



Institut national de physique nucléaire et de physique des particules

RENOUVELLEMENT D'UN GROUPEMENT DE RECHERCHE

Intitulé du GDR: Chromodynamique Quantique

Acronyme: QCD

Équipe de direction:

Directeur: Carlos Munoz Camacho (IN2P3)

Directeur adjoint: Cyrille Marquet (INP)

Représentant du CEA: Michael Winn (IRFU)

Institut de rattachement principal et instituts secondaires

Principal: IN2P3

Secondaire: INP

Section(s) de rattachement du comité national en vue d'une évaluation : Sections 01 et 02

BILAN SCIENTIFIQUE

Le Groupement de Recherche 3753 (GDR QCD) a fait suite au GDR Nucléon puis au GDR PH-QCD. De façon notable, il a été construit, et ce pour la toute première fois, de façon à rassembler l'ensemble de la communauté expérimentale et théoricienne active dans la compréhension de l'interaction forte, quels que soit les sujets d'étude, les expériences concernées ou les méthodes théoriques utilisées. Comme ses prédécesseurs, le GDR QCD a eu pour but de promouvoir les échanges et les collaborations entre physiciens théoriciens et expérimentateurs de notre communauté de physique hadronique et physique des particules afin de renforcer son impact national et international.

La totalité de l'activité scientifique du GDR QCD est accessible à l'adresse http://pperso.th.u-psud.fr/page_perso/GDRQCD/ qui regroupe l'ensemble des événements et manifestations organisés par les cinq groupes de travail qui le constituent.

Une part significative du budget du GDR a été réservée à la formation des jeunes physiciens. Ceci concerne au premier chef les deux écoles QCD maintenant organisées en alternance sur le site d'Orsay et sur le site de Saint-Jacut-de-la-Mer. L'Ecole Internationale QCD organisée à Orsay a été lancée par le GDR PH-QCD en 2012, et a lieu tous les deux ans. C'est un événement central pour le GDR QCD, qui a soutenu les éditions 2016 et 2018. Ces éditions, essentiellement théoriques, ont regroupé des participants théoriciens et expérimentateurs, venant de France, et au-delà d'Europe, d'Asie et d'Amérique.

L'édition 2016, « Dense systems in QCD at asymptotical energies » était consacrée aux différents phénomènes collectifs apparaissant dans les hadrons et les ions lourds à très haute énergie, en particulier dans les collisions ep et eA , telles qu'envisagées dans les projets LHeC et EIC. Couvrant aussi bien les aspects formels que phénoménologiques, elle a regroupé 47 participants.

L'édition 2018, « QCD meets precision » était consacrée aux développements les plus récents concernant la description des processus durs en QCD à l'aide de la factorisation courte/longue distance, aussi bien concernant les approches formelles (corrections en puissance, factorisation non relativiste adaptée à la production de quarkonia) que phénoménologiques (Monte Carlo, physique des jets). Elle a regroupé 39 participants.

Le GDR a également soutenu, depuis sa seconde édition, la « QCD Master Class », soit les éditions 2017 et 2019.

Outre cet aspect formation, absolument central pour le GDR, le second succès majeur du GDR QCD a été la promotion des échanges au sein de nos communautés et le soutien des collaborations nouvelles ou existantes. Les réunions plénières annuelles ont accentué le rapprochement entre les différentes branches de notre communauté, ont suscité l'intérêt scientifique de chacun et ont stimulé nos échanges sur des thématiques transverses. On peut citer comme exemple l'étude et la compréhension des effets nucléaires froids pour lesquels les communautés de la sonde électromagnétique (Jlab, COMPASS, EIC) et des collisions pp, pA et AA sont très complémentaires, partageant les mêmes questionnements scientifiques et les mêmes outils théoriques (avec souvent les mêmes théoriciens dans les deux communautés...). Par l'intermédiaire des groupes de travail, ou à l'occasion des écoles jouant un rôle d'attracteur pour les experts du sujet, le soutien financier partiel du GDR à la visite de collaborateurs étrangers ou à l'organisation de réunions de travail a contribué au développement de travaux en collaboration, ayant conduit à des publications. Ces échanges sont en particulier importants dans cette phase de réflexion sur le futur de la discipline, en particulier le futur du programme d'ions lourds au LHC et le projet de collisionneur EIC qui est maintenant acté par le DOE américain.

Le GDR QCD contribue fortement à la fédération de notre communauté et au développement de la physique hadronique et de la physique des particules en France, dans tous ses aspects, allant de la physique nucléaire de haute énergie jusqu'à la physique des particules de très haute énergie, avec une multitude d'outils théoriques, pour la première fois rassemblés dans une structure unique. Chaque communauté au sein du GDR a bien sûr ses propres intérêts scientifiques et sa propre structuration, mais il est indéniable que les réunions organisées par le GDR représentent un lieu unique pour faire se rencontrer très régulièrement ces communautés, ce qui est déjà en soi un grand succès. Ces rencontres permettent également aux étudiants en thèse ou aux post-doctorants de présenter leurs travaux et ainsi de se faire connaître auprès de leurs pairs, y compris en poste à l'étranger, le GDR entretenant des liens étroits avec de nombreuses équipes en dehors de la France. Ceci représente un pendant naturel à l'aspect formation discuté plus haut, encore une fois central pour le GDR.

Le GDR QCD a su remplir ses objectifs scientifiques et humains, démontrant ainsi expertise et savoir-faire, malgré un contexte financier difficile, et malgré la difficulté de rassembler des communautés assez éloignées, à la hauteur de la reconnaissance scientifique internationale dont bénéficie la communauté française en physique expérimentale et en théorie.

Activités Scientifiques des Groupes de Travail

a- Interactions simples et multiples entre partons dans les nucléons

Ce groupe, assez transverse, associe des questions sur la structure des nucléons aussi bien que sur les interactions multiples au LHC et couvre les aspects allant des interactions partoniques simples aux interactions partoniques multiples. Cette thématique est particulièrement riche puisqu'elle couvre l'ensemble des aspects de la tomographie multidimensionnelle et en spin des nucléons, depuis les quantités mono-dimensionnelles que sont les facteurs de forme ou les distributions de partons (PDF), les distributions tridimensionnelles en position transverse et en impulsion longitudinale (distributions de partons généralisées : GPD) ou en impulsion transverse et longitudinale (distributions en impulsion transverse : TMD), jusqu'aux distributions de Wigner (5D), objet ultime d'étude dont l'intérêt n'a fait que croître pendant la durée du GDR. Elle couvre également la thématique émergente, dans le contexte des processus à haute luminosité au LHC, des processus multi-

partoniques où le processus élémentaire ne se réduit pas à l'interaction de deux partons, mais à plusieurs paires de partons, et concerne l'ensemble des 4 grandes expériences du LHC. La part des contributions de ces processus multi-partoniques est importante dans de nombreux contextes, aussi bien dans les collisions pp que dans les collisions d'ions lourds.

Sur l'ensemble de ces aspects, de nombreuses rencontres, dans des ateliers dédiés ou en séances plénières, ont permis d'échanger des idées, en particulier entre théoriciens et expérimentateurs. Ainsi, il est maintenant clair expérimentalement, sur les aspects concernant la tomographie, que la définition d'observables de précision afin d'extraire les différentes distributions mises en jeu, exige d'une part de prendre en compte les corrections radiatives, aussi bien pour les GPD que les TMD et de développer les codes automatisés correspondants (voir l'exemple de la plateforme *PARTONS*), et d'autre part de prendre en compte les corrections en puissance pour les processus exclusifs mettant en jeu les GPD. Un point très fort de cette thématique est que l'ensemble des sujets, aussi bien théoriques qu'expérimentaux, sont couverts par la communauté française, avec à chaque fois un impact de premier plan au niveau international, malgré le nombre relativement réduit de chercheurs permanents, en décroissance en raison de nombreux départs en retraite et du faible nombre de recrutements. Ceci se ressent particulièrement sur les récents développements concernant les distributions de Wigner, où l'expertise théorique venant d'une part des processus exclusifs ou semi-exclusifs, et d'autre part des processus où la saturation gluonique se manifeste (voir ci-dessous la thématique (b)) a donné lieu à des échanges de très haut niveau, au sein des Ecole QCD ou des sessions plénières. On notera également les récents résultats expérimentaux obtenus sur la mise en évidence expérimentale d'une factorisation avec distributions d'amplitude dans les transitions entre hadrons (TDA), fruit d'une longue suite d'échanges, de très longue haleine, entre théoriciens et expérimentateurs du GDR, au sein d'abord du GDR PH-QCD puis de ce GDR QCD.

Sur cette thématique, beaucoup de questions pourront être abordées expérimentalement dans le cadre du futur projet EIC, ce qui a fait l'objet d'un très grand nombre de discussions et d'invitations au sein du GDR.

Notons enfin que la thématique de ce groupe a été l'un des sujets majeurs de l'Ecole Internationale QCD organisées par le GDR en 2018. Elle devait également, partiellement, être celle de la session 2020, malheureusement annulée à cause du COVID.

b. Physique de la saturation et effets collectifs dans les nucléons et noyaux

Dans les collisions à très haute énergie, au sein des hadrons ou des ions, des effets fortement non linéaires apparaissent, en raison de la très grande densité de gluons, qui rendent leur recombinaison compétitive avec leur multiplication, ce qui conduit à une saturation des distributions gluoniques à haute énergie, dans un état particulier appelé "condensat de verre de couleur" (CGC - Color Glass Condensate). La dynamique de ce CGC est potentiellement accessible par des méthodes perturbatives, si l'échelle de saturation est suffisamment grande devant l'échelle de confinement. La fenêtre perturbative entre ces deux échelles est d'autant plus large que l'énergie dans le centre de masse est grande, et que le nombre de nucléons dans le noyau est élevé. En dehors de son intérêt propre, cette saturation gluonique est l'un des effets nucléaires froids (par ailleurs, le passage des PDF du proton aux PDF des noyaux met en évidence d'autres effets collectifs qui ont fait l'objet de nombreux échanges au sein du GDR) à prendre en compte dans la description de l'état initial dans les collisions d'ions lourds, avant de pouvoir mettre en évidence et comprendre les manifestations de la formation du plasma quark-gluon (QGP) (effets nucléaires chauds). Pendant la durée du GDR, il est apparu clairement que la mise en évidence et la compréhension des effets de la saturation gluonique au sein des hadrons et des ions dans les collisions à très haute énergie nécessitent une physique de précision, à l'ordre des logarithmes sous-dominants resommés. Plusieurs résultats de premier plan ont été obtenus sur ce sujet par différentes équipes participant au GDR. Les discussions au sein du GDR ont fortement bénéficié d'une part d'échanges entre théoriciens, et d'autre part

d'échanges entre théoriciens et expérimentateurs, en particulier dans la recherche de processus exclusifs (voir également la thématique (a)), permettant de définir des observables de précision pour étudier le CGC, avec de nouvelles perspectives récentes offertes par les processus ultra-périphériques au LHC. L'ensemble de ces discussions a bénéficié de l'expertise unique des différentes équipes du GDR sur les très nombreux aspects mis en jeu. Par ailleurs, de nombreuses discussions ont eu lieu sur les possibilités offertes par le futur projet EIC, grâce à la fenêtre perturbative sur la saturation offerte par les collisions sur des noyaux très lourds.

Notons enfin que la thématique de ce groupe était le sujet majeur de l'Ecole Internationale QCD organisées par le GDR en 2016 et de l'Ecole QCD Master Class 2017. Elle devait également partiellement être celle de la session 2020, malheureusement annulée à cause du COVID.

c. Sondes dures : jets et quarkonia en QCD perturbative et au-delà

Les mécanismes de production des jets d'une part, des quarkonia d'autre part, font partie des questions difficiles abordables par des méthodes perturbatives, permettant d'une part de comprendre la dynamique de QCD, et d'autre part avec des implications très fortes au niveau expérimental, aussi bien comme sonde du QGP qu'en physique de précision, dans les recherches de signaux de nouvelle physique pour ce qui est de la physique des jets. Dans ces deux thématiques, le GDR possède une expertise de premier plan aussi bien au niveau théorique qu'expérimental. Des résultats importants ont été obtenus pendant la durée du GDR, qu'il s'agisse de la façon d'extraire de l'information en disséquant l'intérieur d'un jet, ou de mener de la physique de précision à l'aide des quarkonia, avec une foison de résultats expérimentaux obtenus par les grandes collaborations du LHC. Le GDR a soutenu plusieurs conférences ou ateliers sur le sujet. D'autre part, des échanges fructueux ont eu lieu avec les participants des autres thématiques lors des différentes sessions plénières du GDR.

Notons enfin que la thématique de ce groupe faisait partie des sujets couverts par les sessions 2016 et 2018 de l'Ecole Internationale QCD organisées par le GDR et des Ecole QCD Master Class 2017 et 2019.

d. Prospectives sur les observables de l'interaction forte

Pendant la durée du GDR, de très nombreuses réflexions ont été menées sur le futur de la discipline du point de vue expérimental. D'une part, des discussions particulièrement importantes ont lieu concernant le futur des 4 grandes expériences en mode collisionneur au LHC au-delà du Run4, qui impactent directement la physique de l'interaction forte : dynamique du QGP (diagramme de phase, coefficients de transport, perte d'énergie dans la matière nucléaire, etc.), en particulier dans les petits systèmes en mode pp et pA, saturation gluonique, etc. afin que la thématique y ait pleinement sa place, dans un contexte de recherche de nouvelle physique gouvernée de facto par l'augmentation de luminosité et donc avec un taux d'empilement élevé. Un exemple édifiant est fourni par le détecteur ALICE, qui ne pourra plus être opérationnel dans son état actuel au-delà du Run4. Des projets originaux concernant ce détecteur ont été pour la première fois présentés au sein du GDR. Par ailleurs, l'exemple de SMOG à LHCb a explicitement démontré l'intérêt et la faisabilité d'expériences sur cible fixe au LHC, telle que proposée dans les projets de type AFTER, largement discutés au sein du GDR. Des mesures des saveurs lourdes et radiation thermique dans des collisions ion-ion ont été proposées pour la première fois dans le cadre du GDR QCD. Belle-2 offre de nombreuses possibilités en physique des quarkonia et en recherche d'états liés exotiques. Les perspectives ouvertes par la future machine FAIR à Darmstadt pour les études de matière hadronique riche en baryons (HADES et CBM) et de physique hadronique en réactions proton-antiproton (PANDA) ont été aussi discutées. Des réflexions ont également lieu sur le futur de COMPASS. Enfin, déjà comme mentionné à plusieurs reprises, de nombreuses réflexions ont lieu sur l'implication de la communauté expérimentale et théorique autour du futur projet EIC, couvrant à peu près l'ensemble des thématiques du GDR.

De nombreux membres du GDR sont par ailleurs fortement impliqués dans les réflexions stratégiques autour de la discipline (perspectives européennes ; exercice de prospective nationale en physique nucléaire, physique des particules et astroparticules), et le GDR QCD fournit indéniablement un excellent cadre, source d'inspiration et lieu de discussions pour ces réflexions. Les multiples échanges au sein du GDR ont démontré la très grande complémentarité entre les communautés ep/eA d'un côté, pp, pA, AA de l'autre, et il est maintenant clair, le GDR y ayant sans aucun doute contribué, que de nombreuses questions ouvertes en interaction forte ne pourront être résolues sans une solidarité et une avancée de front des deux communautés. Cela devient particulièrement manifeste avec le fait que plusieurs permanents de la communauté des ions lourds ont explicitement témoigné de leur intérêt de participer à EIC.

e. QCD à basse énergie

L'une des forces du GDR QCD est maintenant de couvrir l'ensemble des gammes d'énergie où le lagrangien de QCD fait directement sens, les degrés de liberté fondamentaux (quark, gluon) étant pertinents. A basse énergie, la communauté française possède une expertise de tout premier plan, qu'il s'agisse d'obtenir des résultats sur la dynamique de QCD en tant que telle, ou de fournir des éléments de matrice non perturbatifs, en physique de précision du modèle standard, avec ici pour objectif d'obtenir des signaux de nouvelle physique. Parmi de multiples questions non résolues en QCD, la plus intrigante est sans doute celle du confinement. Elle ne peut par essence être attaquée par des méthodes perturbatives, mais différentes méthodes construites à partir des premiers principes permettent néanmoins d'obtenir des résultats : théorie des perturbations chirale, approche Schwinger-Dyson, QCD sur réseau. Parmi ces différentes techniques, la seule ayant atteint un niveau de précision inégalée, à partir des premiers principes, est la QCD sur réseau. Pendant la durée du GDR, des progrès très importants ont été faits dans différentes directions. Citons, parce qu'elle sont transverses, les nouvelles méthodes permettant de calculer à partir des premiers principes les PDF et à terme des distributions telles que GPD, TMD, etc., voir thématique (a), avec pour la première fois un ensemble de résultats les validant. Différentes réunions ont permis d'échanger sur ces nouvelles techniques, en interaction avec la thématique (a). Par ailleurs, des réunions spécifiques ont été organisées sur l'un des sujets phares en physique de précision, à savoir la mesure du moment magnétique anomal du muon, $(g-2)\mu$, et sa description dans le cadre du modèle standard. La précision théorique actuelle est limitée par la connaissance des contributions hadroniques, de deux types : polarisation du vide et diffusion photon-photon. La communauté QCD sur réseau française participe activement à ces recherches visant à déterminer ces éléments de matrice à partir des premiers principes, et des résultats de premier plan ont récemment été obtenus, qui pourraient potentiellement réduire l'écart inexplicé (sauf à faire appel à de la nouvelle physique) entre théorie et expérience.

En QCD sur réseau, l'expertise numérique développée est de tout premier plan, mais ce n'est bien sûr par la seule thématique en QCD où les aspects numériques sont centraux. Une initiative lancée par la thématique (e) a consisté à organiser deux ateliers transverses au GDR, dédiés aux aspects numériques en QCD, et même au-delà. Avec des ouvertures vers les simulations en physique statistique et en machine learning, ces ateliers ont permis de voir comment des développements en recherche fondamentale peuvent conduire à des applications en dehors du monde académique (invitation d'un ancien doctorant en physique théorique des particules élémentaires travaillant maintenant dans une start-up spécialisée en intelligence artificielle, communauté qui regroupe plusieurs anciens étudiants théoriciens du domaine).

BILAN DES ACTIONS MENÉES

2016

[4th Workshop on Muon g-2, EDM and Flavour Violation in the LHC Era](#)
(23 - 27 mai 2016 au CPT Marseille)

[3rd International Summer School on QCD: Dense systems in QCD at asymptotic energies](#)
(20 juin - 1er juillet 2016 au LPT Orsay)

[Workshop "Opportunities with internal gas target at the LHC"](#)
(4-5 juillet 2016, CERN)

[Réunion de lancement du groupe "Interaction simple et multiple dans les nucléons"](#)
(29 - 30 septembre 2016 à l'IPN Orsay)

[Rencontres QGP-France 2016](#)
(10 - 13 octobre 2016, à Etretat)

[Session plénière 2016 du GDR QCD](#)
(8 - 10 novembre 2016 à l'IPN Orsay)

[Workshop "Light and shadow among QCD and QED"](#)
(16 - 17 novembre 2016 à Montpellier)

2017

[Workshop "Progress in algorithms and numerical tools for QCD"](#)
(15 - 16 mai 2017 à LPT Orsay)

[Workshop "Partons and Nuclei"](#)
(1 - 2 juin 2017 à l'IPN d'Orsay)

[QCD Master Class 2017](#)
(18 - 24 juin 2017 Saint-Jacut-de-la-Mer)

[Rencontres QGP France 2017](#)
(9 - 12 octobre 2017, à Etretat)

[Session plénière 2017 du GDR QCD](#)
(4 - 6 décembre 2017 à l'Orme des Merisiers CEA Saclay)

2018

[Workshop "Getting to Grips with QCD"](#)
(4-6 avril 2018, Campus des Cordeliers, Paris)

[Workshop on "two-pion and e+e- production in hadronic reactions"](#)
(22-24 mai 2018, IPN, Orsay)

[4th International Summer School on QCD: "QCD meets precision"](#)
(18 - 22 juin 2018, LPT Orsay)

[Rencontres QGP France 2018](#)
(2-5 juillet 2018, à Etretat)

[10th International Workshop on Boosted Object "BOOST 2018"](#)

(16-20 juillet 2018, Campus Jussieu, Paris)

[Workshop "hard-soft correlations in hadronic collisions"](#)

(23 - 25 juillet 2018, Clermont-Ferrand)

[Workshop "Collectivity and correlations in high-energy hadron and nuclear collisions"](#)

(5-18 août 2018, Benasque (Espagne))

[Ecole Joliot-Curie 2018 "Correlations between partons in nuclear systems"](#)

(7-12 octobre 2018, La Grande Motte)

[Session plénière 2018 du GDR QCD](#)

(26 - 28 novembre 2018, Ecole Polytechnique)

2019

[Série de Rencontres Ions Lourds 2019](#)

(IPN Orsay)

[Workshop "Quarkonia as Tools"](#)

(13-19 Janvier 2019, Center Paul Langevin, Aussois)

[Progress in algorithms and numerical tools for QCD](#)

(13 juin 2019, LPT Orsay)

[QCD Master Class 2019](#)

(9 - 22 juin 2019 Saint-Jacut-de-la-Mer)

[Rencontres QGP France 2019](#)

(1-4 juillet 2019, à Etretat)

[Electron-Ion Collider User Group Meeting "EICUG 2019"](#)

(22-26 juillet 2019, Paris)

[LIGHT CONE 2019](#)

(16-20 septembre 2019, Palaiseau)

[Session plénière 2019 du GDR QCD](#)

(25 - 27 novembre 2019, LPT Orsay)

2020

[Workshop "Quarkonia as Tools"](#)

(12-18 Janvier 2020, Center Paul Langevin, Aussois)

[Rencontres de physique des particules 2020](#)

(29-31 janvier 2020, Palaiseau)

EVOLUTION DE LA COMMUNAUTE FRANCAISE AVEC BILAN PARITÉ

Recrutements dans les UMRs pendant la durée du GDR précédent (2016-2020):

- * Renaud Boussarie (CPHT)
- Antoine Gérardin (CPT)
- * Jacopo Ghiglieri (Subatech)
- Maxime Guilbaud (Subatech)
- * Mostafa Hoballah (IJCLab)
- * Laure Massacrier (IPNO → IJCLab)
- Emilie Maurice (LLR)
- Marlène Nahrgang (Subatech)
- * Hua-Sheng Shao (LPTHE)
- * Savvas Zafeiropoulos (CPT)

(* nouveaux entrants sur postes CNRS)

Femmes: 30% , Hommes: 70% .

Il y a également eu trois recrutements à l'Irfu durant cette période: Francesco Bossu, Cédric Mezrag et Michael Winn.

Bilan parité des chercheuses/chercheurs permanent.e.s du GDR dans les UMRs:

Janvier 2016: Femmes: 17%, Hommes: 83%

Janvier 2021: Femmes: 20%, Hommes: 80%



MOTIVATIONS SCIENTIFIQUES POUR JUSTIFIER D'UN RENOUVELLEMENT DU GDR

Le GDR QCD a pour ambition de fédérer théoriciens et expérimentateurs partageant un intérêt commun pour l'étude de l'interaction forte. Il s'appuie sur les enseignements et l'expertise acquise dans l'exercice des précédents GDR Nucléon puis PH-QCD. Il englobe ces thématiques, mais s'est également ouvert 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.

L'organisation du GDR QCD a été structurée en cinq thèmes qui impliquent chacun des synergies entre ces communautés. Cette organisation est largement conservée dans le GDR renouvelé, les contours des groupes de travail ont toutefois été légèrement redessinés pour les adapter aux nouveaux enjeux et objectifs en QCD, et aux quelques changements dans notre communauté au cours des dernières années :

- Interactions simples et multiples entre partons

Ce groupe reste centré sur l'étude des interactions simples et multiples entre partons, qui deviennent importantes à haute énergie, et donc de leur influence sur les mesures et calculs théoriques. Il intègre les études des diverses distributions de partons, et des PDF nucléaires. L'influence des interactions multiples sur des observables telles que la section efficace de production fait aussi partie des discussions dans ce groupe.

- Effets collectifs dans les nucléons et noyaux, diagramme de phase de QCD

Ce groupe étudie les effets dus aux grandes densités de partons, que ce soit dans les fonctions d'ondes des hadrons et noyaux, dans l'état initial des collisions hadroniques, dans le QGP ou la matière à haute densité baryonique.

- QCD à grande impulsion transverse

Les activités liées aux sondes dures du QGP se poursuivent, et ce groupe va être enrichi en incorporant de manière plus importantes les développements sur les divers aspects intrinsèques à la théorie des perturbations.

- Prospectives sur les observables de l'interaction forte

Ce groupe va continuer de stimuler les efforts nécessaires pour pérenniser l'implication de notre communauté dans les expériences futures (EIC, FAIR, Cibles fixes, LHeC, HL-LHC, HE-LHC, FCC, ...) et l'élaboration de leur programme de physique.

- QCD à basse énergie, méthodes non perturbatives

Outre l'incontournable QCD sur réseau, ce groupe participe au développement de techniques analytiques et numériques adaptées à ce régime particulier des basses énergies, où la description partonique des hadrons perd sa pertinence, et les phénomènes non-perturbatifs deviennent dominants.

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. Le GDR a également pour ambition de 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.

Les nouveaux enjeux et objectifs sont détaillés ci-dessous. L'équipe d'animation est renouvelée à 87%.

ÉVOLUTION DES ENJEUX ET DES OBJECTIFS POUR JUSTIFIER D'UN RENOUVELLEMENT DU GDR

- renforcement de la thématique “QCD perturbative”

Jusqu'à présent les activités du groupe de travail “QCD à grande impulsion transverse” étaient concentrées sur l'étude des jets et des quarkonia, 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.

Tout en restant dans le même champ thématique de la QCD à grande impulsion transverse, le GDR renouvelé élargit le spectre des questions abordées en incorporant les aspects intrinsèques à la théorie des perturbations (calculs d'amplitude de diffusion, resommations diverses nécessaires pour rendre les troncations acceptables), trop peu représentés jusqu'ici. En particulier, les besoins d'automatisation de ces procédures demandent de gros moyens de calcul, et le GDR pourra servir de structure pour faire des demandes de moyens dédiés, à l'instar de ce qui se fait en QCD sur réseau.

- renforcement de la thématique “diagramme de phase de QCD”

Ce renforcement concerne le domaine de potentiel chimique baryonique non nul. Cet aspect de l'interaction forte est étudié dans le GDR actuel au sein du groupe “Prospectives sur les observables de l'interaction forte”, dans le cadre de la préparation des expériences de FAIR sur la matière à haute densité baryonique, mais il reste peu représenté au niveau théorique. C'est très probablement lié à l'existence d'un GDRi dédié aux études du diagramme de phase de QCD (le GDRi EUREA). Nous pensons qu'un rapprochement est souhaitable, et le GDR QCD renouvelé a ainsi l'ambition de développer ces études sur la matière riche en baryons de concert avec celles existantes sur le QGP à haute température, qui y sont liées via l'équation d'état de la QCD, et les transitions de phase chirale et de déconfinement.

- “puzzle” des petits systèmes, synergie physique hadronique/ions lourds

Les résultats des collisions proton-plomb au LHC, dont beaucoup pensaient qu'il ne s'agissait que d'une simple expérience de contrôle, ont potentiellement remis en question notre interprétation des résultats précédents sur les collisions d'ions lourds: certaines collisions proton-noyau semblent produire les mêmes signaux de présence du QGP que ceux observés dans les collisions noyau-noyau, sans les effets systématiques auxquels on pourrait s'attendre si un petit QGP était formé, dû à sa taille réduite.

Dans cette hypothèse, l'anisotropie azimutale de la distribution des particules sortantes serait comprise comme la réponse hydrodynamique à l'anisotropie spatiale du système formé juste après la collision (liée aux distributions GPD), comme en collision noyau-noyau. Dans le cas contraire, elle proviendrait directement de la structure en impulsion encodée dans la fonction d'onde du proton (et liée aux distributions TMD) et dans le processus de collision.

Résoudre ce “puzzle” et établir et développer une approche unifiée indépendante de la taille du système passe par une collaboration entre les communautés expérimentales “ions lourds” et “physique hadronique”. Le GDR a permis ce rapprochement, la présence des théoriciens ayant été extrêmement bénéfique. Cela doit continuer dans le cadre d'un programme expérimental multifacette (LHC, cibles fixes, EIC).

- vers une structure EIC-France

Avec le démarrage officiel (CD-0) du projet de collisionneur électron-ion (EIC) aux Etats-Unis le 19 décembre 2019, la communauté française a besoin de s'organiser autour d'un projet fédérateur pour lui donner davantage de visibilité internationale. L'EIC, qui sera construit au Brookhaven National Laboratory (New York), sera la machine dédiée à l'étude de la QCD dans les décennies à venir. L'intérêt en France est fort et provient de deux communautés jusqu'à présent assez distinctes : la communauté qui étudie la matière hadronique déconfinée, notamment au LHC, et la communauté qui étudie la structure des nucléons et noyaux, surtout à Jefferson Lab. Le GDR peut et doit jouer un rôle majeur pour catalyser les échanges entre ces deux communautés et permettre d'une part de définir un projet commun, et ensuite de devenir le forum de discussion de ce projet. Le calendrier est particulièrement adéquat. L'appel d'expressions d'intérêt se termine; dans le but de répondre à cet appel plusieurs réunions ont eu lieu au sein de la collaboration française. Un appel international sera lancé mi-2021 pour la formation des collaborations dans l'EIC. Une réponse concertée au niveau français nécessite des nombreux échanges et discussions.

Les interactions entre expérimentateurs et théoriciens seront particulièrement importantes dans l'émergence de ce projet de physique. Le GDR permettra de dynamiser ces interactions pour les rendre fluides, organisées, et fréquentes. Il deviendra ainsi l'incubateur d'une collaboration EIC-France à fort potentiel d'impact international sur le plan théorique et expérimental.

- futur des ions lourds au LHC

Le programme "ions lourds" du LHC est une grande réussite qui a ouvert la voie à de nouvelles mesures impliquant des saveurs lourdes, des quarkonia, des jets et autres particules de grande impulsion transverse, qui sondent non seulement la structure du QGP mais aussi la structure des hadrons et noyaux à des énergies jamais atteintes auparavant. Il a également permis d'améliorer grandement la précision des observables liées à la détection de la majorité des particules produites qui ont une très petite impulsion transverse. En complément de ces recherches "standard", l'observation du puzzle des petits systèmes décrit ci-dessus a fait émerger un questionnement sur les limites de la description hydrodynamique du QGP.

Réussir à consolider le lien entre la dynamique microscopique des partons et l'émergence de la description macroscopique en termes d'hydrodynamique peut avoir des implications au-delà du contexte de la QCD. Mais c'est pour le moment hors de portée, car cela demande une précision de mesure qui n'est pas atteignable, à cause d'un nombre d'événements mesurés trop petit et d'une instrumentation limitée. Pour pouvoir résoudre ce problème avec plus de statistique et une instrumentation améliorée, la communauté "ions lourds" a préparé un programme ambitieux pour la prochaine décennie au LHC, et a aussi l'intention d'en élaborer un pour les années 2030.

En France, la communauté est très impliquée dans les recherches sur le QGP dans ALICE, CMS et LHCb, et elle joue un rôle prépondérant dans la préparation des futurs programmes de physique de toutes les expériences. Le GDR renouvelé offrira un forum de discussion privilégié pour les expérimentateurs, leur permettant de définir leurs participations dans les projets de hardware et software des améliorations futures des détecteurs, en modes collisionneur et cible fixe, qui doivent être très rapidement envisagées. Les théoriciens seront également présents pour aider à définir les futures directions de recherche à prioriser, le but étant de maintenir notre rôle de leader dans les principaux projets "ions lourds" au LHC.

NOM DES RESPONSABLES D'AXES

1. Interactions simples et multiples entre partons
 - a. Zaida Conesa - EXP, IJCLab
 - b. Cédric Lorcé - TH, CPHT
 - c. Dominique Marchand - EXP, IJCLab
renouvellement: 100%
2. Effets collectifs dans les nucléons et noyaux, diagramme de phase de QCD
 - a. Maxime Guilbaud, EXP, Subatech
 - b. Antonin Maire - EXP, IPHC
 - c. Marlene Nahrgang, TH, Subatech
renouvellement: 100%
3. QCD à grande impulsion transverse
 - a. Jean-Philippe Lansberg - TH, IJCLab
 - b. Laure Massacrier - EXP, IJCLab
 - c. Emanuele Re - TH, LAPTh
renouvellement: 100%
4. Prospectives sur les observables de l'interaction forte
 - a. Francesco Bossu - EXP, IRFU
 - b. Emilie Maurice - EXP, LLR
 - c. Beatrice Ramstein - EXP, IJCLab
renouvellement: 67%
5. QCD à basse énergie, méthodes non perturbatives
 - a. Benoît Blossier, TH, IJCLab
 - b. Maxim Chernodub, TH, IDP
 - c. Cédric Mezrag, TH, IRFU
renouvellement: 67%

BILAN FINANCIER

en (€)	École internationale du GDR	Soutien aux ateliers/conférences	Assemblée générale	Total
2016	4 000	5 000	4 000	13 000
2017	2 000	5 000	6 000	13 000
2018	4 000	7 000	2 000	13 000
2019	2 000	8 000	3 000	13 000
2020		2 000		2 000

BUDGET INDICATIF POUR LE RENOUVELLEMENT

Notre demande de budget est de 13 à 18 k€ pour l’Institut Principal, et de 5 à 10 k€ pour l’Institut secondaire, pour un total de **23 000 €**. Cette demande de financement proposée correspond à un exercice annuel dont les dépenses envisagées sont les suivantes :

- L’assemblée plénière : 4 000 €

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.

- Soutien aux ateliers thématiques, réunions de travail, et aux conférences organisés par les membres du GDR : 9 000 €

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.

- L’école internationale du GDR QCD: 10 000 €

Une action annuelle de formation de haut niveau, sous la forme d'une école internationale de deux semaines, sera organisée. La thématique changera chaque année, en continuité avec les écoles organisées dans le cadre du GDR actuel, pour que tous les aspects autour desquels le GDR est construit soient traités.

COMPOSITION DU GDR

Le GDR regroupe aujourd'hui plus d'une centaine de physiciens permanents, moitié théoriciens, moitié expérimentateurs, issus de 17 laboratoires français et de 5 laboratoires étrangers ayant des liens très étroits avec des équipes du GDR. Une trentaine d'étudiants et postdocs sont également impliqués.

Laboratoires rattachés à l'INP en institut principal :

CPHT, CPT, IDP, LAPTh, L2C, LPTHE, IPhT

Laboratoires rattachés à l'IN2P3 en institut principal :

APC, IJCLab, IPHC, IP2I, LLR, LPC, LPNHE, LPSC, Subatech

Nous envisageons, une fois le GDR renouvelé, la signature d'une convention entre le CNRS et le CEA, pour que l'IRFU puisse participer et contribuer.

Liste des 104 participants permanents dans les UMRs :

Laboratoire	Nom	Prénom	Statut
APC	Serreau	Julien	Université
CPHT	Boussarie	Renaud	CNRS
CPHT	Lorcé	Cédric	Université
CPHT	Marquet	Cyrille	CNRS
CPHT	Munier	Stéphane	CNRS
CPHT	Pire	Bernard	Émérite
CPHT	Reinosa	Urko	CNRS
CPT	De Rafael	Eduardo	Émérite
CPT	Gérardin	Antoine	Université
CPT	Knecht	Marc	CNRS
CPT	Lellouch	Laurent	CNRS
CPT	Zafeiropoulos	Savvas	CNRS
IDP	Chernodub	Maxim	CNRS
IJCLab	Amhis	Yasmine	CNRS
IJCLab	Barsuk	Sergey	CNRS
IJCLab	Becirevic	Damir	CNRS
IJCLab	Bernard	Véronique	CNRS

IJCLab	Blossier	Benoît	CNRS
IJCLab	Carbonell	Jaume	CNRS
IJCLab	Conesa del Valle	Zaida	CNRS
IJCLab	Descotes-Genon	Sébastien	CNRS
IJCLab	Didelez	Jean-Pierre	Émérite
IJCLab	Dupré	Raphaël	CNRS
IJCLab	Espagnon	Bruno	Université
IJCLab	Friot	Samuel	Université
IJCLab	Fontannaz	Michel	Émérite
IJCLab	Hadjidakis	Cynthia	CNRS
IJCLab	Hoballah	Mostafa	CNRS
IJCLab	Kou-Bourhis	Emi	CNRS
IJCLab	Lansberg	Jean-Philippe	CNRS
IJCLab	Marchand	Dominique	CNRS
IJCLab	Massacrier	Laure	CNRS
IJCLab	Moussallam	Bachir	CNRS
IJCLab	Munoz Camacho	Carlos	CNRS
IJCLab	Niccolai	Silvia	CNRS
IJCLab	Ramstein	Béatrice	CNRS
IJCLab	Robbe	Patrick	CNRS
IJCLab	Sazdjian	Hagop	Émérite
IJCLab	Suire	Christophe	CNRS
IJCLab	Van de Wiele	Jacques	Émérite
IJCLab	Van Kolck	Ubirajara	CNRS
IJCLab	Voutier	Eric	CNRS
IJCLab	Wallon	Samuel	Université
IJCLab	Zhang	Zhiqing	CNRS
IPHC	Belikov	Iouri	CNRS
IPHC	Hippolyte	Boris	Université
IPHC	Kuhn	Christian	CNRS
IPHC	Maire	Antonin	CNRS
IPHC	Rami	Fouad	CNRS
IPHC	Roy	Christelle	CNRS
IPHC	Schutz	Yves	Émérite

IPhT	Blaizot	Jean-Paul	Émérite
IPhT	Gelis	François	CEA
IPhT	Iancu	Edmond	CNRS
IPhT	Korchemsky	Gregory	CNRS
IPhT	Kosower	David	CEA
IPhT	Ollitrault	Jean-Yves	CNRS
IPhT	Soyez	Grégory	CNRS
IP2I	Cheshkov	Cvetan	CNRS
IP2I	Cheynis	Brigitte	CNRS
IP2I	Ducroux	Laurent	Université
IP2I	Gouzevitch	Maxime	CNRS
IP2I	Hansen	Hubert	Université
IP2I	Uras	Antonio	CNRS
LAPTh	Guillet	Jean-Philippe	CNRS
LAPTh	Pilon	Eric	CNRS
LAPTh	Re	Emanuele	CNRS
L2C	Kneur	Jean-Loïc	CNRS
LLR	Arleo	François	CNRS
LLR	Fleuret	Frédéric	CNRS
LLR	Granier de Cassagnac	Raphaël	CNRS
LLR	Maurice	Émilie	Université
LLR	Nguyen	Matthew	CNRS
LPC	Bastid	Nicole	Université
LPC	Crochet	Philippe	CNRS
LPC	Dupieux	Pascal	CNRS
LPC	Fonvielle	Hélène	CNRS
LPC	Lopez	Xavier	Université
LPC	Manso	Franck	Université
LPC	Mathiot	Jean-François	CNRS

LPC	Morénas	Vincent	Université
LPC	Porteboeuf-Houssais	Sarah	Université
LPC	Ramillien	Valérie	Université
LPNHE	Benayoun	Maurice	CNRS
LPNHE	Da Silva	Wilfrid	CNRS
LPSC	Guernane	Rachid	CNRS
LPSC	Mangin-Brinet	Mariane	CNRS
LPSC	Schienbein	Ingo	Université
LPTHE	Cacciari	Matteo	Université
LPTHE	Fuks	Benjamin	Université
LPTHE	Shao	Hua-Sheng	CNRS
Subatech	Aichelin	Joerg	Université
Subatech	Germain	Marie	CNRS
Subatech	Ghiglieri	Jacopo	CNRS
Subatech	Gossiaux	Pol-Bernard	Université
Subatech	Gousset	Thierry	Université
Subatech	Guilbaud	Maxime	Université
Subatech	Martinez	Gines	CNRS
Subatech	Nahrgang	Marlene	Université
Subatech	Peigné	Stéphane	CNRS
Subatech	Sami	Taklit	Université
Subatech	Shabetai	Alexandre	CNRS
Subatech	Smilga	Andrei	Université
Subatech	Werner	Klaus	Université

Liste des 28 participants permanents à l'IRFU et dans des laboratoires étrangers :

Laboratoire	Nom	Prénom	Statut
DPhN	Baldisseri	Alberto	CEA
DPhN	Ball	Jacques	CEA

DPhN	Bedfer	Yann	CEA
DPhN	Bossu	Francesco	CEA
DPhN	Castillo	Javier	CEA
DPhN	d'Hose	Nicole	CEA
DPhN	Defurne	Maxime	CEA
DPhN	Ferrero	Andrea	CEA
DPhN	Garçon	Michel	CEA
DPhN	Guichon	Pierre	CEA
DPhN	Kunne	Fabienne	CEA
DPhN	Mezrag	Cédric	CEA
DPhN	Moutarde	Hervé	CEA
DPhN	Platchkov	Stéphane	CEA
DPhN	Procureur	Sébastien	CEA
DPhN	Rakotozafindrabe	Andry	CEA
DPhN	Sabatié	Franck	CEA
DPhN	Saghai	Bijan	CEA
DPhN	Winn	Michael	CEA
Institution	Nom	Prénom	Pays
NCBJ	Altinoluk	Tolga	Pologne
NCBJ	Beuf	Guillaume	Pologne
Jefferson Lab	Camsonne	Alexandre	États-Unis
Santiago de Compostela	Ferreiro	Elena	Espagne
Lebedev Institute	Karmanov	Vladimir	Russie
University of Kansas	Royon	Christophe	États-Unis
NCBJ	Szymanowski	Lech	Pologne
University of Kansas	Tapia Takaki	Daniel	États-Unis
NCBJ	Wagner	Jakub	Pologne

SIGNATURE DES DIRECTEURS ET DIRECTRICES DES LABORATOIRES CONCERNÉS

Date 28/10/2020

Laboratoire CPHT

Signature



Jean-René Chazottes (dir.)

Date 21/10/2020

Laboratoire CPT UMR 7332

Signature



Thierry MARTIN
Directeur du
Centre de Physique Théorique

Date 22/10/2020

Laboratoire LAPTh

Signature



Luc FRAPPAT
Directeur du LAPTh



Date 28/10/2020

Laboratoire L2C-UMR5221

Signature



Pierre LEFEBVRE
Directeur du L2C

Date 30/10/2020

Laboratoire Institut Denis Poisson, UMR CNRS 7013, Tours

Signature Luc MOLINET



Date 21/10/2020

Laboratoire LPTHE

Signature



Date 28/10/2020

Laboratoire

Signature



Date 21/10/20

Laboratoire APC UMR 7164

Signature

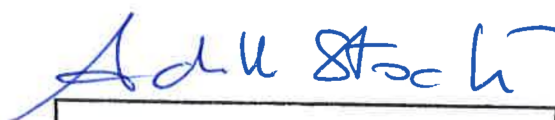


Antoine KOUCHNER

Date 27/10/2020

Laboratoire IJCLab

Signature



Achille Stocchi
Directeur d'IJCLab

SIGNATURE DES DIRECTEURS ET DIRECTRICES DES LABORATOIRES CONCERNÉS

Date 28/10/2020

Laboratoire IPHC, Strasbourg

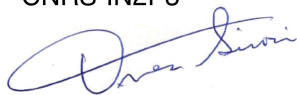
Signature



Date 30 octobre 2020

Laboratoire Laboratoire Leprince-Ringuet, École Polytechnique, CNRS-IN2P3

Signature



Date le 28 octobre 2020

Laboratoire LPSC

Signature Arnaud Lucotte



Date le 29 octobre 2020

Laboratoire IP2I Lyon

Signature

Anne Ealet



Signature numérique de Anne Ealet
DN : c=FR, o=CNRS,
ou=UMR5822, cn=Anne Ealet,
email=a.ealet@ipn.lin2p3.fr
Date : 2020.10.29 18:05:28
+01'00'

Date 28 octobre 2020

Laboratoire LPC

Signature



Date

Laboratoire

Signature




Signature
numérique de
Gines Martinez

Date :
2020.11.01
12:27:15 +01'00'