

# PROSPECTIVE DAPNIA-IN2P3 2004-2014

## Groupe de travail

## Structure Interne des Hadrons

Auteurs :

Nicole Bastid (LPC, Clermont)  
Jaume Carbonell (LPSC, Grenoble)  
Nicole d'Hose (DAPNIA/SphN)  
Jean-Pierre Didelez (IPN, Orsay)  
Hélène Fonvieille (LPC, Clermont)  
Michel Garçon (DAPNIA/SphN)  
Pierre Guichon (DAPNIA/SPT)  
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)  
Christophe Royon (DAPNIA/SPP)  
Franck Sabatié (DAPNIA/SphN)  
Laurent Schoeffel (DAPNIA/SPP)  
Egle Tomasi (DAPNIA/SphN)

## Plan du Document

<b>Synthèse du rapport</b> .....	p 3
<b>Evolution de la physique hadronique théorique vers les calculs</b>	
<b>sur réseau</b> .....	p 9
<b>Spectre des hadrons</b> .....	p 9
<b>Facteurs de forme et distributions de partons</b> .....	p10
<b>La physique nucléaire ‘ab initio’</b> .....	p10
<b>L’expérience COMPASS au CERN</b> .....	p12
<b>Les différentes phases de COMPASS depuis 2000 jusqu’au delà de 2010</b> .....	p12
<b>COMPASS phase I : les réalisations de Saclay pour et les premiers résultats</b> <b>de physique</b> .....	p12
<b>COMPASS phase II (2006-2010)</b> .....	p13
<b>Structure en spin du nucléon</b> <b>Spectroscopie des hadrons</b>	
<b>Etude des Distributions de Partons Généralisées dans la phase III</b> <b>de COMPASS</b> .....	p14
<b>Les expériences à JLab</b> .....	p17
<b>Les expériences de violation de parité</b> .....	p17
<b>L’étude des Distributions de Partons Généralisées : activités présentes à</b> <b>6 GeV et futures à 12 GeV</b> .....	p18
<b>Les expériences à GSI</b> .....	p19
<b>L’étude des mésons vecteurs avec HADES</b> .....	p19
<b>Matière nucléaire et effets de milieu avec FOPI</b> .....	p20
<b>Perspectives en physique hadronique avec PANDA à FAIR</b> .....	p22
<b>Les expériences à MAMI</b> .....	p24
<b>Les expériences à GRAAL</b> .....	p25
<b>Les expériences à très haute énergie à HERA, au Tevatron et au LHC</b> ....	p26
<b>Diffusion Compton virtuelle et distributions de Partons Généralisées</b> <b>à HERA</b> .....	p26
<b>Prospectives pour QCD au Tevatron et au LHC</b> .....	p27
<b>Physique des jets</b> .....	p27
<b>Un nouveau domaine de QCD</b> .....	p28
<b>Diffraction</b> .....	p29
<b>Besoins humains et financiers</b> .....	p31
<b>Les projets de collideurs e-RHIC ou ELIC</b> .....	p32

## 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 (17 physiciens), CERN/COMPASS (11 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 (*18 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** (5.5 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 groupes français du LPC-Clermont et de l'IRES travaillent sur l'équation d'état de la matière nucléaire, grâce en particulier aux particules étranges dont ils étudient la production et la propagation dans le milieu nucléaire (FOPI à GSI). Responsables d'un des sous détecteurs de FOPI, Ils sont impliqués depuis de longues années dans ce programme, qu'ils continueront pendant 2 à 3 années. Au delà de 2006, la participation à ALICE devrait entraîner mécaniquement une réduction de l'activité sur 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>, 45.5 physiciens expérimentateurs travaillent actuellement sur les programmes cités plus haut. Ils sont répartis de la manière suivante auprès des différents accélérateurs :

17 à JLab :	6 LPSC + 4 IPNO + 4 SPhN <sup>2</sup> + 3 LPC
11 sur CERN/COMPASS :	11 SPhN <sup>2</sup>
8 à GSI :	4 IPNO + 4 LPC
5.5 sur Graal :	3 LPSC + 2.5 IPNO
5 sur MaMi <sup>3</sup> :	4 IPNO + 1 LPC

---

<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 1 physicien sur 2 programmes JLab et COMPASS.

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

Tandis que la répartition par thèmes est la suivante :

Facteurs de forme étranges : 13 physiciens (5 LPSC + 7 IPNO + 1 SPhN)  
Polarisation des gluons : 11 physiciens (11 SPhN<sup>4</sup>)  
GPD : 11 physiciens (6 SPhN<sup>4</sup> + 3 LPC + 1 IPNO + 1 LPSC)  
Polarisation des gluons : 11 physiciens (11 SPhN<sup>4</sup>)  
Hadrons dans les noyaux: 8 physiciens  
Baryons, mésons, résonances : 5.5 physiciens<sup>5</sup> (3 LPSC + 2.5 IPNO<sup>6</sup>)  
Polarisabilités généralisées : 1 LPC<sup>3</sup>

Et enfin celle par institut de recherche :

31.5 IN2P3 : soit 14.5 IPNO, 9 LPSC, 8 LPC  
14 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.

8.5 physiciens choisissent de se réorienter à court terme vers des thèmes à la frontière de la physique hadronique (3 sur le moment électrique dipolaire du neutron, 4.5 sur ALICE et 1 sur ATLAS ou CMS). 5 autres souhaitent assurer leurs engagements actuels dans les 5 ans à venir, mais ne souhaitent pas s'orienter sur l'un des 3 axes identifiées ci-dessous à l'horizon 2010

Le recensement actuel de 45.5 physiciens hadronistes qui ne tient pas compte des embauches futures laisse entrevoir seulement **20 physiciens à l'horizon de 2010**. Ils se répartissent sur **trois axes de recherche** :

- **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.

---

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

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

<sup>5</sup> Auxquels il faut ajouter les communautés COMPASS et CLAS.

<sup>6</sup> 1 physicien est aussi impliqué dans ALICE.

### 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 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, S. Ong, B. Ramstein et J. Van de Wiele. 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 reste à définir.

- 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.

## Evolution de la physique hadronique théorique vers les calculs sur réseau

Les calculs sur réseau sont un moyen privilégié pour l'étude du spectre des hadrons et de leur propriétés à partir des seuls paramètres de la théorie des interactions fortes: QCD. Il s'agit d'un domaine dynamique où ni les quarks ni les gluons ne peuvent être traités de façon perturbative. Ces calculs, qu'il est parfois possible de comparer directement à des résultats d'expériences, sont aussi très précieux pour valider des modèles phénoménologiques.

Les difficultés principales des simulations numériques de la QCD sur réseau sont liées à la puissance limitée des ordinateurs actuels, y compris ceux qui sont dédiés. Ceci oblige à faire les calculs avec des masses plus lourdes que les masses physiques – très faibles – des quarks légers  $u$  et  $d$  et même à se limiter souvent à l'approximation 'quenched' qui consiste à négliger les effets de polarisation du vide de QCD. Malgré ces limitations, il est possible de faire des prédictions pour un certain nombre d'observables, mesurées dans des expériences impliquant la communauté française. Ces prédictions ont toutefois une précision limitée mais que l'on pourra systématiquement améliorer par des moyens de calcul de plus en plus puissants

Actuellement, la plupart des calculs numériques sur réseau se limitent au régime des pions « lourds » (600 à 900 MeV) et à des tailles de l'ordre de  $(2 \text{ fm})^3$ . Cependant des calculateurs pouvant atteindre plusieurs Teraflops permettent déjà de simuler la QCD avec 2, voire 3 saveurs de quarks dynamiques en approchant des masses de pion de l'ordre de 250 MeV. Un meilleur contrôle des extrapolations chirales devrait alors permettre de réduire les erreurs inhérentes aux simulations actuelles. La théorie des perturbations chirales est un sujet particulièrement actif en France qui devrait largement bénéficier de cette symbiose avec la communauté des spécialistes du calcul sur réseau

L'état de l'art de la discipline, ainsi que les différents sujets actuellement développés par les groupes français, se trouve résumé dans le compte rendu du workshop "Lattice QCD: present and future" organisé en avril 2004 au LAL (<http://events.lal.in2p3.fr/conferences/lqcd/>).

En ce qui concerne la physique hadronique, le recouvrement entre l'activité théorique en calcul sur réseau et les programmes expérimentaux de l'IN2P3/DAPNIA est très fort. On peut l'organiser autour de trois thèmes principaux : **le spectre des hadrons, les fonctions de distribution du nucléon et du pion, et la physique nucléaire « ab initio »**.

### I. Spectre des hadrons

Une des premières tâches des calculs sur réseau est l'obtention du spectre des hadrons - baryons et mésons - directement à partir du lagrangien de QCD.

La plupart de leurs états fondamentaux semble être bien reproduits qualitativement – même à l'approximation « quenched » - mais il reste des problèmes à résoudre dans le domaine des quarks légers (pion), des excitations radiales ( $N^*$ , Roper) et surtout des hadrons exotiques (tétraquarks, pentaquarks, hexaquarks, glueballs, hybrides).

Ces derniers systèmes sont mal rendus par les modèles de quarks. L'obtention de prédictions précises issues de la QCD, que seuls les calculs sur réseau peuvent fournir, est incontournable. Pour cela, le stade de l'approximation « quenched » doit être dépassé. Ceci s'avère même être critique dans certain cas comme les glueballs.

Dans les années à venir, et suite à la mise en route de détecteurs adaptés (e.g. PANDA au GSI, CLEOIII sur CLEOc à Cornell, BaBar,...) on doit s'attendre à une profusion de nouveaux états hadroniques et à une meilleure détermination des paramètres des états déjà établis..

Le spectre d'excitation des mésons présente aussi un intérêt spécial suite aux découvertes récentes de BABAR, BELLE , CLEO et FOCUS des mésons excités :  $D_s^*(2317)$  et  $D_s^*(2458)$ . L'existence de ces objets était bien prédite par les modèles de quarks mais avec des masses et des largeurs de désintégration bien plus grandes que celles observées expérimentalement. Des calculs sur réseau, sont nécessaires pour rendre compte de ces observations.

## II. Facteurs de forme et distributions de partons

Les facteurs de forme du nucléon, des mésons (pion) et de transition  $N-\Delta$  peuvent être calculés sur réseau, avec une relative facilité. Dans la plupart des cas, l'approximation quenched en fournit déjà une bonne approximation. Ils peuvent être directement comparés à l'expérience.

L'ensemble des moments des distributions de partons peut être calculé sur réseau. C'est un sujet très étudié expérimentalement : à (HERA (H1) pour les fonctions de distributions des partons, à JLAB (HAPPEX et G0) et Mayence pour l'étude du contenu étrange du proton ainsi qu'à COMPASS pour la contribution de l'hélicité des gluons au spin du nucléon.

Les distributions de partons généralisés (GPD) sont étudiées essentiellement à JLAB par des mesures de DVCS et de DVMP : les mesures, actuellement réalisées à JLAB pourraient être étendues au delà de 2009 avec CEBAF 12 GeV et à COMPASS.

Les moments des distributions de partons généralisées peuvent également être calculés à partir des éléments de matrice hadroniques non diagonaux. A l'ordre zéro, on peut extraire les facteurs de forme de Dirac et de Pauli tandis que les moments d'ordre 1 permettent l'accès aux éléments de matrice de l'opérateur énergie-impulsion. De premières estimations ont été faites sur les 3 premiers moments dans l'approximation des pions lourds, qui pourront être comparées aux données à venir.

Des résultats existants montrent un désaccord entre la valeur de  $\Delta\Sigma$  - contribution du spin des quarks au J total du proton – mesurée expérimentalement ( $\Delta\Sigma=0.30$ ) et calculé sur réseau à l'approximation « quenched » ( $\Delta\Sigma=0.70$ ).

Les techniques utilisées dans ces calculs peuvent aussi être employées pour obtenir la fonction d'onde du nucléon en terme de ses états de Fock (« Light front wave function »)

L'étude théorique du contenu étrange du nucléon (expérience G0 de JLab) est également envisageable. Elle nécessite toutefois des calculs avec « quarks dynamiques » (i.e. unquenched). Autrement on ne peut pas tenir compte proprement des contributions de quarks qui ne sont pas de valence. Bien que des astuces aient été utilisées pour contourner cette difficulté, aucun des résultats actuels n'est totalement fiable.

## III. Physique nucléaire 'ab initio'

Les techniques de calcul sur réseau sont aussi appliquées à la physique nucléaire. D'une part pour reproduire les propriétés du nucléon et obtenir les paramètres fondamentaux de cette physique – e.g.  $f_{\pi NN}$  - à partir des seules interactions entre quarks et gluons. D'autre part parce qu'elles peuvent fournir une description des noyaux en termes des lagrangiens

d'interaction NN sans faire appel à la notion de « potentiel ». En effet, si les potentiels sont des bonnes approximations de la théorie quantique des champs sous-jacente pour des faibles constantes de couplage ils sont une sévère restriction dans le domaine non perturbatif et la dynamique qu'ils génèrent est certainement éloignée de celle de la théorie complète.

On peut envisager que la relative simplicité des modèles One-Boson-Echange ou  $\chi$ PT, comparée à la QCD, permette de traiter « ab initio » des systèmes ayant un nombre conséquent de nucléons. Cette nouvelle approche de la physique nucléaire constitue une possible alternative aux méthodes Monte Carlo, limitées aux seuls potentiels locaux et nécessitant impérativement des forces à trois corps, mal maîtrisées et d'une complexité déraisonnable. Elles fourniraient aussi des fonctions d'onde et facteurs de formes relativistes des noyaux légers, étudiés expérimentalement à Jlab.

D'autres problèmes touchant directement la communauté française, bien qu'ayant un programme expérimental non concerné par les machines citées ci dessus, présentent aussi un intérêt pour la communauté réseau. Citons par exemple la **mesure du moment dipolaire du neutron** (ILL et PSI) ou l'étude des **transitions de phase et déconfinement dans QGP** (ALICE).

### **Moyens**

Les moyens de calcul LQCD mis en œuvre sont par nature mutualisés avec l'ensemble des gens qui font des calculs sur réseau pour d'autres observables, et même des parties importantes de certains calculs lourds peuvent être mis en commun, comme par exemple le calcul de configurations de jauge avec quarks dynamiques.

# L'expérience COMPASS au CERN

## I. Les différentes phases de COMPASS depuis 2000 jusqu'au delà de 2010

Le groupe de Saclay (14 physiciens) a depuis l'origine des responsabilités importantes dans la collaboration COMPASS.

Durant la **première phase** (2002 à 2004) un faisceau de muons de 160 GeV a été diffusé sur une cible de  ${}^6\text{LiD}$  avec comme objectif principal la mesure de la polarisation des gluons  $\Delta G/G$  dans le nucléon. On peut extraire cette polarisation de la mesure de l'asymétrie de spin de la réaction de Fusion Photon Gluon (PGF)  $\gamma^* g \rightarrow q \bar{q}$ . On identifie le processus PGF en détectant un méson charmé D (qui résulte de l'hadronisation d'un quark c), ou en sélectionnant une paire de hadrons à grande impulsion transverse  $p_T$ . Plusieurs autres aspects de la structure en spin du nucléon sont aussi étudiés comme les distributions de partons polarisées longitudinalement ou transversalement. En particulier on attend des données sur  $\Delta s$  (saveur étrange) et sur la fonction de structure dépendant du spin transverse  $h_1$ . Actuellement les premiers résultats de physique apparaissent: production de charme, asymétrie de spin des événements PGF pour la mesure de  $\Delta G/G$ , asymétries de Collins et Sivers pour la transversité, production de mésons  $\rho$  et d'hypérons  $\Lambda$ .

Le spectromètre à deux étages, grande acceptance, hauts flux, COMPASS, a été conçu et réalisé pour ces mesures. Il a été mis au point en 2001 et 2002. Des données ont été enregistrées en 2002, 2003 et 2004. En 2005 il n'y aura pas de faisceau au CERN. La collaboration COMPASS prépare maintenant la finalisation et l'upgrade du spectromètre dans le but de démarrer une **seconde phase** de prise de données (entre 2006 et 2010) avec une acceptance étendue et une efficacité améliorée pour la détection et l'identification des particules. Les deux programmes de physique actuellement approuvés seront poursuivis : avec des **muons**, mesure de  $\Delta G/G$ ,  $\Delta s$  et transversité ; avec des **hadrons**, étude de la spectroscopie des hadrons charmés, exotiques et 'glueballs'.

Le futur de COMPASS au delà de 2010, appelé **troisième phase**, est en cours de définition. Un des axes majeurs proposés est l'étude des distributions de partons généralisées avec le faisceau de muons de haute énergie.

## II. Les réalisations Saclay pour COMPASS phase I

**1. Construction (1997-2001):** Depuis l'origine du projet jusqu'à maintenant, Saclay a eu des responsabilités importantes dans la collaboration COMPASS. Le groupe comprend actuellement 14 physiciens, dont 11 permanents, 1 postdoc et 2 doctorants. Par ailleurs, 3 thèses ont déjà été soutenues à l'intérieur du groupe.

La contribution de Saclay à l'appareillage initial a représenté un investissement de  $\sim 1.5$  M€ consacré essentiellement à:

- Conception et réalisation de 12 détecteurs Micromegas de  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  avec l'électronique frontale associée (12000 voies).
- Fabrication de 3 chambres à dérive de  $1.2 \times 1.2 \text{ m}^2$  de huit plans chacune, avec l'électronique frontale associée (3000 voies).
- Réinstallation du solénoïde supraconducteur (construit par Saclay et utilisé précédemment pour l'expérience SMC) pour pallier au retard du solénoïde en construction pour COMPASS.

**2. Premiers résultats de physique :** L'un des défis actuels est l'analyse complexe de l'énorme quantité de données enregistrées (plusieurs centaines de Tbytes par an). Saclay joue un rôle prépondérant dans cette analyse. Les résultats préliminaires basés sur une fraction de données 2002 seulement sont prometteurs pour les deux canaux les plus importants du programme sur le spin:

a- Le pic de résonance du **méson charmé  $D^0$**  a été mis en évidence dans la voie de désintégration  $D^0 \rightarrow K \pi$  [2].

b- L'**asymétrie de spin  $\gamma$ -d** pour les **hadrons à grand  $p_T$**  a pu être extraite [3]:  $A(\gamma d \rightarrow h h') = -0.065 \pm 0.036$  (stat)  $\pm 0.010$  (syst).

D'autres résultats de physique commencent également à apparaître : ils concernent la production de vecteurs mésons  $\rho^0$ , la mesure de la polarisation des hyperons  $\Lambda$  et  $\bar{\Lambda}$  et la décomposition en saveur des distributions de partons polarisées longitudinales et transverses.

### III. COMPASS phase II (2006-2010)

Des progrès considérables ont été réalisés dans l'évaluation et la compréhension du facteur de mérite du spectromètre. Ce travail a permis de mettre en évidence certains secteurs sensibles : tracking et identification des particules par le RICH, pour lesquels une amélioration notable des performances peut être réalisée. Des améliorations hardware sont à l'étude pour la phase II de COMPASS. Leur impact peut être considérable pour le canal du  $D^0$  qui est principalement limité par la statistique.

En outre, le partage du faisceau SPS au-delà de 2005 risque d'imposer une réduction du cycle utile et nous invite donc à considérer comme prioritaire l'amélioration des performances du spectromètre pour un fonctionnement à une luminosité instantanée plus élevée.

**1. Structure en spin du nucléon:** on envisage une période de 2 à 3 ans de prise de données avec le faisceau de muons et le spectromètre amélioré (efficacité et acceptance). En particulier le nouveau solénoïde de grand diamètre sera utilisé pour la cible polarisée. Le but est de poursuivre les mesures de  $\Delta G/G$ ,  $\Delta s$  et de la transversité. Des estimations des barres d'erreur attendues, basées sur les analyses préliminaires de données existantes, montrent qu'il est possible d'atteindre des barres d'erreur proches de la proposition initiale pour la mesure de  $\Delta G/G(x)$  (Fig.1), la transversité (Fig.2) et la mesure de  $\Delta s$  (Fig.3).

**2. Spectroscopie des hadrons :** Pour couvrir le programme prévu initialement dans la proposition, on envisage 2 ou 3 ans de prise de données avec des faisceaux de pions, kaons et protons entre 100 et 300 GeV. Le programme comprend l'étude de la spectroscopie des hadrons charmés, la mesure des polarisabilités du pion et du kaon par effet Primakoff, la recherche d'états exotiques et de 'glueballs', et enfin la recherche des états possibles de pentaquarks. Pour ces mesures, il est prévu de finaliser les deux calorimètres électromagnétiques.

La collaboration COMPASS comprend  $\sim 220$  physiciens. Un addendum au MoU original entre les instituts de la collaboration et le CERN est en préparation. Il concerne un montant total d'environ 6 M€ prévu pour la finalisation et l'upgrade du spectromètre en vue de la seconde phase de COMPASS. Le groupe du DAPNIA/SPhN (**11 physiciens permanents :** J.Ball, Y.Bedfer, E.Burtin, N.d'Hose, F.Kunne, J-M.Le Goff, A.Magnon, C.Marchand, J.Marroncle, D.Neyret, S.Platchkov) participera à cet upgrade pour un montant de **500 à 600k€** On envisage d'une part la construction d'une chambre à dérive de grande taille,

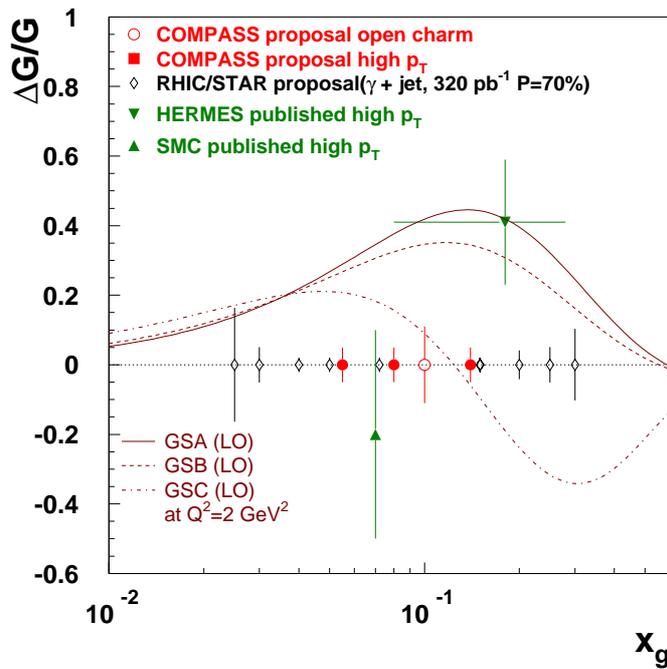


Fig.1 : Erreurs attendues sur  $\Delta G/G$  dans la voie du charme ouvert  $D^0$  (cercles vides) et dans la voie des grands  $p_T$  (cercles pleins). Pour toutes les expériences, les erreurs sont statistiques uniquement, et on estime que les erreurs systématiques ne pourront être inférieures à 0.05.

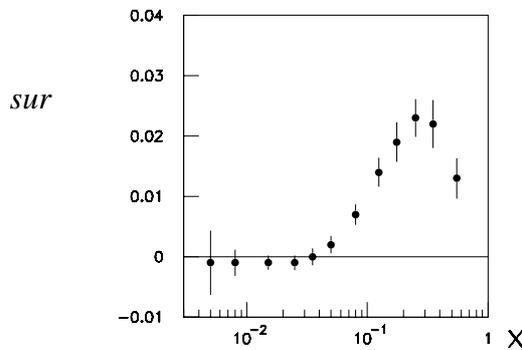
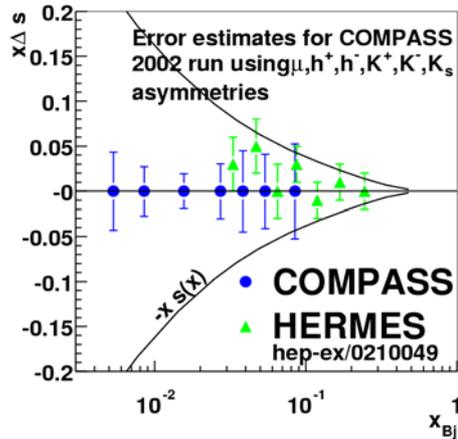


Fig. 3 : Erreurs attendues sur  $x\Delta s$  pour les 2002 uniquement. A terme on attend des  $\sim 3$  fois plus petites.

Fig.2 : Erreurs attendues pour la mesure de la fonction de structure en spin transverse  $xh_1(x)$  le deuton



données  
erreurs

nécessaire pour couvrir l'acceptance du nouveau solénoïde, et d'autre part une participation à l'upgrade de l'électronique du RICH. Ce dernier point est particulièrement important dans le contexte d'une augmentation possible de la luminosité.

Les théoriciens français intéressés par cette physique sont : P.Guichon, B.Pire et J.Soffer.

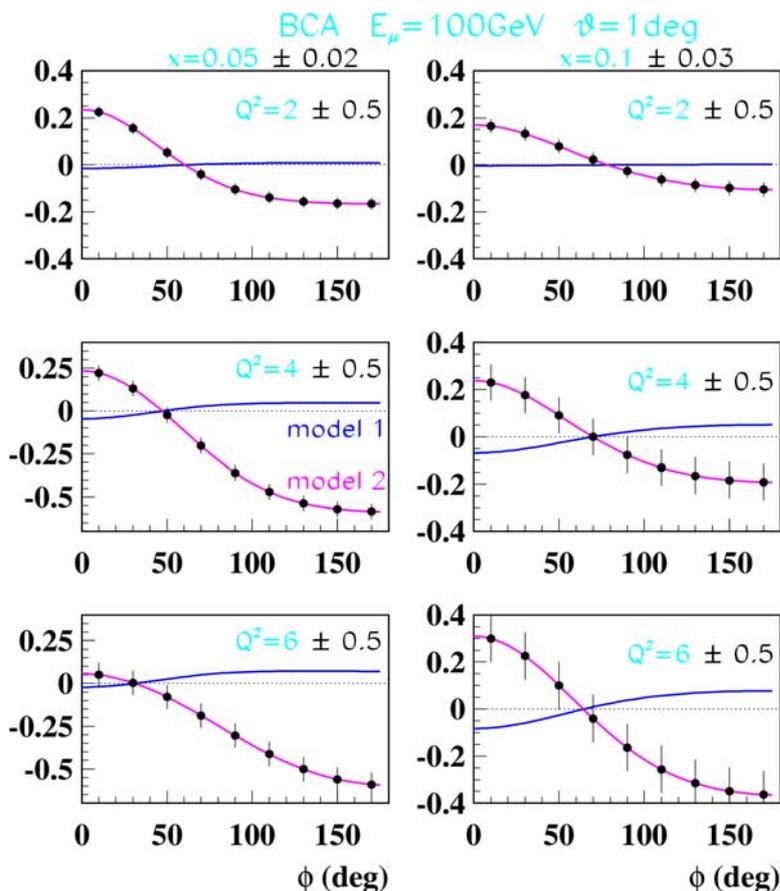
#### IV. Etude des Distributions de Partons Généralisées dans la phase III de COMPASS

Depuis de longues années deux observables bien distinctes nous permettent de décrire le nucléon. Ce sont d'une part les facteurs de forme élastiques reliés à la distribution spatiale ( $\bar{r}$ ) des constituants du nucléon et d'autre part les distributions de parton qui donnent les distributions d'impulsion ( $\bar{p}$ ) des constituants. De nouvelles observables, les distributions de Parton Généralisées (GPDs) ont été introduites récemment et permettent d'améliorer encore notre connaissance de la structure interne du nucléon. Elles donnent la corrélation entre les

deux distributions précédentes, nous offrant une cartographie tridimensionnelle du nucléon. La détermination des moments angulaires ( $\vec{r} \times \vec{p}$ ) des constituants du nucléon devient aussi possible grâce à des règles de somme et complète l'étude détaillée du spin du nucléon.

La communauté française est particulièrement impliquée dans ce nouveau champ de physique, tant sur le point de vue théorique qu'expérimental. Les faisceaux de HERA (avec une participation française dans H1 décrite plus loin) ont permis de fournir les premières données, les faisceaux d'électrons de JLab avec leur excellente luminosité et leur prochaine montée en énergie à 12 GeV permettent de couvrir le domaine des quarks de valence (participation française dans les halls A et B et dans les programmes futurs décrite aussi dans la section suivante), alors que les faisceaux de muons du CERN de haute énergie 100-200 GeV ouvrent un domaine plus bas en  $x_{\text{Bjorken}}$ , avec quarks de la mer et gluons. Nous proposons d'utiliser ces faisceaux de muons pour étudier la diffusion Compton virtuelle auprès de COMPASS après que le programme expérimental de la phase II soit réalisé (vers 2010).

COMPASS offre une situation unique avec à la fois des faisceaux de muons positifs et négatifs pour mesurer les asymétries de charge de la diffusion Compton virtuelle. Ces asymétries de charge sont très sensibles aux modèles des GPDs. La figure suivante montre des prédictions obtenues avec deux modèles extrêmes. Le modèle 1 utilise une simple paramétrisation des GPDs basée uniquement sur un produit de facteurs de forme par des distributions de partons. Le modèle 2 considère que les quarks de valence et les quarks de la mer ne sont pas distribués de la même manière à l'intérieur du nucléon. Les quarks de valence sont au cœur du proton, alors que les quarks de la mer (nuage de pions) et les gluons occupent un plus grand volume.



*Deux prédictions théoriques indiquent les distributions azimutales de l'asymétrie de charge que l'on peut mesurer à COMPASS en 6 mois de prise de données avec une efficacité globale de détection de 25%, un flux de muons de  $2.10^8$  muons par pulse et une cible d'hydrogène de 2.5 mètres*

Pour optimiser de telles réactions  $\mu p \rightarrow \mu p \gamma$  auprès du spectromètre COMPASS il faut :

- 1) Des faisceaux de  $\mu^+$  et  $\mu^-$  de 100 GeV de même intensité et de polarisation opposée. Des flux de muons de  $2 \cdot 10^8$  muons par pulse sont réalisables aujourd'hui.
- 2) Une cible d'hydrogène de grande longueur 2.5m pour maximiser la luminosité et donner des taux de comptage raisonnables pour une expérience d'environ 6 mois de prise de données (cf la figure).
- 3) Une extension de la calorimétrie électromagnétique existante qui prolonge la couverture angulaire à l'avant entre 10 et 24 degrés (ceci est aussi une exigence du programme hadron actuel).
- 4) Un détecteur de recul pour détecter les protons de faible impulsion ( $< 1 \text{ GeV}/c$ ) émis à l'arrière et assurer l'exclusivité de la réaction étudiée.

Toute augmentation du flux de protons (grâce par exemple à l'installation du Linac4 dont la décision est prévue en 2006) sera bénéfique à ce genre d'expérience à condition de bien contrôler la tenue du spectromètre COMPASS avec une augmentation d'intensité.

Une telle expérience doit être approuvée par le comité scientifique du CERN (SPSC). Ce sujet sera présenté au meeting de Cogne qui se tiendra à Villars les 22-28 Septembre 2004 et qui définit le programme expérimental futur du SPS auprès des cibles fixes.

Dès maintenant nous analysons les données de production du méson vecteur  $\rho$ . La quantité de données acquise aujourd'hui dans l'expérience COMPASS est très supérieure à celle des expériences précédentes et nous permet de déterminer de manière précise le transfert d'hélicité entre le photon virtuel et le méson  $\rho$  dans le processus  $\mu p \rightarrow \mu p \rho$ . Si la conservation d'hélicité est totale, nous pouvons sélectionner très aisément la section efficace longitudinale de production de  $\rho$  par une simple détermination de la distribution angulaire des produits de décroissance du méson  $\rho$ . La partie longitudinale est exprimée en terme de GPDs et rejoint la problématique que nous voulons étudier.

D'autre part nous avons reçu un financement européen de 260 k€ pour les années 2004-6 dans le cadre du 6<sup>ème</sup> PCRD (JRA (Joint Research Activity) dédié à l'étude des GPDs) pour démontrer la faisabilité d'un tel détecteur de recul et construire un prototype.

Physiciens intéressés par cette expérience :

Jacques Ball, Yann Bedfer, Etienne Burtin, Nicole d'Hose, Michel Garçon, Jean-Marc Le Goff, Claude Marchand, Jacques Marroncle, Damien Neyret, Stéphane Platchkov (DAPNIA/SPhN), Laurent Schoeffel (DAPNIA/SPP).

Estimation de la contribution française au détecteur de recul ~800 k€

Planning indicatif:

Septembre 2004 : meeting de Cogne où cette physique doit être exposée devant le SPSC

2004-2006 : réalisation du prototype de détecteur de recul

2007-2009 : construction du détecteur de recul

2010-... : prise de données

## Références

1. COMPASS proposal to the CERN SPSC 1996
2.  $D^0$  production, contribution COMPASS à la conférence DIS04
3. Asymétrie de spin de la réaction PGF (grands  $p_T$ ), contrib. COMPASS à la conf. DIS04

## Les expériences à JLab

### I. Les expériences de violation de parité

Ces expériences visent à déterminer le contenu étrange du proton. Grâce au terme d'interférence entre les échanges du photon et du boson intermédiaire  $Z^0$ , il y a une asymétrie, très faible, qui est relié au contenu en quarks étranges du nucléon. Plusieurs expériences mesurent cette asymétrie à JLAB, au travers des expériences HAPPEX et G0. A plus basse énergie, l'expérience PVA4 est également réalisée auprès de MAMI. L'ensemble de ces programmes devrait se terminer au plus tard en 2007.

#### a. Les expériences HAPPEX

Les expériences HAPPEX se déroulent dans le hall A de l'accélérateur CEBAF en Virginie. Elles mesurent précisément l'asymétrie de spin dans la diffusion élastique d'électrons polarisés sur des cibles de protons et d'hélium 4. La combinaison de ces deux noyaux permet de séparer les contributions électrique et magnétique des quarks étranges aux facteurs de forme du nucléon. La région cinématique choisie à bas transfert ( $Q^2=0.1 \text{ GeV}/c^2$ ) contraint en particulier le rayon de charge étrange  $r_s$  et le moment magnétique étrange  $\mu_s$ .

Une première prise de données a eu lieu cet été et sera complétée en 2005. Les résultats préliminaires montrent une bonne maîtrise de l'appareillage et fournissent déjà la première mesure sur l'hélium. A terme ces expériences permettront de trancher définitivement si  $r_s$  et  $\mu_s$  sont négligeables ou non.

Le DAPNIA a conçu et réalisé les détecteurs d'électrons pour ces expériences, avait la responsabilité de co-porte-parole et de la polarimétrie du faisceau. Son implication se terminera avec la fin de la dernière prise de données en 2005.

### 2. L'expérience G0

Un axe majeur de recherche pour l'IN2P3 s'est dégagé en 1998 au Jefferson Laboratory avec le projet G0. Il constitue un des programmes prioritaires de ce laboratoire. Les deux laboratoires de l'IN2P3 impliqués (LPSC-Grenoble et IPN-Orsay) ont bénéficié de l'attribution de deux autorisations de programme pour la construction de la moitié de l'ensemble de détection et de l'électronique pour les deux phases de cette expérience. Ils ont construit et livré dans les temps ces dispositifs au Jefferson Laboratory.

L'expérience G0 se propose de vérifier, avec le minimum d'incertitude théorique, la contribution des quarks étranges aux distributions de charge et de moments magnétiques (courant/spins) dans le nucléon. Elle mesurera pour cela les facteurs de forme faibles du proton (via l'échange de  $Z^0$ , lors de la diffusion d'électrons) dans une gamme d'impulsion transférée  $0.1-1.0 \text{ (GeV}/c)^2$ . Ces facteurs de forme faibles (électrique  $G_E^Z$  et magnétique  $G_M^Z$ ) sont déterminés en diffusion d'électrons polarisés longitudinalement sur une cible d'hydrogène liquide (non polarisée). L'asymétrie de taux de comptage générée n'est pas nulle lorsque la polarisation est renversée car la parité n'est pas conservée dans l'interaction faible. A nos énergies cette mesure demande un contrôle soigneux des biais expérimentaux car, au final, la précision absolue requise sera de quelques  $10^{-7}$ . Par une mesure combinée aux angles avant/arrière (séparation de Rosenbluth), l'expérience G0 permettra de séparer les termes  $G_E^Z$  et  $G_M^Z$  pour plusieurs valeurs de moments transférés. La contribution individuelle des quarks s est obtenue en combinant les mesures de facteurs de forme EM sur le proton et le neutron

avec les facteurs de forme faibles mesurées sur le proton. Ce résultat permettra alors d'étudier la contribution de la mer (composante  $ss$ ) aux distributions de charges et de courants dans le nucléon, avec une précision de quelques pourcents.

Après une phase de commissioning en 2003, l'expérience a été réalisée avec succès en 2004 dans le Hall C pour la phase des angles avant. La première mesure de la phase de l'expérience aux angles arrières vient d'être acceptée par le PAC du Jefferson Laboratory et sera réalisée fin 2005. Deux autres prises de données, de quelques mois chacune, sont prévues dans les années 2006-2007. Le LPSC-Grenoble s'est engagé depuis 2002 dans la conception et la construction de la moitié des Cerenkov à aérogel, complément nécessaire pour les mesures.

## **II. L'étude des Distributions de Partons Généralisées : activités présentes à 6 GeV et futures à 12GeV**

Les distributions de partons généralisées (GPD) permettent d'étudier à un niveau jamais exploré la structure des nucléons en terme de partons. L'aspect novateur de ces quantités est leur sensibilité aux corrélations entre partons qui permettent, par exemple, de les relier au moment angulaire total porté par les quarks, ou encore de faire une cartographie tridimensionnelle du nucléon. Dans certaines limites cinématiques ou par l'intermédiaire de règles de somme, les GPD se réduisent aux distributions de partons ordinaires et aux facteurs de forme.

Expérimentalement, les GPD sont accessibles au moyen de réactions exclusives dites dures, c'est-à-dire procédant par l'intermédiaire d'un sous processus élémentaire au niveau des partons, calculable en théorie des perturbations de QCD. La réaction la plus simple est la diffusion Compton profondément virtuelle (DVCS),  $ep \rightarrow ep\gamma$ . Les GPD peuvent être également mesurées par des réactions où le photon est remplacé par un méson léger (DVMP), permettant ainsi de déterminer séparément les contributions de différents saveurs des quarks.

Plusieurs groupes français sont d'ores et déjà impliqués sur cette thématique à Jefferson Lab avec un faisceau de 6 GeV. Après l'obtention de résultats préliminaires prometteurs, trois expériences DVCS sont à venir d'ici 2005, dont deux dans le Hall A et une dans le Hall B. Celles-ci constitueront les premières mesures dédiées dans le monde permettant d'accéder de façon précise et dans un grand domaine cinématique à des observables liées aux GPD. Quatre laboratoires français sont en collaboration pour l'élaboration de ces expériences, pour un total de treize physiciens permanents, un post-doc et cinq étudiants : le LPC-Clermont, l'IPN-Orsay, le LPSC-Grenoble et le Dapnia/SPhN. Il est important de noter que dans chacune des trois expériences, au moins l'un des porte-parole est français: nous avons un rôle moteur dans la problématique des GPD à Jefferson Lab. L'analyse de ces trois expériences mènera les groupes concernés jusqu'en 2006 ou 2007.

La montée en énergie de CEBAF à 12 GeV permettra d'étendre considérablement le domaine cinématique étudié pour les expériences DVCS et DVMP, notamment en quadri-moment transféré  $Q^2$ , dont de grandes valeurs sont nécessaires pour étudier des lois d'échelle ou d'évolution. La luminosité et l'énergie feront de CEBAF@12GeV un centre unique d'excellence pour l'étude des GPD dans le domaine des quarks de valence (variable de Bjorken  $x_B$  comprise entre 0,1 et 0,7). Le CD-0 (*Critical Decision 0*) a été signé au mois d'avril 2004 par le gouvernement américain, permettant ainsi, entre autres, de démarrer les

études sur les futurs détecteurs des quatre Halls expérimentaux. Les premières prises de données à haute énergie pourraient se faire dès 2009.

Les groupes français impliqués à Jefferson Lab ont connu une fonte des ressources humaines au cours du temps, et seulement sept personnes des quatre laboratoires déjà mentionnés comptent participer, à l'heure actuelle, à la phase du CEBAF à 12 GeV. Il faut souligner que cette diminution d'effectifs n'est absolument pas le fait d'un manque d'intérêt pour la physique. Elle est due principalement à trois facteurs : l'éloignement géographique de ce laboratoire, parfois difficilement compatible avec la vie familiale ou avec d'autres volets de l'activité professionnelle ; des départs en retraite ; un faible niveau d'embauche. Dans ce contexte, **il est essentiel d'avoir un flux entrant de physiciens**, qui, même s'ils ne travaillent que cinq à dix ans à Jefferson Lab, peuvent néanmoins contribuer de façon décisive aux expériences qui y sont menées. De fait, la mobilité des physiciens vers d'autres laboratoires a été et sera bénéfique à la recherche scientifique française. Par ailleurs, les groupes français travaillant à Jefferson Lab ont eu jusqu'à présent un succès certain pour attirer des étudiants brillants.

A l'occasion de la montée en énergie de l'accélérateur, nous souhaitons nous intéresser à la mise à niveau du détecteur CLAS (CEBAF Large Acceptance Spectrometer) installé dans le Hall B. Ce CLAS++ permettra une détection précise et complète des états finals contenant plusieurs particules, caractéristique essentielle pour les expériences exclusives du type DVCS et DVMP que nous comptons y mener. En particulier, le détecteur central de CLAS++ qui permettra la détection et l'identification des particules entre 40 et 135 degrés est un terrain vierge puisqu'un tel détecteur n'existe pas dans la version actuelle de CLAS. Une ébauche d'étude par le groupe Dapnia/SPhN a identifié le trajectographe interne comme un projet à la fois intéressant et bien défini. Une option attractive serait d'utiliser des chambres Micromégas cylindriques et de développer une nouvelle électronique rapide. Toutefois, ce projet semble limité dans le cadre de la collaboration française actuelle et d'autres appareillages pourraient faire l'objet d'études : le détecteur central de CLAS++ contiendra également un système de scintillateurs à temps de vol pour l'identification des particules chargées ainsi qu'un calorimètre électromagnétique pour la détection des neutres. Des discussions et travaux vont commencer très prochainement dans l'ensemble de la collaboration CLAS pour la définition et le partage des responsabilités de tels appareillages. Le moment est opportun pour s'y impliquer.

### **Jefferson Lab 12 GeV, contribution française estimée :**

**Personnel permanent:** J. Ball, C. Ferdi, M. Garçon, M. Guidal, J. Marroncle, B. Michel, F. Sabatié, E. Voutier, + au minimum deux embauches IN2P3 et deux embauches DAPNIA (sur cinq ans).

**Estimation de coût de la contribution au détecteur central :** 800 k€ pour le trajectographe ; + environ le même coût pour une contribution additionnelle dans le détecteur central.

### **Planning indicatif :**

- 2004-2006 : études et conception,
- 2006-2007 : R&D, prototypes,
- 2007-2008 : construction,
- 2009-2013 : prises de données.

## Les expériences à GSI

2 groupes de physiciens, basés à Clermont-Ferrand et à Orsay collaborent respectivement aux programmes réalisés sur la machine de GSI auprès des détecteurs FOPI et HADES. L'étude de la matière nucléaire et des modifications des propriétés des mésons dans cette matière constitue l'ossature de ces programmes qui sont détaillés ci dessous. Ces programmes constituent une activité à moyen terme. Au delà, pour ces équipes, l'évolution se dessine au CERN auprès d'ALICE (voir cette activité dans le groupe de travail correspondant) et sur la nouvelle machine de GSI.

### I. L'étude des mésons vecteurs avec HADES

5 physiciens de l'IPN d'Orsay à plein temps (4 permanents + 1 thésard) constituent actuellement ce groupe, dont environ 3 équivalent plein temps sur HADES, le reste étant distribué sur des activités de publications d'anciens résultats obtenus à Saturne. 2 physiciens sur 4 partiront à la retraite d'ici 4 ans ou moins. Une seule physicienne sera concernée par l'horizon au delà de dix ans.

**Engagements pris sur HADES par l'IPN d'Orsay:** construction de 6 chambres représentant 21 m<sup>2</sup> de détection sur 6 plans. 4 chambres installées aujourd'hui, construites sur la période 2000-2003, 2 à construire d'ici fin 2005. Nos activités de simulation de réactions induites par des projectiles légers (pion et ions légers) et de dépouillement des expériences ont démarré cette année. Les activités de l'équipe liées à d'anciennes expériences se transfèrent progressivement vers les activités HADES.

Le programme de mesures physiques a démarré depuis 2002, ne permettant d'accumuler que des statistiques faibles. Les premières campagnes de physique avec une statistique correcte ont commencé cette année 2004 avec des attributions de faisceau pour des expériences en pp et  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ .

#### **Programme de physique.**

Le programme de physique est vaste. Déclenché par l'incapacité des modèles théoriques à reproduire les données en collision ion-ion issues de la collaboration DLS et le souhait de refaire une expérience dans des conditions d'acceptance et de précision au moins un ordre de grandeur supérieur, le programme s'est considérablement enrichi et diversifié aujourd'hui. De nombreux calculs théoriques ont été réalisés au cours des 10 dernières années tant pour tenter d'expliquer les résultats de DLS que ceux des expériences à beaucoup plus haute énergie (HELIOS et CERES), où un excès de section efficace de production de dileptons dans les réaction entre systèmes lourds est observé dans la région se situant juste en dessous des mésons  $\rho$  et  $\omega$ . Après un travail pionnier de Brown et Rho qui proposait de relier une modification des propriétés spectrales des mésons vecteurs dans la matière nucléaire dense et chaude à une restauration de la symétrie chirale, de nombreux groupes de théoriciens ont proposé des approches alternatives, basées sur les règles de somme de QCD, des modèles effectifs ou les relations de dispersion, avec d'ailleurs des effets parfois opposés quand au signe de la variation de masse. Dans les modèles qui prévoient une diminution de la masse des

mésons vecteurs, associée à une diminution de la valeur du condensat de quark-antiquark du vide de QCD, les changements de masse prédits peuvent aller jusqu'à des valeurs de plusieurs dizaines de MeV, aisées à mettre en évidence avec un détecteur de haute résolution tel qu'HADES. Au travers de l'ensemble des développements théoriques est également apparue la nécessité d'une compréhension fine des processus de base (excitation de résonances baryoniques et couplage à la voie dilepton, couplage Vecteur Dominance Model, rôle joué par les particules à vie longue se propageant dans le noyau, tel que le pion, rôle des processus en plusieurs étapes, rôle du neutron, rôle des effets hors couche en présence de résonances larges, etc..). L'obtention de statistiques importantes permettant de faire des coupures cinématiques, les études à des énergies différentes et avec des sondes différentes constituent l'épine dorsale du programme sur HADES. Sur cette base, le groupe souhaite exploiter le détecteur sur les 5 ans à venir (2004 à 2008) à plein temps sur le complexe SIS 18 de GSI avec des prolongements sur le dépouillement prévisibles jusqu'à 2010 au moins.

Ce programme d'étude comprend plusieurs points : en sus de l'étude des collisions symétriques noyau-noyau déjà amorcée, l'étude des réactions pp, avec en particulier des variations en énergie permettant de découpler la contribution des différents mésons, d'analyser les effets d'interférence et les effets hors couche est prévue. En faisceau de pions, négatifs et positifs, tous deux disponibles à GSI dans une gamme d'énergie tout à fait appropriée, l'étude des réactions élémentaires permettra de mieux cerner le rôle de certaines résonances de façon plus sélective qu'en pp en même temps qu'elle constituera, grâce à une cinématique différente, un outil plus adapté au méson  $\omega$  dont la durée de vie est sensiblement plus grande que celle du méson  $\rho$ .

Des simulations faites récemment au sein de la collaboration HADES montrent qu'il sera possible d'utiliser HADES avec la nouvelle machine au moins jusqu'à 8 GeV par nucléon en ions lourds, une fois que la réalisation de la couverture des petits angles par des RPC avec la granularité requise aura été menée à bien (échéance 2006, entrant dans le cadre du projet de GSI futur). Dans ce contexte, le groupe envisage que son activité sur HADES pourrait se prolonger sur la nouvelle machine, en biseau, avant d'aborder les prises de données sur PANDA.

#### IV. Matière nucléaire et effets de milieu avec FOPI

FOPI est une collaboration internationale Darmstadt en Allemagne auprès de l'accélérateur SIS à laquelle collaborent 6 physiciens du LPC Clermont (dont 4 permanents). L'expérience FOPI, installée à GSI, regroupe environ 60 membres de 12 laboratoires et est dédiée à l'étude de la matière hadronique, à haute densité et à température moyennement élevée, formée lors de collisions d'ions lourds à des énergies de faisceau allant de 100 MeV à 2 GeV par nucléon. Les objectifs scientifiques concernent essentiellement l'étude des propriétés de la matière nucléaire et donc de son équation d'état que l'on peut contraindre notamment au moyen du « *flow* » de matière nucléaire et du comportement des particules étranges dans le milieu nucléaire.

La physique de l'étrangeté est une partie importante du programme de FOPI. Les résultats concernant l'étude de la production et de la propagation de kaons et anti-kaons dans le milieu nucléaire donnent des indications d'effets de milieu nucléaire. A titre d'exemple, l'anticorrélation entre le « *flow* » latéral de protons et celui de kaons (appelée encore anti-*flow* de kaons) ne peut être reproduite par un modèle type BUU que si la masse effective des kaons est modifiée par l'existence d'un potentiel  $K^+$  - nucléon répulsif. Comme le montre la figure ci-dessous, une première mesure du méson  $\Phi$  sous le seuil de création a été obtenue avec les données FOPI.

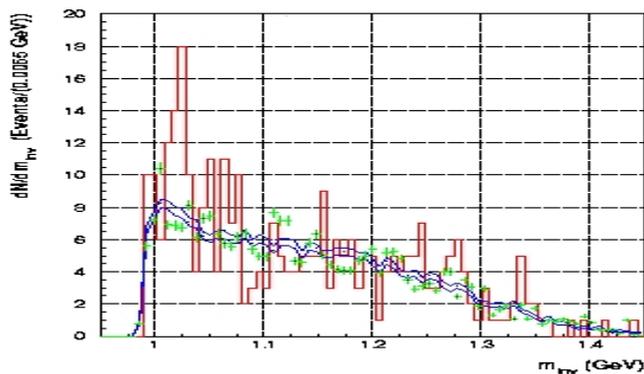


Figure 1 : Spectre de masse invariante des mésons  $\Phi$  mesurés dans les collisions centrales Ni(1.93 AGeV) + Ni (extrait de : A. Mangiarotti and FOPI Collab., Nucl. Phys. A (2003) 89).

D'autres données plus complètes, plus précises, avec plus de statistique sont cependant nécessaires pour explorer au maximum ce domaine de physique. Pour cela le dispositif a dû subir ces dernières années de profondes modifications : réfection des murs de scintillateurs, upgrade de la chambre à dérive centrale, mise en place d'un nouveau tonneau de scintillateurs pour atteindre une résolution de 100 ps et refonte complète du système d'acquisition.

Tirant pleinement parti de ces améliorations, 120 millions d'événements centraux Ni(1.93 AGeV) + Ni ont été collectés en 12 jours de faisceau en 2003. Cette expérience, dédiée à fournir pour la première fois une mesure du taux de production des hypérons doublement étranges  $\Xi^-$  sous le seuil de création, permet aussi des études détaillées des particules étranges  $K^\pm$ ,  $K^0_S$ ,  $\Lambda$ ,  $\Phi$ . Les mesures permettront de parfaire notre compréhension du mécanisme régissant la production de l'étrangeté dans un milieu purement hadronique. Les analyses sont en cours.

Les prises de données, planifiées pour 2004, seront destinées à l'étude de la production de l'étrangeté à densité nucléaire normale dans la réaction  $\pi^- A \rightarrow K^0 \Lambda$ . Pour 2005, une proposition d'expérience concernant la production d'états liés  $K^-$ -baryon est en discussion dans la collaboration.

Pour une étude plus complète de l'étrangeté et notamment des anti-kaons dont certaines propriétés restent inexplicées, le dispositif FOPI doit être équipé d'un nouveau système de temps de vol à haute granularité et haute résolution temporelle entre  $35^\circ$ - $68^\circ$ . La Collaboration s'est orientée vers un détecteur type GRPC (« *Glass Resistive Plate Chambers* »). Ce détecteur est indispensable pour la détection des anti-kaons dans les systèmes lourds tels que Au + Au à 1.5 AGeV. Sous réserve d'acceptation du financement par le GSI, les prises de données pourraient débuter début 2006.

Notons que l'ensemble du programme FOPI axé sur la physique de l'étrangeté est complémentaire de celui de l'expérience HADES qui utilise des sondes leptoniques pour l'étude des effets de milieu.

La contribution française à l'expérience FOPI, forte de 6 personnes dont 4 permanents, consiste en la prise en charge totale d'un des cinq sous-détecteurs de FOPI, le mur Interne de scintillateurs. Le groupe a aussi une participation importante au programme de physique mentionné ci-dessus et il est en particulier fortement impliqué dans l'analyse des dernières prises de données Ni + Ni à 1.93 AGeV (une thèse est en préparation).

3 des membres permanents contribuent fortement au développement du projet ALICE au LHC-CERN

Au-delà de 2004-2005, l'installation et la mise en fonctionnement de l'expérience ALICE, pourrait entraîner une réduction de notre participation à FOPI.

Il faut enfin noter l'importance de la collaboration avec des théoriciens de laboratoires de Subatech à Nantes, de Saclay et allemands.

### III. Perspectives en physique hadronique avec PANDA à FAIR

Dans le cadre de la nouvelle machine de GSI, le projet PANDA, dont les possibilités de physique sont très larges, semble une voie possible au delà des projets actuels. Plusieurs physiciens de l'IPN, actuellement actifs auprès de JLAB et de GSI ont décidé de se regrouper sur ce détecteur qui offre des possibilités attractives d'étude dans nos domaines de compétence. Ce sont l'étude de la structure électromagnétique du proton par des mesures de réaction induites dans des collisions antiproton proton et l'étude d'effets de milieu via des modifications des propriétés des mésons charmés dans la matière nucléaire.

Structure du nucléon.

Plusieurs types de réaction peuvent être étudiés

- En  $\bar{p} p \rightarrow e^+e^-$ , l'extraction des facteurs de forme électrique et magnétique du nucléon dans la région temps est possible, complétant les nombreuses mesures actuellement réalisées dans la région espace. Ainsi, dans le domaine temps, l'électrique et le magnétique n'ont jamais été séparés, les seules mesures actuellement disponibles montrent des effets inattendus, etc... PANDA pourra aborder la mesure précise (et leur séparation) de ces facteurs de forme dans un très large domaine cinématique jamais couvert par une seule expérience.
- En  $\bar{p} p \rightarrow \gamma\gamma$ . Ce processus correspond à la réaction croisée de la diffusion Compton. De même qu'il a été montré récemment l'intérêt des mesures de DVCS pour l'extraction de nouvelles fonctions de structure, les distributions de partons généralisées, la mesure dans le domaine temps de ce processus permettrait encore d'élargir la problématique. Il faut toutefois noter que les fondements théoriques ne sont pas encore aussi bien étayés que pour le DVCS.
- En  $\bar{p} p \rightarrow e^+e^-X$ . Par mesure de la distribution azimutale de la paire de lepton, on peut, sans faisceau ni cible polarisé, accéder à certaines contributions de la structure en spin du nucléon, comme la distribution des quarks polarisés transversalement (transversité)

Mésons charmés dans la matière nucléaire. l'étude des modifications des propriétés des mésons dans la matière nucléaire, toujours lié à la structure du vide de QCD, mais cette fois sur son contenu gluonique. Dans ce cas, un faisceau d'antiprotons de quelques GeV interagissant avec un noyau permet de créer les mésons charmés. Dans le secteur des mésons charmés, des effets de déplacement de masse analogues, quoique plus petits, à ceux prédits pour les mésons vecteurs sont tout à fait détectables en utilisant les voies de décroissance peu perturbées par la distorsion, paire de leptons seule ou associée à un photon. Ici aussi, les prédictions théoriques diffèrent très largement et il est important de les tester. Compte tenu des faibles largeurs de ces résonances et de la zone de masse concernée, un déplacement, même petit, est relativement aisé à mettre en évidence. Ce programme constitue un prolongement tout à fait naturel des activités qui sont menées aujourd'hui avec HADES, tant sur le plan de la problématique de physique que des méthodes expérimentales utilisées.

Dans le cadre de la nouvelle machine, les premières expériences sur PANDA ne démarreraient au plus tôt qu'en 2013, mais la participation à celles-ci implique de pouvoir dégager progressivement du temps pour faire des simulations, construire des détecteurs,

participer à des réunions de collaboration. Ces 3 types de réactions n'ont fait l'objet que de simulations très sommaires, que le groupe d'Orsay propose d'affiner par l'élaboration de générateurs.

Les compétences techniques reconnues du service détecteurs de l'IPN, avec lequel nous entretenons une très forte et fructueuse collaboration depuis de nombreuses années sur le programme HADES ainsi qu'à JLAB sur les expériences DVCS et G0, sont tout à adaptées et constituent un excellent atout pour rentrer dans la collaboration PANDA. Une implication au niveau de l'électronique est aussi possible. Un point plus complet sera fait en octobre après qu'un certain nombre de réunion avec la collaboration PANDA, prévues au cours du mois de septembre, aient eu lieu. Il sera alors préciser la nature de la contribution technique ainsi que la demande correspondante en moyen humain et financier.

## Les expériences à MAMI

Deux thématiques sont présentes à MAMI : la violation de la parité et la Diffusion Compton Virtuelle, également abordées à JLAB.

### I. Violation de la parité

Il s'agit ici de mettre en évidence la contribution des quarks étranges à la structure du nucléon, soit in fine les facteurs de forme étranges  $G_M^s$  et  $G_E^s$  par une mesure de l'asymétrie de spin en diffusion élastique d'électrons polarisés sur le proton. L'asymétrie est due à l'interférence entre les amplitudes électromagnétique et faible, cette dernière violant la parité. La séparation des facteurs de forme  $G_M^s$  et  $G_E^s$  nécessite des mesures avant et arrière, à même  $Q^2$ , ou comparer des expériences différentes. A Mayence (PVA4), l'asymétrie a été mesurée à  $Q^2=0.1$  et  $0.23 \text{ GeV}^2$ , suggérant une contribution faible, mais non nulle, des quarks étranges aux facteurs de forme du nucléon. Les réalisations techniques correspondantes vont de l'électronique du calorimètre à la R et D pour un polarimètre à électrons. Une extension de ces expériences sur le deuton est prévue en 2004/5, afin de contraindre la partie axiale des facteurs de forme et il est envisagé d'étendre les mesures aux angles arrières (2006/7). L'implication du groupe d'Orsay à MAMI se terminera au plus tard en 2007, avec PVA4.

### II. Diffusion Compton Virtuelle

Menée par des groupes de Saclay et de Clermont, la Diffusion Compton Virtuelle (VCS) permet d'accéder aux polarisabilités généralisées (GPs) du nucléon. Ces observables sont caractéristiques de la structure du nucléon et traduisent sa capacité à se déformer sous l'action d'un champ électromagnétique. Le but est l'étude détaillée de ces GPs en fonction de  $Q^2$ , c'est à dire de l'échelle de distance. Les groupes français ont participé activement à ce programme depuis le début avec la première expérience réalisée dans le monde à MAMI. Ces résultats, publiés depuis 2000, sont en bon accord avec la théorie des perturbations chirales. Cette activité se poursuit sous 2 formes

- 1) en faisceau polarisé, pour mesurer l'asymétrie de spin de faisceau. L'analyse de ces données prises sur la période 2002-4 est en cours.
- 2) En faisceau polarisé et avec mesure de la polarisation du proton de recul. Destinées à séparer pour la première fois les 6 GPs à bas  $Q^2$ , cette expérience, qui a récemment bénéficié d'un run test, devrait s'étendre (prise de données et analyse) jusqu'en 2007-8

D'autres possibilités existent en VCS, qui seront accessibles avec l'upgrade de MAMI à 1.5 GeV. Les groupes de Clermont et du DAPNIA souhaitent continuer l'activité VCS à MAMI, notamment par leur participation aux 2 expériences en cours, qui ne concernent que le court et moyen terme. A plus long terme, la situation est ouverte et encore non définie.

MAMI est une machine performante - 100% de cycle utile, faisceau polarisé - doté d'équipements complètement opérationnels. L'encadrement des étudiants se fait sur des expériences réalisables dans la durée d'une thèse, sous la responsabilité de physiciens experts. L'upgrade prochain (MAMI C vers 2006) permettra un programme plus étendu, notamment lié à la production d'étrangeté. Des réalisations techniques sont possibles dans ce cadre, quoique non encore abordées et discutées. La physique accessible à MAMI est tout à fait complémentaire de celle faite à JLAB. Ce créneau « basse énergie » va tendre à devenir unique au monde. Il permet de réaliser des expériences dans de très bonnes conditions, au sein de collaborations pas trop larges, avec une souplesse et une réactivité très profitables. Un futur à long terme à MAMI peut donc exister, bien que non défini aujourd'hui : les réflexions devront s'étendre au delà des journées de prospective.

## Les expériences à GRAAL

Depuis sa mise en service il y a après de 10 ans, le poste expérimental GRAAL a permis d'exploiter la [polarisation linéaire de son faisceau et les performances du système de détection (en particulier pour les mésons neutres), afin de mesurer de 0.5 à 1.5 GeV, les sections efficaces et les asymétries faisceau dans la photo-production des mésons  $\pi$ ,  $\eta$ ,  $K^+$ ,  $\omega$  et  $2\pi^0$ , sur le proton. Ces mesures ont largement contribué à compléter les bases de données existantes et permis de préciser la contribution des résonances du nucléon aux processus de photo-production.

Les résultats obtenus notamment en photo-production du  $\eta$  ont donné le couplage à la résonance  $D_{13}(1520)$  et suggèrent l'existence d'une 3<sup>ième</sup> résonance  $S_{11}$ , non prédite par les modèles de quarks constituants, mais souvent associée à des configurations moléculaires  $\Sigma$ -K. Les résultats précis concernant les asymétries pions, dans le domaine peu exploré 0.8-1.5 GeV, ont contraint les analyses en ondes partielles., requérant notamment la prise en compte de nouvelles résonances-D(1620),  $S_{31}$  et  $P_{13}(1720)$ .

Les asymétries dans le canal  $\omega$  ont montré une contribution inattendue, mais néanmoins importante des résonances  $N^*$  à grand angle, mettant en évidence pour la première fois un couplage important au canal  $\omega p$ . Dans le canal  $2\pi^0$ , une remontée spectaculaire des sections efficaces au delà du GeV, ne peut s'interpréter qu'en invoquant l'excitation de la résonance  $P_{11}(1710)$ , qui aurait alors un rapport d'embranchement important correspondant à l'émission du méson  $\sigma$ , lui-même très couplé à  $2\pi^0$ .

Les mesures récentes sur cible de deutérium liquide permettent de déduire des observables sur le neutron. Un signal de la production du  $\theta^+$  et d'autres membres non étranges de l'anti décuplet est activement recherchée.

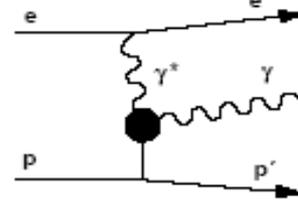
Enfin, l'implantation prochaine de la cible polarisée pur HD « HYDILE », développé à l'IPN d'Orsay et permettant d'accéder à des facteurs de dilution exceptionnel, donnera accès aux asymétries cible et à l'exploitation de la polarisation circulaire du faisceau. Par des mesures de double asymétrie, la règle de somme GDH pourra être vérifiée sur le proton et le neutron.

## Les expériences à très haute énergie à HERA, au Tevatron et au LHC

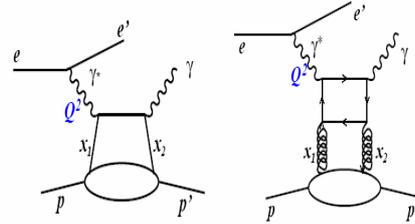
## I. Diffusion Compton virtuelle et distributions de Partons Généralisées à HERA

La section efficace de la production exclusive d'un photon réel lors du processus diffractif :  $e+p \rightarrow e+p+\gamma$  a été mesurée par les expériences H1 et ZEUS.

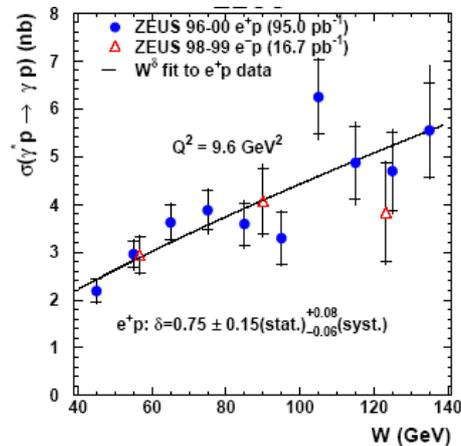
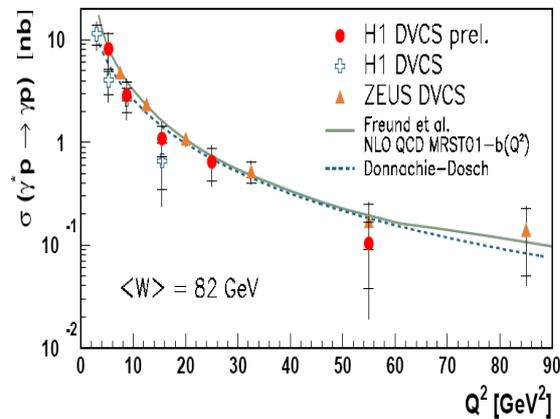
Comme illustré sur la figure ci-contre, cette réaction consiste en la diffusion élastique d'un photon virtuel  $\gamma^*$  par le proton incident via un échange neutre de couleur. L'intérêt de ce processus réside ainsi dans la possibilité de tester avec précision la QCD perturbative dans le domaine des interactions diffractives.



Ces calculs supposent de plus que l'échange (diffractif) est réalisé par deux partons d'impulsions transverses et longitudinales différentes, du fait de la différence de masse entre les photons virtuel et réel : voir les diagrammes ci-contre au LO et NLO ( $x_1 \neq x_2$ ).



La section efficace DVCS dépend alors d'une nouvelle classe de distributions de partons, lesquelles généralisent les densités standards en incluant l'information sur les corrélations entre les impulsions des partons intervenant lors de l'interaction : on les appelle ainsi Distributions de Partons Généralisées (GPDs), elles dépendent des variables  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $Q^2$  et  $t \equiv (p' - p)^2$ .



Les mesures de section efficace DVCS sont représentées ci-dessus en fonction de  $Q^2$  et  $W \sim Q^2/x_{Bj}$  (à petits  $x_{Bj}$ ). La dépendance en  $W$  caractérise un processus dur :  $\sigma \sim W^\delta$  avec  $\delta \sim 0.75$ , justifiant ainsi les calculs perturbatifs que nous comparons à la dépendance en  $Q^2$ . En particulier, le modèle de Freund et al intègre les GPDs évoluées au NLO. Si ces mêmes calculs avaient été réalisés en remplaçant les GPDs par les distributions standards (avec  $x_1=x_2$ ), la prédiction obtenue pour  $\sigma_{DVCS}$  seraient quatre fois plus petite.

La sensibilité aux GPDs est donc clairement établie par ces mesures à petits  $x_{Bj}$  ( $x_{Bj} < 0.01$ ). L'objectif est maintenant d'extraire ces nouvelles fonctions progressivement.

Dans un premier temps, la mesure de la pente en  $t$  est accessible via  $\sigma_{DVCS}$  (H1 et ZEUS) et l'amplitude des asymétries de spin (HERMES, JLab). Ces asymétries sont par ailleurs une étude essentielle pour déterminer directement (i.e. sans convolution) les GPDs sur la droite  $x_2=0$  (avec les notations des diagrammes ci-dessus). De premiers résultats ont déjà été obtenus.

Dans un second temps, la mesure des asymétries de charge  $\equiv \sigma(e^+p) - \sigma(e^-p)$  par ces collaborations permettrait de contraindre un terme récemment introduit dans l'expression des GPDs et qui assure les conditions dites de polynomialité de ces dernières : le « D-term ».

Enfin, les théoriciens proposent des modélisations différentes des GPDs suivant le domaine cinématique considéré. La complémentarité des expériences à petits  $x_{Bj}$  : H1, ZEUS et des expériences sur cible fixe ( $x_{Bj} > 0.01$ ) : HERMES, JLab, COMPASS est donc essentielle pour préciser la forme fonctionnelle des GPDs. Par ailleurs, notons que dans le domaine des grands  $x_{Bj}$ , l'expérience COMPASS proposera un régime favorable à la mesure de  $\sigma_{DVCS}$ , du fait de la grande énergie du faisceau de muons (100-200 GeV).

Une analyse combinée permettra ainsi dans le futur d'extraire les GPDs pour la première fois sur un large domaine cinématique.

## II. Prospectives pour QCD au Tevatron et au LHC

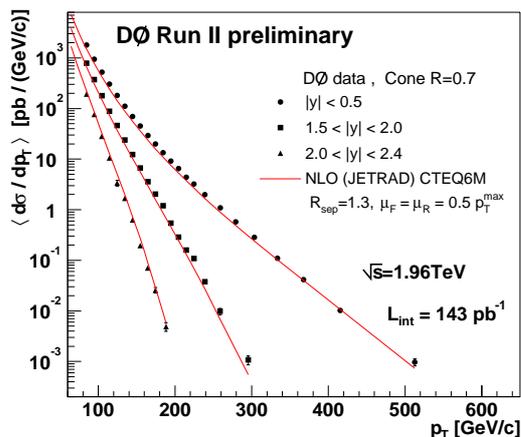
### 1. Physique des jets

Le domaine de l'étude des jets est un domaine particulièrement fondamental de QCD à haute énergie. La mesure de la section efficace de production des jets au Tevatron, par exemple dans l'expérience D0 où l'IN2P3 et le CEA participent, permet de tester QCD dans un grand domaine cinématique en mesurant des jets d'impulsion transverse comprise entre 50 et 800 GeV, dans différents domaines de rapidité (la rapidité  $\eta = \log(\tan(\theta/2))$  est directement reliée à l'angle  $\theta$  de production du jet dans le détecteur). La figure 1 donne par exemple la section efficace inclusive de production de jets mesurée par la collaboration D0 en fonction de l'impulsion transverse des jets. Tester QCD dans ce grand domaine de rapidité et mesurer la section efficace de production des jets sur dix ordres de grandeur permet d'améliorer la connaissance des distributions de partons (quarks et gluons) en particulier à grand  $x$  où  $x$  désigne la fraction d'impulsion emportée par le parton qui interagit. Par exemple, la densité de gluons à grand  $x$  est très mal connue. Cette activité est la suite naturelle de mesures effectuées par la collaboration H1, à DESY, Hambourg, concernant la structure du proton. La figure 2 présente la mesure de la fonction de structure du proton réalisée par les expériences H1 et ZEUS, en continuité avec les expériences réalisées sur cible fixe au CERN (BCDMS, NMC). La fonction de structure du proton est directement reliée à la structure en quarks et gluons du proton, et la grande précision de ces mesures permet une détermination des distributions de partons dans un grand domaine cinématique.

La connaissance précise des distributions de partons est indispensable pour la recherche en physique des interactions fondamentales au-delà du modèle standard (par exemple particules supersymétriques, les dimensions supplémentaires, la technicouleur), car la production de jets est souvent un bruit de fond pour ce type de recherche qu'il faut connaître avec précision. Ces mesures se poursuivront à la fois au Tevatron (expérience D0), et au LHC (expériences ATLAS et CMS).

Au Tevatron, un exemple intéressant, qui représente un test de QCD, est la mesure de l'angle azimuthal entre les deux jets les plus énergétiques produits lors de l'interaction. L'avantage de ce type de mesure est qu'il est moins sensible à la détermination de l'échelle absolue des énergies dans les détecteurs (la mesure des angles est souvent plus facile). Cette mesure peut être comparée aux prédictions de QCD à l'ordre des logarithmes sous dominants en cours d'étude, et est sensible à des effets d'ordre supérieur.

La mesure de la section efficace de production des dijets en fonction de leur masse est également intéressante car elle permet, à haute masse, d'être sensible à une sous-structure des quarks (modèles composites). Ce type de mesure est effectuée actuellement au Tevatron et sera également fondamental au LHC.



Des tests de QCD qui sont à la fois effectués au Tevatron et au LHC, sont également la mesure de la constante de couplage "dure"  $\alpha_S$ , les formes et les sous structures des jets en mini-jets.

Fig. 1. Mesure de la section efficace inclusive de production de jets en fonction de leur impulsion transverse comparée à des prédictions de QCD.

## 2. Un nouveau domaine de QCD

Un autre domaine cinématique peut être également testé au Tevatron et au LHC, celui de QCD à grande rapidité (celui des petits  $x$ ) grâce au nouveau domaine en énergie qui peut être atteint avec les nouveaux collisionneurs tels que le Tevatron ou le LHC. Dans ce nouveau domaine d'interaction forte, les densités de partons (spécialement les gluons) deviennent très grandes et la dynamique des gluons devient non linéaire (effet de saturation). L'observation de ce nouveau phénomène au LHC représenterait une découverte fondamentale sur un nouveau régime de QCD.

Différentes observables qui peuvent être mesurées au Tevatron et au LHC permettent d'accéder à ce nouveau domaine cinématique. La mesure de la section efficace de di-jets séparés par un grand intervalle en rapidité, la mesure d'un intervalle en rapidité entre deux jets vide de toute activité hadronique, ainsi que la mesure de la section efficace de mésons vecteurs à grand transfert d'énergie permettent d'approcher ce nouveau domaine. Il est donc fondamental de réaliser ce type de mesure au LHC.

## 3. Diffraction

La diffraction dite dure où les protons (anti-protons) restent intacts après une interaction à courte portée a représenté une partie importante du programme de physique à HERA et actuellement au Tevatron. Ces processus représentent en effet le lien entre la

physique ‘douce’ non perturbative et la physique ‘dure’ où les prédictions perturbatives sont possibles, ce qui permet donc d'explorer les aspects les plus inconnus de QCD, à partir des propriétés connues. La construction de détecteurs dédiés pour ce type de mesure (les ‘pots romains’) qui permettent de détecter les protons très peu déviés par rapport à l'axe du faisceau, ainsi que l'analyse de ce type d'événements est fondamental au Tevatron et au LHC pour comprendre la frontière de QCD perturbative. Les mesures comprennent des analyses aussi différentes que la mesure de la structure partonique de l'objet non coloré lors de l'interaction, la production diffractive de jets, de mésons vecteurs... Les données du Tevatron et du LHC permettront d'accéder à des mesures plus précises de la structure de l'objet non coloré échangé, et donc de comprendre plus en détail les phénomènes fondamentaux de QCD qui expliquent la diffraction.

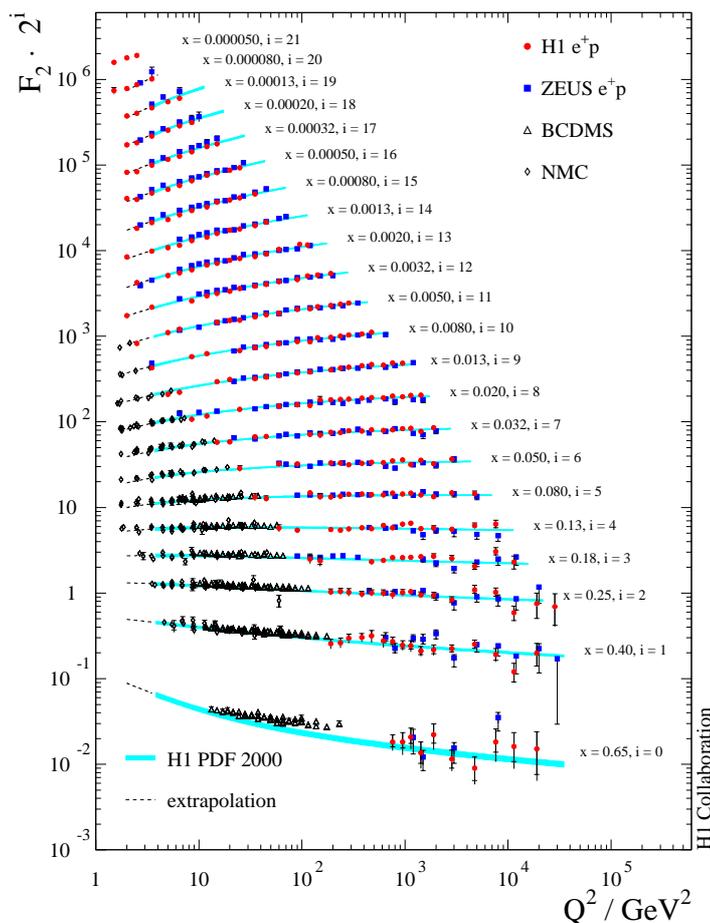


Fig2. Mesure de la fonction de structure  $F_2$  réalisée par les collaborations H1 et ZEUS ainsi que par les expériences sur cible fixe NMC et BCDMS. Les données sont comparées à un ajustement basé sur QCD.

Une nouvelle idée apparue récemment envisage également la production de boson de Higgs au LHC par des processus diffractifs, ce qui permettrait une voie nouvelle de découverte ou l'analyse précise du boson de Higgs. On donne dans la figure 3 le signal divisé par le bruit de fond pour différentes résolutions en masse de bosons de Higgs à titre d'exemple pour différentes fenêtres en masse de mesure.

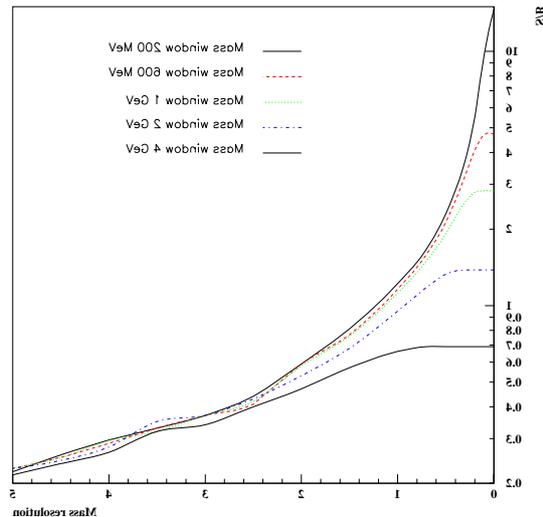


Fig. 3 : Signal divisé par le bruit de fond pour la recherche de boson de Higgs diffractif au LHC pour une masse de boson de Higgs de 120 GeV.

#### 4. Besoins humains et financiers

Le domaine de QCD a été un domaine privilégié en France avec des responsabilités dans les collaborations BCDMS (porte-parole), CDHS, NMC (Marc Virchaux, Alain Milsztajn), H1 (porte-parole: Joël Feltesse), et D0 (coordinateur du groupe QCD: Christophe Royon). Il est donc fondamental de poursuivre ce domaine de recherche en France et de conserver l'expérience acquise, qui bénéficie en particulier d'une collaboration active avec des services de Physique Théoriques en France (qui sont en pointe en particulier dans ce domaine) et à l'étranger.

Les physiciens permanents actuellement impliqués dans cette physique sont : C. Royon, M. Boonekamp, L. Schoeffel (CEA/DAPNIA/SPP), R. Peschanski, E. Iancu (CEA/SPhT), S. Wallon (LPT, Orsay), F. Moreau (Ecole Polytechnique), Z. Zhang, F. Zomer, C. Pascaud (LAL, Orsay).

Les besoins humains représentent des groupes suffisamment forts dans les collaborations D0, ATLAS et CMS, permettant la mesure, l'analyse et l'interprétation des nouvelles données. Dans ce cadre, la collaboration avec les théoriciens du CNRS et de la DSM est fondamentale. La bonne réalisation de ce programme de recherche nécessite donc à la fois des groupes français expérimentaux forts et une bonne collaboration avec les théoriciens. Typiquement, des groupes comportant une dizaine de personnes dans chaque expérience (CMS et ATLAS pour le futur) sur chaque sujet (diffraction, jets, saturation) est nécessaire. Au niveau de la construction des détecteurs, il serait préférable que les expérimentateurs participent à la construction des détecteurs de pots romains utilisés pour la diffraction en plus de la contribution naturelle à la construction des détecteurs principaux ATLAS et CMS.

Du point de vue financier, les besoins sont essentiellement humains et demandent un nombre suffisant de postes et de moyens (missions...) pour soutenir cette activité de recherche. La construction de pots romains au LHC nécessiterait l'addition de 300 k€ pour les deux expériences.

## Les projets de collisionneurs e-RHIC ou ELIC

Le projet eRHIC vise à faire collisionner un faisceau d'électrons polarisés d'une énergie pouvant varier entre 5 et 10 GeV avec le faisceau de protons polarisés de RHIC de 50 à 250 GeV ( $30 \leq \sqrt{s} \leq 100$  GeV). Les performances attendues sont  $\mathcal{L} = 10^{33}$  à  $10^{34}$  et  $P > 70\%$  et le domaine cinématique couvert  $10^{-4} < x < 0.7$  pour  $Q^2 > 1$  GeV<sup>2</sup>. eRHIC fonctionnerait aussi avec des ions de 12 à 100 GeV avec  $\mathcal{L} = 10^{31}$  à  $10^{32}$  par nucléon. Le projet est en cours de discussion et la date possible de démarrage se situe entre 2012 et 2014. Il existe également un projet, ELIC, qui vise à faire collisionner un faisceau de protons polarisés de 30 à 100 GeV avec le faisceau d'électrons polarisés de Jefferson Lab. Mais ce projet ne pourrait voir le jour que vers 2024 et nous ne le discuterons pas plus avant.

Le projet eRHIC est idéal pour la diffusion profondément inélastique polarisée. La fonction de structure  $g_1$  peut être mesurée précisément jusqu'à  $x=10^{-4}$ , ce qui réduirait fortement l'erreur due à l'extrapolation à petit  $x$  qui domine actuellement dans la détermination du premier moment,  $\Gamma_1 = \int_0^1 g(x)dx$ , et donc dans celle de l'élément de matrice singlet axial,  $a_0$ . La règle de somme de Bjorken, prédiction fondamentale de QCD, peut alors être testée avec une précision de 1 à 2%.

La distribution de gluon polarisée,  $\Delta g(x)$  peut être mesurée de la même manière que  $g(x)$  a été mesuré à HERA. C'est à dire à la fois par les violations de scaling de  $g_1(x, Q^2)$  et directement par le processus de fusion du photon et du gluon, cette seconde voie pouvant faire appel à des paires de jets, des paires de hadrons à grande impulsion transverse ou à la production de charme ouvert. Il est prévu d'obtenir une précision sur le premier moment

$$\Delta g(Q^2) = \int_0^1 \Delta g(x, Q^2) dx \text{ de 3 à 5\%}.$$

Cette machine permettrait également de mesurer pour la première fois les fonctions de structure polarisées du photon, d'étendre la mesure de la règle de somme de DHG jusqu'à plusieurs TeV et de mener une étude du DVCS grâce à sa haute luminosité et l'étendue du domaine cinématique couvert. Enfin le fait de disposer pour la première fois d'un collisionneur électron ion permet d'envisager toute une série d'étude comme celle des phénomènes de saturation et des 'color glass condensate'.