure nationale actuellement en discussion et ne sont pas disponible pour l'instant (voir texte).</p>

<b>Nom</b>	Physique des supernovae thermonucléaires de type IA
<b>Buts scientifiques</b>	<p>Ce projet a pour objectif d'étudier comment explosent les supernovae thermonucléaires et de faire le lien avec la cosmologie en calculant les courbes de lumière issues des simulations numériques</p> <p><b>Il rassemble les compétences nécessaires pour décrire :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Les naines blanches progénitrices</li> <li>- L'équation d'état</li> <li>- les réactions nucléaires nécessaires à la combustion</li> <li>- Les compétences en détonique, déflagration et propagation de flammes</li> <li>- Les courbes de lumière</li> </ul> <p><b>Il s'appuyera sur les observations</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sismiques des naines blanches si elles permettent de mieux tester leur structure.</li> <li>- Des supernovae Ia vues par MEGACAM pour voir les effets de structures et étudier les effets de métallicité</li> </ul>
<b>Description</b>	<p>L'explosion des supernovae de type IA n'est pas encore maîtrisée car elle fait appel à des notions complexes de détonation dans un environnement très riche, asphérique et probablement magnétisé. De plus le mécanisme même d'allumage (en couche) lors de la migration de matière du compagnon sur la naine ou plus en profondeur n'est pas encore sous contrôle. Il convient donc pour dominer l'explosion et ses conséquences de tester plusieurs scénarios et aussi de développer des codes 1D, 2D, 3D et d'étudier un grand nombre d'instabilités qui se développent et contribuent encore davantage à l'asymétrie de l'explosion. De plus les différentes physiques (astrophysique, nucléaire, combustion) sont très imbriquées et nécessitent de rassembler des communautés qui doivent chacune apporter leur expertise au moment opportun.</p> <p>Cette communauté a été constituée en 2004, elle rassemble plus d'une vingtaine de personnes des différentes disciplines. Ce projet évoluera sur environ 5 ans et devrait aboutir à des contraintes fortes sur l'interprétation des courbes de lumière à des fins cosmologiques. Il se fait dans le cadre des activités de l'ILP recherche qui a pour objectif de fédérer les compétences scientifiques autour des grands lasers. Ainsi un certain d'expériences auprès de la LIL et du LMJ concernant les chocs seront réalisés pour valider les codes développés.</p>
<b>Laboratoires Français</b>	CEA Saclay, LCD Poitiers, LET Poitiers, MAB Bordeaux.
<b>Collaborations</b>	IAA Bruxelles (Belgique), Université de Chicago.
<b>Budget</b>	C'est un projet de physique théorique qui nécessitent des moyens adaptés : gros moyens de calculs pour le développement et l'exécution des codes 1D, 2D, 3D ; ce projet nécessitera des moyens financiers pour déplacement de quelques semaines et aussi des moyens humains renforcés en modélisation.

<b>Nom</b>	Physique théorique pour les Supernovae gravitationnelles
<b>Buts scientifiques</b>	<p>C'est un projet de physique théorique qui rassemble les recherches suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Propriétés des étoiles compactes :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Equations d'état de la matière nucléaire : rôle de l'asymétrie d'isospin, de l'appariement, structure cristalline à basse densité, ...</li> <li>- Propagation des neutrinos dans les proto-étoiles à neutrons + couplage à la dynamique de l'explosion des Supernovae gravitationnelles : modes collectifs, transition de phase, diffusion des neutrinos...</li> </ul> </li> <li>- <b>Structure et réactions nucléaires pour l'astrophysique :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Structure des noyaux exotiques avec la méthode QRPA.</li> <li>- Réaction des noyaux impliqués dans la nucléosynthèse : capture de neutrons, interaction neutrino-noyaux.</li> <li>- Réactions indirectes : méthode du cheval de Troie.</li> </ul> </li> </ul>
<b>Description</b>	<p>Les étoiles compactes comme les étoiles à neutrons sont constituées de matière nucléaire allant jusqu'à des densités de plusieurs fois la densité de saturation de la matière nucléaire. Ce projet s'intéresse à comprendre les différents états de la matière nucléaire, de la surface où la matière s'organise sous forme de cristaux de noyaux jusqu'au centre de l'étoile qui reste encore très mal connu. Il s'agit de comprendre d'une part la structure du réseau nucléaire cristallin, le rôle de l'appariement, l'interface entre les sites du réseau et les vortex superfluides, et d'autre part, à plus haute densité, la chimie de la matière nucléaire hadronique et la transition de phase vers la matière étrange. Les sondes expérimentales les plus directes de la matière nucléaire dense sont les neutrinos produits lors des effondrements de supernovae, qui sont observés directement ou bien qui participent au refroidissement de l'étoile compacte. La propagation des neutrinos dans les proto-étoiles à neutrons est très sensible aux propriétés de la matière nucléaire dense, chaude et asymétrique, en particulier à la présence d'une transition de phase du type liquide-gaz ainsi qu'aux modes collectifs qui peuvent apparaître dans différents canaux de réaction. Nous travaillons à la modélisation hydrodynamique de l'évolution des supernovae.</p> <p>La nucléosynthèse des éléments plus lourds que le Fer est encore mal connue. Ceci est essentiellement du au nombre très important de noyaux mis en jeu (plus du millier) et aux très faibles contraintes expérimentales car ces noyaux sont loin de la vallée de stabilité. Nous travaillons sur des études conjointes en structure et en réactions nucléaires pour déterminer les taux de capture de neutrons ou bien encore l'interaction neutrino-noyau. Nous sommes aussi impliqués dans le développement des outils théoriques pour l'analyse de certaines réactions pour l'astrophysique nucléaire, en particulier pour la méthode du cheval de Troie. C'est une recherche qui est menée conjointement avec des équipes expérimentales (voir fiche «campagnes de mesures en astrophysique nucléaire»).</p>
<b>Laboratoires Français</b>	IPN Orsay, GANIL + LPC Caen, CEA, LUTH Meudon.
<b>Collaborations</b>	IFIC Valence et Université de Barcelone (Espagne), Université Pise et de Catane (Italie), Université de Tübingen (Allemagne), IAA Bruxelles (Belgique).
<b>Budget</b>	C'est un projet de physique théorique qui nécessitent des moyens adaptés : moyens de calculs rapides et souples d'utilisation (pour le développement des codes) ; accès aux gros moyens de calculs (pour l'exploitation des codes) ; nous avons aussi besoin de financement pour développer nos collaborations (mois IN2P3, accords CNRS – institut étrangers).

## **VIII – Cosmologie et matière noire**



# Document du groupe de travail Cosmologie et Matière noire pour la préparation de la prospective Dapnia/IN2P3

## Groupe de travail

Pierre Astier (LPNHE, Paris), Edouard Audit (DAPNIA/SAp)  
Gabriel Chardin (DAPNIA/SPP), Jacques Dumarchez (LPNHE, Paris)  
Joël Feltesse (DAPNIA/DIR), Yannick Giraud-Héraud (PCC/CdF et APC, Paris)  
James Rich (DAPNIA/SPP), Sylvie Rosier-Lees (LAPP, Annecy)  
Daniel Santos (LPSC, Grenoble), Gérard Smadja (IPN, Lyon)

## Synthèse

La communauté impliquée dans les domaines de la cosmologie et de la recherche de la matière cachée représente un ensemble d'environ 90 physiciens permanents. Cette communauté présente un grand dynamisme et connaît une croissance régulière du nombre de physiciens impliqués. La communauté française a des contributions majeures dans plusieurs programmes phare comme Planck, avec son précurseur Archeops, dans les expériences Edelweiss, Antares ainsi que le Supernova Cosmology Project (SCP), le SuperNova Legacy Survey (SNLS) et XMM. Les équipes françaises sont également impliquées de façon importante dans des collaborations internationales comme HESS ou AMS. La visibilité des équipes françaises, qui ont joué un rôle de pionnier dans une large fraction de ces domaines, est donc excellente et s'articule autour des grandes questions posées actuellement avec acuité par la cosmologie et le modèle de concordance.

## COSMOLOGIE

Le modèle de concordance de la cosmologie s'appuie sur un grand nombre d'observations dont les approches sont parfois indépendantes et complémentaires. Les équipes françaises y ont joué un rôle important que ce soit dans le domaine des études des anisotropies du fond diffus cosmologique (Archeops et Planck), dans celui de l'utilisation des supernovae de type Ia comme chandelles standard (Supernova Cosmology Project), dans celui des observations à grand champ (Canada-France Redshift Survey et Virgos sur le VLT) ou dans celui des relevés X avec XMM. Les grandes questions ouvertes aujourd'hui sont la nature de l'énergie noire et de la matière noire ainsi que la recherche d'une trace directe de la période inflationnaire.

Toutes ces questions seront abordées par les programmes observationnels qui sont développés au sein des équipes du DAPNIA et de l'IN2P3 pour les dix prochaines années. Il s'agit notamment d'un côté du programme « supernovae de type Ia (SNLS) et astrophysique à grand champ » autour de la caméra Megacam installée sur le télescope Canada-France-Hawaï et de l'autre du programme Planck de l'ESA, satellite destiné à l'analyse des anisotropies du fond diffus cosmologique qui sera lancé en août 2007. Dans le domaine des observations infrarouges, les résultats les plus importants viendront de deux grandes missions spatiales : le satellite Herschell (et son instrument Spire) dont le lancement est couplé avec celui de Planck, et l'instrument Miri qui équipera le JWST (lancement 2011).

Au regard des questions qui seront encore ouvertes, à l'horizon 2015-2025, la nécessité d'un satellite dédié à la mesure de la polarisation du fond diffus cosmologique s'est dégagée de façon extrêmement claire et une réflexion internationale s'est engagée avec différentes hypothèses : pilotage NASA (Einstein Probes), pilotage ESA voire CNES (projet Sampan). Cette perspective implique d'ores et déjà la mise en place d'un programme intensif de R&D sur le développement de matrices de bolomètres, nécessité que l'on retrouve aussi dans le cas des observations X qui devront permettre de faire de la spectro-imagerie avec une résolution spectrale près de 20 fois supérieure à celle des instruments actuels.

Dans le domaine de l'observation optique à grand champ aussi, l'avenir se situe manifestement dans l'espace. Les équipes françaises impliquées dans cette réflexion sont en train de coordonner leurs efforts de R&D et évaluent les différents schémas techniques (spectromètre, taille de miroir, etc.) et organisationnels (projet JDEM-NASA/DOE ; projet Dune qui serait piloté par l'ESA voire par le CNES directement dans le cadre d'une collaboration inter-agences européennes).

## **MATIERE CACHEE**

Les principales expériences actuelles se distinguent par leur mode de détection des éventuelles interactions de WIMPs. Les expériences de détection directe cherchent à mettre en évidence en laboratoire une population identifiée de reculs nucléaires, les expériences de détection indirecte cherchant de leur côté à observer les produits d'annihilation des WIMPs.

Détection directe

Les trois expériences actuellement les plus sensibles, CDMS aux Etats-Unis, Edelweiss et CRESST en Europe, utilisent des détecteurs cryogéniques permettant un rejet actif du bruit de fond radioactif. Elles bénéficient actuellement d'une sensibilité d'environ  $10^{-6}$  picobarn.

La majeure partie des efforts des équipes françaises dans le domaine de la détection directe s'est actuellement investie dans les développements d'Edelweiss. La première phase d'Edelweiss s'est achevée en mars 2004 et a permis de tester pour la première fois un ensemble de modèles de supersymétrie. La deuxième phase de l'expérience doit permettre de progresser de plus d'un ordre de grandeur en sensibilité et de tester une fraction beaucoup plus large de théories supersymétriques, jusqu'à un niveau de sensibilité de quelques  $10^{-8}$  picobarn.

Au-delà de cette étape, qui implique des équipes françaises, allemandes et russes, avec une contribution française prédominante, la stratégie des équipes impliquées s'organise dans le projet européen EURECA. La première phase d'EURECA doit permettre, sur une période d'étude de 4 ans, de tester l'ensemble des points de développement nécessaires à la mise en oeuvre d'une masse cible de l'ordre d'une tonne, nécessaire à terme pour tester une très large fraction des modèles de supersymétrie et identifier de façon inambiguë d'éventuels candidats WIMPs. Le coût de l'expérience 1 tonne est estimé à environ 50 Meuros. la contribution française à cet effort pourrait représenter environ 20 à 25% de cet investissement afin de conserver un rôle majeur dans ce projet.

Détection indirecte

Concernant la détection indirecte des WIMPs, la contribution française est très importante dans l'expérience européenne ANTARES. Elle est également significative dans les expériences AMS, HESS et GLAST. Les performances de l'étape 0,1 km<sup>2</sup> d'Antares doivent permettre de définir la phase 1 km<sup>3</sup> en rassemblant les équipes impliquées dans les programmes Antares,

Nemo et Nestor. Le coût de l'étape 1 km<sup>3</sup> est actuellement étudié dans le cadre d'une Design Study européenne.

## **CONCLUSIONS**

L'excellence des résultats obtenus, le caractère fondamental des questions étudiées et la haute valeur ajoutée associée aux développements mis en oeuvre dans ces expériences nous paraissent justifier la recommandation du renforcement des soutiens humains et financiers accordés à ce domaine de recherche.

## ANNEXE 2

### Ressources nécessaires pour assurer le programme scientifique décrit dans ce document de prospective

Dans l'évaluation de nos demandes de moyens, nous devons tenir compte du fait que dans le domaine de la cosmologie/matière noire les projets majeurs sont financés par des organismes extérieures (CNES, ESA, ESO, NASA...). Par contre, un soutien de nos tutelles (IN2P3 et DAPNIA) est nécessaire pour une partie de la R & D et pour soutenir des projets intermédiaires.

- CMB

- programmes en cours : Planck  
soutien au calcul (CCIN2P3) et à l'analyse de données de Planck, programme ballon Olimpo
- objectifs à 15 ans : satellite de mesure de la polarisation du CMB
  - \_ première hypothèse : EPIC : projet de satellite NASA (1 Geuros) dans le cadre Einstein Probe avec participation du CNES pour la contribution française  
(20 Meuros après 2012).
  - \_ deuxième hypothèse : SAMPAN : projet de satellite européen avec une résolution angulaire dégradée coût total 300 Meuros. Dans ce cas il y a deux options, l'une à pilotage ESA (Cosmic Vision) : contribution CNES de l'ordre de 40 Meuros ; l'autre à pilotage CNES avec collaboration européenne ou américaine : contribution CNES de l'ordre de 150 Meuros.
- programme intermédiaire : R & D détecteurs ; expériences au sol de mesure de la polarisation du CMB  
financement de R & D via le programme Astroparticules puis le CNES et d'une expérience au sol (Brain/Clover au Dôme C) via l'IN2P3 (coût de l'ensemble pour l'IN2P3 2 Meuros sur 4 ans)) et d'un programme ballon Pilote pour l'étude des avant-plans polarisés

- Energie noire

- programmes en cours : CFHTLS et SN factory  
soutien à l'analyse de données jusqu'en 2015
- objectifs à 15 ans : satellite astronomie à grand champ (DUNE/JDEM)
  - première hypothèse : (J)DEM : projet de satellite (1 Geuros) équipé d'un miroir de 2 m de diamètre - pilotage DOE (+NASA) avec participation du

CNES pour la contribution française (20 Meuros après 2007).

- deuxième hypothèse : Dune (300 Meuros) : projet de satellite équipé d'un miroir de 1 m de diamètre. Dans ce cas il y a deux options, l'une à pilotage ESA dans le cadre de Cosmic Vision (coût pour CNES 60 Meuros), l'autre à pilotage CNES avec collaboration européenne ou américaine (coût pour CNES 150 Meuros).
- programme intermédiaire : R & D sur électronique de lecture des caméras et sur l'étude d'un spectromètre pouvant être équipé (J)DEM  
financement de R & D via le programme Astroparticules puis le CNES  
Effort IN2P3 2003-2004 : 150 keuros/an ; ITA : 6 ETP  
Effort IN2P3 2005-2006 : 300 keuros/an ; ITA : 12 ETP
- Modélisation numérique
  - programmes en cours : Horizon, Combustion et Supernovæ
  - objectifs à 15 ans : créer en France une communauté de physiciens numériques bien intégrée à l'astrophysique.
    - méso-équipement 2004-2007 : 150 keuros (INSUE)
    - équipements locaux : 130 keuros
  - programme intermédiaire : implantation de meso-équipements de calcul ; faire reconnaître les métiers du numérique par les tutelles.
- observations en X
  - programmes en cours : XMM  
soutien à l'analyse de données
  - objectifs à 15 ans : satellite XEUS (coût total 1 Geuros)
  - programme intermédiaire : R & D détecteurs ; matrices de micro-calorimètres ; projet Simbol-X dans le cadre du programme CNES de vols en formation (coût total 150 Meuros avec contribution CNES de 100 Meuros à l'horizon 2010)  
financement de R & D via le programme Astroparticules puis le CNES

coût de la R&D pour matrices de calorimètres X, études effectuées en collaboration avec le LETI (2 Meuros sur 5 ans)
- détection de matière noire
  - programmes en cours : Edelweiss  
financement de la phase 100 détecteurs d'Edelweiss II (cela correspond à un financement supplémentaire de 3 Meuros comparé aux 4,5 Meuros de la première étape avec 28 détecteurs)
  - objectifs à 15 ans : détecteur 1 tonne (30-50 Meuros) avec participation française de l'ordre de 15 %
  - programme intermédiaire : R & D détecteurs avec un financement de R & D via le programme Astroparticules et Design Study européenne Eureka en collaboration

avec les équipes de CRESST (Allemagne, Angleterre) et de divers instituts européens dont le CERN : coût 5-7 Meuros sur 3-4 ans avec participation française de l'ordre de 30 %.

## Volet financier

	<i>Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015</i>	<i>accélérateur, détecteur, calculateur.....</i>	<i>Etude de faisabilité, avant projet détaillé, construction....</i>			<i>Cette colonne sera consolidée par les directions de l'IN2P3 et du CEA</i>		<i>Cette colonne sera consolidée par les directions de l'IN2P3 et du CEA</i>	
<b>Priorité</b>	<b>Nom du projet</b>	<b>Type de projet</b>	<b>Etat d'avancement</b>	<b>Années de début et de fin des investissements</b>	<b>Coût total hors personnel (en M€)</b>	<b>Coût total en incluant le personnel (en M€)</b>	<b>Contribution IN2P3+CEA (hors personnel) en M€</b>	<b>Contribution IN2P3+CEA (en incluant le personnel) en M€</b>	<b>Autres contributions Françaises en M€</b>
	Olimpo	CMB-ballon	approuvé-financé	2003-2005	2,5 M€	3,5 M€	150k€	300k€	
	Planck	CMB-satellite	approuvé-financé	1997-2007		500M€			CNES-35M€
	Epic Sampan-ESA Sampan-CNES	polarisation B du CMB - satellite	en discussion	après 2012		1G€ 300 M€ 300 M€			CNES-20M€ CNES-40M€ CNES-150 M€
	Brain/Clover	polarisation du CMB	en discussion	2006-2009		12M€		2M€	IPEV-3M€
	R&D détection millimétrique		en cours	2003-2015					Astroparticules - CNES : 2 M€
	CFHTLS SN factory	SN1a - sol - Hawaii	approuvé-financé	2001-2004					
	(J)DEM DUNE-ESA DUNE-CNES	SN1a - cisaillement astronomie grand champ	en discussion	2007-2015		1G€ 300M€ 300M€			20M€ 60M€ 150M€
	R&D électronique - spectromètre		en cours				150 k€/an 300 k€/an	150k€/an+6 ETP 300k€/an+12 ETP	
	Horizon Combustion et Supernovae	simulations numériques	approuvé - à financer	2004-2007					INSUE-0,15M€ Astroparticules 0,13M€
	XEUS	satellite - X	en discussion	2015-...		1G€			

	R&D pour matrices de calorimètres (LETI)		en discussion	2005-2010					CNES-2M€
	Simbol-X	satellites en formation - X	phase A	2010-...		150M€			CNES-100M€
	Edelweiss II	matière noire - 10 kg	approuvé - financé	2003-2006			4,5M€		
	Edelweiss III	matière noire - 35 kg	approuvé - à financer	2006-2009			3,5M€		
	Eureca	matière noire (1 tonne)	en discussion	2010-2015		30-50M€	5-7 M€		
	R&D détecteurs				5-7 M€				Astroparticules 1,5-2 M€

## **IX - Astrophysique de haute énergie**



## « Executive Summary »

### *Groupe de travail :*

#### *« Physique et astrophysique des sources énergétiques: des photons aux particules »*

La très grande richesse et la variété des phénomènes violents observés dans l'Univers ont montré que l'étude de ces phénomènes ne pouvait pas se limiter à un seul type d'observation. La compréhension des mécanismes sous-jacents implique de "sonder" ces phénomènes à travers tous les "messagers" qu'ils sont susceptibles d'émettre : gamma ( rayons X aux photons d'une gamma en énergie variant du GeV au TeV), particules chargées et neutrinos. Cette constatation a permis à ces observations "multi-messagers" de connaître un remarquable essor lors de ces dernières années.

Ces messagers pourront nous renseigner sur le fonctionnement des accélérateurs cosmiques d'énergies extrêmes tels que les noyaux actifs de galaxies (AGN) souvent associés à des trous noirs massifs, les sursauts gamma ou les étoiles à neutrons. Parallèlement à ces études de type "astronomie", ces particules et rayonnements de haute énergie pourraient également indiquer l'existence de particules encore inconnues qui pourraient être responsables de la matière noire de l'univers ou témoigner de ses premiers instants. Ils peuvent peut-être aussi nous renseigner sur l'antisymétrie matière antimatière. Dans ce domaine il existe donc un potentiel important de découvertes et peut être une nouvelle physique à l'épreuve de conditions bien plus extrêmes que celles que l'on ne pourra jamais produire dans les laboratoires terrestres.

La variété de ces messagers implique des propriétés fort différentes quant à leur mode de production et à leur propagation. Les particules chargées sont accélérées dans les objets astrophysiques. Ces particules chargées sont soumises à l'effet de champs magnétiques et leur capacité de pointer les sources est réduite à basse énergie. De ce fait, elles peuvent donner des contraintes importantes sur l'intensité du champ magnétique galactique et extra-galactique encore mal connu aujourd'hui. Le rayonnement gamma et les neutrinos sont produits dans les réactions de ces particules avec la matière environnante et constituent une contre partie importante de l'observation. La propagation des rayons gamma ne peut être affectée que par le fond micro-onde et infra-rouge. Les neutrinos peuvent se propager sans perturbation dans l'univers mais à cause de cette probabilité faible d'interaction, les neutrinos sont aussi les particules les plus difficiles à détecter. Ainsi, les rayons gamma et bientôt les neutrinos sont des observables privilégiées pour l'étude des sources.

Pour comprendre ces sources de haute énergie il est important de poursuivre en parallèle et d'une manière corrélée les observations des particules chargées, des rayons gamma sur un vaste domaine spectral et des neutrinos et éventuellement la détection des ondes gravitationnelles. La distribution des sources potentielles est différente dans les deux hémisphères. Le centre galactique est visible dans l'hémisphère sud. On peut observer également une plus grande partie du halo galactique dans le sud. En contrepartie, il y a localement plus d'AGN dans l'hémisphère nord. Il est donc important d'assurer une couverture globale du ciel.

### *Les rayons gamma*

**Le présent :** L'observation des rayons gamma se fait soit par des télescopes au sol soit par des détecteurs embarqués.

Les 4 télescopes Cherenkov de HESS, en Namibie, prennent des données depuis fin 2003. La prospective porte d'une part sur une extension vers les basses énergies pour assurer un recouvrement avec les missions spatiales et d'autre part une augmentation des surfaces efficaces de détection (de l'ordre de plusieurs hectares) que permettent les télescopes Tcherenkov.

Concernant les missions spatiales en cours, INTEGRAL a pour objectif principal l'exploration approfondie des sites célestes émissifs dans la bande spectrale de 15 keV à 10 MeV. Cette mission a déjà donné des résultats marquants sur l'émission des gamma du centre de notre galaxie. Cette mission sera décrite plus en détail dans la partie Astrophysique Nucléaire.

**Les projets futurs :** Dans un futur à court terme, le projet de télescope HESS2 pourrait assurer une meilleure couverture spectrale avec les missions spatiales (GLAST, AMS). A plus long terme un site en haute altitude pourrait alors être envisagé pour maximiser la quantité de lumière reçue. D'autre part, l'extension ultérieure des installations en cours de construction est une option intéressante permettant de réaliser un relevé systématique dans certaines régions du ciel. Une demande de « Design study » au niveau européen est envisagée. Le télescope MAGIC, situé dans l'hémisphère nord (pas de participation française) complète les observations par HESS.

L'autre grande mission devant entrer en service dans la décennie en cours est la mission internationale GLAST, dont le lancement doit intervenir en 2007. GLAST se propose d'observer le ciel gamma de haute énergie (10 MeV – 300 GeV). Prévue pour durer au moins cinq ans, la mission GLAST sera en mesure de détecter et de localiser avec précision des milliers de sources gamma galactiques (pulsars, restes de supernova, pléïons) et extragalactiques (quasars, galaxies voisines, amas) ainsi que l'émission du milieu interstellaire.

La mission ECLAIRS, qui pourrait être lancée en 2008, sera en mesure de pratiquer une étude multi longueurs d'onde de l'émission prompt d'une centaine de sursauts gamma par an. L'autre voie qui s'ouvre est celle des satellites en formation. SIMBOL-X, une mission qui, en s'appuyant sur deux satellites en formation, affiche une sensibilité et une résolution angulaire améliorées de plus de deux ordres de grandeur par rapport à INTEGRAL. SIMBOL-X pourrait entrer en service en 2011.

### *Les rayons cosmiques de haute et ultra haute énergies*

**Le présent :** Le site sud de l'Observatoire Pierre Auger (OPA) a commencé la prise de données au début de cette année. Il observera des rayons cosmiques d'énergie d'extrême, au-delà de  $10^{19}$  eV. L'existence de la coupure du spectre des rayons cosmiques à très haute énergie due à des réactions avec le fond micro-ondes (la coupure GZK) est une question controversée qui peut révéler une déviation des lois de Physique connues actuellement. L'observatoire Pierre Auger pourra détecter aussi des neutrinos de haute énergie grâce à des gerbes horizontales issues des neutrinos traversant soit l'atmosphère soit la terre. Actuellement, l'Observatoire Pierre Auger est la seule expérience des rayons cosmiques de très haute énergie ayant une acceptance nécessaire pour mesurer le spectre énergétique avec une statistique suffisante. De plus, l'utilisation des deux techniques expérimentales, réseau de

surface et télescopes à fluorescence, permettra d'évaluer les erreurs systématiques et d'avoir des données fiables. La construction du site sud devrait être finie vers la fin de 2005.

### **Les projet futurs :**

Le site nord de l'OPA est à l'étude aux USA et actuellement deux sites, dans le Colorado et en Utah, sont considérés. Un développement intéressant est engagé pour la détection des gerbes atmosphérique par des ondes radio.

L'expérience AMS doit être installée sur la Station Spatiale Internationale (ISS) en 2007. Elle permettra de mesurer avec une précision jamais atteinte la composition et le spectre des rayons cosmiques ( $e^-$ ,  $e^+$ ,  $p$ ,  $\text{anti-}p$  et noyaux légers identifiés en masse jusqu'à des  $A < 13$  et en charge jusqu'à des  $Z < 30$ ) dans la gamme d'énergie allant du GeV à quelques TeV. Ces mesures sont importantes en elle mêmes et utiles, en particulier pour mieux modéliser la propagation des rayons cosmiques. AMS effectuera également des recherches : d'antimatière primordiale, avec une sensibilité améliorée par trois ordres de grandeur; de nouvelles formes de matière comme les strangelets et de matière noire recherchée dans ses produits d'annihilation simultanément avec plusieurs types de particules ( $\text{anti-}p$ ,  $\text{anti-}D$ ,  $e^-$ ,  $e^+$ ,  $\gamma$ ).

Le projet spatiale EUSO a terminé sa phase A qui a été jugée satisfaisante au niveau des ambitions de la physique et au niveau technique. Des objections ont été soulevées concernant le transport vers l'ISS, l'attente des données issues de l'OPA et le financement par la direction de la Science de L'ESA. Des solutions de transport sont à l'étude via l'utilisation de l'HTV (transporteur japonais) et une plus grande participation financière de la direction des vols habités (D/MSM) de l'ESA est proposée. A plus long terme une proposition d'un détecteur encore plus efficace que EUSO à été déposée dans le cadre du programme Cosmic Vision de l'ESA (2015-2025).

### *Les neutrinos*

**Le présent :** En raison de la très faible section efficace des neutrinos, un détecteur efficace devrait avoir une masse sensible de l'ordre de  $10^9$  tonnes ( $1 \text{ km}^3$  d'eau), d'où la nécessité d'utiliser un milieu naturel, eau de mer ou glace polaire. La collaboration ANTARES construit actuellement, au large des côtes méditerranéennes françaises, un détecteur de neutrinos d'une surface de  $0.1 \text{ km}^2$  pour des neutrinos de quelques centaines de TeV. Ce projet européen, initié et coordonné par les équipes françaises, sera achevé fin 2006. Il possède un potentiel de découverte appréciable pour les premières observations des sources cosmiques des neutrinos énergétiques (microquasars, AGNs etc.). Enfin les neutrinos peuvent aussi donner une indication sur les particules supersymétriques qui pourraient être à l'origine de la matière noire de l'univers.

**Les projets futurs :** Pour explorer plus loin l'univers en neutrino, un détecteur plus grand sera nécessaire. Le financement d'un 'design study' pour un tel détecteur (KM3NeT) a été récemment approuvé par le programme européen FP6. Cette étude durera trois ans et vise une résolution angulaire de  $\sim 0.1^\circ$  avec un volume instrumenté d'au moins  $1 \text{ km}^3$  dans la Mer Méditerranée. Comme ANTARES, ce détecteur regardera l'hémisphère sud et donc va voir le centre galactique. Avec l'expérience ICECUBE, en construction au pôle sud, ils donneront ensemble une couverture complète du ciel en neutrinos de hautes énergies vers 2011.

### *Conclusions*

Ce programme de recherche se situe au cœur de la Physique des Astroparticules. La France a une contribution importante, à la fois dans la R&D, la construction des instruments et l'analyse et l'interprétation des données. Dans ce domaine il est clairement important d'avancer en utilisant plusieurs observables, la technique multi-messagers, et assurer à la fois le développement et l'exploitation des expériences au sol et dans l'espace. Dans l'avenir un effort significatif doit sans doute être fait pour développer les méthodes de corrélations de ces différentes observations. Il faut également noter que, pour la plupart de ces expériences, il y aura obligation de rendre publique, dans des délais courts, les données ainsi que des logiciels d'exploitation : ceci représente un effort important que la communauté doit évaluer avec réalisme.

Plusieurs des expériences futures impliquent des R&D importants. L'utilisation du milieu naturel pour la détection (l'atmosphère, l'eau de mer) nécessite aussi la création de collaborations avec les spécialistes d'autres domaines. Il faut souligner également l'importance des physiciens théoriciens pour l'interprétation des données ainsi que pour la recherche de nouvelles observables.

La communauté scientifique dans ce domaine est environ 100 chercheurs permanents. En vue de l'arrivée prochaine des données de plusieurs expériences, il faut assurer le recrutement régulier des jeunes chercheurs.

Les expériences apparaissent bien échelonnées en fonction du temps et ne présentent pas de recouvrements indésirables. La question qui pourrait se poser est celle des moyens, financiers et humains, disponibles pour les projets à venir et les choix qui seraient, éventuellement, nécessaire de faire.

## Volet humain

	Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015	<i>accélérateur, détecteur, calculateur.....</i>	<i>Etude de faisabilité, avant projet détaillé, construction....</i>				<i>Autant que possible détailler par année et par organisme ( IN2P3 et CEA )</i>	
Priorité	Nom du projet	Type de projet	Etat d'avancement	Années de début et de fin des investissements	Pays partenaires	Nombre de physiciens français participant au projet	Nombre de techniciens et ingénieurs français participant au projet en nombre d'hommes par an.	Commentaires
	<b>ECLAIRS</b>	<b>Spatial</b>	fin de construction operation 2008	2004-2008		Sap- Dapnia		
	<b>SIMBOL-X</b>	<b>spatial</b>	etude de faisabilité, vols en formation....	2002-2011	Italie,Royaume Uni, Allemagne	Sap- Dapnia		
	<b>AMS</b>		Fin construction prévue début 2006	1999-2015	56 instituts USA, Taiwan, Italie,Allemagne, Espagne, Suisse, Hollande, Portugal, Danemark, Mexique,Roumanie, Finlande,Russie,Chine, Coree	12 permanents - 3 postdocs et 5 thesards	14 in2p3 jusqu'en 2007	Experience reconnue du Cern - integration et centre d'operation (POCC) et scientifique (SOC) au CERN
	<b>GLAST</b>	<b>Spatial</b>	Fin construction prévue début 2006	2000-2015	USA, Japon, Italie, Suede	7 permanents in2p3 et 4 permanants CEA	24 ingenieurs/an	
	<b>HESS II</b>	<b>Experience</b>	Fin de construction en 2008	2005-2008	Allemagne,UK, Irlande, Namibie, RSA, Armenie,Tchequie, France. (Italie?)	24 (+3?) permanents, 3 PostDoc, 3 Thesards	IN2P3 : 7 hommes/an (sur 2005-2008). CEA: 1 homme/an (sur 2005-2006)	Approuve par le CS/In2p3, recommande par le programme astroparticule et la CID 47. Projet TGE (2005-2007) approuve par le CS et le CA du CNRS

	<b>AUGER SUD</b>	<b>Observatoire</b>	Fin construction prévue début 2006	1999 - 2005	Argentine Allemagne Australie Brésil Espagne Etats Unis Italie Mexique Pologne Royaume Uni Slovénie Tchéquie	21 physiciens titulaires 4 post-docs 10 doctorants	30 ingénieur- ans (80% IN2P3 - 10% INSU - 10% SPI)	
	<b>AUGER NORD</b>	<b>Observatoire</b>	R&D sur l'upgrade de AUGER SUD, début de construction 2007	2007 - 2010	Même que AUGER SUD avec quelques modifications	Les équipes de AUGER SUD + éventuellement nouveaux groupes	Similaire à AUGER SUD	
	<b>EUSO</b>	Spatial	Phase A de l'ESA	2006-2010	Italie, Portugal, Allemagne, Espagne, Brésil, Japon, USA	11	~10	
	<b>ANTARES</b>	<b>Experience</b>	fin de construction 2006	1996-2006	Italie, Pays Bas, Allemagne, Espagne, Russie	IN2P3:10 physiciens, 1 post doc, 5 étudiants - CEA 7 physiciens, 2 étudiants	IN2P3 : 17 hommes/an CEA:16 hommes/an	
	<b>KM3NET</b>	<b>Experience</b>	étude de faisabilité	2006-2008	Italie, Pays Bas, Royaume Uni, Allemagne, Espagne, Russie	à définir	à définir	

## Volet financier

	<i>Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015</i>	<i>accélérateur, détecteur, calculateur.....</i>	<i>Etude de faisabilité, avant projet détaillé, construction.....</i>			<i>Cette colonne sera consolidée par les directions de l'IN2P3 et du CEA</i>		<i>Cette colonne sera consolidée par les directions de l'IN2P3 et du CEA</i>	
<b>Priorité</b>	<b>Nom du projet</b>	<b>Type de projet</b>	<b>Etat d'avancement</b>	<b>Années de début et de fin des investissements</b>	<b>Coût total hors personnel (en M€)</b>	<b>Coût total en incluant le personnel (en M€)</b>	<b>Contribution IN2P3 (hors personnel) en M€</b>	<b>Contribution IN2P3 (en incluant le personnel) en M€</b>	<b>Autres contributions Françaises en M€</b>
	<b>ECLAIRs</b>	<b>Spatial</b>	operation 2008	2004-2008					CNES 18 M€
	<b>SIMBOL-X</b>	<b>mission vol en formation</b>	Phase B ?	2002-2011			previson CEA:10M€		previson CNES 200 M€
	<b>AMS</b>	<b>Spatial</b>	construction 99-05 Intégration + Tests + Prise/Analyse Données	1999 - 2005 2006 - 2015	180 M€ 30 M€	650 M€ 450 M€	0.8 M€ 0.7 M€	25 M€ 15 M€	Rhone Alpes 0.4 Hte Savoie 0.3 CNES 0.3
	<b>GLAST</b>	<b>Spatial</b>	Fin de construction en 2006	2000 - 2006 2007 - 2015			8 M€ IN2P3 1.5 M€ CEA	CEA 3.6 M€	CNES 340 K€
	<b>HESS II</b>	<b>Experience</b>	Fin de construction en 2008	2005-2008	8 M€	16 M€	4 M€	8 M€	
	<b>AUGER SUD</b>	<b>Observatoire</b>	Fin construction prévue début 2006	1999-2006		WBS 48.3 M\$	CNRS + IN2P3 3.22 M€		Région Ile-de-France 0.35 M€
	<b>AUGER NORD</b>	<b>Observatoire</b>	R&D sur l'upgrade de AUGER NORD, début de construction prévu en 2007	2007-2010		Estimé actuellement estimé à 50 M\$	Similaire à AUGER SUD		
	<b>EUSO</b>	<b>Spatial</b>	Fin Phase A de l'ESA	2006-2010?	5,3 M€ du CNES	10,5M€	0,5M€ (etude phase B)	5,2M€	
	<b>ANTARES</b>	<b>Experience</b>	fin de construction 2006	1996-2006	20 M€		3 M€ IN2P3 2.3 M€ CEA	VAR 1.5 M€ PACA 150 K€	
	<b>KM3NET</b>	<b>Expérience</b>	Etude de faisabilité	2006-2008	Demande FP6 9 M€				



## **X - Ondes gravitationnelles**



## **Synthèse du rapport sur le Thème « ondes gravitationnelles »**

P. Hello, F. Marion, B. Mours

### **1) Introduction**

Depuis une quinzaine d'années, des laboratoires de l'IN2P3 se sont engagés dans la recherche des Ondes Gravitationnelles (O.G.). C'est un domaine en forte évolution où le démarrage des interféromètres de plusieurs kilomètres de long que sont LIGO et Virgo nous font passer d'une époque dominée par les développements technologiques à une époque où l'observation en continu et la recherche de sources doivent devenir quotidiennes.

Les enjeux de la recherche des O.G. sont multiples. Il s'agit tout d'abord d'observer directement un signal émis depuis des régions de l'espace où règnent des champs gravitationnels intenses (coalescence de trous noirs par exemple) contrairement à la plupart des manifestations de la gravitation, offrant ainsi de nouveaux tests. D'autre part, les O.G. détectables étant émises par des sources astrophysiques, nous allons pouvoir observer l'univers avec un œil neuf et compléter ainsi les observations faites à base d'ondes électromagnétiques. Enfin, c'est un domaine qui demande de nombreux développements technologiques.

Cette synthèse du rapport présentera la physique des O.G. et plus particulièrement les contributions des laboratoires de l'IN2P3 aux deux aspects de ce domaine : les recherches faites avec des détecteurs terrestres et celles qui peuvent être faites à l'aide de détecteurs spatiaux. Ces deux domaines correspondant à des bandes de fréquence bien distinctes (mHz-Hz et Hz-kHz) doivent permettre l'observation de sources différentes.

Signalons enfin, que jusqu'à présent le DSM/DAPNIA ne s'est pas impliqué dans la recherche des O.G.

### **2) Détecteurs terrestres.**

Les laboratoires de l'IN2P3 se sont lourdement investis dans la construction des détecteurs terrestres, essentiellement Virgo dont la construction s'est achevée en 2003.

Le savoir-faire des laboratoires de l'IN2P3 a été essentiel pour la construction de Virgo et s'est enrichi au cours des années. Ces laboratoires sont donc bien préparés à l'exploitation des données et à participer aux améliorations nécessaires.

#### ***2.1) Situation actuelle et perspective à très court terme (2004-2005)***

Actuellement (fin 2004) Virgo est en phase de commissioning. C'est une phase longue car il s'agit d'une machine complexe et complètement nouvelle. La première priorité est donc de faire fonctionner Virgo à la sensibilité nominale et de manière permanente. Cet objectif peut être atteint pendant la deuxième moitié de l'année 2005 si tout se déroule normalement.

Parallèlement à cet effort, il y a aussi un travail important de mise en place de l'analyse des données. Cette physique nécessite une mise en commun des données provenant des différents détecteurs situés dans le monde. Là aussi, les physiciens de l'IN2P3 ont su tisser des liens avec les autres expériences pour participer à ce travail. Citons par exemple la définition du

format des données de toutes les expériences ou la participation à des échanges de données test. Cet esprit de collaboration avec les autres expériences dépasse l'analyse des données et inclut des aspects techniques tels que des programmes de R&D communs avec LIGO comme le traitement de surface des miroirs ou les études du recyclage du signal.

Remarquons que la période actuelle (mise en route du détecteur, des analyses et des premiers upgrades) est propice à l'apport de nouveaux groupes de l'IN2P3 ou du DAPNIA dans Virgo.

### ***2.2) Perspective à moyen terme (2006-2009)***

Bien que Virgo (ou l'expérience américaine LIGO) améliorent de plusieurs ordres de grandeur la sensibilité des détecteurs, l'observation d'un signal d'O.G. est loin d'être certaine, compte tenu des incertitudes des prédictions théoriques. Il est donc nécessaire de prévoir dès maintenant des améliorations des détecteurs. Ces améliorations passent par toute une série de changements plus ou moins importants dont une bonne partie peut être mise en place de manière graduelle. Il s'agit, par exemple, de changer les miroirs pour améliorer leurs performances vis à vis du bruit thermique (nouveaux matériaux, nouveaux traitements de surface, nouvelles formes de faisceau...) de modifier leur type de suspension (suspension monolithique), d'augmenter la puissance lumineuse, de modifier la configuration optique (recyclage du signal) ou d'améliorer les systèmes de contrôles.

Les laboratoires de l'IN2P3 sont en particulier impliqués dans les études de traitement de surface (Lyon), systèmes de contrôles (LAPP) et recyclage du signal (LAL). Ces études font partie d'un programme mis en place et financé par le biais d'EGO, structure franco-italienne. Les différentes options qui seront retenues et le planning de ces améliorations graduelles sont encore à l'étude par la collaboration Virgo.

Ce programme est en fait parallèle à celui mis en place par LIGO, programme qui doit être installé en 2009 mais qui est plus ambitieux car il inclut une refonte totale de l'isolation sismique. A la fin de ces programmes, il est envisagé que la sensibilité de Virgo tout comme celle de LIGO soit améliorée d'un ordre de grandeur. La participation des laboratoires de l'IN2P3 doit se poursuivre dans la direction actuelle.

### ***2.3) Perspective à long terme (2010 et plus)***

Des modifications en profondeur des choix technologiques effectués pour Virgo seront nécessaires pour gagner un nouvel ordre de grandeur en sensibilité et ouvrir sérieusement le domaine de l'astronomie des O.G.. Plusieurs options sont alors possibles. Par exemple il peut y avoir l'introduction de nouvelles technologies telles que de nouveaux matériaux pour les miroirs, le refroidissement des ou d'une partie des miroirs, l'utilisation d'états condensés de la lumière, des optiques diffractives...

Toutes ses options pourront être mises en oeuvre sur Virgo et/ou sur une deuxième antenne européenne éventuellement souterraine. Cette seconde antenne sera nécessaire pour assurer une couverture raisonnable du ciel avec la redondance requise pour une observation continue couplée avec les deux sites de LIGO. Dans le cadre de l'initiative européenne FP6, un programme de « Design Study » a été soumis par un groupe qui fédère l'ensemble des groupes européens travaillant sur cette thématique. Cette activité qui doit se dérouler pendant les années 2005-2009 devrait permettre de préparer les choix et les options qui s'avéreront disponibles en 2010. Elle est essentielle pour l'organisation à long terme de la communauté européenne.

### **3) Les O.G. avec des détecteurs spatiaux.**

Aujourd'hui, il n'existe pas de détecteurs spatiaux d'O.G. même s'il y a eut une première tentative d'analyse de données radio de certains satellites (« tracking Doppler »). Cependant des projets sont en préparation depuis longtemps. Le projet spatial clef est LISA qui actuellement est conjointement porté par l'ESA et la NASA. LISA dont le lancement devrait intervenir en 2013 (?) sera précédé d'une mission de qualification technologique d'un certain nombre de composants (mission LISA Pathfinder) dont le lancement est prévu pour 2008.

Les laboratoires de l'IN2P3 ont longtemps été éloignés de ce sujet, domaine où la présence française était d'ailleurs de plus en plus réduite. Mais en 2004, une évolution s'est manifestée et un certain nombre de laboratoires français dont certains de l'IN2P3 ont affiché leur intérêt pour LISA : APC avec une contribution dès LISA pathfinder, le LAPP et plus récemment le LPSC, l'intérêt commun de ces laboratoires se retrouvant autour du traitement des données. Il s'agit donc d'un investissement là aussi à long terme pour une physique complémentaire de celle des détecteurs terrestres. Signalons à ce sujet le rôle du GDR GREX (Gravitation et Expérience dans l'Espace) qui permet un échange entre les deux domaines.

## Volet humain

	<i>Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015</i>	<i>accélérateur, détecteur, calculateur .....</i>	<i>Etude de faisabilité, avant projet détaillé, construction....</i>				<i>Autant que possible détailler par année et par organisme ( IN2P3 et CEA )</i>	
Priorité	LISA / LISA Pathfinder	Mission spatiale	avant-projet détaillé	2005-2007 (date de lancement de Pathfinder) puis -2012 (date de lancement prévue de LISA)	USA-Europe	?	?	LISA-France (qui comptait 2 personnes jusqu' en 2004) est en train de s'organiser

## Volet financier

	<i>Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015</i>	<i>accélérateur, détecteur, calculateur .....</i>	<i>Etude de faisabilité, avant projet détaillé, construction....</i>			<i>Cette colonne sera consolidée par les directions de l'IN2P3 et du CEA</i>		<i>Cette colonne sera consolidée par les directions de l'IN2P3 et du CEA</i>	
Priorité	LISA/LISA Pathfinder	Mission spatiale	Avant projet détaillé	2005-2012	Pathfinder : 160 (en M€)	Coût total en incluant le personnel (en M€)	Contribution IN2P3+CEA (hors personnel) en M€	Contribution IN2P3 + CEA (en incluant le personnel) en M€	CNES : 2 M€. L'UE doit contribuer pour moitié à LISAPathfinder

**XI - Physique et chimie pour le nucléaire et  
l'environnement**



## **PHYSIQUE ET CHIMIE POUR L' ENERGIE NUCLEAIRE ET L'ENVIRONNEMENT**

Groupe de Travail : G. Barreau (CENBG), E. Berthoumieux (DAPNIA), A. Billebaud (LPSC) , I. Billard (IRES), S. Bouffard (CIRIL), S.David (IPNO), B. Grambow (Subatech), S. Hubert (IPNO), T. Kirchner (Subatech), C. Landesman (Subatech), C. Le Brun (LPSC), N. Moncoffre (IPNL), S. Leray (DAPNIA), D.Ridikas (DAPNIA), H. Safa (DAPNIA), E. Simoni (IPNO), J.C. Steckmeyer (LPC Caen), L. Thomé (CSNSM).

L'augmentation de l'effet de serre due aux énergies fossiles, l'épuisement à long terme des ressources et l'accroissement de la demande en énergie des pays émergents (Chine, Inde) laissent envisager une reprise de l'énergie nucléaire à plus ou moins long terme. Cependant, la poursuite du développement de l'énergie nucléaire nécessite de garantir une sûreté maximale des réacteurs, d'aborder la question des ressources (les réserves d'uranium étant limitées) tout en empêchant la prolifération et surtout trouver une solution, acceptable par la société, pour la gestion des déchets nucléaires à vie longue.

Dans ce contexte, la loi Bataille de 1991 a initié de nombreuses recherches selon trois axes : séparation- transmutation, stockage souterrain, conditionnement - entreposage longue durée, et a suscité depuis une douzaine d'années une forte mobilisation des chercheurs de l'IN2P3 et du DAPNIA autour de ces objectifs, particulièrement sur la gestion des déchets nucléaires à vie longue provenant des cycles des combustibles, dans le cadre de PACE (GDR PRACTIS, NOMADE, GEDEPEON) et en étroite collaboration avec d'autres acteurs du nucléaire (CEA, COGEMA, ANDRA, EDF..). Si d'importants résultats ont été obtenus et des solutions proposées sur la réduction de la radiotoxicité, sur le conditionnement, et la séparation poussée, des progrès restent à accomplir, et certaines recherches sont plus avancées que d'autres. Il est donc fortement vraisemblable qu'en 2006, quelques décennies de recherches restent encore nécessaires.

Dans le futur un effort important doit être poursuivi en radiochimie, en particulier sur le comportement des radionucléides (RN) sous rayonnement, la chimie des RN dans les milieux innovants pour la séparation et dans les nouveaux combustibles, tout en continuant d'améliorer nos connaissances sur les propriétés physicochimiques des actinides et l'acquisition de bases de données thermodynamiques permettant de simuler le comportement des RN à long terme dans l'environnement.

Pour répondre aux enjeux du développement de l'énergie nucléaire, de nouvelles filières devront être développées. Des études sont engagées au niveau international, dans le cadre du Forum Génération IV, afin d'évaluer quelle pourrait être une quatrième génération de réacteurs plus sûrs, produisant moins de déchets, optimisant les ressources en matières fissiles et non proliférants.

La définition et l'évaluation des nouveaux concepts de réacteurs et des différentes options pour l'amont et l'aval du cycle, avec des contraintes de performance et de sûreté accrues, nécessitent évidemment de pouvoir disposer de nouvelles données expérimentales et d'outils de simulation adaptés et validés. Ceci demande à la fois des mesures fondamentales auprès d'installations appropriées, des études théoriques pour améliorer les outils de simulation, des démonstrations à différentes échelles des concepts ou solutions techniques proposés, des études d'impact et de scénarios. Ces recherches doivent évidemment être menées en collaboration étroite avec les autres acteurs du domaine au niveau français (CEA, EDF, FRAMATOME, COGEMA...), européen (projets des différents PCRD) et mondiaux. Les physiciens nucléaires du DAPNIA et de l'IN2P3 se sont mobilisés ces dernières années pour apporter leur contribution dans ces domaines. Des dispositifs expérimentaux ont été

construits, des expériences réalisées, des outils de simulation mis en place et des équipes se sont constituées. Il s'agit maintenant de pérenniser ces compétences et de renforcer les équipes, étant donnée l'ampleur de la tâche, afin qu'une évaluation et une validation scientifiques des différents concepts ou solutions puissent être faites.

En marge des applications à l'énergie nucléaire, d'autres domaines pourraient bénéficier de ces compétences: sources de neutrons, production d'isotopes radioactifs, astrophysique, métrologie, médical... En particulier, la caractérisation de matériaux par de nouvelles méthodes nucléaires non destructives (photofission, utilisation de neutrinos) suscite depuis peu un grand intérêt dans le domaine de la sécurité intérieure, le contrôle de la prolifération, le démantèlement des installations. Des études à la fois fondamentales et de validation des techniques sont requises et nécessitent le renforcement des équipes existantes.

## **1. Radiochimie pour le nucléaire et l'environnement**

La recherche en radiochimie porte sur la chimie de la matière radioactive dans le secteur de l'énergie nucléaire présent et futur (amont et aval du cycle des combustibles nucléaires) ainsi que dans l'environnement et la médecine. Il est clair que les questions liées à la gestion des déchets nucléaires (confinement et entreposage, migration des radionucléides à partir d'un site de stockage) sont toujours d'actualité et le resteront après 2006. De plus, les études liées au « nucléaire du futur » (Génération IV, RSF) devront être développées, notamment sur l'extraction/séparation (en particulier par électrochimie et pyrochimie et extraction innovante avec les liquides ioniques), la mise au point de nouveaux combustibles et de matrices de transmutation. Ces différents sujets nécessitent pour certains des études très prospectives ainsi qu'une forte implication en recherche fondamentale.

Concernant la radioactivité dans l'environnement le problème fondamental est l'évaluation du risque radiologique par la modélisation de la migration et des transferts des radionucléides dans le cycle bio-géochimique naturel et jusqu'à l'homme. Enfin, dans le médical, la radiochimie a un rôle important à jouer sur la mise au point des nouvelles techniques d'imagerie et de radiothérapie interne.

Les programmes de recherche sur le comportement des actinides en particulier, ont une spécificité : ils doivent permettre d'effectuer des extrapolations dans le temps. Ainsi, l'identification, l'analyse et la hiérarchisation des phénomènes physico-chimiques à l'origine de ce comportement doivent constituer un ensemble expérimental permettant de décrire rigoureusement ces processus, et conduire à une compréhension suffisamment fine permettant ces extrapolations.

La radiochimie ne peut pas achever sa mission dans ce vaste domaine sans une recherche fondamentale dans tous les domaines de la physico-chimie des actinides et autres radioéléments (dans le solide, en solution et aux interfaces) et sur les effets chimiques des rayonnements ionisants, ni sans une bonne connaissance de la métrologie des radionucléides. De plus elle nécessite l'accès à des laboratoires nucléarisés et à des instrumentations et des infrastructures lourdes permettant la manipulation et l'analyse de la matière radioactive en respectant des règles de radioprotection strictes, ce qu'il faut prendre en compte.

Dans ce contexte général, où la radiochimie reste un domaine pluridisciplinaire incontournable, deux grands thèmes de recherche seront développés plus particulièrement :

- **La physico-chimie des radionucléides** concerne les études cinétique,

thermodynamique, structurale et la spéciation des radionucléides en phase solide, et en solution homogène / hétérogène. Il s'agit ici d'une part de recueillir les données de base (thermodynamique, structurale et cinétique) qui font défaut pour la modélisation des processus contrôlant le comportement de ces éléments dans un milieu donné, d'autre part de développer de nouvelles recherches sur les milieux innovants pour l'extraction/séparation et la (co)conversion de combustibles pour les systèmes du nucléaire du futur.

○ **La physico-chimie sous rayonnement** est un domaine complexe où la physique atomique, la physique de la matière condensée et la chimie se côtoient pour une approche fondamentale qui, de tout temps, a eu des retombées dans de nombreux domaines appliqués. En effet, les irradiations, qu'elles soient liées à l'activité humaine ou naturelle, ont des conséquences qu'il est important de connaître afin de mieux les utiliser ou de s'en prémunir.

La majorité des thèmes de recherche sont soutenus dans PACE (PARIS, NOMADE et GEDEPEON) ainsi que dans le Réseau Européen d'Excellence ACTINET 6. Une partie importante de ces recherches est menée en collaboration étroite avec le CEA, l'ANDRA et l'EDF, plusieurs laboratoires CNRS, européens et internationaux.

Enfin, la place prépondérante prise par l'industrie nucléaire en France, a conduit au fil des années, à une prise de conscience de l'impact de cette industrie sur l'environnement. Dans ce contexte, la mesure de la radioactivité naturelle ou artificielle dans l'environnement, est devenue une préoccupation sociétale. L'implication de l'IN2P3 dans le domaine de la **métrologie** repose essentiellement sur des démarches individuelles des laboratoires qui se sont investis ces dernières années.

## ***2. Scénarios et physique des réacteurs pour le nucléaire du futur***

Les études systèmes et scénarios ainsi que la physique des réacteurs sont fortement couplées. Les systèmes envisagés pour l'incinération des déchets ainsi que ceux faisant l'objet d'études pour une production d'énergie pérenne nécessitent à la fois l'utilisation de méthodes stochastiques de simulation neutronique afin d'évaluer les déchets produits ou incinérés, les inventaires de matière fissile produite ou les possibilités de déploiement, et des validations expérimentales de certains concepts et grandeurs neutroniques. Plusieurs systèmes dominent les études à conduire.

Les réacteurs sous-critiques (ADSR), dédiés à l'incinération des actinides mineurs, ont déjà fait l'objet de plusieurs programmes expérimentaux (FEAT, TARC, MUSE). Ils doivent se poursuivre par des programmes menés auprès de systèmes de complexité croissante (TRADE, MYRRHA), dédiés en particulier au développement des procédures de contrôle et de maîtrise de l'ensemble cœur-cible-faisceau (mesure de la réactivité, procédures de démarrage et d'arrêt,...) et à la compréhension de la neutronique des systèmes sous-critiques mais aussi critiques. Les ADSR nécessitent entre autres des calculs spécifiques d'incinération de l'américium en s'appuyant sur les projets de démonstrateur actuels (MYRRHA,...), ainsi que des études de sûreté en situation accidentelle.

Les réacteurs à gaz sont envisagés à la fois en spectre thermique, pour l'incinération du plutonium civil et militaire, et en spectre rapide (GFR) pour la production d'énergie en cycles régénérateurs U/Pu et Th/U. Les réacteurs à spectre thermique demandent à être optimisés en particulier dans la composition des combustibles, tandis que les rapides représentent un axe prioritaire de la DEN du CEA. Plusieurs caloporteurs (Na, Pb, He) sont encore à comparer sur le plan des simulations dans le domaine des RNR, notamment en ce qui concerne la sûreté et les déchets produits et la capacité d'incinération des déchets des filières futures ou actuelles ; le gaz fera néanmoins l'objet du prochain programme expérimental sur

le réacteur maquette MASURCA (CEA Cadarache) à l'horizon 2006. De nouveaux matériaux pour le combustible ainsi que pour le réflecteur y seront étudiés, ainsi que l'impact de la présence des canaux de gaz en terme de fuite de neutrons. L'IN2P3 devra prendre part à ce nouveau programme. Les études des nouveaux matériaux pourront être complétées par des mesures neutroniques sur la plateforme PEREN (LPSC).

Les réacteurs à sels fondus (RSF) permettent la régénération du combustible en cycle thorium et spectre thermique grâce au traitement en ligne du combustible liquide. Des études par simulation doivent permettre leur optimisation et simplification sur le plan du retraitement. La quantification de certains procédés de séparation chimiques sera réalisée dans le laboratoire de chimie de PEREN. Les études de sûreté de tels réacteurs restent également à réaliser par le couplage de la neutronique à la chimie ainsi qu'à la thermo-hydraulique. La réalisation d'une boucle de sels fondus à échelle réduite permettrait de tirer des enseignements en R&D utiles aux études scénarios.

De manière générale, l'étude du cycle Th/U, qui permet de maintenir les ressources naturelles de combustible contrairement à l'utilisation de l'uranium enrichi, doit être poursuivie, et les possibilités de produire l'uranium 233 nécessaire à la mise en œuvre de ce cycle grâce à la transmutation de couvertures de thorium dans des RNR U/Pu ou à l'utilisation de MOX thorié dans les réacteurs à eau légère, seront quantifiées.

Toutes ces études ont en commun l'utilisation de moyens de simulation numérique adaptés. Le développement d'un code global permettant de traiter l'évolution des combustibles est en cours et ce code devra ensuite être validé. Des outils plus spécifiquement dédiés aux études sûreté seront développés : ils permettront le calcul des coefficients de vide et de température, la prise en compte de la thermohydraulique et des effets de contre-réaction de cœurs de différents types. D'autres outils sont à l'étude pour l'analyse des sensibilités de la criticité et d'autres paramètres aux données nucléaires utilisées dans les calculs. Enfin l'évaluation de l'activation des structures d'un réacteur et la participation au démantèlement d'un certain nombre d'installations existantes permettra d'acquérir une expérience applicable à la conception de réacteurs innovants en matière de choix des matériaux, ceci afin de minimiser les volumes à traiter en fin de vie des centrales.

## **2. La physique nucléaire pour les réacteurs du futur et autres applications**

La conception des systèmes innovants pour la production d'énergie ou l'incinération des déchets nucléaires, mais aussi d'autres applications comme les sources de spallation, la caractérisation des déchets ou le contrôle de la prolifération, nécessitent des études de physique nucléaire alliant mesures fondamentales, développements théoriques et validation en vraie grandeur.

### **o Mesures neutroniques fondamentales**

Les systèmes innovants mettent en jeu, par rapport aux réacteurs actuels, des matériaux différents et un domaine en énergie beaucoup plus vaste. Il s'agit donc d'améliorer et d'étendre les données existantes, et d'en établir de nouvelles, en particulier concernant les actinides mineurs. Depuis une dizaine d'années, plusieurs équipes du DAPNIA et de l'IN2P3 effectuent des mesures de données neutroniques. Ces actions sont coordonnées par le groupement de recherche GEDEPEON et certaines font l'objet d'une vaste collaboration internationale (Europe, USA et Russie). Les besoins et leur projection dans le futur sont en grande partie déjà inscrits dans le 6<sup>ème</sup> PCRD et concernent essentiellement des mesures de capture (DAPNIA et IN2P3), de fission et (n,xn) (IN2P3). Au-delà, il est envisagé d'étudier les caractéristiques des neutrons retardés, bien connues pour les actinides majeurs, mais beaucoup moins pour les isotopes de l'américium et du curium. Ces mesures seront

complétées par une étude systématique des distributions en masses et charges des fragments de fission de ces transuraniens.

La disponibilité d'installations en Europe susceptibles de fournir des neutrons est essentielle. Pour des neutrons thermiques, l'installation mini-INCA auprès de l'ILL à Grenoble est utilisée. Pour des neutrons de plus haute énergie, divers accélérateurs, parfois très anciens, sont disponibles. En ce qui concerne les sources blanches de neutrons, le DAPNIA et l'IN2P3 sont déjà impliqués dans les installations de temps de vol GELINA en Belgique et n\_TOF au CERN. De nouvelles initiatives se développent autour de AIFIRA à Bordeaux, SPIRAL II à GANIL et de GSI à Darmstadt. La réalisation d'une machine européenne de nouvelle génération qui pourrait être l'European Spallation Source (ESS) dont la vocation pluridisciplinaire a souvent été évoquée serait très souhaitable. Les besoins pour une telle machine existent en Europe et recouvrent un spectre très large d'applications allant de la médecine à la physique fondamentale en passant par de nombreuses applications industrielles dont la neutronique pour le nucléaire (données, matériaux,...).

Un problème important concerne la disponibilité de cibles d'éléments transuraniens ou produits de fission très radioactives. Pour effectuer des mesures directes sur des éléments à vie courte il est indispensable de se doter de tous les maillons de la chaîne allant de la synthèse de l'isotope jusqu'à la mesure de sa section efficace. Dans certains cas, ces noyaux peuvent être étudiés plus facilement par réaction de transfert.

La mise en forme des données expérimentales pour leur utilisation dans les calculs de neutronique résulte d'un long travail d'évaluation. La collaboration avec les groupes spécialisés dans les évaluations (CEA/DAM à Bruyères-le-Châtel et CEA/DEN à Cadarache) doit être renforcée afin de valoriser les mesures effectuées par les expérimentateurs.

#### ○ **Spallation et systèmes hybrides (ADSR)**

En Europe, dans le cadre du 6<sup>ième</sup> PCRD, le projet IP-EUROTRANS est en train de se mettre en place. Son objectif est l'étude de faisabilité d'un prototype d'X-ADS et de ETD. Ce projet réunit l'ensemble des acteurs européens dans les domaines des combustibles, matériaux, accélérateurs et données nucléaires et vise une démonstration de certaines composantes d'un futur ADSR afin de rassembler tous les éléments permettant de décider la construction éventuelle d'un démonstrateur européen lors du 7<sup>ième</sup> PCRD.

En ce qui concerne les études liées au module de spallation, il s'agit d'évaluer et de démontrer la technologie des cibles de métal lourd liquide en termes de performances, de résistance aux dommages et de radioprotection, et d'estimer la tenue dans le temps des composants environnants comme la fenêtre ou le conteneur de la cible. Ceci nécessite, d'une part, la compréhension des mécanismes élémentaires des réactions de spallation. Des avancées importantes ont été accomplies ces dernières années grâce, en particulier, à l'approche globale développée au DAPNIA, alliant expérience, théorie et validation. Ces études doivent être poursuivies, en particulier avec des expériences de seconde génération auprès de GSI, programme SPALADIN, qui permettront de résoudre les défauts importants encore constatés sur certaines observables et d'aboutir à des modèles suffisamment fiables pour les simulations. D'autre part, des tests de matériaux dans des conditions représentatives et des validations en vraie grandeur dans des cibles de spallation comme MEGAPIE et TRADE sont indispensables, l'étape suivante étant la conception d'une cible pour un démonstrateur. Ces études demandent une collaboration entre physiciens, chimistes et ingénieurs, dont ceux d'autres départements du CNRS et d'autres directions du CEA.

Il est important de noter que les sources de spallation ont aussi beaucoup d'autres applications potentielles (caractérisation de matériaux pour l'industrie et la biologie, irradiation pour les réacteurs du futur, la fusion, l'industrie spatiale, production de faisceaux

radioactifs, ...) qui pourraient bénéficier de ces études. Des sources de spallation sont actuellement en construction aux USA (SNS) et au Japon (JPARC).

#### ○ **Photofission et autres nouvelles applications**

Les nouvelles possibilités offertes par la photofission ainsi que d'autres méthodes innovantes d'interrogation à distance, telles que la détection de neutrinos, suscitent depuis plusieurs mois un regain d'intérêt. Par exemple, la photofission peut être mise à profit pour la détection de matières nucléaires sensibles (projet européen NUMADE) ou le contrôle non destructif de blocs de déchets nucléaires (projet INPHO du DAPNIA). Ceci est réalisé en utilisant un faisceau d'électrons, créant des gammas de bremsstrahlung. En mesurant la quantité de neutrons retardés émis par un colis après le bombardement du faisceau, on pourra estimer la quantité d'actinides présents dans le colis et, éventuellement sa composition. Ceci nécessite des expériences de base, des améliorations des outils de simulation et une estimation des performances potentielles. L'approfondissement des connaissances du processus de la photofission (distributions des produits de fission ou spectres d'émission des neutrons retardés) est nécessaire pour améliorer les systèmes de détections actuels. La photofission a aussi d'autres applications comme les générateurs de neutrons et la production d'isotopes radioactifs.

L'AIEA a récemment organisé un colloque à Vienne sur les possibilités offertes par les antineutrinos pour contrôler les installations nucléaires. En effet, le spectre et le nombre moyen des antineutrinos émis (par désintégrations  $\beta^-$ ) à l'issue de la fission d'un noyau diffèrent selon l'isotope. Il y aurait là un moyen permettant, en principe, de discriminer entre un fonctionnement fortement plutonigène et un autre qui ne le serait pas. L'AIEA a fait l'inventaire des scénarios malveillants permettant la production « discrète » de plutonium dans une centrale nucléaire. À chacun correspond une signature en termes d'antineutrinos bien précise (flux, spectres énergétiques, évolution temporelle). Un détecteur efficace d'antineutrinos permettrait de repérer les situations litigieuses ou mensongères. Parmi les différents acteurs se préoccupant de cette thématique (CEA/DRT, CEA/DAM, DGA), le DAPNIA est très bien armé dans ce domaine, grâce aux méthodes éprouvées et aux outils de détection performants empruntés à la recherche fondamentale.

### **3. Conclusions**

Ces recherches se sont développées dans **la pluridisciplinarité** grâce, en partie, aux échanges et collaborations initiés dans les ateliers des GDR de PACE, dont la prolongation est indispensable. Elles ont bénéficié aussi bien de soutiens financiers de ces GDR que d'apports extérieurs représentant pour la radiochimie 30 à 70% du budget total (Europe, CEA/DEN, ANDRA, EDF, Universités...). Il est cependant souhaitable qu'à l'avenir ces activités soient soutenues par un **financement plus important du DSM/DAPNIA et de l'IN2P3 assurant leur pérennité**, car les apports financiers par contrat ne seront pas forcément reconduits dans le futur au delà de 2006 (fin loi Bataille). Dans le tableau 1, les besoins financiers des projets concernant cette thématique, ont été regroupés pour l'ensemble des laboratoires pour les 10 années à venir.

La réalisation des projets présentés dans ce document nécessite, plus encore, **une augmentation des moyens humains** si le DAPNIA et l'IN2P3 souhaitent avoir un rôle majeur dans le domaine de l'énergie nucléaire et de l'environnement. Dans le tableau, les effectifs totaux souhaités, pour cette thématique, indépendamment des mouvements de personnel comprennent aussi les effectifs nécessaires pour les expériences des radiochimistes auprès des accélérateurs (Nantes, Lyon, CIRIL). L'existence de groupes compétents dans ces disciplines doit permettre aussi d'assurer la formation de futurs ingénieurs et techniciens du nucléaire, d'étudiants en science et plus généralement l'information du grand public, besoins qui ne manqueront pas de s'accroître si l'énergie nucléaire doit connaître un renouveau.

## Volet humain

	<i>Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015</i>	<i>accélérateur, détecteur, calculateur .....</i>	<i>Etude de faisabilité, avant projet détaillé, construction...</i>				<i>Autant que possible détailler par année et par organisme ( IN2P3 et CEA )</i>	
Priorité	Nom du projet	Type de projet	Etat d'avancement	Années de début et de fin des investissements	Pays partenaires	Nombre de physiciens français participant au projet (actuels et souhaités)	Nombre de techniciens et ingénieurs français participant au projet en nombre d'hommes par an.(actuels et souhaités)	Commentaires
1 pour IN2P3, 0 pour DAPNIA	Radiochimie pour le nucléaire et l'environnement	Recherche fondamentale et appliquée	En cours	2005-2015	Commission européenne, réseau d'excellence Actinet6, OCDE, Allemagne, Belgique, Espagne, Suede, Russie	tous IN2P3: 31 chim + 31 thés-postdoc 40 chim + 40 thés-postdoc	13 it 24it	<b>Dans ces demandes sont inclus les personnels IT nécessaires auprès des accélérateurs (cyclotron Nantes, VdG Lyon, CIRIL)</b>
1 pour IN2P3, 0 pour DAPNIA	Métrologie	Recherche appliquée et valorisation	En cours pour SUBATECH, IRES, commence pour IPNL	2005-2015	Belgique, Allemagne (Contrat EUGRAM)	2 chim 5chim	28it + 3 CDD 35it + 7 thés/CDD	
1 pour IN2P3, 0 pour DAPNIA	Etudes scénarios et systèmes, physique des réacteurs	Etude de filières nucléaires	En cours	2005-2015	Europe, Forum GEN IV, Italie (TRADE), Belgique (MYRRHA)	15 phy+8 thés 26 phy + 16 thés-postdoc	<b>3 it + 1 h/a DAPNIA</b>	
1 pour IN2P3, 1 pour DAPNIA	XADS/Spallation	Recherche fondamentale et appliquée	En cours	2005-2015	Commission européenne, Suisse, Allemagne, Belgique, Italie	7 phy + 4 thés-postdoc 14 phy + 8 thés-postdoc	<b>5 it + 7.5 h/a DAPNIA sur 5 ans minimum</b>	Ces demandes incluent le projet SPALADIN qui apparait aussi en Structure Nucléaire
1 pour IN2P3, 1 pour DAPNIA	Données nucléaires	Recherche fondamentale et appliquée	En cours	2005-2015	Commission européenne, CERN, partenaires N-Tof	18 phy + 10 thés-postdoc 20 phy + 12 thés-postdoc	<b>2 it + 3h/a DAPNIA sur 5 ans minimum</b>	
0 pour IN2P3, 1 pour DAPNIA	Photofission et autres applications	Recherche fondamentale et appliquée	En cours	2005-2015		2 phy + 2 thés-postdoc 5 phy + 9 thés-postdoc	<b>10 h/an sur 5 ans minimum</b>	

## Volet financier

	<i>Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015</i>	<i>accélérateur, détecteur, calculateur.....</i>	<i>Etude de faisabilité, avant projet détaillé, construction....</i>			<i>Cette colonne sera consolidée par les directions de l'IN2P3 et du CEA</i>		<i>Cette colonne sera consolidée par les directions de l'IN2P3 et du CEA</i>	
<b>Priorité</b>	<b>Nom du projet</b>	<b>Type de projet</b>	<b>Etat d'avancement</b>	<b>Années de début et de fin des investissements</b>	<b>Coût total hors personnel (en M€)</b>	<b>Coût total en incluant le personnel (en M€)</b>	<b>Contribution IN2P3+CEA (hors personnel) en M€</b>	<b>Contribution IN2P3+CEA (en incluant le personnel) en M€</b>	<b>Autres contributions Françaises en M€ incluant contrats</b>
1 pour IN2P3, 0 pour DAPNIA	Radiochimie pour le nucléaire et l'environnement	Recherche fondamentale et appliquée	En cours	2005-2015	4		2,5		1.5 (PACE, CEE...)
1 pour IN2P3, 0 pour DAPNIA	Métronologie	Recherche appliquée et valorisation	En cours pour SUBATECH, IRES, ...	2005-2015	3		1		2 (Contrats)
1 pour IN2P3, 0 pour DAPNIA	Etudes scénarios et systèmes, physique des réacteurs	Etude de filières nucléaires	En cours	2005-2015	7 (sans CEE et autres)		2		5 (CEA/DEN, PACE, Universités)
1 pour IN2P3, 1 pour DAPNIA	XADS/S pallation	Recherche fondamentale et appliquée	En cours	2005-2015	6 pour SPALAD IN +cout MEGAPIE, TRADE		2.3		CEA/DEN
1 pour IN2P3, 1 pour DAPNIA	Données nucléaires	Recherche fondamentale et appliquée	En cours	2005-2015	2.4		0.25		CEA/DEN
0 pour IN2P3, 1 pour DAPNIA	Photofission et autres applications	Recherche fondamentale et appliquée	En cours	2005-2015	2.6		0.6		La majorité du financement provient de sources externes dont CEA (DEN, DRT, DAM)

## **XII - Interface avec les sciences de la vie**



## LES INTERFACES AVEC LES SCIENCES DE LA VIE EXECUTIVE SUMMARY

Les activités situées à la frontière entre la physique, la biologie et la médecine auront connu depuis 2000 un véritable essor au sein de l'IN2P3 et du DAPNIA. Cette période aura en effet été marquée par une forte implication des laboratoires et de leurs chercheurs pour le domaine et une structuration progressive de ses thèmes. Ainsi, les interfaces entre physique et sciences du vivant se sont:

Pour l'IN2P3:

10 laboratoires: CENBG Bordeaux, CPPM Marseille, IPN Lyon, IPN Orsay, IRES Strasbourg, LPC Caen, LPC Clermont, LPSC Grenoble, SUBATECH Nantes et Centre de Calcul Lyon.

47 chercheurs dont 22 à temps partiel (30 universitaires et 17 CNRS)

19 ITA dédiés dont 7 à temps partiel

45 thèses dont 16 sont actuellement en cours

65 publications réparties entre journaux de physique, biologie et médecine

14 brevets et 2 enveloppes SOLEAU

principales collaborations: CHU et centres anticancéreux, INSERM, SDV (CNRS), DSV (CEA), Europe et Laboratoires privés

principaux financements: universités, programme ACI, régions, IN2P3, Europe, fonds industriels

Pour le DAPNIA:

1 groupe de 6 ingénieurs (collaboration NEUROSPIN)

1 groupe de 3 physiciens (physique pour le biomédical)

5 grands thèmes sont identifiés:

**La caractérisation physique et chimique pour le vivant** (CENBG Bordeaux, IPN Orsay, IPN Lyon, LPC Clermont ): ce thème regroupe trois axes de recherche: l'étude des biomatériaux, l'étude d'expositions environnementales à l'échelle du tissu biologique et de la cellule, et la caractérisation de biomolécules pour la bactériologie, l'exobiologie et l'environnement. Il s'est développé auprès d'accélérateurs d'ions légers dont certains ont été modifiés pour l'accélération d'ions lourds poly-atomiques : Van de Graaff de 2 MV à l'IPNL, Van de Graaff de 3.5 MV au CENBG et Tandem de 15 MV à l'IPNO et fait appel à des techniques d'imagerie, d'analyse chimique élémentaire et d'irradiation locale à l'échelle du micromètre. Il évoluera prochainement vers l'échelle nanométrique grâce au programme AIFIRA (CENBG), au projet de faisceaux d'ions polyatomiques TANCREDE et nanofaisceaux d'agrégats d'or (IPNO et IPNL).

**La radiobiologie** (CENBG Bordeaux, IPN Lyon, LPC Clermont, LARIA GANIL):

Les axes de recherche principaux sont: l'étude de la dynamique intermoléculaire sous irradiation, de la production d'électrons et de radicaux libres, l'étude des lésions de l'ADN (lésions non ou mal réparées) et des instabilités génomiques radioinduites, la recherche de molécules ou nano-objets qui inhibent ou au contraire augmentent la radiosensibilité de certains sites dans l'ADN notamment, et l'étude de la sensibilité de certaines cibles intra-cellulaires et des mécanismes de signalisation cellulaire et intercellulaire après irradiation. Ces recherches sont associées aux développements théoriques (chimie quantique, physique statistique, simulations) visant notamment à la

constitution de modèles microdosimétriques. Elles s'appuient sur la mise en œuvre de différents types de rayonnements (ions, neutrons), de différents modes d'irradiations (faisceaux pulsés, micro-faisceaux), à différentes échelles dans la matière avec l'approche cellulaire (irradiation de cellules en culture ou in vivo) et l'approche moléculaire (irradiation de molécules en phase gazeuse, déposées sur un substrat ou dans un agrégats de molécules d'eau). Elles exploitent pour cela la ligne microsonde du CENBG (AIFIRA, Bordeaux), la plate-forme d'irradiation du LPC Clermont, le dispositif d'irradiation d'agrégats biologiques de l'IPN Lyon, et le pôle de recherche sur la radiobiologie avec les ions lourds du GANIL (LARIA).

**Les techniques de radiothérapie** (DAPNIA, LPC Caen, LPC Clermont, IPN Lyon, IPN Orsay): ce thème couvre la quasi-intégralité des rayonnements utilisés en radiothérapie: neutrons, protons, ions carbonés et faisceaux d'X ou photons. Plus précisément, il comprend: la neutronthérapie vectorisée (exposition de nanohybrides injectés porteurs de  $^{157}\text{Gd}$  à des faisceaux neutrons thermiques), l'hadronthérapie (avant projet ETOILE (Lyon) et ASCLEPIOS (Caen) proposant: la machine, le contrôle commande, le suivi des organes en mouvement, la planimétrie et la dosimétrie), la protonthérapie (aide scientifique et technique aux centres de traitement existants), la radiothérapie X et e- (dosimétrie et planimétrie). Dans son esprit, cette thématique se développe autour du traitement à travers le trajet de patient. En premier lieu par l'amélioration des techniques de planimétrie qui font appel aux connaissances de la physique nucléaire (sections efficaces, mesures de données biologiques et calcul). Dans un second temps, par l'amélioration ou le développement des machines de traitement (accélérateur, tête isocentrique). Et enfin par le développement des techniques de contrôle qualité associées aux différentes approches de traitement (dosimétrie des faisceaux, vérification des traitements en ligne par gprompts ou production de  $^{11}\text{C}$ ).

**L'imagerie médicale et biologique** (CPPM Marseille, DAPNIA, IPN Lyon, IPN Orsay, IRES Strasbourg, LPC Clermont, LPSC Grenoble, SUBATECH Nantes): ce thème regroupe un champ très large de l'imagerie allant du domaine microscopique (autoradiographie) au domaine macroscopique (imagerie du petit animal et per-opératoire). Il comprend: l'imagerie in vitro (développement de radioimageur pour l'autoradiographie), l'imagerie in vivo (développement de tomographe PET, SPECT et scanner X dédié au petit animal), l'imagerie multi-modale (corrélation de l'image fonctionnelle à l'image anatomique par combinaison PET/X ou SPECT/X), et enfin l'imagerie per-opératoire (conception de mini-gamma caméra exploitable en bloc opératoire). Ce thème s'inspire pour beaucoup de l'instrumentation et de l'électronique mises en œuvre initialement pour la physique subatomique, avec cependant des contraintes fortes d'adaptation liées à un contexte rendu souvent délicat que ce soit en biologie ou médecine. Il comprend enfin une grand part de valorisation.

**La bio-informatique** (CENBG Bordeaux, DAPNIA, IPN Lyon, IRES Strasbourg, LPC Clermont, LPSC Grenoble): les besoins croissants en simulation et modélisation de l'imagerie médicale et de la radiothérapie, l'explosion des données de la génomique et de la post-génomique, exposent les médecins et les biologistes à une utilisation croissante de l'informatique massive. Les laboratoires de l'IN2P3 et le DAPNIA deviennent alors les partenaires naturels des laboratoires de biologie dans leur besoin de puissance de calcul, d'espace de stockage et de stratégie d'analyse massive de données. 4 volets sont principalement abordés: la simulation Monte-Carlo pour la physique médicale et en particulier

pour l'imagerie et la dosimétrie (plate-forme de simulation GATE, projet MAESTRO), la simulation pour la radiobiologie (simulation du dispositif d'irradiation AIFIRA), la biologie in silico et plus précisément l'exploitation des grilles pour la bio-informatique (réseau européen DATAGRID (FP5) et EGEE (FP6)).

### **Les atouts**

L'IN2P3 et le DAPNIA possèdent de très sérieux atouts pour développer une interface avec la biologie et la médecine de qualité. Cela relève bien entendu de leurs compétences en instrumentation, en simulation, en électronique, et de la force de leurs services techniques qui sont autant d'éléments favorables au développement d'outils originaux et innovants pour les sciences de la vie. C'est par exemple le cas pour la caractérisation physique et chimique du vivant, la radiobiologie et la radiothérapie qui exploitent pour la plupart l'expérience des chercheurs et des ingénieurs acquise auprès des accélérateurs d'ions légers, de la connaissance précise des faisceaux et des systèmes de détection associés. La connaissance de la conduite de projets à grande échelle basé sur la mise en place d'accélérateur d'ions légers est notamment déterminante et un garant de la réussite des programmes interdisciplinaires sous-jacents. C'est aussi le cas pour l'imagerie dont la dynamique relève en partie des progrès instrumentaux de la physique subatomique et des nouveaux composants développés dans le cadre de ses grands projets. C'est enfin le cas pour la bio-informatique qui profite des outils développés pour la coordination de grands projets mais aussi des codes de calcul pour profiler la gestion médicale, les caméras ou encore la radiothérapie personnalisée de demain.

Au-delà des aspects purement techniques, l'IN2P3 et le DAPNIA détiennent de 2 autres atouts favorables pour dynamiser l'interface avec les sciences de la vie: Une méthodologie issue de la physique des hautes énergies qui permet de renseigner des questions de physique et de biologie originales soulevées par les progrès récents des sciences de la vie; l'autonomie et les ressources propres des laboratoires que l'on retrouve pour la plupart à proximité des plus grands pôles de biologie ou de médecine français.

### **La coordination**

L'interface avec les sciences de la vie s'est principalement développé sur la base de collaborations étroites et locales avec des CHU ou centres anti-cancéreux, des laboratoires sciences de la vie INSERM, CNRS ou CEA, et des laboratoires privés. Pour chaque thème décrit, des collaborations européennes ont été initiées et font l'objet aujourd'hui de programmes inscrits dans le 6<sup>ième</sup> PCRD. En revanche, la coordination nationale reste faible. La discipline est en effet encore jeune et doit se structurer progressivement à l'échelle des organismes pour permettre une meilleure lisibilité. Cette démarche est actuellement entreprise.

### **Les moyens**

Les créations des postes de chargé de mission à l'IN2P3 et au DAPNIA puis d'un directeur adjoint à l'IN2P3 ont été une étape importante pour la discipline, mais cette étape doit être soutenue par une volonté politique d'engager des moyens humains et des moyens financiers. Ceci est crucial pour que les équipes puissent conserver leur rôle leader en Europe, et amplifier leur rayonnement international. Cet engagement doit en premier lieu se traduire par des postes de chercheurs et d'ITA et des autorisations de Programmes significatives. Puis, pour pouvoir répondre à une demande de plus en plus importante au niveau des laboratoires (quasiment toutes les équipes impliquées nécessitent d'un poste de chercheur à court terme), il devient nécessaire de mettre en place des actions dédiées interdisciplinaires pour donner de plus fortes opportunités de recrutement: multiplication des sites et projets structurants, accords formalisés entre département avec dotation de postes interdisciplinaires, création de GDR avec mutualisation des moyens.

## Volet humain

	<i>Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015</i>	<i>accélérateur, détecteur, calculateur.....</i>	<i>Etude de faisabilité, avant projet détaillé, construction...</i>				<i>Autant que possible détailler par année et par organisme ( IN2P3 et CEA )</i>	
Priorité	Nom du projet	Type de projet	Etat d'avancement	Années de début et de fin des investissements	Pays partenaires	Nombre de physiciens français participant au projet (actuels et souhaités)	Nombre de techniciens et ingénieurs français participant au projet en nombre d'hommes par an (actuels et souhaités)	Commentaires
élevée	Imagerie	recherche fondamentale et appliquée (détecteurs)	avant projet détaillé pour SUBATECH demande de création d'UMR pour le groupe IPB de l'IPNO (section 30 ) en cours pour les autres laboratoires	2005-2010	6ième PCRD, réseau EUREKA, Allemagne, Pologne, Israel, Russie, USA, collaboration Crystal Clear	28 chercheurs, 10 thésards/post-docs, 12 chercheurs, 13 thésards/post-docs	29 hommes.an 20 hommes.an	ce tableau ne tient pas compte du projet Neurospin
élevée	radiobiologie et caractérisation physique et chimique pour le vivant	recherche fondamentale et appliquée (accélérateurs, spectromètres de masse)	fin partie technique projet AIFIRA: fin 2006 avant projet détaillé PAVIRMA	2005-2010	6ième PCRD, réseau COST P9, Autriche Canada, Danemark, Liban, Maroc, Pays-Bas, Russie, USA	22 chercheurs, 14 thésards/ post-docs, 4 chercheurs, 8 thésards/ post-docs	26 hommes.an 5 hommes.an	

## Volet financier

	<i>Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015</i>	<i>accélérateur, détecteur, calculateur .....</i>	<i>Etude de faisabilité, avant projet détaillé, construction....</i>			<i>Cette colonne sera consolidée par les directions de l'IN2P3 et du CEA</i>		<i>Cette colonne sera consolidée par les directions de l'IN2P3 et du CEA</i>	
<b>Priorité</b>	<b>Nom du projet</b>	<b>Type de projet</b>	<b>Etat d'avancement</b>	<b>Années de début et de fin des investissements</b>	<b>Coût total hors personnel (en M€)</b>	<b>Coût total en incluant le personnel (en M€)</b>	<b>Contribution IN2P3+ CEA (hors personnel) en M€</b>	<b>Contribution IN2P3+ CEA (en incluant le personnel) en M€</b>	<b>Autres contributions Françaises en M€</b>
élevée	Imagerie	recherche fondamentale et appliquée (détecteurs)	avant projet détaillé pour SUBATECH demande de création d'UMR pour le groupe IPB de l'IPNO (section 30 ) en cours pour les autres laboratoires	2005-2010	4,33	*	2,76	*	1,58
élevée	radiobiologie et caractérisation physique et chimique pour le vivant	recherche fondamentale et appliquée (accélérateurs, spectromètres de masse)	fin partie technique projet AIFIRA: fin 2006 avant projet détaillé PAVIRMA	2005-2010	5,7	*	1,4	*	4,04



## **XIII - Accélérateurs et grands instruments**



# 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.



## **XIV - Instrumentation et détecteurs**



# Prospective IN2P3-DAPNIA

## Instrumentation et Détecteurs

Octobre 2004

P. Bourgeois, DAPNIA, J.F. Genat, LPNHE, Laurence Lavergne, IPN Orsay, M. Winter, IReS

### 1- Introduction

L'IN2P3 et le DAPNIA imaginent, développent, construisent et qualifient les instruments requis par des programmes scientifiques particulièrement ambitieux et diversifiés. Si la réalisation des instruments mobilise un potentiel important où l'industrie joue un rôle indispensable, une forte activité de R&D est indispensable pour réaliser des avancées dans nombre de domaines. Au sein d'un contexte international très actif, ils doivent trouver les créneaux porteurs où ils pourront efficacement mettre à profit talents, compétences et moyens pour développer des prototypes d'instruments que l'industrie, par vocation, n'est pas à même, de réaliser.

A la faveur des progrès technologiques, les performances en granularité, sensibilité, dynamique, résolution, vitesse, tolérance aux radiations, intégration et transparence des détecteurs, ont progressé de plusieurs ordres de grandeur au cours des dernières années.

La photo-détection s'oriente vers des capteurs de plus en plus diversifiés, selon le domaine spectral envisagé. L'électronique sub-micronique permet d'ores et déjà d'intégrer des systèmes de lecture hautement performants au niveau des front-end: des fibres optiques rapides acheminent un flux de données compactées des détecteurs vers l'ordinateur central.

Pour les dix années à venir, on anticipe, entre autres, la poursuite de l'explosion industrielle des nanotechnologies, la maîtrise des très basses températures, la mise au point de matériaux composites aux propriétés mécaniques et électriques nouvelles.

La complexité croissante des détecteurs requiert leur simulation en termes de conception, modélisation physique ou comportementale pour les systèmes dans leur globalité. Les outils logiciels correspondants doivent être acquis et maintenus. La réalisation d'un détecteur, de son prototype de quelques voies à sa version finale constituée de millions de canaux, fait appel à la gestion de projet pluridisciplinaire où interviennent la qualification de chaque composant et sa réalisation en masse, puis celle du système, selon des spécifications établies à la conception, en étroite interaction avec les partenaires académiques, institutionnels et industriels.

En ce qui concerne les ressources humaines, le savoir-faire acquis dans les domaines traditionnels doit être sauvegardé. Le dialogue physicien - équipe technique n'a jamais été aussi nécessaire, que ce soit en électronique (e.g. l'intégration ou le couplage des front-end aux détecteurs semi-conducteurs) ou dans d'autres domaines spécialisés. L'embauche de jeunes doctorants issus de filières technologiques en physique appliquée s'avère indispensable et va de pair avec un effort particulier vers la formation des personnels dont on doit, avec le concours du CNRS et des Universités et Ecoles, l'Industrie, maintenir la technicité dans un contexte particulièrement tentaculaire.

## 2- Thématiques

Plus précisément et parmi les domaines qui font la part belle aux projets d'avenir et s'inscrivent dans une démarche prospective, mentionnons les détecteurs semi-conducteurs, gazeux et liquides, les photo- et cryo-détecteurs, ainsi que les techniques de conditionnement du signal.

Que ce soit auprès des futurs grands accélérateurs (Super LHC et Collisionneur Linéaire International), auprès d'installations de faisceaux radioactifs exotiques (SPIRAL II, EURISOL), expériences au sol ou dans l'espace, les détecteurs semi-conducteurs font l'objet de vigoureux programmes de R&D portant essentiellement sur les détecteurs silicium, germanium et CdTe. Ils devront affronter dans certains cas, des contraintes en termes de taux de rayonnement et de rapidité très sévères. Dans tous les cas, la granularité reste le maître mot : segmentation et pixellisation sont absolument nécessaires pour améliorer la résolution spatiale en trajectographie, calorimétrie, échantillonnage des taches focales. L'augmentation drastique du nombre de voies nécessite un réel développement en micro-électronique : évolution vers des systèmes sur puce où les micro-circuits de conditionnement du signal sont intégrés à même le volume sensible pour endiguer le flot de données (e.g. capteurs CMOS), intégration de fonctionnalités de plus en plus nombreuses et complexes au niveau du front-end. La modélisation des détecteurs, pour optimiser les systèmes de collection de charge en présence de densité d'ionisation importante, doit soutenir un domaine émergent : la reconnaissance de forme d'impulsion pour reconstruire les trajectoires des photons dans un détecteur germanium segmenté ou dans une matrice de CdTe, et/ou identifier des particules en masse et en charge dans un détecteur, tout en conservant une excellente résolution en énergie.

Pour les détecteurs gazeux et liquides, les micro-grilles amplificatrices de type Micromegas constituent en France la plus importante avancée. Les avantages en sont transparence, résolutions spatiale et temporelle, tolérance aux radiations, fonctionnement sous hauts flux et faible coût. Elles sont utilisées en trajectographie, détection de neutrons, neutrinos, détection du photo-électron unique. Mentionnons également un projet de TPC lu par des damiers sub-millimétriques pour l'ILC. Des structures à amplification multi-grilles sont mises en œuvre pour l'imagerie X et b. Elles sont associées d'une part aux bolomètres à hélium superfluide pour détecter la matière noire, d'autre part au xénon liquide pour la tomographie à émission de positons.

En photo-détection, des développements majeurs voient le jour et doivent conduire à des avancées en calorimétrie pour les détecteurs de particules, en cosmologie observationnelle depuis l'infra-rouge lointain jusqu'aux X, en détection des neutrinos, en mesure des gerbes cosmiques de très haute énergie ainsi qu'en imagerie médicale in vivo. Elles concernent entre autres les photomultiplicateurs de grande surface et segmentés, les photo-diodes à avalanches, les photo-multiplicateurs sur Silicium, les dispositifs hybrides à haute tension de type EBCMOS, les détecteurs infra-rouges proche et lointain, X et g. La segmentation et l'intégration d'électroniques spécifiques éventuellement refroidies vont de pair avec ces développements. A la frontière de la photo-détection les antennes radio-électriques font l'objet d'un R&D spécifique dans le domaine décimétrique pour l'observation des grandes gerbes cosmiques.

Les cryo-détecteurs à l'échelle de la fraction de Kelvin, mesurent la variation de température induite par l'interaction d'un rayonnement ou d'une particule dans un absorbeur. Ces détecteurs tirent profit de la faible capacité calorifique des matériaux aux basses températures entre 10 et 300 mK. Leur domaine d'utilisation comprend aussi bien le rayonnement infra-rouge lointain ainsi que les X avec une très bonne résolution spectrale, et la matière noire : détection directe de WIMPS avec des détecteurs massifs en germanium. Ils sont également exploités en spectrométrie de masse pour l'analyse des protéines. Dans l'infra-rouge aux fréquences du Terahertz, on peut convertir directement l'onde électromagnétique et la mesurer thermiquement avec un bolomètre. Des prototypes de microcalorimètres ont démontré de bonnes performances en laboratoire pour deux filières de senseurs thermométriques: les semi-conducteurs fortement dopés (germanium NTD, silicium implanté et diffusé) qui couvrent un grand domaine d'énergie compatible avec la bande passante des télescopes X des missions de nouvelle génération, et les senseurs à transition supraconductrice particulièrement adaptés aux forts taux de comptage. Ces filières réalisent des capteurs rapides faisant gagner un ordre de grandeur comparés aux capteurs à couplage de charge utilisés jusqu'à présent. La segmentation (jusqu'à mille pixels envisagés par exemple pour l'astronomie X) est également à l'ordre du jour. Les champs de prospective semblent donc vastes et diversifiés dans ce domaine d'instrumentation.

L'intégration de systèmes électroniques au plus près des détecteurs est imposée par la segmentation, la vitesse, et la dynamique toujours croissantes des détecteurs, sous la forme de circuits mixtes analogiques-numériques de faible encombrement, à très faible consommation, et souvent tolérants aux radiations. Les données seront souvent stockées localement dans des mémoires, elles aussi fortement intégrées. L'électronique purement numérique s'intégrera dans des composants programmables, configurables dynamiquement. Des technologies nouvelles apparaissent, telles que les processus CMOS de dimensions sensiblement inférieures au micron, le silicium-germanium, l'intégration des squids pour la lecture des bolomètres. Elles impliquent un surcroît de complexité des circuits analogiques. On peut prévoir des évolutions à court terme en matière de conception de systèmes, synthèses d'architecture et l'utilisation de blocs virtuels développés par l'industrie, réalisant des fonctions analogiques et logiques qui devront faire l'objet d'achats concertés, compte tenu de leurs coûts élevés. L'ampleur croissante des projets, particulièrement en microélectronique, conduit de plus en plus à des conceptions multi-laboratoires qu'il faudra coordonner nécessitant des méthodologies d'échanges inter-laboratoires comparables à la logistique développée pour la technologie CMOS AMS 0.35  $\mu\text{m}$ .

### **3- Moyens**

Toutes ces activités mobilisent des moyens humains et financiers de taille assez variable selon la problématique envisagée. Rappelons les développements électroniques impliqués par les détecteurs semi-conducteurs et l'évolution des technologies fortement sub-microniques, qui requièrent de gros moyens en logiciels de conception, et qui nécessitent la négociation d'importants contrats par les Instituts. De même, le développement des capteurs à pixels et des détecteurs CdTe requiert des compétences techniques spécifiques associées à des moyens financiers particulièrement lourds, et à certaines techniques industrielles. Parallèlement, les moyens humains dans ces domaines posent un problème de compétence souvent résolu par l'accueil des jeunes doctorants, de plus en plus difficile à embaucher par la suite. De plus, la

quasi-disparition du technicien de laboratoire ne facilite pas la mise au point de nouveaux instruments, et certains domaines telles que la cryogénie et le comportement des matériaux à très basse température ou la spatialisation, demandent d'acquérir de nouvelles compétences pour réaliser les détecteurs.

L'indispensable coopération avec l'industrie est souvent féconde, mais parfois délicate du fait des spécificités des développements et des faibles quantités demandées. Les Instituts disposent d'un fort potentiel d'innovation, de conception et d'évaluation des performances qui doit profiter aussi bien aux entreprises partenaires qu'aux expériences.

De façon générale, il serait souhaitable de disposer de plus de souplesse quant à la gestion des budgets des laboratoires : gel en début d'année, segmentation des versements, dépenses non reportables d'une année sur l'autre.

Le tableau suivant reflète certaines des demandes les plus importantes :

	<b>Budget</b>	<b>Personnel</b>	<b>Durée</b>
<b>Détecteur Silicium</b>	<b>500 K€ / 10 m<sup>2</sup></b>	<b>20h</b>	<b>10ans</b>
<b>Pixels hybrides</b>	<b>600 k€</b>	<b>3h</b>	<b>3ans</b>
<b>Développements CdTe</b>	<b>600 k€</b>	<b>6h</b>	<b>4ans</b>
<b>Pixels MAPS</b>	<b>1 M€</b>	<b>13h</b>	<b>10ans</b>
<b>Germanium</b>	<b>2.5 M€</b>	<b>4h</b>	<b>5ans</b>
<b>Photométrie</b>	<b>200 k€</b>	<b>4h</b>	<b>4ans</b>
<b>Lecture CCDs</b>	<b>120 k€</b>	<b>10h</b>	<b>3ans</b>
<b>Grilles Micromegas</b>	<b>200 k€</b>	<b>3h</b>	<b>4ans</b>

#### **4- Conclusion**

Comme dans toute aventure technique d'envergure, les compétences doivent être tenues à niveau : les métiers évoluent, et les personnels sont appelés à approfondir leurs connaissances par la formation, et diversifier leurs activités. Il faut en particulier apprendre à gérer la sous-traitance tout en conservant les savoir-faire et la maîtrise d'œuvre. Les ressources humaines et matérielles devront être mutualisées autant que possible pour pallier à la baisse en personnels et à la diminution des budgets de soutien. Un grand nombre de compétences actuelles et même anciennes doivent être maintenues sous peine de perdre, paradoxalement, la capacité concrète d'innover.

Afin de fournir des systèmes de détection opérationnels, on est aujourd'hui amené à quantifier la fiabilité et mettre en place l'assurance qualité. Techniques et outils doivent être harmonisés dans les laboratoires, et tous les personnels sensibilisés à la gestion de projet.

Les liens avec l'industrie doivent être renforcés, non seulement au niveau de la prestation de service pour les réalisations en sous-traitance, mais surtout pour la R&D menée conjointement (GIS, brevets et licences). Les partenariats doivent donc être recherchés, et les retours d'expérience, indispensable à la validation des réalisations, ne doivent pas être négligés.

Le contexte international est un puissant stimulant pour ces perspectives. Les projets évoqués ci-dessus et dans les documents plus détaillés, sont élaborés pour partie dans nos Instituts. Parmi les développements effectués dans des laboratoires étrangers avec participation française, mentionnons le diamant CVD, le silicium amorphe, poly-cristallin, les semi-conducteurs à basse température, le silicium-germanium électronique, l'électronique CMOS fortement sub-micronique, les couches minces supraconductrices. Pour le futur plus lointain, citons les nano-tubes de carbone pour la réalisation de sources ponctuelles, de supports mécaniques rigides et transparents, d'électronique rapide et compacte, l'exploitation des cristaux métalliques, des matériaux composites aux propriétés mécaniques et électriques nouvelles. Si dans l'ensemble, les R&D s'inscrivent dans les projets d'expériences, des progrès instrumentaux doivent aussi pouvoir s'appuyer sur des problématiques plus génériques (R&D amont).



## **XV - Enseignement et formations**



## Formation et communication: bilan et propositions

Les annexes associées à ce tableau seront jointes au document final fourni à l'issue des journées de la Colle sur Loup.

thème	Etat des lieux	Recommandations
Enseignements à l'Université	<b>Nouveaux masters:</b> liste des masters dans lesquels des laboratoires DAPNIA et/ou IN2P3 sont impliqués (Annexe 1) Liste des <b>cours</b> préparés dans le cadre du Réseau Universitaire des Centres d'Autoformation (« <b>Ruca</b> ») disponibles (Annexe 2).	Mise sur le <b>site web de l'IN2P3</b> d'une information centralisée, <b>mise à jour</b> , pour les étudiants, d'une part, et, d'autre part, les enseignants. Doivent être accessibles : <ul style="list-style-type: none"> <li>- les formations spécifiques dans les universités qui relèvent de nos disciplines et des techniques associées.</li> <li>- les propositions de stages à tous niveaux</li> <li>- les propositions de sujets de thèses</li> <li>- les contenus de cours (en particulier ceux réalisés sous la houlette du GREPS).</li> <li>- des propositions d'expériences de cours pour les enseignants</li> </ul> <p>→ <b>Une personne devrait se consacrer prioritairement à la mise en forme et au suivi de ce site</b></p>
Doctorants	<b>Evolution</b> du nombre de doctorants sur plusieurs années (Annexe 3) <b>Diversification de la formation</b> durant la thèse (illustration par l'exemple de l'expérience de Lyon : description en Annexe 4)	<b>Informations à rendre accessible</b> (site web ci-dessus) : <ul style="list-style-type: none"> <li>- sujets de thèses en cours, soutenances et manuscrits</li> <li>- annonces de postes/bourses post-doctoraux + ATER</li> <li>- journées consacrées aux thésards</li> <li>- cours des Ecoles Doctorales</li> <li>- devenir des doctorants</li> </ul> <p><b>Développer des activités d'ouverture professionnelle y compris sur le monde des entreprises</b> <b>Tisser des liens avec les Ecoles Doctorales européennes</b></p>
Janus	Impact excellent de ces stages Suppression cette année	<b>Rétablissement partout des financements associés</b> Organisation d'écoles autour des stages Généralisation (CPGE)

Harmonisation des programmes au niveau L	<b>Initiative</b> de la MSTP-DS2 et de la <b>SFP</b> (extrait en Annexe 5) : à exploiter lors de réajustements ultérieurs des programmes. Prise en compte effective et officielle des heures de cours données ailleurs que dans son Université	<b>Essayer nos disciplines à ce niveau</b> Pas de solution miracle mais ajout de solutions partielles: <ul style="list-style-type: none"> <li>- création d'équipes (GAM)</li> <li>- échanges entre universités à condition que: <ul style="list-style-type: none"> <li>_ accord avec présidents</li> <li>_ réalisation d'échanges de disciplines</li> </ul> </li> <li>- difficulté d'aboutir à une solution universelle</li> </ul>
Enseigner autrement	<b>Rôle positif des stages en labo</b> Rôle limité des conférences pour étudiants Rôle spécifique des TP dans nos disciplines	<b>Développer les stages en labo</b> (obligatoires en M1 ; 4 semaines) : investissement à long terme. Proposer des expériences de cours ou des films, détaillés, mis sur le web, illustrant notre discipline
Chercheurs enseignants	<b>Echanges de volumes horaires d'enseignement enseignants % chercheurs</b> : appréciés, en nombre croissant mais limités Concernent des volumes de 40 h en moyenne.	<b>Nécessité d'instaurer un cadre bien défini, officiel et homogène</b> , jusqu'en M1 inclus. Encourager ces échanges sans les imposer Nécessité de décompter les enseignements donnés par les chercheurs pour les déduire des charges des enseignants Voir la contribution des chercheurs comme un apport complémentaire, et non pas comme un «moyen» d'économiser de nouveaux postes d'enseignant - chercheurs. <b>Augmentation du nombre de délégations et introduire plus de souplesse dans la mise en application des décharges</b>
Interdisciplinarité	Méconnaissance entre enseignants du même site Expériences positives des rencontres intra-ED	Proposition de séminaires larges et co-organisés, rencontres inter-labos de sites → collaborations interdisciplinaires favorisées Gazette universitaire <b>Participation plus forte aux instances</b>
Scolaires	<b>Conférences Népal</b> dans les lycées: très apprécié Aide aux TIPE : site web détaillé Expérience de Lyon (voir ci-dessus)	Népal: <ul style="list-style-type: none"> <li>- ouverture sur d'autres niveaux (cf GRES à Caen) ?</li> <li>- bilan complet détaillé pour favoriser son essor + contacts</li> <li>- nécessité de signer des conventions</li> </ul>
Enseignants	<b>E2PHY</b> : initié par le GREPS, franc succès (300 participants)	- A poursuivre et à soutenir - Cours aux enseignants de CPGE, dans le cadre des TIPE
Journalisme		Comment participer à leur formation? (cours / séminaires dans les écoles de journalisme,...)
Grand public	Bars des sciences, Science en fête	Revue « Elementaire »

**XVI - Recherches interdisciplinaires auprès des accélérateurs et sources d'ions.**



## Recherches interdisciplinaires auprès des accélérateurs et sources d'ions.

*Coordonnateur : Serge Bouffard (CIRIL)*

*Contributeurs : M. Chabot (IPNO), M. Chevallier (IPNL), D. Dauvergne (IPNL),  
S. Della Negra (IPNO), M. Fallavier (IPNL), F. Garrido (CSNSM), D. Jacquet (IPNO),  
C. Ray (IPNL), L. Thomé (CSNSM)*

Les recherches interdisciplinaires auprès des accélérateurs et des sources d'ions couvrent tous les domaines de recherche de la collision élémentaire à la compréhension des modifications structurales des matériaux irradiés, quelle que soit leur nature, et aux applications de ces modifications.

Ces activités sont développées auprès des sources d'ions (sources ECR du GANIL et sources LMIS et ECR dédiées aux ions poly-atomiques de l'IPNO) et auprès des accélérateurs (les différentes sorties du GANIL, les accélérateurs tandem de l'IPNO et du CSNSM, et les accélérateurs Van de Graaff de Lyon et du CENBG) dont certains ont été modifiés pour l'accélération d'agrégats (tandem 15 MV de l'IPNO, Van de Graaff 2.5 MV de l'IPNL et ARAMIS au CSNSM). A côté de ces machines de l'IN2P3, il en existe d'autres largement utilisées par la communauté : sources ECR du LCAM, du LASIM et du GPS, accélérateurs du CERI à Orléans, le Van de Graaff électrons du LSI, le GSI en Allemagne pour ne citer que quelques exemples.

Le tableau ci-dessous résume l'ensemble de cette activité<sup>9</sup> :

			Implication IN2P3
<b>Processus de collision</b>			
Atomes	Sections efficaces d'ionisation et excitation	Etude des processus d'excitations multiples lors d'une collision unique.	
Molécules	Sections efficaces Fragmentation moléculaire	Etude des processus d'excitations multiples lors d'une collision unique pour une cible complexe et des voies de relaxation des molécules excitées.	Oui
Solides	Transport des excitations en phase solide	Etude des excitations multiples au sein des solides (ou des surfaces) et des effets du champ de sillage.	Oui
	Processus de collisions en canalisation	Etude des collisions en phase solide dans des conditions permettant de maîtriser le paramètre d'impact.	Oui
<b>Transferts d'énergie dans les solides</b>			
Agrégats	Agrégats froids multi-ionisés	Etude de la limite de stabilité des agrégats multichargés Etude des voies de désexcitation des agrégats (fission – évaporation). Informations de base sur la stabilité des solides	
Emission d'électrons	Collision ion – cibles minces Collision agrégat – cibles minces	Informations sur les ionisations et le transport des électrons en phase solide et sur l'état de la matière lors de l'émission des électrons.	Oui
Pulvérisation	Emission d'atomes, d'ions et d'agrégats	Informations sur les mécanismes de mise en mouvement des atomes après excitation de la matière.	Oui

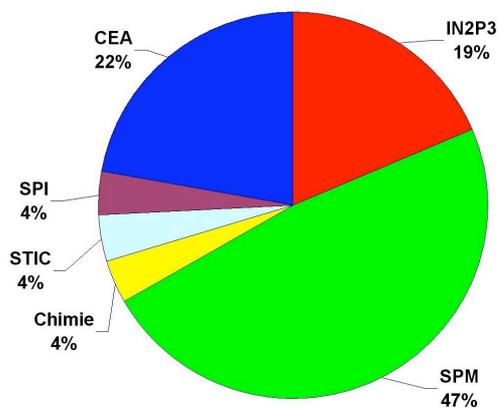
<sup>9</sup> Dans ce rapport, le mot matière est utilisé pour décrire les objets d'étude c'est à dire les atomes, les molécules, les agrégats et les matériaux.

	Pulvérisation en condition de canalisation	Etude des mécanismes d'éjection d'ions lors de collisions à paramètre d'impact connu.	Oui
<b>Mécanismes d'endommagement des matériaux et modifications structurales induites</b>			
Collisions élastiques	Interaction ions et agrégats accélérés – matière	Nano-structuration des surfaces en fonction de la densité du dépôt d'énergie dans le volume d'impact.	Oui
Excitation électronique intense	Interaction ion – matière	Dynamique des matériaux sous irradiation en fonction de l'excitation et des propriétés physico-chimiques des matériaux.	Oui
	Interaction agrégats accélérés – matière	Stabilité des matériaux sous excitation extrême.	Oui
Chimie sous rayonnement	Chimie radicalaire	Etude de la chimie radicalaire et des produits formés pour des excitations électroniques (effet du TEL).	
<b>Simulation de l'interaction des particules avec les matériaux</b>			
Matériaux du nucléaire	Modélisation multi-échelle	Construction d'un ensemble de simulation permettant de prédire le comportement des matériaux de l'événement initial aux évolutions des propriétés mécaniques.	
Matériaux sous excitation électronique	Dynamique moléculaire ab-initio	Prendre en compte les excitations électroniques dans la dynamique des atomes.	
<b>Simulation expérimentale du vieillissement des matériaux sous irradiation</b>			
Matériaux du nucléaire	Données de base pour le choix et la prévision du comportement des matériaux du nucléaire	Stabilité des matériaux (métaux, céramiques, polymères...), diffusion sous irradiation, lixiviation sous irradiation	Oui
Matériaux pour l'espace		Test de composants embarqués	Oui
Radiobiologie	Effets des forts TEL sur les matériaux du vivant	Réponse des composants du vivant (in vitro et in vivo), bases, ADN, protéines, cellules, petit animal	Oui
<b>Utilisation des modifications induites</b>			
Sondes de la matière	Influence des défauts sur les propriétés physico-chimiques des solides	Piégeage des vortex, des parois de Bloch par les défauts.	
	Ions radioactifs	Emission gamma comme sonde de la matière	
	Agrégats accélérés	Analyse de surface par spectrométrie de masse des ions émis	Oui
	Analyse par faisceau d'ions	Mesure de compositions, de répartition en profondeur, de taux de désordre...	Oui
Nano-structuration	Traces d'ions lourds rapides	Production de nano-objets directement par endommagement ou par révélation des traces et remplissage des pores	
	Démixtion, diffusion, ségrégation	Création d'alliages hors d'équilibre aux propriétés remarquables	
Radiothérapie	Hadronthérapie (simulations et expérimentation)	Pic de Bragg, fragmentation, hadron-PET, dosimétrie	Oui

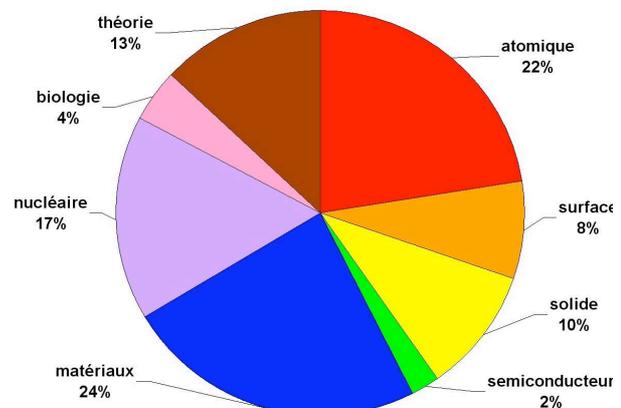
Cette apparente disparité recouvre en réalité une cohérence très forte qui ne laisse dans l'ombre aucun aspect de l'interaction des particules avec la matière. Les finalités appliquées

(nucléaire, structuration des matériaux, biologie ou espace) bénéficient directement de ces recherches fondamentales sur les processus de collisions et de relaxation de la matière excitée. Cette communauté est structurée d'une part par l'utilisation des mêmes machines, et d'autre part, par la continuité thématique entre les différents niveaux d'étude de l'interaction des particules avec la matière et des effets induits. Cette approche multi-échelles des phénomènes est une des forces de cette communauté : les différents niveaux d'études s'interfécondent. Ainsi, par exemple, les études sur l'émission électronique permettent de valider les simulations des distributions spatio-temporelles des ionisations dans un matériau qui permettent de comprendre les effets spécifiques des irradiations par des ions rapides de la matière biologique. De plus, si la finalité de beaucoup de ces travaux porte sur la compréhension de phénomènes complexes, multi-paramétriques et souvent non-linéaires, ces recherches sont en contact très étroit avec une communauté bien plus large, utilisatrice ou potentiellement utilisatrice des effets induits par l'interaction des particules avec la matière. Même si la tentation existe de regrouper en une même structure les différents acteurs de l'interaction particule – matière, leur insertion au sein de ces différentes communautés nous semblent essentielles pour la qualité de leurs contributions à ces recherches.

Une analyse rapide et certainement non exhaustive de la communauté permet de donner un ordre de grandeur de son importance (~170 chercheurs de 24 laboratoires) et sa répartition entre les grandes thématiques : les chercheurs en physique des collisions représentent de l'ordre de 30% des effectifs, 35% pour l'étude des matériaux sous irradiation (50% si on inclut les matériaux du nucléaire). Un cinquième des laboratoires est rattaché à l'IN2P3 et la moitié à SPM, le CEA représente un peu moins du quart des laboratoires pour cette recherche fondamentale. La distribution du rattachement des chercheurs est légèrement différente. Certains groupes de l'IN2P3 sont déjà présentés dans d'autres thèmes de ces prospectives dans les chapitres « *Physique et Chimie pour le nucléaire et l'environnement* » et « *interfaces-sciences de la vie* ». Les figures ci-dessous résument ces répartitions et l'ensemble des données est reporté dans le tableau de l'annexe II.



*Rattachement des laboratoires dont une partie de l'activité porte sur les recherches interdisciplinaires*



*Répartition des effectifs sur les différentes thématiques des recherches interdisciplinaires.*

Si l'insertion des recherches « interaction particules – matière » dans la communauté utilisatrice des effets induits est naturelle, souhaitable et ne pose aucun problème, leur fédération autour des différents niveaux d'études de l'interaction des particules avec la matière n'est pas, pour différentes raisons, aussi étroite qu'elle devrait être. Une des raisons est l'appartenance de ces chercheurs à de nombreux laboratoires gérés par différents départements du CNRS et du CEA. La faiblesse de cette communauté réside donc dans la taille réduite des différents groupes et un trop faible nombre de collaborations. Son évaluation, lorsqu'elle existe, est également faite au sein de plusieurs sections du comité national : 3, 4, 5, 6, 13 et 15. Par ailleurs, l'accès à certains faisceaux, notamment ceux de haute énergie, est mal adapté aux besoins spécifiques de cette communauté (de courtes

périodes plusieurs fois par an) ; ceci est également une des difficultés limitant le développement de cette science.

### ***Propositions***

En raison de la faible structuration de cette communauté, il était difficile de faire émerger dans les temps impartis des projets à long terme<sup>10</sup> ambitieux, aussi nous a-t-il paru plus important de profiter de ces perspectives pour faire émerger une réflexion sur une nécessaire organisation qui s'adresserait à l'ensemble de la communauté des recherches interdisciplinaires auprès des accélérateurs et des sources d'ions, quel que soit l'organisme ou le département de rattachement. Quelques axes de réflexion sont néanmoins indiqués dans une deuxième partie.

### **Organisation de la communauté**

La communauté étudiant l'interaction des particules avec la matière et les effets induits a de multiples occasions de se rencontrer lors de conférences internationales (REI, ICACS, IBMM, SHIM, IRAP...) ou lors de réunions de GDR ou de CPR dédiés à l'étude des matériaux du nucléaire (GDR NOMADE, GEDEPEON, CPR ISMIR, SMIRN...). Ces rencontres jouent un rôle important pour la diffusion des résultats et le renforcement des liens applications - recherches, mais n'ont pas l'effet structurant dont cette communauté a besoin. Il en résulte une visibilité qui n'est pas à la hauteur de l'importance de cette communauté, une difficulté pour les différents groupes à monter des projets importants et un certain repliement sur un petit noyau de partenaires. Aussi, pour sortir de cette situation, nous proposons de créer dès 2005 une structure dont les objectifs seront de renforcer la cohésion de cette communauté d'une part, et de définir des stratégies ambitieuses sur quelques axes de recherche d'autre part. Cette organisation améliorera la visibilité de ces recherches vis à vis de ses instances de tutelle et des communautés connexes qui soit lui donnent accès à leurs faisceaux soit devraient être des utilisateurs potentiels de la science des irradiations. Cette structure sera axée sur les approches fondamentales mais devra rester à l'écoute des besoins exprimés par la recherche appliquée ou par le monde industriel, ceux-ci pourront être pris en considération par cette structure s'il en découle d'intéressantes études fondamentales.

Une des ces priorités sera de participer à la réflexion sur les outils de cette recherche : définition des faisceaux (type de projectile, énergie, taille, structure temporelle...) et de l'instrumentation en ligne ou hors ligne nécessaires à l'obtention de résultats novateurs, réflexion en amont sur les opportunités fournies par les nouveaux faisceaux (FAIR à GSI, SPIRAL II à GANIL...), et implication dans les collaborations internationales correspondantes.

Cette structure pourrait démarrer sous forme d'un GDR « recherche fondamentale en interaction particule – matière » sous la tutelle des départements IN2P3, SPM et Chimie du CNRS et du CEA/DSM. Ce GDR couvrira toutes les domaines de recherche décrits ci-dessus et sera un outil pour définir les grands axes de recherche du futur.

### **Axes de recherche à approfondir**

La description de ces axes de recherche n'est bien sûr qu'indicatif, le premier objectif du GDR « recherche fondamentale en interaction particule – matière » sera de se structurer afin de conduire une réflexion pour faire émerger les sujets les plus prometteurs et répondant à des attentes des applications des faisceaux de particules. Les groupes de l'IN2P3 sont fortement

---

10 La notion de long terme typiquement 5-6 ans est en rapport avec des investissements de moindre ampleur que pour la physique des particules et nucléaire.

impliqués dans les points 1,2 et 4. Dans l'annexe I sont regroupés les projets détaillés des équipes de l'IN2P3 **autres que ceux rentrant dans les rubriques « Physique et Chimie pour le nucléaire et l'environnement » et « interfaces-sciences de la vie ».**

### ***Etude des processus élémentaires des collisions***

Objectifs : description des processus intervenants lors de la collision entre un ion et un atome, une molécule ou un agrégat en phase gazeuse. Les différents domaines d'énergie à privilégier pour ces études sont certainement les très basses énergies avec des ions multi-chargés où les processus de captures multiples dominant, et les énergies intermédiaires où les processus de capture et d'excitation sont en compétition.

Moyens expérimentaux à mettre en œuvre : à basse énergie, des dispositifs de détection adaptés aux ions de très basse énergie (extraction pulsée...) et aux molécules et agrégats plus complexes (dispositif COLTRIM adapté aux multi-coïncidences...) des sources fournissant des ions très chargés à basse énergie (source EBIT, implication dans le projet de GSI...), à moyenne énergie, dispositifs permettant de faire des collisions ion – ion.

### ***Stabilité d'un ensemble d'atomes soumis à une excitation***

Objectifs : étude des voies de fragmentation et des mécanismes de transfert d'énergie et d'excitation dans des molécules et des agrégats d'atomes et de molécules. Description des premiers instants de la relaxation de la matière : impulsion aux atomes, répartition des ionisations, effets des multi-ionisations sur les voies de fragmentation...

Moyens expérimentaux à mettre en œuvre : production des cibles gazeuses triés en masse, utilisation de détecteurs rapides multi-impacts, détections des neutres...

### ***Stabilité de la matière sous excitation intense***

Objectifs : étude des voies de relaxation d'un matériau soumis à une irradiation.

### **Phase de mise en mouvement des atomes**

Description de l'état de la matière juste après l'interaction (état d'excitation, distribution des impulsions des atomes...) à partir d'observables sur les particules éjectées lors de l'impact du projectile et sur le projectile lui-même: états de charge et relaxations atomiques, distributions angulaire et d'impulsion des électrons, des ions, des neutres et des agrégats.

Moyens expérimentaux à mettre en œuvre : chambres ultra-vides dotées de dispositifs de préparation des échantillons et de détecteurs multi-impacts à localisation, post-ionisation des neutres et technique originale permettant de maîtriser les paramètres d'impact des ions (pulvérisation en condition de canalisation), utilisation des faisceaux polyatomiques de l'EV au MeV...

### **Phase de relaxation de la matière**

Défauts hors d'équilibre, physico-chimie

Moyens expérimentaux à mettre en œuvre : spectroscopie optique résolue en temps (ns) pour les défauts hors d'équilibre, ( $\mu$ s-ms) pour la phase physico-chimique, faisceaux pulsés intenses...

### **Description fine des modifications structurales**

Etudes des différents niveaux de désordre (défauts ponctuels, amas de défauts, changement de phase, transition ordre-désordre...

Moyens expérimentaux et humains à mettre en œuvre : accès à un grand nombre de techniques de caractérisation, instrumentation en ligne (diffraction de rayons X, spectroscopie optique UV-visible, infrarouge, Raman, microscopie électronique et à champ proche, spectromètre RPE...). Elargir les compétences matériaux disponibles dans les laboratoires.

### **Modélisations**

Objectifs : décrire théoriquement les phases de transfert d'énergie et de relaxation de la matière afin de prévoir des lois de comportement pour les différentes classes de matériaux.

Moyens théoriques à mettre en œuvre : dynamique moléculaire (potentiel interatomique empirique et excitation électronique phénoménologique), dynamique moléculaire ab-initio pour la description des mécanismes d'endommagement par excitation électronique. Chimie radicalaire dans un modèle de cinétique hétérogène. Modèles orientés thermodynamiques et hydrodynamiques. Prise en compte des différents niveaux de complexité des matériaux (cristaux, interfaces et surfaces, inhomogénéités, impuretés...)

### **Effets induits sur les propriétés des matériaux**

Objectifs : décrire les effets de la présence des différents niveaux de désordre sur les propriétés physico-chimiques et biologiques des matériaux. Ces études permettent d'une part de prévoir le comportement de matériaux soumis à des irradiations (nucléaire, espace, accélérateurs, réacteur de fusion...) et d'autre part de comprendre par l'introduction de défauts de manière contrôlée les propriétés des matériaux (mobilité de paroi de Bloch, de vortex, effet du désordre sur la réactivité des matériaux, sur les propriétés de transport...). Les recherches sur les phases physico-chimiques suivant l'impact d'une particule avec les milieux biologiques font partie de ce chapitre.

Moyens expérimentaux et humains à mettre en œuvre : l'étude de l'influence des défauts sur les propriétés physico-chimiques demande l'utilisation d'une instrumentation en ligne souvent couplée à un système cryogénique. Le maintien des équipements existants et le développement de nouveaux sont essentiels. Le couplage de cette activité avec la communauté de physique des solides et des sciences des matériaux est bien évidemment essentielle.

### **Conclusion**

La réflexion initiée par l'IN2P3 et DSM est une chance que la communauté des recherches interdisciplinaires doit absolument saisir pour se construire un avenir plus ambitieux.

## **XVII – QCD sur réseau**



# BESOINS ET COÛTS RELATIFS À QCD SUR RÉSEAU

(Journées de Prospective DAPNIA/IN2P3 pour les années 2004-2014)

## Groupe de Travail

D. Beciveric(LPT), Ph. Boucaud(LPT), I. Campbell(LdV), J. Carbonell(LPSC), F. Gélis(SPhT), L. Giusti(CPT), E. Iancu(SPhT), S. Kox(LPSC), L. Lellouch(CPT), J.-P. Leroy(LPT), O. Pène(LPT), C. Roiesnel (CPhT), P. Roudeau(LAL), M. Soyeur(DAPNIA), A. Stocchi(LAL)

La-Colle-sur-Loup, Octobre 2004

### Abstract

La poursuite d'une activité de tout premier plan en Chromodynamique Quantique sur réseau requiert un ordinateur dont la puissance soutenue dépasse le teraflop. Les motivations scientifiques de cette activité, son impact sur notre compréhension des interactions fondamentales et le contexte international sont brièvement exposés. Nous estimons les besoins en moyens de calcul de la communauté française à 1.5 Tflops soutenus. A court terme, dans la suite logique d'efforts communs pour le développement de l'ordinateur européen apeNEXT et d'une collaboration scientifique de longue date, nous demandons l'installation d'un apeNEXT français de 3 Tflops à l'université de Rome I, en synergie avec le parc italien d'apeNEXT.

November 26, 2004

**Keywords:** QCD sur réseau, LQCD, apeNEXT, centre européen

## 1. Introduction

Le rôle du calcul et de la simulation numériques dans l'activité scientifique ne cessent de croître. Ils apparaissent de plus en plus comme de nouveaux instruments de recherche, permettant de vérifier quantité d'idées théoriques et de modèles, d'interpréter des données, voire de montrer l'inutilité d'expériences coûteuses.

Cette évolution implique des puissances de calcul de plus en plus élevées et des logiciels adaptés. Nous sommes entrés dans l'ère des calculs multi-teraflops et rien ne laisse prévoir un ralentissement de cette tendance.

Le projet présenté ici est issu des besoins de la chromodynamique quantique sur réseau (LQCD). La communauté de LQCD se caractérise par le fait qu'elle est organisée de façon forte et internationale depuis les origines (environ 1980), qu'elle a des besoins en moyens de calcul exceptionnellement importants et bien définis, sur une problématique scientifique parfaitement établie. Elle a de longue date investi ses forces dans l'informatique pour adapter les moyens de calcul à ses besoins, allant jusqu'à construire de toutes pièces des ordinateurs optimisés, dont l'apeNEXT, produit d'une collaboration italo-germano-française.

Nous allons résumer ici le programme scientifique de QCD sur réseau et quantifier les besoins minimums requis pour poursuivre cette activité en France. Nous décrirons ensuite la situation dans le monde, la communauté de QCD sur réseau en France, puis nous comparerons les performances d'un apeNEXT et des clusters de PC's. Enfin, nous indiquerons dans les grandes lignes le contenu de ce projet: la création d'un centre européen et, à court terme, **l'installation d'un apeNEXT français à Rome.**

## 2. Les motivations scientifiques des ordinateurs multi-teraflops

Nous présentons d'abord la QCD sur réseau, ses besoins et son impact sur les disciplines qui font usage de ses résultats. Nous indiquons ensuite les besoins des autres domaines faisant appel au calcul numérique de haute puissance.

### La chromodynamique quantique

La chromodynamique quantique sur réseau consiste à faire des simulations numériques permettant de résoudre les interactions fortes subnucléaires. Elle joue un rôle essentiel dans notre compréhension des interactions fondamentales aussi bien sur le plan théorique que dans l'interprétation des données provenant des grandes expériences actuelles en physique des hautes énergies. Ces simulations exigent des moyens de calcul et des algorithmes qui ont depuis plusieurs années été à la pointe des technologies disponibles. Pour ces raisons, la communauté de QCD sur réseau a non seulement fait progresser de façon importante les algorithmes et les méthodes de calcul, mais a également créé des ordinateurs originaux optimisés, parmi lesquels la série des "APE" initiée par des physiciens italiens (Cabibbo, Parisi, etc.) dans les années 1980. De nombreuses autres disciplines scientifiques, ayant des besoins assez semblables, se sont jointes à ces efforts.

Les théories de jauge quantiques sont l'outil mathématique avec lequel sont décrites les interactions fondamentales des particules élémentaires. Parmi celles-ci, la Chromodynamique Quantique (QCD), qui régit la dynamique des quarks et des gluons, jouit d'un statut particulier. En effet, cette interaction a la particularité de confiner les quarks et les gluons au sein de hadrons, phénomène qu'il est impossible de décrire par les méthodes usuelles basées sur un développement limité en puissances de la constante de couplage. Il faut donc un outil

“non-perturbatif”, qui va au-delà de ces développements, pour relier le monde hadronique observable à la théorie fondamentale sous-jacente. Ce lien se fait en formulant la QCD sur un espace-temps discret euclidien (QCD sur réseau) et en résolvant numériquement la théorie discrétisée pour différentes observables. Les objectifs de ces études peuvent se résumer ainsi:

1) vérifier que la QCD décrit le monde hadronique et comprendre en particulier le(s) mécanisme(s) du confinement et de la brisure spontanée de la symétrie chirale de QCD

2) déterminer les paramètres fondamentaux de QCD, tels la constante de couplage et les masses des quarks

3) calculer les effets de l'interaction forte sur les processus électrofaibles couplés aux quarks afin de permettre l'étude du mélange de saveurs et de la violation de la symétrie charge-parité (nécessaire pour expliquer l'asymétrie matière-anti-matière dans l'univers)

4) déterminer les propriétés de l'interaction forte à température finie (importantes pour l'univers primordial et la physique des ions lourds ultra-relativistes) et/ou à densité finie (importantes pour le cœur des étoiles à neutrons).

## Estimation de la puissance nécessaire

Les quarks polarisent le vide, et cet effet rend les calculs de LQCD d'autant plus coûteux que la masse de ces quarks est plus légère. Pendant de nombreuses années la communauté mondiale de LQCD s'est limitée à l'approximation “quenched” qui représente les effets de polarisation du vide par un champ moyen. Ces calculs ont rendu des services immenses, mais impliquent une erreur systématique de l'ordre de 15 à 20%.

Depuis plusieurs années la transition se fait dans le monde vers la prise en compte de cette polarisation du vide, ce qu'on appelle les “**calculs avec quarks dynamiques**” ou “**unquenched**” et les nouveaux ordinateurs qui sont attendus cette année vont en faire la norme. **Il deviendra impossible d'exercer une activité reconnue à moins de rejoindre ce mouvement ce qui demande d'atteindre l'échelle de calcul de plusieurs teraflops.** Cela a été démontré par plusieurs interventions lors du workshop “Lattice QCD: present and future” tenu à Orsay du 14 au 16 avril 2004 [1].

## Les “utilisateurs” de la QCD sur réseau

La QCD sur réseau reçoit dans de nombreux pays un soutien significatif d'institutions dont l'activité première est l'expérience en physique des particules et en physique nucléaire (e.g. Fermilab, DESY, INFN, Jefferson Lab, etc.). En effet **la LQCD est indispensable à l'exploitation d'un grand nombre d'expériences**, celles dans lesquelles les hadrons jouent un rôle important et celles dans lesquelles le plasma de quarks et de gluons est impliqué. Cela couvre une part très importante de l'activité de l'IN2P3: physique de la saveur (beauté, charme et étrangeté), physique hadronique, ions lourds et physique nucléaire.

D'autre part de nombreux théoriciens qui ne pratiquent pas eux-mêmes la LQCD sont intéressés par ses résultats: tous ceux qui étudient la physique de la saveur et les hadrons avec différents outils théoriques, ceux qui étudient les plasmas de quarks et de gluons, les cosmologistes qui s'intéressent aux plasmas primordiaux, les théoriciens nucléaires, etc.

## 3. Les grands moyens de calcul dans le monde

Pour illustrer le contexte nous résumons brièvement les grands moyens de calcul dans le monde, essentiellement dans le domaine de la QCD sur réseau.

## Hors Europe

En dehors des pays européens, le Japon et les USA ont une tradition de calculs de QCD sur réseau.

**Au Japon.** Précédé par le projet QCDPAX (1987), le programme CP-PACS [2] a démarré en 1992. Le développement a duré cinq ans et a coûté 22 M\$. Cette installation a permis au groupe CP-PACS d'effectuer pendant plusieurs années des calculs pionniers avec les quarks dynamiques.

**Aux États-Unis.** De nombreux groupes effectuent des calculs de QCD sur réseau aux USA. Concentrons nous sur les grands projets actuels. Il existe un plan cohérent américain pour le développement de la QCD sur réseau. Il comprend l'installation de trois plateformes à coût optimisé de 10 Tflops chacune et l'utilisation de l'infrastructure de calcul **SciDAC**.

- La première plateforme de calcul consiste en une installation durant l'année 2004 d'un ordinateur **QCDOC** (QCD On a Chip) [3] de 10 Tflops soutenus à Brookhaven.
- Le développement progressif de deux grands clusters de PC's à Fermilab et à Jefferson Lab. Une puissance de 10 Tflops est visée pour 2006. Des versions plus modestes, de l'ordre de quelques centaines de Gflops sont déjà installées (128 noeuds à Fermilab, 256 à Jlab).

## La situation en Europe

En 1999 un rapport de l'ECFA [4] a soulevé, à l'échelle Européenne, le problème de la QCD sur réseau et insisté sur la nécessité de se doter en Europe en 2003-2004 de moyens de calculs de l'ordre de 10 Tflops.

En **Italie**, les calculs de QCD sur réseau ont démarré dans les années 80 avec le développement de calculateurs dédiés, APE (APE, APE100, APEmille et maintenant APENext) dont les puissances respectives sont de l'ordre de 1 Gflops, 100 Gflops, 1 Tflops et 10 Tflops. Ce programme a été soutenu par l'INFN.

Dans plusieurs centres, en Italie, sont installées des machines APEmille [5]: Rome I (0,65 Tflops), Pisa (0,26 Tflops), Rome II (0,26 Tflops), Milano (0,13 Tflops), Bari (0,065 Tflops) et INFN-LNS (0,065 Tflops).

L'INFN a déjà notifié l'achat de apeNEXT de 5 Tflops pour 2004 et la même quantité est prévue pour 2005. Les APE sont et resteront le principal ordinateur utilisé en Italie pour la QCD sur réseau

**L'Allemagne** est aussi fortement équipée en APEmille. Le centre de DESY-Zeuthen, membre de la collaboration APE, dispose en APEmille de 0,54 Tflops et participe de manière importante aux développements de apeNEXT. A Bielefeld 0,145 Tflops sont disponibles. Des "clusters" de PC sont installés ou en voie d'installation dans des centres universitaires où à DESY, le plus important, de 512 noeuds bi-processeurs, étant à Wuppertal. Les centres de calcul de Jülich et Munich sont aussi utilisés.

Récemment la communauté de QCD sur réseau d'Allemagne, Autriche et Suisse-allemande s'est organisée dans un groupe nommé LATFOR [6]. Ce groupe a étudié ses besoins et comparé de façon précise les solutions offertes, en particulier les apeNEXT et les clusters de PC's. En conclusion il a présenté une demande de apeNEXT de 15 Tflops. Cette demande

est encore en cours d'examen. Le centre de DESY a notifié l'achat de 3 Tflops d'apeNEXT pour ses chercheurs. L'université de Bielefeld a reçu du Land de Nordrhein-Westfalen un financement pour une apeNEXT de 5 Tflops, sous réserve de l'avis favorable d'un comité d'évaluation.

Au **Royaume Uni**, la communauté de QCD sur réseau est organisée dans la collaboration UKQCD. Elle dispose d'un puissant CRAY T3E à Edimbourg et d'une APEmille à Swansea de 0,08 Tflops de crête. Un groupe britannique a participé activement à la recherche et au développement de la **QCDOC** avec les américains. Elle dispose d'un financement important (6M de livres Sterling) pour son centre à Edimbourg. Ce financement a permis d'acheter une QCDOC de 12 Tflops, en cours d'installation.

#### 4. La situation en France

Malgré ses moyens de calcul extrêmement modestes, la communauté française de QCD sur réseau est très active et jouit d'une grande réputation internationale. En 2004 elle compte 14 permanents (dont plusieurs recrutements récents) répartis dans 7 laboratoires.

Cette communauté s'insère parfaitement dans la communauté scientifique française. Elle est *un interlocuteur privilégié de plus en plus indispensable aux expérimentateurs en physique des particules, physique hadronique, physique des ions lourds et physique nucléaire ainsi que pour de nombreux théoriciens.*

Aujourd'hui, la communauté française de QCD sur réseau dispose d'une petite APEmille de 16 Gflops crête et d'un certain nombre de PC's, au total moins de 40 Gflops, c'est à dire d'une puissance de calcul d'environ 1/40 de celle dont dispose chacun de nos grands voisins: l'Allemagne, l'Italie et le Royaume Uni. **Si rien n'est fait, ce rapport va tomber à environ 1/300** puisque les communautés de QCD sur réseau de ces pays vont disposer dans l'année qui vient d'environ 10 Tflops chacune.

Comme indiqué plus haut, la communauté mondiale de QCD sur réseau est entrée dans une phase de calculs de précision, tenant compte de la polarisation du vide par les quarks, qui exige des puissances de calcul au-delà du Tflop. *Pour avoir un impact significatif sur la connaissance des interactions fondamentales, la communauté française a impérativement besoin d'une puissance qui dépasse le Tflop soutenu.* Nous avons comparé le coût des principales solutions et abouti à demander **un apeNEXT de 3,2 Tflops de puissance crête, c'est à dire une puissance soutenue de 1,6 Tflops, pour un coût de 1,8 Meuros.** Les raisons de ce choix seront développées dans la prochaine section. Nous souhaitons aussi que cet effort soit pérennisé puisque le chemin vers la solution de la QCD, avec des masses réalistes des quarks légers et une précision de 1%, prendra vraisemblablement encore une dizaine d'années.

#### 5. apeNEXT et clusters de PC's

Les moyens de calcul demandés, en particulier par la QCD sur réseau, étant très massifs, il importe de choisir la meilleure solution du point de vue du coût financier et humain. Les grands moyens de calcul généralistes qui sont aujourd'hui disponibles sur le marché reviennent cher. Nous nous concentrons donc sur deux types de solution:

1) Les ordinateurs optimisés pour la QCD sur réseau qui apparaissent sur le marché en 2004: apeNEXT [7; 8] et QCDOC [3].

2) Des très gros clusters de PC's dotés de réseaux optimisés.

La discussion est complexe puisque, si du côté de apeNEXT/QCDOC les données du problème sont bien connues, la variété des clusters que l'on peut concevoir est encore grande en fonction de la nature des processeurs de calcul, de la nature et de la topologie des réseaux de communications, etc. De véritables tests, grandeurs nature, à l'échelle multiteraflop n'existent pas mais il existe de nombreuses références récentes à propos des clusters [9]. Une étude comparative approfondie a été faite à l'occasion du workshop "Lattice QCD: present and future" déjà mentionné [10]. Une intéressante synthèse [11] basée sur l'expérience américaine des clusters a aussi été présentée lors de la conférence "Lattice 2004".

En résumé, la meilleure solution en ce qui concerne le coût financier et humain est l'achat d'une apeNEXT. Nous avons estimé que **3 Tflops crête, i.e. 1.5 Tflops soutenus, est le minimum** qui permette à la communauté française de QCD sur réseau de participer au mouvement international de calcul avec quarks dynamiques tout en étant ouverte aux autres disciplines qui pratiquent le calcul intensif.

Bien évidemment la communauté française de QCD sur réseau continuera à utiliser des clusters de PC's, plus souples, pour tester de nouvelles idées physiques et algorithmiques (en particulier en rapport avec les "fermions chiraux"), pour exploiter les données de l'apeNEXT, mais aussi pour garder un savoir faire qui peut être précieux à l'avenir; une activité qui nécessiterait un cluster d'une puissance de calcul d'un ordre de grandeur inférieure à celle de l'apeNEXT.

Le **programme scientifique** qui sera suivi sur cet ordinateur comprendra la phénoménologie du modèle standard, les fermions chiraux, les propriétés fondamentales de la QCD, les propriétés nucléaires, mais aussi assurément de nouveaux champs de recherche en QCD et dans des disciplines voisines.

Cette activité devrait s'organiser autour d'un **GDR**, qui regrouperait non seulement les utilisateurs directs de l'ordinateur mais aussi les expérimentateurs et théoriciens qui sont intéressés à la LQCD, qui lui fournissent des idées et en attendent des réponses. Ce GDR jouerait un rôle décisif pour faire émerger les nouvelles lignes de recherche évoquées ci-dessus dans le cadre d'une réflexion interdisciplinaire.

## 6. Pour une mutualisation européenne des efforts

Une mutualisation européenne des efforts en faveur des moyens de calcul massifs apparaît comme la meilleure solution.

**A court terme une machine française à Rome.** L'INFN et l'université de Rome I (Sapienza) ont signé un accord selon lequel toutes les apeNEXT italiennes (5 Tflops déjà commandés plus 5 Tflops prévus l'an prochain) seraient regroupées en un seul lieu à l'université Rome I. L'installation d'une apeNEXT française de 3 Tflops dans le même lieu présenterait des avantages évidents en mutualisant la maintenance et l'infrastructure. En outre, en combinant les machines italiennes et françaises cela permettrait certains calculs sur des configurations de 13 Tflops. Les directeurs de l'INFN et du département de physique de Rome I ont exprimé formellement leur approbation d'une telle solution.

**Le projet d'un centre européen.** Plus important que cet avantage immédiat est la perspective d'un centre européen de calcul scientifique débutant par la QCD sur réseau mais s'élargissant à d'autres disciplines. En effet, résoudre la QCD est un effort de longue haleine qui demandera de plus en plus de moyens matériels et humains. Une coordination de ces

efforts à l'échelle européenne s'impose comme c'est déjà le cas aux USA grâce au projet SCIDAC.

Les objectifs d'un tel centre pourraient être:

- Mutualisation des moyens de calcul existants.
- Mutualisation des codes et de la conduite des calculs les plus décisifs et les plus lourds.
- Recherche concernant les moyens de calcul et les logiciels qui répondront de façon optimale aux besoins à venir, en route vers le petaflop.
- Comparaison des besoins en matériel et en logiciel avec les autres disciplines grosses consommatrices de moyens de calcul.
- Organisation de la collaboration interdisciplinaire entre scientifiques des différentes applications et informaticiens.
- Constitution éventuelle d'un projet dans le genre de ce qu'a été apeNEXT.
- Garantie de la pérennité indispensable à ce type d'effort.

Outre les communautés Italiennes et françaises, la communauté allemande de QCD sur réseau a déjà exprimé son intérêt pour ce projet.

## 7. Conclusion

Le projet résumé ci-dessus a déjà été évalué positivement. Il a reçu le soutien explicite des départements SPM et IN2P3 (CNRS) et du DAPNIA (CEA). La Direction de la recherche du ministère a aussi reconnu sa qualité et son enjeu scientifique.

Cet enjeu est apparu clairement lors des journées de perspectives de La-Colle-sur-Loup. Qu'il s'agisse de la physique hadronique, de la physique des ions lourds ou de celle de la saveur et de la violation de CP, les futures expériences ont un besoin impératif des progrès de la théorie et en particulier de la QCD sur réseau pour être fructueusement exploitées. Qu'il s'agisse de comprendre les résonances baryoniques (Roper), le spin du proton, le diagramme de phase de la QCD à température et densité finies, le spectre du charmonium et du bottomium, il est nécessaire de prendre en compte les quarks de la mer, et de maîtriser la limite chirale, ce qui suppose dès aujourd'hui des moyens de calcul au delà du teraflop. Dans le cas de la physique de la violation de CP et de la matrice CKM, la précision expérimentale atteinte vers 2010 sera du même ordre que la précision théorique obtenue avec les ordinateurs multi-teraflops et, dans le cas d'une construction d'une super usine à B, la précision en 2013 serait vraisemblablement du même ordre que celle de la QCD sur réseau à l'échelle du petaflop.

Le projet de développement de la QCD sur réseau trouve donc tout à fait sa place dans la prospective au même titre que les projets expérimentaux. La participation de la France à l'effort européen et mondial dans ce domaine est tout aussi indispensable qu'elle l'est dans les expériences phares.

## References

- [1] <http://events.lal.in2p3.fr/conferences/lqcd/telechargements/proceedings.pdf>
- [2] <http://www.rccp.tsukuba.ac.jp/cppacs/project-e.html>
- [3] [http://vmsstreamer1.fnal.gov/VMS\\_Site\\_03/Lectures/Lattice04/presentations/040623Boyle.pdf](http://vmsstreamer1.fnal.gov/VMS_Site_03/Lectures/Lattice04/presentations/040623Boyle.pdf)

- [4] Requirements For High Performance Computing For Lattice QCD: Report of the ECFA Working Panel, <http://www.hep.phys.soton.ac.uk/cts>
- [5] A. Bartoloni *et al.* [APE-Collaboration], Nucl. Phys. Proc. Suppl. **106**, 1043 (2002) [arXiv:hep-lat/0110153].
- [6] <http://www-zeuthen.desy.de/latfor/>  
 “Ein Multi-Teraflops-Rechner für die Gitterfeldtheorie in Deutschland”,  
<http://www-zeuthen.desy.de/latfor/Proposal.pdf>,
- [7] <http://www-spires.dur.ac.uk/spires/hep/hep-lat/0102011>,  
<http://www-zeuthen.desy.de/ape/html/apeNEXT/>,  
[http://events.lal.in2p3.fr/conferences/lqcd/wednesday/tripiccione\\_version2.pdf](http://events.lal.in2p3.fr/conferences/lqcd/wednesday/tripiccione_version2.pdf).
- [8] <http://lqcd.fnal.gov/lattice04/Plenary/23Wed/rapuano.pdf>
- [9] A. Gellrich, D. Pop, P. Wegner, H. Wittig, M. Hasenbusch and K. Jansen, eConf **C0303241** (2003) TUIT003, [arXiv:physics/0306090]; D. Holmgren, A. Singh, P. Mackenzie, J. Simone [arXiv:cs.DC/0307019]; Thomas Lippert, [arXiv:hep-lat/0311011]
- [10] D. Pleiter, Evaluation of the platforms,  
<http://www-zeuthen.desy.de/latfor/fohlen/pleiter.ps>,  
<http://events.lal.in2p3.fr/conferences/lqcd/thursday/pleiter.pdf>
- [11] [http://vmsstreamer1.fnal.gov/VMS\\_Site\\_03/Lectures/Lattice04/presentations/040623Holmgren.pdf](http://vmsstreamer1.fnal.gov/VMS_Site_03/Lectures/Lattice04/presentations/040623Holmgren.pdf)

## Volet humain

	<i>Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015</i>	<i>accélérateur, détecteur, calculateur.....</i>	<i>Etude de faisabilité, avant projet détaillé, construction...</i>				<i>Autant que possible détailler par année et par organisme ( IN2P3 et CEA )</i>	
Priorité	Nom du projet	Type de projet	Etat d'avancement	Années de début et de fin des investissements	Pays partenaires	Nombre de physiciens français participant au projet	Nombre de techniciens et ingénieurs français participant au projet en nombre d'hommes par an.	Commentaires
1	LQCD	Calculateur	Projet scientifiquement approuvé	2005-2010	Italie Allemagne	9 physiciens théoriciens, 1 informaticien (3 hommes-an/an)	4 informaticiens et électroniciens (3 hommes-ans/an)	Les physiciens comptés sont ceux qui participent aux activités de codes, software et hardware. 20 utilisateurs (calculateurs) sont prévus au début (y compris les étudiants et postdocs)

## Volet financier

	<i>Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015</i>	<i>accélérateur, détecteur, calculateur.....</i>	<i>Etude de faisabilité, avant projet détaillé, construction...</i>			<i>Cette colonne sera consolidée par les directions de l'IN2P3 et du CEA</i>		<i>Cette colonne sera consolidée par les directions de l'IN2P3 et du CEA</i>	
Priorité	Nom du projet	Type de projet	Etat d'avancement	Années de début et de fin des investissements	Coût total hors personnel (en M€)	Coût total en incluant le personnel (en M€)	Contribution IN2P3+CEA (hors personnel) en M€	Contribution IN2P3+CEA (en incluant le personnel) en M€	Autres contributions Françaises en M€
1	LQCD	Calculateur	Projet scientifiquement approuvé	2005-2010	6	7,4	?	? + 0,9 (Personnel SPM+IN2P3)	SPM, ministère (?)

## **XVIII - Autres contributions sans executive summary**



Textes complets sur le web : <http://prospective2004.in2p3.fr/>

- Neutrons
- Calcul (tableaux ci-dessous)

Volet humain

	<i>Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015</i>	<i>accélérateur, détecteur, calculateur....</i>	<i>Etude de faisabilité, avant projet détaillé, construction....</i>				<i>Autant que possible détailler par année et par organisme (IN2P3 et CEA)</i>	
Priorité	Nom du projet	Type de projet	Etat d'avancement	Années de début et de fin des investissements	Pays partenaires	Nombre de physiciens français participant au projet	Nombre de techniciens et ingénieurs français participant au projet en nombre de personnes par an.	Commentaires
1	<b>LCG-France</b>	Calcul pour le LHC	avant projet détaillé : <a href="http://grid.in2p3.fr/lcg/">http://grid.in2p3.fr/lcg/</a>	2005-2015	CERN et pays mettant en place un Tier-1	30 physiciens LHC français	50 (IN2P3+CEA) au CC-IN2P3 et dans les laboratoires IN2P3+CEA	la réalisation de ce projet permettra de faire l'analyse physique des données LHC ce qui justifie in fine les investissements (financiers et humains) dans les expériences.

## Volet financier

	<i>Projets qui seront encore en construction en 2006 et projets qui vont commencer d'ici à 2015</i>	<i>accélérateur, détecteur, calculateur.....</i>	<i>Etude de faisabilité, avant projet détaillé, construction...</i>			<i>Cette colonne sera consolidée par les directions de l'IN2P3 et du CEA</i>		<i>Cette colonne sera consolidée par les directions de l'IN2P3 et du CEA</i>	
Priorité	Nom du projet	Type de projet	Etat d'avancement	Années de début et de fin des investissements	Coût total hors personnel (en M€)	Coût total en incluant le personnel (en M€)	Contribution IN2P3+CEA (hors personnel) en M€	Contribution IN2P3+CEA (en incluant le personnel) en M€	Autres contributions Françaises en M€
1	<b>LCG-France</b>	Calcul pour le LHC	avant projet détaillé: <a href="http://grid.in2p3.fr/lcg/">http://grid.in2p3.fr/lcg/</a>	2005-2015	38	60	38	63	3,00 (EGEE à travers CNRS: 2004-2008)