

Demande de Création du

Groupement de Recherche

Chromodynamique Quantique

Des physiciens membres de laboratoires français souhaitent se rassembler dans le cadre du Groupement De Recherche *Chromodynamique Quantique* (GDR QCD). Cette structure a pour ambition de fédérer théoriciens et expérimentateurs partageant un intérêt commun pour l'étude de l'interaction forte. Cette structure s'appuiera sur les enseignements et l'expertise acquise dans l'exercice des GDR Nucléon puis PH-QCD, dont elle englobera les thématiques. Elle aura également pour ambition de s'ouvrir à une plus large communauté, afin de partager et de diffuser au maximum aussi bien les questionnements que les outils propres aux différentes thématiques du domaine, qu'il s'agisse des gammes d'énergies mises en jeu, du nombre de degrés de liberté excités, ou encore des concepts théoriques sous-jacents. Cette complémentarité sera notamment traduite par une activité fédératrice importante au niveau de la formation. Le GDR devra jouer un rôle moteur dans les réflexions concernant la prochaine génération de collisionneurs, pour lesquels l'étude de l'interaction forte sera l'un des sujets majeurs.

Table des matières

1.Introduction.....	3
2.Motivations.....	3
3.Objectifs.....	5
4.Organisation.....	6
a.Interactions simples et multiples entre partons dans les nucléons.....	6
b.Physique de la saturation et effets collectifs dans les nucléons et noyaux.....	9
c.Sondes dures et hadronisation des jets.....	11
d.Prospectives sur les observables de l'interaction forte.....	11
e.QCD à basse énergie.....	12
5.Mise en œuvre.....	15
6.Demande budgétaire.....	16
7.Participants.....	17
ANNEXE.....	19

1. Introduction

La Chromodynamique Quantique (QCD), théorie décrivant l'interaction forte et dont la description a été achevée pendant les années 1970, permet de décrire une quantité inouïe de phénomènes naturels à partir d'un nombre restreint de principes et de paramètres physiques bien définis.

L'étude de la structure des protons et neutrons en termes de quarks et gluons s'est révélée un sujet fécond, récompensé par trois Prix Nobel de physique en 1961, 1969 et 1990. Il s'agit à présent d'un domaine scientifique actif avec des problèmes théoriques bien posés et des programmes expérimentaux associés promettant des mesures de grandes précisions.

La liberté asymptotique, cet aspect peu intuitif de l'interaction forte qui voit sa constante de couplage décroître lorsque les distances deviennent petites, est parfaitement comprise théoriquement et vérifiée expérimentalement. Cette découverte a été couronnée par le Prix Nobel de physique en 2004. Elle fournit un outil fécond pour étudier de façon systématique de très nombreux phénomènes pour lesquels une sonde dure est mise en jeu.

A l'inverse, le confinement, propriété remarquable qui stipule qu'aucun quark ou gluon n'est observable isolément, reste une des questions ouvertes les plus profondes de la physique moderne. D'après le prestigieux institut de mathématiques américain CLAY, c'est un des sept problèmes de mathématiques les plus importants à résoudre en ce début de siècle. Des mécanismes théoriques ont été proposés pour expliquer cette observation, mais encore aucun n'a été validé expérimentalement.

2. Motivations

Les études théoriques, expérimentales et phénoménologiques actuelles de l'interaction forte visent donc à comprendre la structure de la matière hadronique constituée de quarks et gluons en interaction, asymptotiquement libres et en même temps confinés. C'est donc un sujet complexe et extrêmement varié, traitant des phénomènes allant de l'étude de la matière déconfinée à très haute température et densité d'énergie telle qu'elle a existé quelques microsecondes après le Big Bang, jusqu'à la structure des nucléons en terme de quarks et de gluons. Le nombre de degrés de liberté mis en jeu peut être très variable, de quelques unités dans le cas des études portant sur la structure tridimensionnelle des hadrons aux énergies intermédiaires, jusqu'à des effets collectifs très non-linéaires dans le cas des études portant sur la matière à très haute densité (plasma quark-gluon, physique de la saturation). Le domaine

d'énergie couvert est très vaste, allant de la physique nucléaire jusqu'aux expériences les plus élevées aux collisionneurs (LHC et projets futurs). Les outils théoriques mis en jeu sont donc multiples (théorie quantique des champs dans les régimes perturbatif et non perturbatif, liens avec la physique statistique, factorisation courte/longue distance). L'étude de l'interaction forte a sa dynamique propre, et vise à une compréhension qualitative et quantitative des différents phénomènes étudiés, en particulier avec les multiples résultats attendus dans les projets en cours ou à venir qui exigent de développer les outils adéquats. En même temps, une compréhension extrêmement fine des effets de l'interaction forte est indispensable pour de nombreuses recherches portant sur la physique du modèle standard (secteur du boson BEH) et la recherche de signaux de nouvelle physique.

Du point de vue expérimental, la communauté française est actuellement très impliquée dans ces recherches :

- Les physiciens français participent activement aux expériences ATLAS, CMS, ALICE et LHCb auprès du LHC, notamment par l'étude des sondes dures, quarkonia et jets, tant dans les collisions pp que dans les collisions d'ions lourds, qui donnent accès aux caractéristiques thermodynamiques du Plasma de Quarks et de Gluons immédiatement après sa production ainsi qu'au phénomène d'écrantage de couleur prédit par la QCD sur réseau.
- Dans le but d'étudier la structure interne des nucléons et la dynamique du confinement des quarks, permettant ainsi d'aborder la question de l'origine du spin et de la masse du nucléon, la communauté française participe à des expériences procédant à la tomographie du nucléon, CLAS et Hall A au *Jefferson Laboratory* (US) et COMPASS au CERN, par l'étude de structure électromagnétique du proton ou de processus exclusifs durs pour accéder à des domaines cinématiques peu ou pas explorés. La constitution des hadrons et leur spectroscopie sont également étudiées avec les expériences HADES au GSI et prochainement à FAIR. La communauté restera également attentive aux développements de l'expérience PANDA à FAIR qui constituera un outil privilégié pour l'étude du confinement des quarks dans les hadrons.
- La France a activement participé aux études des contributions hadroniques à la polarisation du vide, en particulier celles issues de l'exploitation des événements recueillis auprès des collisionneurs e^+e^- avec radiation d'un photon par une des particules mères (expériences Babar ou KLOE), sachant que celles basées sur un scan direct des collisions e^+e^- (expériences CMD-2 ou SND) sont également populaires. L'expertise de notre communauté sera encore valorisée lorsque les prochaines données seront pleinement disponibles à Super Belle, BES III, CMD-3 et SND.
- Enfin, la communauté française participe à des projets de collisionneur électron-ion EIC à haute énergie et luminosité pour des mesures ultra-précises de la structure du nucléon dans une région cinématique où la mer de quarks et gluons domine et où les

phénomènes de saturation sont importants. De manière complémentaire d'autres projets sont envisagés, notamment sur cible fixe, pour étudier la région de valence. Ces études expérimentales vont de pair avec de nombreux développements théoriques fournissant un cadre systématique pour répondre aux questions fondamentales de physique décrites plus haut. En effet, les expériences à venir permettront d'accéder à de multiples informations de façon très précise, mais nécessiteront dans le même temps de développer de nouveaux outils théoriques afin d'inclure de façon systématique à la fois les corrections radiatives et les corrections en puissance de l'énergie de la sonde sans lesquelles les mesures seraient inexploitable. Les équipes de théoriciens et phénoménologues français participent activement et de façon très importante à ces développements analytiques, en lien étroit avec les équipes expérimentales.

3. Objectifs

L'objectif du GDR QCD est ambitieux et novateur. Il a pour but de renforcer la position française à l'avant-garde de l'effort de recherche actuellement consenti sur l'étude du confinement en induisant, pour la première fois, des synergies fortes entre les différentes communautés présentées précédemment. Cette stratégie nouvelle est stimulée par l'observation récente auprès du LHC d'effets collectifs sensibles à haute énergie, dans les collisions noyau-noyau, proton-noyau, mais également proton-proton, ainsi que par la mise au point de nombreuses expériences de basse énergie impliquant les leptons, avec un potentiel fort de découverte de nouvelle physique mais où la prise en compte du confinement des quarks induit une contribution systématique tout à fait cruciale.

Les résultats récents obtenus en physique des hautes énergies placent aujourd'hui le LHC à la croisée des chemins. L'approche *Multiple Parton Interactions* (MPI) telle qu'actuellement envisagée pour interpréter les données du LHC pourrait être fortement enrichie par les connaissances acquises sur la structure du nucléon comme, par exemple, les *Generalized Parton Distributions* (GPD) ou les *Transverse Momentum Dependent Parton Distributions* (TMD), par exemple en ce qui concerne les aspects liés à la physique du spin, la tomographie ou encore les problèmes théoriques liés à la factorisation courte/grande distance. Les TMD interviennent également dans un cadre a priori très différent de la physique semi-inclusive pour laquelle ils ont été introduits, à savoir dans les études concernant la saturation des distributions de partons dans les protons et les noyaux, lors d'une collision à très haute énergie, pour lesquelles la connaissance de l'impulsion transverse des partons est également très importante. Les effets collectifs observés dans les nucléons et noyaux pourraient permettre d'enrichir le socle théorique de l'approche « classique » des *Parton Distribution Functions* nucléaires (nPDF) pour l'étude du Plasma de Quarks et de Gluons, mais aussi de la matière nucléaire froide. D'autres résultats, récemment obtenus sur l'étude de la production

des jets dans les collisions proton-noyau soulèvent des questions sur les processus de fragmentation des jets et par extension sur les mécanismes d'hadronisation. Enfin, ces résultats vont permettre de dessiner le périmètre des futures recherches à la fois dans le régime de la mer de quark et de gluon et dans le régime de valence.

Au-delà de leur intérêt intrinsèque, ces études peuvent avoir des implications importantes dans d'autres domaines, y compris en physique des particules, en particulier parce qu'aucune physique de précision du secteur électrofaible du modèle standard, de même qu'aucune recherche de nouvelle physique, ne peuvent être entreprises sans une connaissance quantitative très fine des effets de QCD. C'est vrai bien entendu dans la gamme d'énergie du LHC mais également pour des expériences du secteur leptonique, de plus basse énergie, qui reste une source riche d'inspirations pour la mise en évidence de physique au-delà du modèle standard : moment magnétique anormal du muon, processus violant la conservation de la saveur leptonique.

4. Organisation

Avec cet objectif ambitieux, l'organisation du GDR QCD a été structurée en cinq thèmes qui impliquent chacun des synergies entre les communautés précédemment présentées :

- a. interactions simples et multiples entre partons dans les nucléons
- b. physique de la saturation et effets collectifs dans les nucléons et noyaux
- c. sondes dures: jets et quarkonia en QCD perturbative et au-delà
- d. perspectives sur les observables de l'interaction forte
- e. QCD à basse énergie

La coordination de chacun des groupes de travail sera effectuée par deux ou trois physiciens, théoriciens et expérimentateurs, afin de faciliter les synergies. L'un des objectifs explicites de cette organisation est de mélanger au maximum des communautés qui ont leurs intérêts propres, afin de conduire à des échanges les plus fructueux possibles.

La coordination générale du GDR sera assurée par ces mêmes 12 membres, assistés de Frédéric Fleuret, Hervé Moutarde et Samuel Wallon qui assureront tous trois la direction collégiale du GDR.

- a. Interactions simples et multiples entre partons dans les nucléons
Coordinateurs : Raphaël Dupré, Hervé Moutarde, Sarah Porteboeuf-Houssais

Les prédictions basées sur les calculs perturbatifs de QCD dépendent de façon cruciale des théorèmes de factorisation. De manière remarquable, il est possible grâce à eux d'utiliser par exemple les PDF mesurées à HERA pour faire des prédictions concernant la production

inclusive du Higgs au LHC. Cependant, les prédictions concernant sa distribution en impulsion transverse demandent une compréhension des effets de QCD incluant la répartition en impulsion transverse des partons mis en jeu. Cet exemple illustre l'importance, pas seulement en tant qu'outil propre à la communauté s'intéressant au contenu partonique des hadrons, de l'étude des distributions allant au-delà des PDF usuelles, qui sont mises en jeu dans les théorèmes de factorisation colinéaires.

De façon générale, les distributions partoniques multidimensionnelles (notamment les GPD et TMD qui sont des objets d'intérêt expérimental actuel) sont des facettes particulières des distributions de Wigner, qui ne sont pour le moment pas accessibles expérimentalement. Les motivations pour l'étude des distributions partoniques multidimensionnelles sont multiples: compréhension des canaux expérimentaux donnant accès à ces distributions, métrologie de ces distributions, compréhension quantitative de la structure des hadrons, utilisation de ces distributions pour prédire des observables d'autres canaux expérimentaux, et compréhension de QCD dans son régime de grande distance.

Les GPD sont des distributions qui corrélient la fraction d'impulsion longitudinale portée par un parton dans un hadron à sa position dans le plan transverse. Elles généralisent naturellement les PDF et facteurs de forme usuels mais vont bien au-delà. Elles offrent un regard neuf sur la structure en spin, énergie et impulsion des hadrons, et rendent envisageable, à moyenne échéance, la réalisation d'images tridimensionnelles expérimentales du contenu partonique des hadrons. Lors de la décennie passée, les mesures pionnières liées à la diffusion Compton profondément virtuelle (DVCS) ou à la production exclusive dure de mésons (DVMP) ont montré la pertinence de ce concept. Associées à des avancées théoriques concomitantes, la phénoménologie des GPD est un thème scientifiquement mûr qui apportera une grande richesse d'informations nouvelles sur le nucléon dans les prochaines années. Le groupe se penchera aussi sur l'utilisation du cadre théorique des GPDs pour étudier la structure en partons des noyaux légers dans le but de décrire les modifications des distributions de partons dans le plan transverse induites par le milieu nucléaire. Rappelons que le mécanisme à l'origine de la modification des distributions de partons dans les noyaux (effet EMC) reste à ce jour une question en suspens dans la communauté.

De manière complémentaire aux GPD, les TMD sont des distributions donnant accès aux distributions des partons dans les hadrons, dans l'espace de leur impulsion transverse, en y incluant leur dépendance en spin. Les observables expérimentales combinent en général ces TMD PDF avec les Transverse-Momentum Dependent Fragmentation Functions (TMD FF). Intégrées sur l'impulsion transverse des partons, elle se réduisent au PDF et Fragmentation Functions (FF) colinéaires usuelles. Pour accéder au contenu en spin, ces TMD doivent également inclure une information aussi bien sur le spin des partons que sur celui des hadrons. Des progrès majeurs ont été accomplis dans la décennie qui vient de s'écouler, notamment grâce à l'étude des diffusions profondément inélastiques semi-inclusives (SIDIS).

De façon surprenante, les TMD PDFs, en particulier gluoniques, apparaissent également dans un contexte très différent, celui de la physique des collisions aux énergies asymptotiques, aussi bien entre hadrons qu'entre noyaux, et font alors apparaître des phénomènes collectifs du type saturation. La communauté théorique française possède une expertise reconnue sur ces sujets, et l'un des buts du GDR sera de faire diffuser les questionnements et les outils entre la communauté dites des énergies intermédiaires, pour laquelle la physique du spin est un enjeu central, avec un nombre réduit de degré de liberté mis en jeu, et celle des énergies asymptotiques, pour lesquels les effets collectifs sont centraux. De nombreux questionnements sont communs à ces communautés : universalité des factorisations colinéaires et/ou à haute énergie, équations d'évolution et leur limitation en fonction de l'énergie mise en jeu et identification d'observables permettant de tester qualitativement et quantitativement ces différentes limites cinématiques dans un cadre unique cohérent.

A l'ère du LHC, en particulier dans son régime de haute luminosité, la probabilité d'interactions multipartoniques multiples dans un même événement devient très élevée. En particulier lorsque l'énergie dans le centre de masse est très grande comme c'est le cas au LHC, les fractions d'impulsion x typiques emportées par les partons en interaction sont très faibles, et donc leurs distributions de probabilités très élevées. De nombreux signaux d'interactions multiples ont été récemment mis en évidence par les différentes collaborations du LHC, ce qui montre l'importance de leur prise en compte dans de nombreuses analyses. La modélisation des distributions multiples de partons mises ici en jeu est un problème ouvert, puisqu'elles ne peuvent s'écrire de façon simple en termes des PDF usuelles. Ces distributions sont sujettes à des effets de corrélation combinant spin, couleur et impulsion. Elles posent également des problèmes de factorisation. L'ensemble de ces questions peut bien entendu être attaqué avec les outils développés par ailleurs dans le cadre des études concernant les GPD et TMD, et seront un enjeu important pour le domaine dans les années à venir. L'objectif sera, en s'appuyant par exemple sur des simulations de type Monte-Carlo, d'obtenir une compréhension théorique et phénoménologique de ces effets à partir des premiers principes.

Aux énergies asymptotiques (aussi bien pour les collisions pp que pour celles mettant en jeu des ions lourds), ces sous-processus multipartoniques sont vraisemblablement reliés aux effets collectifs de type saturation (voir rubrique b ci-dessous). Un cadre conceptuel permettant de décrire ces différents effets n'existe pas pour le moment. Il peut s'avérer crucial, en particulier afin d'identifier correctement les signaux de formation du plasma quark-gluon, le comportement en loi d'échelle en fonction du nombre de masse A des observables étant modifié par les effets multipartoniques.

Un expertise expérimentale et théorique importante existe en France sur plusieurs aspects complémentaires des sujets mentionnés ci-dessus, ce qui permettra à la communauté de jouer un rôle central dans les projets expérimentaux futurs (voir également la rubrique d), dans une très large gamme d'énergies.

b. Physique de la saturation et effets collectifs dans les nucléons et noyaux
Coordinateurs : François Gelis, Franck Sabatié, Ingo Schienbein

Les distributions de partons dans les noyaux (nPDFs) sont étudiées actuellement essentiellement par quatre groupes (EKS, nCTEQ, DSSZ, HKN), et sont beaucoup moins bien connues que celles du proton. Cela rend difficile la séparation d'effets très différents, tels que ceux liés à l'apparition du plasma quark-gluon, aux effets nucléaires ou encore ceux dus aux effets dits de la matière nucléaire froide, qui sont tous susceptibles de modifier les observables clés étudiées dans les collisions d'ions lourds. Une connaissance améliorée des nPDFs est donc très importante pour de nombreux domaines de la physique des particules et de la physique nucléaire :

- L'origine des modifications des PDFs dans un milieu nucléaire complexe, par comparaison à ce qui se passe dans un nucléon isolé, n'est pour le moment pas complètement compris, et l'objet d'importantes études depuis de nombreuses années. De nombreux modèles ont été proposés pour expliquer la suppression des PDFs aux petites fractions d'impulsion x (« shadowing ») et leur augmentation aux valeurs intermédiaires de x (« *anti-shadowing* »), en raison de la superposition respectivement destructive et constructive d'amplitudes de diffusion lorsqu'un projectile diffuse de façon cohérente sur les multiples nucléons qui constituent le noyau. La mise en évidence expérimentale de la suppression des nPDFs aux grandes valeurs de x (effet dit EMC, du nom de l'expérience l'ayant mis en évidence), n'est pour le moment pas comprise, malgré plusieurs décennies d'efforts théoriques. Enfin, dans la limite $x \rightarrow 1$, les effets nucléaires deviennent à nouveau importants avec une amplification, généralement attribuée au mouvement de Fermi des nucléons dans le noyau. Il est important, pour valider ou infirmer les différents modèles existants, et de les améliorer, de pouvoir procéder à une extraction séparée des nPDFs de différents saveurs.
- Une connaissance améliorée des nPDFs sera essentielle pour la prochaine génération d'expériences d'oscillation de neutrinos, puisque reposant sur les interactions neutrino-noyaux pour la détection de ces neutrinos.
- Une meilleure connaissance des nPDFs à très petits x (environ 10^{-7}) sera également indispensable pour mieux comprendre les sections efficaces d'interaction des neutrino d'ultra-haute énergie dans l'atmosphère, comme recherchés par l'expérience AUGER. A de telles valeurs de x , les phénomènes de saturation discutés ci-dessous sont manifestement importants.

Les effets de saturations sont en effet centraux, aussi bien dans la physique des collisions de proton que d'ions lourds aux énergies asymptotiques. Rappelons que les distributions de quarks et de gluons dans un nucléon peuvent être extraites des données de diffusion

profondément inélastique, telles que celles obtenues par le collisionneur HERA. Ces mesures indiquent une rapide augmentation de la distribution de gluons (et dans une moindre mesure, de celle de quarks) lorsque la fraction d'impulsion longitudinale x décroît. De manière équivalente, cela indique que le nombre de gluons augmente si l'énergie augmente. Comme le volume du nucléon est en première approximation constant, cela implique que la densité de gluons augmente dans les mêmes proportions.

Lorsque la densité de gluons devient grande, se produit un nouveau phénomène appelé « saturation », par lequel les gluons se recombinent afin de ralentir la croissance de leur densité. Ce phénomène se produit à plus basse énergie dans les noyaux atomiques du fait du grand nombre de nucléons qu'ils contiennent, et par conséquent on s'attend à ce qu'il joue un rôle important dans les collisions noyau-noyau (telles que celles réalisées dans le programme du LHC).

La théorie des perturbations usuelle est fondée sur le fait que l'on regarde des processus « rares », pour lesquels un seul parton dans chaque nucléon incident participe à la réaction. Lorsque l'on atteint le régime de forte densité, cette condition n'est plus vraie, et le développement perturbatif habituel doit être révisé. Deux améliorations sont nécessaires: (1) le nouveau formalisme doit permettre de calculer des processus dans lesquels un grand nombre de partons dans chaque nucléon incident prennent part à la réaction, (2) le nouveau formalisme doit donner accès aux distributions « multi-partons » dans les nucléons incidents, du type de celles discutée dans la partie a, mais ici dans le régime spécifique aux grandes densités.

A cet effet, une théorie effective fondée sur QCD, appelée « Color Glass Condensate », a été développée au cours des 10 dernières années. Elle est désormais suffisamment mûre pour permettre des applications concrètes à l'étude des collisions hadroniques à haute énergie, ainsi que des collisions noyau-noyau.

Sur le plan phénoménologique et expérimental, de nombreux effets propres à la dynamique de QCD aux énergies asymptotiques peuvent être étudiés à l'aide des phénomènes diffractifs au LHC. La mesure de la section efficace totale à 7, 8 et ensuite 13 TeV est effectuée dans les collaborations TOTEM et ALFA, ainsi que la diffraction molle et la mesure de multiplicité dans ce type d'événements. L'installation de nouveaux détecteurs dans la collaboration CMS-TOTEM ainsi que dans ATLAS (projet AFP) permettra d'effectuer de nombreuses mesures en diffraction telles que les mésons vecteurs, la production de jets, de bosons W et Z, etc, ce qui permettra d'étendre le domaine cinématique couvert à HERA et au Tevatron et de contraindre la structure du Pomeron. Ces nouvelles mesures sont complémentaires de celles effectuées en particulier dans LHCb et Alice sans demander des protons intacts dans l'état final. La haute luminosité du LHC permettra également d'étudier les événements diffractifs exclusifs produits par échange de gluons. Les événements exclusifs sont très particuliers parce qu'ils ne présentent que deux protons intacts dans l'état final et deux jets dans les détecteurs CMS ou

ATLAS, et permettent de contraindre les distributions de gluons non intégrées dans le proton. La production d'événements exclusifs via échange de photons permet également de tester les modèles au-delà du modèle standard comme l'existence de dimensions supplémentaires dans l'univers.

Enfin, l'étude des corrélations entre jets séparés par une grande rapidité relative, dans les événements inclusifs au LHC, fournit une observable de choix pour étudier et comprendre la dynamique de QCD aux énergies asymptotiques. En particulier, les distributions angulaires azimutales, sujettes à des effets de resommation, font l'objet d'études très prometteuses aussi bien au niveau expérimental que théorique.

c. Sondes dures et hadronisation des jets

Coordinateurs : Matthew Nguyen, Andry Rakotozafindrabe, Gregory Soyez

Une propriété fondamentale de la QCD est la liberté asymptotique : à haute énergie, les quarks et gluons deviennent libre et peuvent être traités en théorie des perturbations. Ceci ouvre un vaste champ de recherche et ce GDR entend consacrer à ce domaine un chapitre de ses activités.

Au niveau fondamental, les objets étudiés seront d'une part les jets, manifestations des quarks et gluons aux collisionneurs, dont l'énergie varie de quelques dizaines de GeV à plusieurs TeV, et d'autre part les quarkonia, états liés de quarks lourds où l'échelle de masse laisse miroiter la possibilité d'un traitement perturbatif.

Pour chacun de ces deux objets, de nombreuses questions peuvent être abordées tant en collisions proton-proton, où leur connaissance précise et approfondie est notamment un pré-requis vital pour la recherche de nouvelle physique, qu'en collisions d'ions lourds où la propagation de ces « sondes dures » fournit des informations essentielles sur la structure du plasma quark-gluon (en lien avec b).

Enfin, ce GDR s'intéressera également aux aspects à l'interface entre les propriétés perturbatives et non-perturbatives de ces objets durs (en lien avec a). L'importance des connaissances décrites ici est aussi fondamentale pour la physique aux collisionneurs futurs (cf. d).

d. Perspectives sur les observables de l'interaction forte

Coordinateurs : Cynthia Hadjidakis, Cyrille Marquet, Béatrice Ramstein

Les membres du GDR, avec la communauté internationale de physique hadronique et nucléaire dont ils font partie, envisagent la construction de plusieurs « laboratoires de QCD », de nouvelles expériences qui permettront de répondre aux grandes questions du domaine. En parallèle, la montée en luminosité, puis en énergie, du LHC et les projets de collisionneurs à 100 TeV vont ouvrir la voie à de nouveaux développements pour de nombreuses thématiques

précédemment décrites. Parmi les problématiques importantes, citons notamment, en relation avec les thèmes précédemment décrits:

- Comprendre comment les mouvements tridimensionnels des partons dans un hadron contribuent à son spin. À l'heure où les composantes dues aux spins des constituants, et leur évolution en fonction de l'échelle de résolution, commencent à être précisément établies, cela permettra d'assembler la dernière pièce d'un puzzle vieux de 25 ans.
- Comprendre la dynamique des gluons et leur rôle dans les fonctions d'onde des hadrons et noyaux. Cela permettra, entre autre, de découvrir le mécanisme responsable de la masse de 96% de la matière visible dans l'univers. En effet, si le mécanisme de Higgs permet aux particules élémentaires d'acquérir une masse, cette contribution est négligeable au niveau de la masse des hadrons, et ce sont bien les gluons qui "donnent" leur masse aux hadrons et noyaux.
- Comprendre les propriétés thermodynamiques du plasma de quarks et de gluons (énergie, température, viscosité, ...), et le lien avec les phénomènes collectifs qui en découlent. Alors que les processus durs au niveau partonique deviennent dominants avec la montée en énergie des expériences d'ions lourds, l'étude de la matière déconfinée se diversifie avec de nouvelles sondes expérimentales.
- Raffiner la QCD perturbative (distribution de partons, calculs d'amplitudes, jets boostés, resommations diverses, ...). Avec la montée en énergie, on entre dans un régime où la QCD perturbative ne peut que prospérer, à la fois intrinsèquement, et aussi en terme de nécessité pour la recherche de physique au-delà du modèle standard.

Le groupe de travail "Prospective sur les observables de l'interaction forte" va stimuler les efforts nécessaires pour pérenniser l'implication de notre communauté dans les expériences futures (EIC, FAIR, AFTER, LHeC, HL-LHC, HE-LHC, ILC, FCC, ...) et l'élaboration de leur programme de physique.

e. QCD à basse énergie

Coordinateurs : Benoît Blossier, Marc Knecht

Dans le domaine des basses énergies, la description partonique des hadrons perd sa pertinence. Les phénomènes non-perturbatifs deviennent dominants, notamment la brisure spontanée de la symétrie chirale, qui se matérialise en particulier par la masse très légère du pion.

Des techniques analytiques adaptées à ce régime particulier ont été développées, comme la théorie des perturbations chirales pour les saveurs légères, les développements en inverse de la masse pour les quarks lourds ou encore la méthode des règles de somme spectrales (qui uti-

lise l'expansion de Wilson où les effets non-perturbatifs sont générés par des condensats de dimensions de plus en plus élevées). Ces techniques ont leurs limitations. En particulier, si elles organisent les contributions hadroniques dans des développements systématiques, ces derniers font intervenir des quantités qui contiennent l'information non-perturbative, et qui restent donc à déterminer. Ceci peut se faire, en croisant des données où interviennent ces mêmes quantités, soit en développant des modèles théoriques ou des limites où il est possible d'obtenir des informations (limite de grand nombre de couleurs, limite de faible recul pour les quarks lourds). Dans de nombreux cas, ces quantités peuvent être estimées phénoménologiquement par les règles de somme. Elles peuvent également être calculées à partir de la QCD elle-même, par des simulations numériques sur un réseau d'espace temps. La tâche, une fois atteinte une précision statistique suffisante, consiste alors à maîtriser les limites du continu, du volume infini, et l'extrapolation vers des masses de quarks physiques, afin d'obtenir une estimation aussi fiable que possible des incertitudes systématiques qui en découlent. En outre un effort remarquable est entrepris pour tenir compte dans les simulations des brisures forte et électromagnétique de la symétrie d'isospin pour en évaluer les impacts respectifs sur les quantités hadroniques. Enfin une comparaison détaillée entre les approches numérique et analytique dans le régime infrarouge de la QCD a le mérite soit d'apporter un éclairage sur les résultats analytiques comportant une ambiguïté (solutions multiples des équations de Schwinger-Dyson sur les fonctions de Green de fantômes et de gluons), soit de mieux comprendre la dynamique du vide de QCD (condensats de quarks, avec différents nombres de saveurs dans la mer, et des gluons). Ces mêmes méthodes analytiques (équations de Schwinger-Dyson et de Bethe-Salpeter) offrent un cadre théorique fécond pour modéliser les distributions partoniques décrivant la structure des hadrons mentionnées notamment en a. Les modèles produits par ces outils vérifient par construction toutes les propriétés théoriques attendues, et ont un fort pouvoir prédictif.

Dans le contexte de ce projet de GDR, la découverte de plusieurs hadrons exotiques X, Y, Z (interprétés soit comme des molécules ou comme des états tétraquarks), et très récemment des candidats pentaquarks P_c au LHCb, nécessite des prédictions plus précises de leurs masses et de leur largeur en utilisant soit l'approche sur réseau soit celle des règles de somme de QCD. D'autre part, un intérêt phénoménologique majeur pour la QCD dans le régime des basses énergies est lié à la possibilité de mettre en évidence de la physique nouvelle par des mesures extrêmement précises d'observables bien choisies, comme le moment magnétique anormal du muon. Ce dernier est actuellement mesuré avec une précision relative de 0.54 ppm (un demi-millionième), et deux projets d'expériences, l'une à FNAL, l'autre à J-PARC, envisagent d'améliorer cette précision par un facteur 4 d'ici quelques années. Ce type de mesure de précision représente un véritable défi théorique car, même si le muon est un lepton, les corrections quantiques à son moment magnétique sondent tous les degrés de liberté virtuels, et sont donc affectées, dès l'ordre α^2 , par des contributions hadroniques, qui sont essentiellement dominées par le régime à basse énergie. Actuellement, la comparaison entre la dernière valeur expéri-

mentale obtenue à BNL au début des années 2000, et la prédiction théorique (qui inclut des corrections de QED jusqu'à l'ordre α^5) fait état d'une différence qui est de 2.4 à 3.6 déviations standard, selon les valeurs adoptées pour les corrections hadroniques. La théorie et l'expérience contribuent pour le moment à parts égales à l'erreur qui affecte cette différence. Une amélioration de la mesure expérimentale comme celle envisagée plus haut, ferait donc de la théorie le facteur limitant dans l'interprétation de cette nouvelle expérience en termes de découverte, ou non, de nouvelle physique.

La contribution hadronique à l'ordre α^2 mentionnée plus haut peut être extraite de données concernant la diffusion électron-positron en hadrons. Actuellement, elle est connue avec une précision relative inférieure à 0.5 %, et des améliorations de cette précision sont encore possible avec les nouvelles données qui vont devenir disponibles dans les prochaines années, en particulier à BES III, CMD-3, SND et Super Belle. En attendant, de nombreux efforts sont actuellement entrepris pour en obtenir une détermination, certes moins précise (une précision relative de 5 %, avec des erreurs systématiques fiables, représenterait déjà une percée) à partir de calculs ab-initio de QCD sur réseau.

Ces calculs constituent un banc d'essai pour aborder la contribution hadronique qui apparaît à l'ordre α^3 , et est communément désignée sous le vocable de diffusion lumière-lumière hadronique. En vue de l'interprétation des mesures futures du moment anormal du muon, il conviendrait de déterminer cette contribution avec une erreur relative de l'ordre de 10 %. Cette réduction par un facteur deux de l'erreur relative des déterminations phénoménologiques disponibles aujourd'hui représente un véritable défi et un réel enjeu.

5. Mise en œuvre

Les activités du GDR couvriront une période de quatre années à partir de 2015. Elles s'inscrivent dans un contexte international, et, à ce titre, des experts étrangers pourront être associés aux groupes de travail.

Ces activités seront rythmées par des événements particuliers tout au long de l'année :

- Assemblée plénière : 1 / an
Une réunion de l'ensemble des participants du GDR sera organisée annuellement et permettra à chaque groupe de travail de présenter ses travaux. Elle sera également l'occasion de développer des échanges entre participants ayant des intérêts scientifiques *a priori* éloignés, mais pouvant profiter d'outils ou de concepts communs.
- Ateliers thématiques : 1 / an / thème
Des réunions thématiques et itinérantes seront organisées au cours de chaque année dans le but d'une part de renforcer l'activité de chaque groupe, et d'autre part de diffuser l'activité scientifique au sein et en dehors du GDR. Des réunions de travail, à échelle plus réduite seront organisées au sein de chaque groupe, en fonction des besoins exprimés.
- Formation (école) : 1 / an
Une action annuelle ou bisannuelle de haut niveau, sous la forme d'une école internationale, sera organisée. Sa périodicité dépendra directement des financements disponibles, le budget nécessaire étant assez élevé. Un accord avec nos homologues aux USA impliqués dans le projet EIC est en cours de discussion, ce qui permettrait de passer l'école à un rythme annuel.

6. Demande budgétaire

Ce projet de GDR regroupe aujourd'hui une centaine de personnes, issus de 17 laboratoires français et de 5 laboratoires étrangers ayant des liens très étroits avec des équipes du GDR. La liste précise des personnels impliqués est détaillée dans la section qui suit.

La demande de financement proposée correspond à un exercice annuel dont les dépenses envisagées sont les suivantes :

- Assemblée plénière : (80 personnes dont 25 personnes en mission GDR)
 $25 \times (\text{voyage [200]} + \text{frais de mission 2 nuits [180]}) = 9500 \text{ €}$
- 4 ateliers thématiques ou réunions de travail : (15 personnes dont 8 personnes en mission GDR)
 $4 \times 8 \times (\text{voyage [200]} + \text{frais de mission 1 nuit [90]}) = 9280 \text{ €}$
- Une école internationale d'une semaine :
Couverture des frais de 10 étudiants ou post-docs du GDR y participant
 $10 \times (\text{voyage [200]} + \text{frais de mission 4 nuits [360]}) = 5600 \text{ €}$
Invitation de deux des orateurs étrangers = 3000 €
- Invitation de deux visiteurs étrangers de haut niveau (une semaine) = 3000 €

Soit une demande totale de **30 000 €** demandés conjointement à l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3) et à l'Institut National de Physique (INP).

7. Participants

	laboratoire	thème a.	thème b.	thème c.	thème d.	thème e.
François Gelis	CEA/IPhT		OK	OK		
Edmond Iancu	CEA/IPhT		OK	OK	OK	
Gregory Korchemsky	CEA/IPhT			OK	OK	
David Kosower	CEA/IPhT			OK	OK	
Jean-Yves Ollitrault	CEA/IPhT		OK			
Gregory Soyez	CEA/IPhT		OK	OK	OK	
Alberto Baldisseri	CEA/IRFU/SPhN			OK		
Jacques Ball	CEA/IRFU/SPhN	OK	OK	OK	OK	OK
Yann Bedfer	CEA/IRFU/SPhN	OK		OK	OK	
Javier Castillo	CEA/IRFU/SPhN			OK		
Nicole d'Hose	CEA/IRFU/SPhN	OK	OK	OK	OK	OK
Maxime Defurne	CEA/IRFU/SPhN	OK	OK	OK	OK	OK
Andrea Ferrero	CEA/IRFU/SPhN	OK	OK	OK	OK	OK
Eric Fuchey	CEA/IRFU/SPhN	OK	OK	OK	OK	OK
Michel Garçon	CEA/IRFU/SPhN	OK				
Pierre Guichon	CEA/IRFU/SPhN					OK
Fabienne Kunne	CEA/IRFU/SPhN	OK		OK	OK	
Thibaut Metivet	CEA/IRFU/SPhN					OK
Cédric Mezrag	CEA/IRFU/SPhN	OK	OK	OK	OK	OK
Hervé Moutarde	CEA/IRFU/SPhN	OK	OK	OK	OK	OK
Stéphane Platchkov	CEA/IRFU/SPhN	OK		OK		
Sébastien Procureur	CEA/IRFU/SPhN	OK			OK	
Andry Rakotozafindrabe	CEA/IRFU/SPhN		OK	OK	OK	
Franck Sabatié	CEA/IRFU/SPhN	OK	OK	OK	OK	OK
Bijan Saghai	CEA/IRFU/SPhN					OK
Cédric Lorcé	CPhT	OK			OK	OK
Cyrille Marquet	CPhT	OK	OK	OK	OK	
Stéphane Munier	CPhT	OK	OK	OK	OK	
Bernard Pire	CPhT	OK			OK	
Marc Knecht	CPT					OK
Laurent Lellouch	CPT					OK
Eduardo de Rafael	CPT					OK
Maxime Gouzevitch	IPNL			OK	OK	
Ermias Atomssa	IPNO				OK	OK
Véronique Bernard	IPNO					OK
Marie Boer	IPNO	OK			OK	OK
Jaume Carbonell	IPNO					OK
Gustavo Conesa	IPNO			OK		
Zaida Conesa del Valle	IPNO	OK	OK	OK	OK	
Raphaël Dupré	IPNO	OK		OK	OK	OK
Bruno Espagnon	IPNO				OK	
Michel Guidal	IPNO	OK			OK	
Cynthia Hadjidakis	IPNO	OK	OK	OK	OK	
Ronald Kunne	IPNO	OK			OK	OK
Jean-Philippe Lansberg	IPNO	OK	OK	OK	OK	OK
Dominique Marchand	IPNO	OK			OK	OK
Bachir Moussallam	IPNO				OK	OK
Carlos Munoz	IPNO	OK	OK	OK	OK	OK
Silvia Niccolai	IPNO	OK			OK	
Béatrice Ramstein	IPNO				OK	OK
Hagop Sazdjian	IPNO					OK
Christophe Suire	IPNO	OK			OK	
Ubirajara van Kolck	IPNO					OK
Eric Voutier	IPNO	OK			OK	OK

	laboratoire	thème a.	thème b.	thème c.	thème d.	thème e.
Alexandre Camsonne	JLAB	OK			OK	
Bertrand Ducloué	Jyväskylä	OK	OK	OK		
Christophe Royon	KU		OK	OK	OK	
Jean-Loic Kneur	L2C		OK		OK	OK
Stephan Narison	LUPM					OK
Giulia Manca	LAL	OK			OK	
Patrick Robbe	LAL	OK			OK	
Zhiqing Zhang	LAL				OK	OK
Jean-Philippe Guillet	LAPTh			OK		
Eric Pilon	LAPTh			OK		
François Arleo	LLR		OK	OK	OK	
Frédéric Fleuret	LLR	OK	OK	OK	OK	
Raphael Granier de Cassagnac	LLR	OK		OK	OK	
Matthew Nguyen	LLR			OK		
Maxim Chemodub	LMPT					OK
Nicole Bastid	LPC	OK	OK	OK	OK	
Meriem Benali	LPC	OK	OK		OK	OK
Philippe Crochet	LPC	OK			OK	
Hélène Fonvieille	LPC				OK	OK
Jean-François Mathiot	LPC					OK
Vincent Morénas	LPC				OK	OK
Sarah Porteboeuf-Houssais	LPC	OK		OK	OK	
Maurice Benayoun	LPNHE				OK	OK
Wilfrid da Silva	LPNHE	OK			OK	OK
Frédéric Kapusta	LPNHE	OK			OK	OK
Rachid Guernane	LPSC	OK	OK	OK	OK	
Mariane Mangin-Brinet	LPSC					OK
Ingo Schienbein	LPSC	OK	OK	OK	OK	
Damir Becirevic	LPT				OK	OK
Benoît Blossier	LPT					OK
Philippe Boucaud	LPT					OK
Renaud Boussarie	LPT	OK	OK	OK	OK	OK
Sébastien Descotes-Genon	LPT					OK
Michel Fontannaz	LPT	OK		OK	OK	
Samuel Wallon	LPT	OK	OK	OK	OK	OK
Matteo Cacciari	LPTHE			OK		
Vladimir Karmanov	Lebedev Institute					OK
Lech Szymanowski	NCBJ	OK	OK	OK	OK	OK
Jakub Wagner	NCBJ	OK			OK	
Elena Ferreiro	Santiago	OK	OK	OK	OK	
Marie Germain	Subatech			OK		
Pol-Bernard Gossiaux	Subatech	OK	OK	OK	OK	
Thierry Gousset	Subatech			OK		
Gines Martinez	Subatech			OK	OK	
Stéphane Peigné	Subatech		OK	OK	OK	
Taklit Sami	Subatech			OK	OK	
Alexandre Shabetai	Subatech	OK		OK	OK	

101

51

34

53

69

49

ANNEXE

Le GDR 3034, Chromodynamique Quantique et Physique des Hadrons

Le Groupement de Recherche 3034 (GDR PH-QCD) a fait suite au GDR Nucléon et, tout comme son prédécesseur, a eu pour but de promouvoir les échanges et les collaborations entre physiciens théoriciens et expérimentateurs de notre communauté de Physique Hadronique afin de renforcer son impact national et international. Le GDR PH-QCD a aussi répondu à un souhait de rapprochement entre nos différentes équipes confrontées à des problématiques parfois similaires et souvent complémentaires malgré des domaines d'énergies différentes, motivant en cela un élargissement vers les communautés CMS et ALICE. Le besoin de formation spécialisée des doctorants, post-doctorants, et physiciens de nos communautés a également été un élément majeur de l'action scientifique du GDR. Tout au long de ses quatre années d'existence, le GDR PH-QCD aura su remplir avec un certain succès ses objectifs fondateurs.

La totalité de l'activité scientifique des GDR Nucléon et PH-QCD est consultable en ligne à tout instant à l'adresse <http://lpsc.in2p3.fr/GDR-PH-QCD> qui regroupe l'ensemble des événements et manifestations organisés par les différents groupes de travail qui le constituent.

Le centre d'excellence du GDR PH-QCD aura été la formation avec l'organisation de deux Ecoles Internationales regroupant jusqu'à une soixantaine de participants français et étrangers autour d'orateurs de grande notoriété. Ces Ecoles ont été remarquées au-delà des frontières de notre communauté avec un article publié dans le CERN COURIER (<http://cerncourier.com/cws/article/cern/50568/3>) et de récentes perspectives d'élargissement dans le contexte du projet EIC. La thématique couverte par cette série, centrée sur la QCD et présentant un haut niveau de focalisation scientifique, est unique en France et en Europe.

Le deuxième succès majeur du GDR PH-QCD aura été la promotion des échanges au sein de nos communautés et le soutien des collaborations nouvelles ou existantes. Les réunions plénières annuelles ont permis d'amorcer le rapprochement entre les différentes branches de notre communauté, de susciter l'intérêt scientifique de chacun et de stimuler nos échanges. Par l'intermédiaire des groupes de travail, le soutien financier partiel du GDR à la visite de collaborateurs étrangers ou à l'organisation de réunions de travail aura contribué au développement de travaux en collaboration qui pour la plupart ont conduit à des publications.

Le succès limité du GDR PH-QCD est à rechercher dans les activités thématiques de chaque groupe de travail. La disparité entre la contribution de chacun d'eux à l'animation de la vie

scientifique du GDR peut trouver une explication à la fois dans la rigueur des budgets accordés par nos autorités de tutelles, et le choix d'une organisation structurelle trop linéaire, possiblement mal-adaptée à cette rigueur. Le GDR PH-QCD aura néanmoins dégagé une activité scientifique soutenue, reconnue et appréciée telle que décrite ci-après et détaillée sur son site.

Les GDR Nucléon puis PH-QCD auront contribué à la fédération de notre communauté et au développement de la Physique Hadronique en France, condition minimale nécessaire pour affronter les enjeux représentés par la compréhension de la QCD et les projets de future machine. Malgré un contexte financier défavorable, le GDR 3034 aura su remplir ses objectifs scientifiques et humains, démontrant ainsi expertise et savoir-faire.

Activités Scientifiques des Groupes de Travail

Structure 3D des hadrons (WG1)

L'exercice 2010-14 du GDR coïncide avec l'arrêt des expériences à Jefferson Lab pour la montée en énergie à 12 GeV, et la préparation de l'acquisition de données DVCS à COMPASS. Cette conjoncture a affecté principalement l'étude des Distributions Généralisées de Partons (GPD) et des processus exclusifs durs (DVCS, DVMP, TMD, ...), l'un des axes majeurs des activités de ce groupe. Les acteurs de ces études relatives se sont naturellement dirigés vers l'analyse des données expérimentales précédemment acquises, la construction des détecteurs nécessaires aux expériences et le développement d'outils théoriques ou phénoménologiques pour préparer l'exploitation des mesures futures. Une fraction importante des membres de ce groupe s'est ainsi consacrée à la préparation de l'avenir ou à des analyses de données poussées. La production scientifique associée a systématiquement fait l'objet de présentation lors des assemblées annuelles du GDR.

Il convient également de mentionner les travaux autour des facteurs de forme du nucléon, des distributions de partons (PDF) polarisées (quarks et gluons), des fonctions de fragmentation et des distributions d'amplitude dans les transitions entre hadrons (TDA). Ces objets physiques sont accessibles de diverses manières, et se sont prêtés à des discussions transverses dans le cadre d'ateliers thématiques des groupes WG1 et WG2.

Notons enfin que la thématique de ce groupe a été l'un des sujets majeurs des deux Ecoles Internationales QCD organisées par le GDR.

Processus électromagnétiques de diffusion et d'annihilation (WG2)

La période 2010-14 a vu le développement d'une activité riche et productive avec la tenue de plusieurs ateliers thématiques ou transversaux.

Suivant son principe directeur basé sur les symétries de croisement, l'activité de ce groupe s'est attachée au développement d'une vision unifiée des processus d'annihilation (e^+e^- ou $p\bar{p}$ dans l'état initial) et de diffusion (faisceaux d'électrons, de muons ou de hadrons sur cible nucléaire fixe), dont l'exemple-type est celui des réactions ($e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$), ($p\bar{p} \rightarrow e^+e^-$) et ($ep \rightarrow ep$) donnant accès aux facteurs de forme du nucléon dans les régions temps et espace. Les ateliers et réunions de travail du groupe ont ainsi brassé un large spectre d'études expérimentales et théoriques, allant des interactions proton-antiproton (projet PANDA à FAIR) aux interactions électron-positron (Babar, Belle, BES III) en passant par les expériences de diffusion en faisceaux de hadrons (Hades, COMPASS) ou d'électrons (JLab, MAMI).

Un thème central de travail est la détermination des facteurs de forme électromagnétique du proton dans la région temps avec le détecteur PANDA à FAIR. Le GDR a accompagné le développement des activités liées à ce projet, notamment sur les simulations, les optimisations du programme de reconstruction, les études de bruit de fond hadronique, etc... Un autre canal électromagnétique d'intérêt au sein de notre communauté est la réaction $p\bar{p} \rightarrow e^+e^- \pi^0$ donnant accès aux distributions d'amplitude de transition (TDA), complémentaires des GPD, et aux facteurs de forme du nucléon dans la partie « non-physique » de la région temps. Enfin, les corrections radiatives aux processus d'annihilation et de diffusion ont fait l'objet non seulement d'états des lieux réguliers au cours de ces quatre ans, mais aussi d'un atelier général dédié, notamment en liaison avec les expériences actuelles testant la contribution des mécanismes d'échange de deux photons ou visant à résoudre le problème du rayon de charge du proton.

Chacun des ateliers du groupe a regroupé de 20 à 40 participants venant de nombreux pays (France, Italie, Allemagne, Ukraine, Russie, USA, Chine...), et qui auront pu bénéficier de la forte interaction entre expérimentateurs et théoriciens présente au sein du GDR.

QCD dans les collisions pA et AA (WG3)

La période d'activité du GDR PH-QCD a vu une énorme quantité de résultats produite par les expériences du LHC s'intéressant aux collisions d'ions lourds (ALICE, ATLAS, CMS, et même LHCb en collisions pPb). Le GDR a contribué significativement à la dissémination et à la discussion de ses résultats, au sein de ses réunions plénières. Il compte en son sein des membres de CMS, ainsi que des théoriciens de la discipline, et s'est rapidement ouvert aux expérimentateurs d'ALICE. La quasi-totalité des résultats concernant les quarkonia dans ALICE et CMS ont été produits par des chercheurs français, discutés au sein du GDR, et interprétés par certains de ces membres, tels par exemple les résultats concernant la perte d'énergie des jets. Des revues critiques de l'ensemble des résultats expérimentaux ont également été présentées.

Collisionneurs électron-ion et expériences futures (WG4)

Les activités de ce groupe furent d'une part axées sur le projet de collisionneur électron-ion aux USA (EIC), et d'autre part sur les projets d'expériences sur cibles fixes de nouvelles générations (AFTER, CHIC, NA60+).

Les activités en rapport avec le projet EIC se sont focalisées sur la formation des physiciens, jeunes comme seniors, lors des deux écoles organisées par le GDR. La participation des membres du GDR aux nombreux workshops internationaux dans le cadre de la collaboration EIC (série de conférences POETIC, workshops dédiés, user meeting EIC, ...) ont contribué à la visibilité des groupes français dans le développement de ce futur accélérateur. Les travaux de la communauté réunie autour d'EIC ont débouché sur l'écriture d'un *white paper* où le GDR est par ailleurs explicitement mentionné dans la liste des sponsors.

Les nouveaux projets sur cibles fixes au CERN ont été l'occasion d'une activité intense au sein de ce groupe, en particulier en direction des projets CHIC et AFTER qui ont été au centre de nombreuses réunions d'envergure internationales dont le détail est disponible sur le site du GDR. Elles ont rassemblés de 20 à 50 participants sur des durées de 1 à 10 jours, résultat remarquable compte-tenu des moyens disponibles. Ces efforts se sont concrétisés en la soumission au SPS d'une lettre d'expression d'intérêt pour le projet CHIC, et ont initié l'idée d'une soumission au LHCC d'une lettre d'expression d'intérêt pour le projet AFTER. Les travaux de simulations et de synthèse réalisés lors de deux ateliers à Trento et aux Houches ont de plus généré de nombreuses présentations lors de conférences internationales.

Activités de Formation du GDR PH-QCD

La formation est au centre des motivations de l'existence du GDR et ses écoles bi-annuelles ont acquis au cours de cet exercice un niveau d'excellence et une dimension internationale, tant du point de vue des participants que des orateurs. Ces écoles se sont attachées à la discussion de problèmes à l'avant-garde de notre physique, dans un souci de pédagogie accessible à tous et ont remporté un très vif succès.

Le programme scientifique de l'école *QCD prospects for future ep and eA colliders* était centré sur les grandes questions de physique au cœur des grands projets de collisionneurs électron-proton et électron-ion, actuellement à l'étude aux USA et en Europe. Les aspects théoriques et phénoménologiques ont été discutés avec quatre orateurs principaux parmi les meilleurs experts mondiaux du sujet : Alfred Mueller (Columbia University, New York (USA)), Piet Mulders (Vrije Universiteit, Amsterdam (Pays-Bas)), George Sterman (Stony Brook University, Stony Brook (USA)) et Marc Vanderhaeghen (J. Gutenberg Universität, Mainz (Allemagne))

La ligne directrice de l'école *Correlations between partons and nucleons* a été la notion de corrélations dans les protons et neutrons : corrélations entre quarks et gluons dans les diffusions multiples, mais aussi corrélations entre des assemblages denses de gluons, et corrélations entre le spin du proton, les positions, quantités de mouvement et spins des quarks et gluons. L'école avait pour objectif d'offrir une revue pédagogique des différents outils théoriques ainsi qu'une vue prospective sur les connaissances expérimentales associées. Similairement à l'école précédente, les cours étaient de très haut niveau, avec un équilibre entre experts senior de tout premier plan au niveau international et plus jeunes orateurs à l'expertise déjà reconnue internationalement : Marco Stratmann (Universität Tübingen (Allemagne)), Markus Diehl (DESY, Hamburg (Allemagne)), Cédric Lorcé (IPNO, Orsay (France) and IFPA Liège (Belgique)), Raju Venugopalan (Brookhaven National Laboratory and Stony Brook University (USA)), Leif Lönnblad (Lund University (Suède)), and Abhay Deshpande (Stony Brook University (USA)).