



Plasma de Quarks et de Gluons

Prospectives 2012-2022 IN2P3/Irfu

A. Baldisseri (IRFU) J. Castillo Castellanos (IRFU)
G. Martínez García (Subatech) C. Furget (LPSC)
Z. Conesa del Valle (IPHC) B. Espagnon (IPNO), M. Estienne (Subatech)
F. Fleuret (LLR) R. Granier de Cassagnac (LLR) C. Kuhn (IPHC)
X. Lopez (LPC Clermont) F. Rami (IPHC) A. Rakotozafindrabe (Irfu)
R. Tieulent (IPNL) F. Arleo (LPTH) J. Aichelin (Subatech)
F. Gelis (IPHT) P. B. Gossiaux (Subatech) J. P. Lansberg (IPNO)
J. Y. Ollitrault (IPHT) I. Schienbein (LPSC)

9 mars 2012

Table des matières

1	La recherche autour du plasma de quarks et de gluons	3
2	Questions ouvertes	4
2.1	Physique de l'état initial	4
2.2	Phénomènes collectifs	5
2.3	Hadronisation	5
2.4	Sondes électro-magnétiques	7
2.5	Production des saveurs lourdes	7
2.5.1	Quarkonia	7
2.5.2	Saveurs lourdes	8
2.6	Jets	9
3	Perspectives	10
3.1	Etude des mécanismes d'hadronisation et des propriétés du « bulk » sous l'angle des hadrons étranges	11
3.1.1	Rapports baryon/méson et corrélations azimutales	11
3.1.2	Degré d'équilibre et influence des jets sur les propriétés du « bulk »	11
3.2	Hadrons charmés et upgrade de l'ITS d'ALICE	12
3.3	L'expérience CBM auprès de FAIR	13
3.4	Upgrade de l'électronique du VZERO d'ALICE	14
3.5	Upgrade du spectromètre à muons d'ALICE	14
3.6	Analyse Quarkonium et Saveurs Lourdes dans ALICE au LHC	15
3.6.1	Analyse des quarkonia	16
3.6.2	Analyse des saveurs lourdes ouvertes	16
3.7	Mesons vecteurs, Quarkonia et Upgrade ALICE MUON : MFT	17
3.8	Expérience CHIC au SPS pour la mesure du χ_c en Pb-Pb	18
3.9	Expérience AFTER au LHC	19
3.10	Analyses dans l'Expérience CMS	20
3.11	Analyse des Jets dans l'Expérience ALICE	21
3.12	Projet d'extension de la calorimétrie au sein de l'expérience ALICE	22
4	Synthèse des prospectives du groupe QGP	23

1 La recherche autour du plasma de quarks et de gluons

Les collisions d'ions lourds ultra-relativistes permettent d'étudier depuis de nombreuses années les propriétés de la matière nucléaire à des densités d'énergie bien au delà de la matière nucléaire normale. Dans le régime de la liberté asymptotique, qui est une propriété fondamentale de la théorie de l'interaction forte (QCD), le couplage entre les quarks et les gluons au sein des hadrons s'avère si amoindri que ses constituants peuvent se mouvoir librement, sur des distances bien supérieures à la taille d'un hadron. Suivant les calculs de la QCD sur réseau, la matière nucléaire subit une transition de phase d'un gaz hadronique vers un plasma de quarks et de gluons déconfinés (QGP) à des températures d'environ 150 – 200 MeV correspondant à une densité d'énergie de l'ordre de 0.5 – 1 GeV/fm³. En outre, on s'attend, lors de la transition vers le QGP, à une restauration de la symétrie chirale de la QCD. Ces conditions extrêmes seraient réunies au coeur des étoiles à neutrons ou quelques μ s après le *Big Bang*. La physique des ions lourds vise à comprendre le lien qui existe entre les propriétés thermodynamique du QGP (énergie, température, viscosité ...) avec les phénomènes collectifs qui en découlent et les propriétés de l'interaction forte entre ses constituants.

Les travaux de recherche réalisés sur les collisions d'ions lourds ultra-relativistes depuis les années 80 ont ainsi permis d'explorer le diagramme de phase de la matière nucléaire. L'utilisation d'accélérateurs d'énergie toujours plus grande depuis l'AGS jusqu'au LHC en passant par le SPS et le RHIC ont permis d'accéder aux très hautes températures combinées à de toujours plus faibles potentiels baryoniques.

L'expérience accumulée a permis de proposer un scénario d'évolution des collisions d'ions lourds, qui semble bien établi. La description de son évolution dynamique nécessite de maîtriser de nombreux concepts issus de la physique des particules, la physique nucléaire, de la thermodynamique hors équilibre et de l'hydrodynamique. Ainsi, la densité d'énergie déposée au cours de la collision conduit à un état initial hors équilibre. À l'heure actuelle, cet état précurseur du QGP fait l'objet de nombreuses études théoriques, en particulier concernant le régime de saturation des gluons et le processus de thermalisation. Ensuite le système devrait se thermaliser rapidement pour former le QGP, dont l'évolution est régie par les équations hydrodynamiques. Les données expérimentales de RHIC et du LHC semblent indiquer que le QGP possède les propriétés d'un liquide quasi parfait. La mesure du flot collectif des particules permet d'étudier la viscosité et les fluctuations dans l'état initial. Au cours de son expansion le système se refroidit avant de se convertir en gaz hadronique jusqu'au gel chimique qui fixe la composition des hadrons produits. Le degré d'équilibration thermodynamique du QGP est étudiée à travers la production des particules dans l'état final en fonction de leur nature (baryon ou méson) ou de leur saveur (étrangeté et charme).

Grâce à l'énergie croissante mise en jeu dans les collisions d'ions lourds, les processus durs au niveau partonique deviennent prépondérants en particulier au LHC. Il en résulte une production importante de jets, de photons et de particules de différentes saveurs de très grande impulsion transverse, de même que les quarkonia de quarks charmés et beaux. Ces sondes dures permettent de mieux caractériser le QGP. Les bosons vecteurs W et Z, qui sont également produits en grand nombre, peuvent fournir des informations sur l'état initial. Une des questions centrales pour la caractérisation du QGP est la compréhension des mécanismes de production des quarkonia qui dépend de la compétition entre l'écrantage du potentiel d'interaction entre quarks et le processus de recombinaison. De plus, l'étude de la perte d'énergie des partons dans le milieu coloré et sa dépendance vis-à-vis du type de partons et de leur masse, prédite par la QCD, est accessible expérimentalement par l'étude de la production des particules de différentes saveurs et des jets.

Il est clair que tous ces sujets nécessitent une collaboration étroite entre théoriciens et expérimentateurs. Cette collaboration doit être encore plus intense qu'elle ne l'a été au RHIC car les

résultats des expériences au LHC sont encore plus précis et ont donc un pouvoir de discrimination plus élevé parmi les différentes approches théoriques. Ceci est indispensable pour progresser vers une meilleure compréhension des collisions d’ions lourds ultra-relativistes.

2 Questions ouvertes

Cette partie aborde en détail les différents mécanismes physiques mis en jeu au cours de la réaction. Cependant, loin d’être exhaustif, il se concentre sur les questions essentielles mis en avant par la communauté française. Certaines parties sont abordés sous un angle plus théorique tandis que d’autres reposent en grande partie sur les observations expérimentales les plus récentes. Elle vise à mettre en perspective les problématiques, qui seront mis en avant dans la troisième partie de ce rapport.

2.1 Physique de l’état initial

Les résultats des collisions d’ions lourds effectuées au Relativistic Heavy Ion Collider (Brookhaven National Laboratory, États-Unis) ont montré que l’évolution de la matière constituée de quarks et de gluons produite dans ces collisions peut être décrite comme s’il s’agissait d’un fluide quasi parfait en expansion. En effet, une description de cette évolution basée sur les équations de l’hydrodynamique relativiste est en très bon accord avec les mesures (en particulier du flot elliptique, qui quantifie comment l’anisotropie spatiale du système est convertie en une anisotropie de la distribution des impulsions des particules produites) lorsque la viscosité est supposée extrêmement petite.

D’un point de vue théorique, cette observation conduit à plusieurs questions :

- i.** Peut-on calculer à partir de QCD les conditions initiales nécessaires pour l’évolution hydrodynamique ? Plus précisément, on a besoin de la distribution spatiale de la densité d’énergie et de la vitesse du fluide à un certain temps initial (typiquement inférieur à 1 fm/c).
- ii.** Quelle est l’équation d’état de la matière ainsi décrite ? (en effet, les équations de l’hydrodynamique ne constituent un système fermé que si on les complète à l’aide d’une relation entre la pression et la densité d’énergie).
- iii.** Dans le cas où des corrections visqueuses sont incluses dans la description hydrodynamique, quelle valeur de la viscosité doit-on utiliser ?
- iv.** Enfin, peut-on justifier les conditions d’applicabilité d’une description hydrodynamique ? En effet, le consensus parmi les théoriciens est que le système doit être suffisamment proche de l’équilibre thermodynamique local afin de pouvoir le décrire comme un fluide quasi parfait.

Les points **ii.** et **iii.** sont en pratique utilisés de manière différente dans les analyses des données expérimentales : en variant l’équation d’état et la viscosité dans les simulations hydrodynamiques, peut-on contraindre leur valeur grâce aux mesures du flot dans les collisions d’ions lourds ? Pour ce qui est de l’équation d’état (et dans une moindre mesure pour la viscosité, dont le calcul en QCD est techniquement plus complexe), les contraintes ainsi obtenues peuvent ensuite être confrontées à l’équation d’état attendue en QCD (grâce à des simulations numériques sur réseau) pour un plasma de quarks et de gluons en équilibre.

Concernant le point **i.**, le calcul peut être effectué dans le cadre du “Color Glass Condensate”, qui est une description effective de la QCD dans le régime de grande densité partonique qui est atteint dans les collisions d’ions lourds ultra-relativistes. Des conditions initiales obtenues dans ce type de description sont d’ores et déjà utilisées dans certaines simulations hydrodynamiques.

Du point de vue de la théorie, le point le plus difficile à justifier est le **iv.**, i.e. le fait que le système de quarks et de gluons produits dans les collisions d'ions lourds approche un état d'équilibre thermique local en un temps très bref. Cette question concentre actuellement une grosse partie des efforts théoriques et diverses nouvelles idées ont été proposées récemment concernant les mécanismes microscopiques pouvant conduire à la thermalisation. Toutefois, des études plus détaillées (notamment numériques) sont nécessaires afin de déterminer si ces mécanismes ont bien l'effet escompté.

2.2 Phénomènes collectifs

Le défi pour la prochaine décennie est de conclure, à partir des données actuelles et futures, sur les mécanismes en jeu lors de la réaction entre ions lourds. Est-ce que toute la zone de réaction participe à l'expansion hydrodynamique? Est-ce que les valeurs non nulles des coefficients impairs du flot azimutal v_i sont dues uniquement aux fluctuations des conditions initiales? Quel mécanisme conduit à atteindre l'équilibre thermodynamique aussi rapidement que le suggère le succès des modèles hydrodynamiques? Peut-on comprendre la dépendance en centralité des différentes observables. Comment interagissent les jets avec le « bulk » de la matière et que peut-on apprendre de cette interaction sur l'état de la matière en expansion.

Le flot elliptique v_2 pourrait être une des observables clés. Son évolution avec la centralité de la collision observée avec les données actuelles peut être reproduite par des

- des calculs hydrodynamiques parfaits dans lesquels seulement une partie du système participe à l'expansion hydrodynamique alors que le reste fragmente,
- des calculs hydrodynamiques avec viscosité dans lesquels tout le système participe à l'expansion hydrodynamique,
- des modèles simple de type « core-corona » dans lesquels seuls les nucléons ayant interagi plus d'une fois participent à la formation du plasma alors que les autres vont fragmenter comme dans des collisions p-p.

Afin de distinguer entre ces différentes possibilités, une analyse très détaillée des données expérimentales est nécessaire. Par exemple, l'étude du v_2 pour les particules identifiées en fonction de la centralité et de la taille du système sera essentielle. De même, la variation des propriétés d'échelle (*e.g.* par rapport au nombre de quarks constituants) du v_2 en fonction de la centralité pourra donner des informations sur les mécanismes en jeu lors de l'évolution de la collision.

Si les fits de type « blast-wave » se sont avérés des très bons outils pour décrire les données, leur interprétation reste très difficile. Les différences dans les valeurs du flot transverse radial pour différentes particules peuvent indiquer que la physique en jeu est complexe. Néanmoins, il n'est pas encore prouvé que ces différences puissent être complètement attribués aux re-interactions après l'hadronisation du QGP. En particulier, la difficulté qu'ont les modèles hydrodynamiques à décrire le « freeze-out » chimique et thermique avec le même ensemble de paramètres suggère des problématiques physiques intéressantes à étudier.

2.3 Hadronisation

Dans les collisions d'ions lourds du RHIC comme du SPS, l'analyse de la composition chimique des systèmes formés, au moyen de modèles statistiques, se fonde sur deux paramètres principaux : la température de freeze-out chimique et le potentiel chimique baryonique. Les modèles utilisés font l'hypothèse d'un équilibre thermique et chimique (soit un gaz de hadrons et de résonances hadroniques à l'équilibre) pour reproduire les abondances relatives des particules produites. L'accord obtenu suggère qu'un degré élevé d'équilibration chimique est atteint et que la formation du QGP pourrait en être à l'origine.

Cependant, cette image statistique est probablement trop simpliste car elle ne fournit pas une description unique des données. Le fait que la même approche puisse être aussi utilisée dans les collisions proton-proton ou électron-positron à haute énergie est troublant : il ne s'agirait alors pas d'un système thermique au sens de Boltzmann, (i.e. un état d'équilibre maintenu grâce à de nombreuses collisions entre les particules) mais d'une « domination de l'espace de phases ». Dans les collisions d'ions lourds à haute énergie, la situation est différente : la quantité de ré-interactions est estimée suffisante pour créer cette matière thermodynamique et pouvoir attribuer aux multiplicateurs de Lagrange T et μ_B leur signification physique de température et de potentiel chimique. Dans ce cadre-là, le modèle statistique peut fournir indirectement certaines indications sur l'apparition d'un QGP.

Déjà au SPS puis au RHIC, les abondances relatives de particules ont conduit à des températures ($\simeq 170$ MeV) proches de la transition de phase prédite par les calculs QCD sur réseau. Cela suggère que le système était, au préalable, au dessus de cette limite et que les hadrons observés se sont formés à partir d'une phase de partons déconfinés. Ces approches ont permis de construire une image statistique unifiée, de SIS jusqu'au RHIC, via l'AGS et le SPS, caractérisée par une augmentation de T et une diminution de μ_B suivant une courbe d'énergie moyenne par hadron d'environ 1 GeV.

Au LHC, il s'agit de déterminer si la production de particules suit la même systématique, impliquant des valeurs de température de freeze-out chimique et de potentiel chimique baryonique proches de celles du RHIC ou si elle est sujette à des déviations pouvant témoigner de l'importance des processus hors équilibre. Dans ce contexte, suivant les prédictions de modèles statistiques hors équilibre autorisant une « sur-saturation » de l'étrangeté, la production de particules étranges et surtout celle de baryons multi-étranges pourrait fortement excéder au LHC celle prévue par les modèles statistiques à l'équilibre.

Ces scénarios s'inscrivent dans la continuité des prédictions théoriques plus anciennes pour lesquelles l'accroissement de la production d'étrangeté peut être considérée comme une signature robuste du QGP : non seulement la production des baryons étranges (Λ , Ξ , Ω) et leur anti-particules serait plus importante dans un QGP par rapport à un système hadronique (proton-proton ou proton-noyau) mais un tel accroissement augmenterait avec le contenu en quarks étranges du baryon. Un tel comportement a été observé au SPS, au RHIC et récemment dans les collisions PbPb du LHC mais son interprétation n'est pas sans ambiguïté. En effet, un tel résultat peut être qualitativement reproduit par des calculs statistiques dans le cadre d'un modèle de gaz de hadrons, à condition d'utiliser un formalisme canonique. Dans cette formulation canonique, la conservation exacte des nombres quantiques, événement par événement, réduit fortement l'espace de phases disponible pour la production de particules, comparé à l'ensemble grand canonique. L'effet observé correspondrait alors à une suppression de l'étrangeté dans p-p et p-noyau par rapport à noyau-noyau. Bien que cette modélisation explique l'amplitude globale de l'effet (entre p-noyau et collisions centrales noyau-noyau), elle ne reproduit pas correctement au SPS et au RHIC son évolution en fonction du nombre de nucléons participants. Une explication proposée est que le volume de corrélations pour la production de particules étranges ne suit pas linéairement le nombre de nucléons participants, et que la véritable échelle serait plutôt liée au nombre de collisions binaires ou dépendrait d'une structure plus complexe (core-corona) de la zone de recouvrement des deux noyaux. Dans ce cadre, il est très important de confirmer/infirmier cette tendance à l'énergie du LHC. L'ensemble de ces questions ouvertes doit être traité par l'analyse des collisions Pb-Pb ainsi que les références constituées des collisions p-p. Pour reprendre l'exemple de l'augmentation d'étrangeté, répondre aux questions qui se posent au LHC (quel est le volume de corrélation adéquat ? quelle est l'échelle qui régit sa fonction d'excitation ? quelle est l'influence des processus hors équilibre ? les différences entre p-p et Pb-Pb sont elles encore significatives ?) nécessite de confronter les données p-p d'une part aux modèles

statistiques et d'autre part aux modèles dynamiques, incorporant à la fois les aspects perturbatifs de QCD et une description phénoménologique de ses aspects non perturbatifs.

2.4 Sondes électro-magnétiques

Dans le cadre de l'étude du QGP, l'utilisation des sondes électromagnétiques a un double intérêt :

1. Comme elles sont peu modifiées par le plasma de quarks et de gluons, elles servent de références aux processus qui sont pour leur part modifiés.
2. Leur légères modifications reflètent des effets nucléaires qui sont en soit intéressants : isospin, shadowing ou saturation.

D'un point de vue expérimental, seuls les photons étaient accessibles au RHIC. Par contre, au LHC, les bosons électrofaibles Z et W deviennent également accessibles. L'expérience CMS a rapporté que les photons et les bosons acquis lors de la première prise de données Pb–Pb n'étaient pas modifiés par le plasma, avec des incertitudes qui sont encore grandes. Des mesures de haute précision sont donc nécessaires. Les mêmes mesures conduites dans des collisions p-A sont également nécessaires pour poser des contraintes fortes sur les fonctions de distribution de partons nucléaires (nPDF). Photons et bosons Z sont également importants dans des processus photon-jet et Z -jet dans lesquels ils fournissent une mesure in-situ de l'énergie transverse du jet.

2.5 Production des saveurs lourdes

2.5.1 Quarkonia

Les quarkonia sont considérés comme étant des sondes privilégiées pour étudier la matière formée dans les collisions d'ions lourds ultra-relativistes. Deux mécanismes sont généralement envisagés : Le premier mécanisme, l'écrantage de couleur dans le QGP, se traduit par une suppression de la production des quarkonia et en particulier du J/ψ . Si on prend en compte la suppression des ψ' et χ_c qui contribuent (via leur désintégration en J/ψ) respectivement à environ 10% et 30% au taux de production du J/ψ , alors une suppression séquentielle du J/ψ devrait être observée. Ceci donnerait accès à la température relative de dissociation de ces résonances et à une estimation expérimentale de la température maximale atteinte dans les collisions d'ions lourds. Le second mécanisme qui se traduit par l'augmentation de la production des quarkonia, est du à la recombinaison des quarks c et \bar{c} dans le QGP [2]. Ce scénario qui nécessite une production suffisante de paires de quarks charmés est inopérant aux énergies du SPS puisqu'environ 0,1 paires $c\bar{c}$ sont produites par collision contre une dizaine aux énergies du RHIC, plusieurs dizaines à celles du LHC.

L'expérience NA50 au SPS a mesuré à mi-rapidité la production des J/ψ et ψ' dans les collisions p-A [3] à $\sqrt{s_{NN}} \simeq 30$ GeV et Pb–Pb [4] à $\sqrt{s_{NN}} \simeq 17$ GeV. La suppression de la production du J/ψ dans les collisions p-A a été interprétée comme de l'absorption dans la matière nucléaire froide. Après extrapolation de cette absorption aux collisions Pb–Pb, une suppression a été observée dans les collisions les plus centrales indiquant la présence d'effets chauds qui pourraient être attribués à la formation du QGP ou à l'interaction du J/ψ avec des hadrons covoyageurs. L'amplitude de cette suppression a été estimée à environ 20–40%, ce qui pourrait correspondre à la suppression des mésons χ_c et ψ' .

Au RHIC, à une énergie dix fois supérieure à celle opérée au SPS, l'expérience PHENIX qui a mesuré la production du J/ψ à rapidité centrale et à rapidité avant [5]. À mi-rapidité la suppression du J/ψ observée dans les collisions Au–Au est similaire à celle observée au SPS. Ceci pourrait être interprétée par le mécanisme de suppression séquentielle, ou par un mécanisme de recombinaison compensant une plus grande suppression due à la plus grande densité d'énergie.

De plus, la mesure à rapidité avant montre une suppression plus grande qu'à rapidité centrale. Les résultats récents de la dernière prise de données d–Au [6] semblent indiquer que cette suppression supplémentaire pourrait être entièrement due aux effets nucléaires froids.

Au LHC, à des énergies 15 fois supérieures à celles opérées au RHIC, 50 à 100 paires $c\bar{c}$ sont produites par collision centrale Pb–Pb. Dans ces conditions, le taux de production de charme par unité de rapidité pourrait être suffisamment grand pour aboutir à l'augmentation de la production de charmonium [7]. Les premiers résultats obtenus par les expériences ALICE et CMS montrent qu'à rapidité centrale, dans CMS, les J/ψ d'impulsion transverse supérieure à 6,5 GeV/c sont plus fortement supprimés qu'au RHIC. À rapidité avant, dans ALICE, sans coupure en impulsion transverse, les J/ψ sont moins supprimés qu'au RHIC. À la lumière de ces résultats récents, un scénario global et cohérent, impliquant les mécanismes de suppression séquentielle et de recombinaison, commence à émerger. Il pourrait permettre d'interpréter l'ensemble des résultats obtenus, depuis les énergies du SPS jusqu'à celles du LHC : au SPS et au RHIC, le J/ψ serait soumis au seul mécanisme de suppression séquentielle ; au LHC, le J/ψ serait soumis à la fois au mécanisme de suppression séquentielle et au mécanisme de recombinaison.

Ces résultats importants restent cependant encore insuffisants pour aboutir à l'objectif initial : tester les prédictions de la QCD sur réseau et évaluer expérimentalement la température maximale atteinte dans les collisions d'ions lourds. Plusieurs éléments restent encore à clarifier :

- Implication du mécanisme de suppression séquentielle : ce test peut être effectué en mesurant la production d'état suffisamment liés, contribuant significativement à la production du J/ψ , tels que le χ_c . Cette mesure est essentielle pour aboutir à la compréhension globale des phénomènes mis en jeu depuis les énergies du SPS jusqu'aux énergies du LHC.
- Implication du mécanisme de recombinaison : la mesure et la compréhension du mécanisme de recombinaison va nécessiter l'étude simultanée de plusieurs observables telles que le flot elliptique du J/ψ , le quenching des quarks charmés ou encore l'évolution de la suppression de la production du J/ψ en fonction de l'impulsion transverse ou de la rapidité.
- Production des bottomonia : l'étude de la production des bottomonia au LHC, donnera une information importante sur le comportement de la beauté dans les collisions d'ions lourds.
- Compréhension des effets nucléaires froids : la compréhension des effets nucléaires froids, des énergies du SPS à celles du LHC est essentielle pour obtenir une bonne estimation des effets chauds à l'œuvre dans les collisions d'ions lourds. Ils constituent encore aujourd'hui un chantier important. La limitation de la couverture en rapidité de l'expérience NA50 et les incertitudes sur les mesures effectuées au RHIC n'ont pas encore permis de répondre de manière non ambiguë. Au LHC, une prise de données p–Pb est programmée en 2012.
- Maîtrise des mécanismes de production des quarkonia dans les collisions p–p. Ces processus font l'objet de nombreux calculs en pQCD, mais les comparaisons des données en collisionneurs hadron-hadron et lepton-hadron et les mesures de polarisation représentent toujours un défi pour ces modèles. Des mesures précises de la production des divers états des familles des quarkonia en fonction de \sqrt{s} , de sondes plus rares ou des corrélations, en parallèle à des développements théoriques sur les processus de production et les contributions des ordres supérieurs permettront de mieux comprendre les mécanismes de production des quarkonia.

2.5.2 Saveurs lourdes

Les expériences STAR et PHENIX ont mis en avant la suppression à haut p_T des électrons d'origine non photonique (ENP) au cours des collisions d'ions lourds ultrarelativistes. Ceux-ci

étant majoritairement issus de la décroissance des mésons charmés et beaux, l'interprétation la plus souvent avancée de cette suppression est que les conditions extrêmes de température et de densité d'énergie atteintes au cours de ces collisions au RHIC induisent une perte d'énergie et un couplage au plasma significatifs des quarks lourds, d'où un quenching du spectre des hadrons charmés et beaux. Cette interprétation est corroborée par l'observation d'un flot elliptique différentiel des ENP de l'ordre de 10 %, i.e. similaire à celui des hadrons légers.

Un tel degré de « thermalisation » ne se déduit toutefois pas naturellement de la théorie fondamentale (QCD), dont les prédictions vont plutôt dans le sens d'un couplage d'autant plus faible que la masse du quark est importante (effet de cône mort dans les pertes d'énergie d'origine radiative[8], temps de thermalisation inversement proportionnel à la masse des quarks dans un traitement stochastique « à la Fokker-Planck » [2,9], etc.); si certains modèles effectifs parviennent aujourd'hui à reproduire les spectres des électrons non photoniques [10], notons qu'il n'existe actuellement aucun modèle permettant de reproduire à la fois les propriétés des spectres de hadrons légers et lourds.

Au LHC, les premiers résultats relatifs aux mésons D (ALICE) ainsi qu'au J/ψ non prompts majoritairement issus de la décroissance des mésons B (CMS) indiquent d'ores et déjà une perte d'énergie au moins aussi importante qu'aux énergies du RHIC. Les prochaines prises de données à grande statistique et portant simultanément sur les mésons D et B permettront de contraindre significativement l'origine et la dépendance de la perte d'énergie vis-à-vis de la masse des quarks constituant les hadrons et de leur énergie. Elles pourraient aussi conduire à mettre en évidence de nouveaux effets non prédits par le traitement perturbatif de la théorie QCD (comme une éventuelle saturation de la perte d'énergie).

Les caractéristiques cinématiques, telles que le flot elliptique, apporteront eux aussi de l'information sur les mécanismes d'hadronisation et/ou de thermalisation de ces hadrons et sur les échelles de temps impliquées, ce qui permettra de mieux maîtriser la distribution des quarks charmés dans l'espace des phases au moment de leur recombinaison en quarkonia.

2.6 Jets

La physique des hautes impulsions transverses et en particulier des jets a pour objectif d'étudier l'évolution d'un parton issu de processus durs lorsqu'il traverse le plasma de quarks et de gluons. On s'attend à ce que la perte d'énergie, qui en résulte, dépende des mécanismes d'interaction avec le milieu coloré et des propriétés thermodynamique du milieu traversé (densité d'énergie, viscosité etc ...). Cependant la description complète de la production de jets nécessite de contrôler également la production initiale des partons et de leur fragmentation dans l'état final.

Au début des années 2000, les expériences basées auprès de l'accélérateur RHIC ont montré des résultats très intéressants avec l'observation d'une forte suppression des taux de comptage inclusifs des hadrons de grands p_T en collisions centrales ainsi qu'une décorrélation angulaire dans la production de paires de hadrons émis à 180° . Cependant la physique de la particule prépondérante et son interprétation a montré des limitations de type biais de *trigger* et biais de surface qui ont motivées l'étude des jets dans leur ensemble. Bien que limitées par les énergies du RHIC, les premières études de R_{AA} de jets, par exemple, ont d'ores et déjà montré les effets de perte d'énergie par émission de gluons mous à l'extérieur du cône de reconstruction des jets. Des études complexes des distributions en moment des particules dans les jets ont mis en évidence l'importance de l'événement sous-jacent (*Underlying Event* = UE) et de ses fluctuations dans les collisions d'ions lourds à ne pas négliger dans l'étude des jets.

Avec l'augmentation en énergie au LHC, on s'attend à ce que la production de jets joue un

rôle central dans l'étude du QGP. Suite aux premières prises de données réalisées en collisions $Pb - Pb$ en 2010, l'expérience ALICE, qui utilise pour la mesure des jets l'information couplée de son système de trajectométrie et de son calorimètre, s'est focalisée sur la compréhension et l'influence de l'UE dans cette reconstruction. Ces études devraient lui permettre d'étudier la physique des jets dans un domaine d'assez bas p_T , à mi-rapidité, complémentaires de celles d'ATLAS et CMS et de construire des fonctions de fragmentation à très petits z ($=p_T^{had}/p_T^{jet}$) où les effets de perte d'énergie devraient être dominants. Les premiers résultats d'ALICE sont pour l'instant en bon accord avec les résultats de l'expérience STAR à plus basse énergie. Les expériences ATLAS et CMS ont choisi de se placer dans un domaine en énergie plus élevée, où elles ont observé des asymétries en énergie de l'ordre de 50% dans les événements di-jets dans les collisions centrales absente dans les collisions $p - p$ pour un jet *trigger* de plus de 100 GeV/c. Ces résultats semblent indiquer la production d'un milieu dense même s'ils pourraient être expliqués par de simples considérations liées aux fluctuations de l'UE. D'autres mesures de l'expérience CMS ont montré que la perte d'énergie du jet secondaire ne semble pas s'accompagner d'un élargissement angulaire de ce dernier ni d'une modification de sa fonction de fragmentation par rapport aux collisions élémentaires. Cependant, la coupure imposée sur le p_T des hadrons ne permet pas de conclure quant à la modification de la distribution à petit z où les effets de *quenching* mais également de l'UE sont dominants. Une étude plus globale de la répartition des particules dans l'événement par rapport à l'axe du jet semble indiquer toutefois que l'énergie serait dissipée à très grand angle (en dehors du cône dans lequel est contenu le jet) et à des p_T inférieurs au GeV/c.

Bien que d'ores et déjà très riches, les premiers résultats du LHC sur la physique des jets dans les collisions d'ions lourds sont encore loin d'être maîtrisés et compris. Ils ne pourront être que meilleurs avec des études couplées à la production de photons directs et surtout la maîtrise de l'événement sous-jacent. Les premiers résultats obtenus suggèrent que l'énergie transmise par le parton dans le milieu semble être en grande partie dissipée par ce dernier et devrait se retrouver dans les propriétés du milieu (physique *soft*). Par ailleurs, les différentes harmoniques du flot du *bulk* contribuent de façon non négligeable aux fonctions de corrélation azimutales entre particules *trigger* et associées motivant d'autant plus l'étude de l'UE

3 Perspectives

L'analyse des données de RHIC et du LHC a permis durant la dernière décennie d'accumuler de nombreuses informations expérimentales. Cependant, nous sommes encore loin de maîtriser les processus complexes mis en jeu dans les collisions d'ions lourds dans le but de caractériser le QGP. C'est pourquoi il est indispensable de poursuivre notre effort aussi bien au niveau théorique qu'expérimental.

Les projets, qui sont proposés dans le cadre des prospectives, peuvent ainsi être classés suivant leur motivations scientifiques :

- Les conditions de thermalisation du milieu et l'imbrication des processus durs et mous pourront être étudiés à partir de la production des hadrons étranges (3.1) et charmés (3.2). La mesure de baryons charmés nécessite de l'amélioration de l'ITS d'ALICE (3.2). De plus, l'expérience CBM permettra d'étendre ces études à une zone du diagramme de phase à haute densité baryonique (3.3).
- La compréhension des mécanismes de production des quarkonia, qui représente un axe importante au sein de la communauté française, devra être poursuivie à travers les analyses des expériences ALICE (3.6.1) et CMS (3.10) dans des domaines de cinématiques complémentaires. En particulier, la mesure du charmonium ψ' et les mesons vecteurs nécessitera de l'amélioration du spectromètre à muons d'ALICE (3.5) et l'ajout du trajectographe

MFT (3.7). Deux nouvelles expériences sur cible fixe sont proposées : CHIC (3.8) au SPS, qui se propose de mesurer la suppression χ_c et AFTER (3.9) au LHC, qui envisage une mesure systématique de haute précision aux énergies du RHIC.

- L'étude des mécanismes mis en jeu dans les processus de perte d'énergie des différents types de partons dans un milieu coloré et de leur hadronisation nécessite d'augmenter la précision des mesures actuelles. Il est donc proposé de poursuivre les efforts d'analyse sur la physique des jets entrepris sur les expériences CMS (3.10) et ALICE (3.11) et d'améliorer les capacités de la calorimétrie au sein d'ALICE (3.12). De plus, l'analyse sur la production des saveurs lourdes à grande impulsion transverse permettra de mesurer la perte d'énergie des quarks c et b dans la QGP (3.6.2).

Par ailleurs, il est important de noter que la poursuite du programme expérimental d'ALICE nécessite des upgrades sur les dispositifs expérimentaux existants dont la France a la charge comme le détecteur V0 (3.4).

3.1 Etude des mécanismes d'hadronisation et des propriétés du « bulk » sous l'angle des hadrons étranges

3.1.1 Rapports baryon/méson et corrélations azimutales

Dans les collisions d'ions lourds du RHIC et du LHC, les différences observées entre mésons et baryons au niveau notamment de leur distribution en impulsion transverse (excès de baryons par rapport aux mésons à p_T intermédiaire) peuvent s'expliquer par l'imbrication de processus durs (conduisant à une hadronisation par fragmentation de partons) et de processus mous (formation de hadrons par recombinaison de partons et influence du flot radial). Il sera essentiel d'étudier l'évolution de ces mécanismes du RHIC au LHC où l'on prévoit que la limite de recombinaison devrait être déplacée de façon substantielle vers les plus hauts p_T . Il faudra évaluer l'influence respective des mécanismes de coalescence et de fragmentation en comparant la production des hadrons dans les collisions Pb-Pb (incluant son évolution en fonction de la centralité de la collision) avec celle issue des collisions proton-proton. Dans ce contexte, les hadrons étranges (méson K_s^0 et baryons Λ , Ξ , Ω) constituent une sonde précieuse et unique car ils sont mesurés et identifiés par des méthodes de reconstruction topologique, ce qui permet de couvrir un domaine en p_T très vaste. Parallèlement, l'objectif sera de quantifier le degré de production lié à des interactions parton-parton dures par rapport à des modes de formation plus lents impliquant des interactions multi-partoniques et des processus de type recombinaison. Cela nécessitera des études différentielles consistant à associer la production de hadrons étranges à l'émission simultanée de particules de haute impulsion transverse, essentiellement en mesurant les possibles corrélations angulaires azimutales entre les hadrons étranges et des particules chargées provenant de mini-jets et de jets reconstruits par calorimétrie. Ces études ont débuté avec les premières données Pb-Pb ($\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV) et pp (0.9 et 7 TeV) du LHC. Elles se poursuivront sur l'ensemble des campagnes de prise de données de ces prochaines années, couvrant une gamme d'énergie allant jusqu'à 5.5 TeV pour les collisions PbPb et 14 TeV pour les collisions pp. L'ensemble de ce programme s'étendra sur 4 à 5 ans, c'est-à-dire jusqu'en 2016 probablement.

3.1.2 Degré d'équilibre et influence des jets sur les propriétés du « bulk »

Il s'agira de tester le degré d'équilibration chimique et thermique du « bulk » en comparant les taux de production et rapports de taux de production des hadrons mesurés aux prédictions de divers modèles statistiques à l'équilibre et hors équilibre. Dans ce contexte, les baryons étranges et surtout les baryons multi-étranges (Ξ , Ω) jouent également un rôle clef car ils sont la source de contraintes particulièrement fortes pour les modèles, relatives notamment à la température

de gel chimique. Suivant certaines prédictions, impliquant des scénarios hors équilibre et la possibilité d’avoir une « sur-saturation » de l’étrangeté, la production de particules étranges au LHC, et surtout celle de baryons multi-étranges, pourrait fortement se différencier de celle prévue par les modèles statistiques à l’équilibre. L’état de l’analyse des données PbPb à $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV n’apporte pour l’instant que les premiers éléments de réponse à notre questionnement. Il semble certes montrer que les modèles statistiques à l’équilibre, bien qu’ils soient soumis à rude épreuve au LHC, parviennent à reproduire de manière satisfaisante la plupart des rapports de taux de production des particules mais seule une étude systématique de l’ensemble de ces rapports et surtout de leur évolution entre 2.76 et 5.5 TeV pourra apporter une conclusion solide. Parallèlement, une analyse de la composition chimique des événements, en fonction de leur contenu en jets et de l’énergie (ou impulsion) de ces jets permettra d’évaluer l’influence des jets sur la composition chimique du « bulk » et sur sa thermalisation. Elle devrait également permettre de déterminer les corrélations entre la phase initiale et les phases de freeze-out ainsi que les corrélations entre les processus mous et durs. L’accomplissement de ces analyses, démarrées en novembre 2010, nécessitera plusieurs années (4-5 ans).

Pour l’ensemble de ces études, les physiciens impliqués proviennent essentiellement de l’IPHC et sont au nombre de 4.

3.2 Hadrons charmés et upgrade de l’ITS d’ALICE

L’extension de l’étude des modes de formation des hadrons aux saveurs lourdes (quark charmé en particulier) apportera des informations complémentaires cruciales sur les mécanismes de coalescence et de fragmentation, ainsi que sur leur imbrication à p_T intermédiaire qui semble prévaloir pour les saveurs légères (quarks u, d et s). Qu’en sera-t-il pour les hadrons charmés ? La réponse à cette question nécessitera de pouvoir mesurer à la fois les mésons charmés (mésons D) et les baryons charmés (Λ_c), pour produire les rapports baryon/méson correspondants. Avec la configuration du trajectographe interne (ITS) d’ALICE tel qu’il est actuellement, la mesure des mésons D se fait dans de bonnes conditions, en utilisant des méthodes de reconstruction topologique du même type que celles utilisées pour reconstruire les hadrons étranges. En revanche les baryons charmés sont difficilement mesurables car ils se désintègrent beaucoup plus rapidement ($c\tau = 60 \mu\text{m}$ pour le Λ_c). Leur mesure nécessite une meilleure résolution sur le paramètre d’impact de leurs produits de désintégration que celle obtenue avec l’ITS actuel. Un projet d’upgrade de l’ITS a démarré au sein de la collaboration ALICE avec comme objectif l’installation du nouveau trajectographe en 2018-19. L’intérêt d’un upgrade de l’ITS ne réside pas uniquement dans la possibilité de reconstruire les baryons charmés. Les apports du nouvel ITS seront nombreux : une meilleure résolution sur le vertex principal de la collision, une meilleure sensibilité pour la mesure des mésons charmés et une amélioration du « B-jet tagging ». Parce qu’ils sont essentiellement créés lors des tous premiers instants de la collision, les hadrons charmés apportent des informations sur l’état initial du système, en particulier sur l’étape de pré-équilibre. Ils constituent également une observable cruciale pour déterminer le bruit de fond qui affecte la mesure des quarkonia. La mesure de leurs sections efficaces de production et de leurs propriétés dans les collisions proton-proton permet de vérifier les calculs des modèles inspirés de la QCD et de sonder les fonctions de distribution partoniques. Ces informations sont cruciales pour interpréter les résultats dans les collisions d’ions lourds. Ce qui semble indispensable pour améliorer la mesure des mésons charmés et permettre l’accès à la reconstruction des baryons charmés, c’est l’introduction dans l’ITS de couches de pixels supplémentaires, dont une aussi proche que possible de l’axe du faisceau (la limitation étant le diamètre du tube du faisceau), aussi fines que possible et permettant une résolution spatiale d’environ $4 \mu\text{m}$ dans les deux dimensions. L’ensemble de ces exigences plaide fortement en faveur de l’utilisation de pixels monolithiques

(capteurs intégrant sensor et micro-circuits électroniques de lecture pour le prétraitement des données). Une solution allant dans ce sens et que nous avons proposée à la collaboration ALICE est actuellement à l'étude. Ce projet se fonde sur le savoir faire et les développements de pixels monolithiques (Monolithic Active Pixel Sensors) en cours dans le groupe PICSEL de l'IPHC. Il s'agit donc d'une collaboration entre le groupe ALICE et le groupe PICSEL qui aurait en charge le développement de ces capteurs dont les performances ambitionnées sont les suivantes : Pixels CMOS minces ($50 \mu\text{m}$) en technologie $0.18 \mu\text{m}$, offrant une résolution spatiale de $4 \mu\text{m}$, dans les deux dimensions, et une tolérance aux radiations de quelques MRad et supérieure à $2 \cdot 10^{13} \text{neq/cm}^2$. L'objectif final est de produire des échelles de détection (détecteurs + support) double-face dont le budget de matière total est 0.3% de X0. L'ensemble de ce projet, qui comprendra d'abord une phase de R&D d'environ 2 à 3 ans, puis les phases de production et de mise en service, devrait s'étendre jusqu'en 2018. Les physiciens impliqués au niveau de l'IPHC sont au nombre de 7.

3.3 L'expérience CBM auprès de FAIR

CBM est l'une des expériences majeures du futur accélérateur FAIR du GSI-Darmstadt (Allemagne) dont la mise en service est prévue en 2018. Cette expérience propose, de façon complémentaire aux programmes expérimentaux du RHIC et du LHC, d'explorer le diagramme des phases de la matière nucléaire dans la région des très hautes densités baryoniques nettes (jusqu'à ~ 10 fois celle de la matière nucléaire ordinaire). Cette région, quasiment inexplorée à ce jour, sera accessible grâce au domaine d'énergie de FAIR pour les faisceaux d'ions lourds (2 à 45 GeV/nucléon). Des simulations récentes de QCD sur réseau prédisent la présence, dans cette région, d'un point critique au delà duquel la transition de phase entre le gaz hadronique et la phase partonique serait de 1^{er} ordre. La découverte de ce point critique constituerait une avancée majeure pour la physique nucléaire. Les objectifs principaux de CBM sont, outre la recherche de ce point critique, la mise en évidence d'une restauration de la symétrie chirale et l'élaboration de l'équation d'état de la matière nucléaire dans des conditions proches de celles existantes au coeur des étoiles à neutrons. Pour cela, il est prévu de mesurer un grand nombre d'observables physiques. L'accent sera mis sur celles associées à des sondes rares comme le charme ouvert, le charmonium et les mésons vecteurs légers, qui sont particulièrement sensibles aux effets de haute densité baryonique et de transitions de phases. Ces sondes rares seront mesurées pour la première fois dans le domaine d'énergie de FAIR, grâce aux grandes luminosités de ses faisceaux et l'utilisation de détecteurs de nouvelle génération.

L'équipe PICSEL de l'IPHC-Strasbourg est engagée depuis plusieurs années dans le développement de capteurs à pixels CMOS (CPS) adaptés au détecteur de vertex (MVD) de l'expérience. Celui-ci est essentiel pour l'identification des hadrons à charme ouvert (mésons D et baryons Λ_c), dont la distance de vol est extrêmement courte (durée de vie de l'ordre de la picoseconde), et qui sont très rares aux énergies de FAIR (production au seuil). Le développement concerne la radio-tolérance et la vitesse de lecture, et s'inscrit dans un programme de R&D plus général des CPS poursuivi à l'IPHC pour des détecteurs de vertex et des trajectomètres à venir (e.g. jouvence de l'ITS d'ALICE, trajectomètre SVT auprès de SuperB, détecteur de vertex pour l'ILC). L'objectif du développement est d'atteindre les spécifications du MVD correspondant au programme SIS-100 de l'expérience et, accessoirement, de faire émerger des solutions techniques potentielles pour les étapes ultérieures de son programme scientifique, dont le cahier des charges est plus exigeant.

Cette activité a donné lieu à plusieurs thèses permettant d'affiner le cahier des charges des CPS à l'aide de simulations Monte-Carlo détaillées et, simultanément, de définir la géométrie du MVD conduisant à une reconstruction optimale des hadrons à charme ouvert. L'ensemble

de ces études s'inscrit dans la préparation d'un Technical Design Report attendu vers 2014/15, période au-delà de laquelle la construction de l'appareillage expérimental pourrait commencer, pour aboutir au terme de 3 ou 4 ans au démarrage de la prise de données. Un physicien de l'IPHC, Strasbourg est impliqué dans ce projet.

3.4 Upgrade de l'électronique du VZERO d'ALICE

Le taux de déclenchement de biais minimum du VZERO est très fortement pollué par ce qui est communément nommé « after-pulse ». Ceux-ci sont causés par des ions positifs, créés par l'ionisation du gaz résiduel du photomultiplicateur, qui retournent vers la photocathode et produisent à leur tour des électrons qui vont créer un nouveau pulse. Le délai en temps après le pulse principal peut varier de quelques dizaines de nanosecondes à quelques microsecondes. Dans ALICE, le trigger de biais minimum est composé par le "ou" logique des 64 compteurs individuels. Par conséquent, la fréquence de faux triggers est haute et perturbe entre autre le déclenchement stand alone du VZERO ainsi que la mesure de luminosité.

Une série de tests en laboratoire, nous a permis d'observer que la forme des pulses de scintillation est très différente de celle d'after-pulse, ces derniers ayant une extension temporelle plus courte. Cette observation nous amène à proposer une analyse de forme de pulse permettant l'identification et la réjection des after-pulses directement au coeur de l'électronique "Front-End" du VZERO donc en ligne avant l'envoi des triggers vers le Processeur de Trigger Central.

L'upgrade de l'électronique est centré sur le remplacement des intégrateurs de charge (QDC) par des flashes ADC d'une fréquence de 0.5 GHz permettant la mesure de l'amplitude du pulse toutes les 2 ns. L'efficacité de la méthode est en cours d'évaluation en laboratoire. La nouvelle électronique reprendra toutes les fonctionnalités de la présente tout en y ajoutant la réjection des after-pulses ainsi que des corrections actuellement faites offline comme la correction de "slewing". Une décision concernant la validation de cet upgrade sera faite en fin d'année 2011. Cet upgrade devra être opérationnel au redémarrage du LHC après le long shutdown de 2013. Trois physiciens de l'IPN de Lyon sont impliqués dans ce projet.

3.5 Upgrade du spectromètre à muons d'ALICE

Certains objectifs scientifiques ne seront atteints qu'avec l'amélioration du LHC. Elle permettra, après 2018, de taux de collisions Pb–Pb de l'ordre de 50 kHz. Pour profiter pleinement de cette amélioration du LHC, les systèmes de trajectographie et de déclenchement du spectromètre à muons d'ALICE devront être améliorés.

La lecture de l'électronique frontale des dix chambres du système de trajectographie du spectromètre à muons d'ALICE est réalisée en parallèle par vingt modules électroniques appelés CROCUS (Cluster Read Out Concentrator Unit System). Les données collectées par un CROCUS sont traitées et mises en forme par une ferme de quatorze DSP (Digital Signal Processor) et douze FPGA (Field Programmable Gate Array) avant d'être envoyées au système d'acquisition global. La gestion des busy des CROCUS et des signaux de déclenchement provenant du trigger général d'ALICE est assurée par le TCI (Trigger Crocus Interface) qui est une ferme de douze FPGA et cinq DSP.

Le design de cette électronique remonte à l'an 2000 et était à l'époque à la pointe de la technologie. Depuis plus de dix ans, l'électronique numérique a considérablement évolué et les progrès permettent d'envisager un système beaucoup plus performant, beaucoup plus simple techniquement et surtout plus simple à mettre en œuvre. La conception d'une nouvelle électronique de read-out permettra de prendre en compte un certain nombre de contraintes qui sont apparues lors du démarrage du LHC. Ainsi le temps de lecture et donc le busy pourraient être beaucoup plus courts (inférieur à 100 μ s), une meilleure résistance aux interruptions dues

aux causes environnementales comme les radiations pourra être prévue. Les problèmes pouvant survenir sur les détecteurs, en particulier ceux dus à des dysfonctionnement de l'électronique frontale, qui impactent les performances des CROCUS pourront être pris en compte et corrigés. Il pourrait être également envisagé de revoir le système de gestion des triggers (TCI).

Le développement de cette électronique, qui intéresse également d'autres expériences, pourrait se faire rapidement compte tenu des connaissances acquises sur le précédent système et de l'expertise disponible à l'IPNO. Durant l'arrêt long prévu au LHC en 2013-14 il pourrait être envisageable, après tests en laboratoire, d'installer un premier prototype sur le spectromètre fin 2014. Si les tests se révélaient concluants, le remplacement pourrait se faire soit progressivement, soit lors d'un arrêt long.

Le système de déclenchement du spectromètre à muons d'ALICE, ou Muon TRigger (MTR), est composé de 72 détecteurs de type RPC (Resistive Plate Chambers) équipés de 21K « strips » pour l'extraction du signal et d'autant de voies d'électronique de front-end réparties sur 2400 cartes. Ce front-end assure essentiellement une fonction de discrimination et fournit un signal logique, de largeur 25 ns, au format LVDS en sortie. Il n'y a pas d'amplification du signal au niveau du front-end, ce qui impose un fonctionnement en mode streamer ou « grande avalanche » des RPC. Le gain des RPC elles-mêmes (via la haute tension appliquée) est donc élevé, ce qui induit potentiellement des effets de vieillissement du détecteur plus importants que dans un mode de fonctionnement en pure avalanche, avec une électronique de front-end amplifiée. Ce choix avait été fait évidemment parce qu'il respectait les exigences connues du fonctionnement dans ALICE sur les premiers 10 ans de prises de données. D'autre part, la disposition des strips sur les RPC d'ALICE fait qu'il est difficile d'assurer un blindage électro-statique fiable, ce qui pourrait poser des problèmes de bruit dans le cas d'un front-end amplifié. Avec l'électronique de front-end actuelle, il est clair que le vieillissement des RPC serait très rapide aux luminosités correspondant aux futurs faisceaux LHC de l'après 2019. Déjà fin 2011, les mauvaises conditions de bruit faisceau en pp (qui était complètement dominant par rapport à la contribution relative aux interactions) étaient difficilement tolérables pour les RPC : des comptages de l'ordre de 30 Hz/cm² sur une grande partie du MTR ont été mesurés alors que les valeurs de design, à courant nominal dans le LHC, étaient de l'ordre de 10 Hz/cm². A noter que le vieillissement des RPC a été testé durant la phase de R&D du MTR jusqu'à 500 Mhits/cm², sans effet notable de vieillissement, ce qui correspond seulement à quelques mois de fonctionnement avec de tels taux de hits sur les RPC. Des actions visant à diminuer le bruit faisceau sont en cours mais les résultats ne seront pas connus avant le printemps 2012.

Il serait donc judicieux voire nécessaire d'anticiper une R&D sur une nouvelle électronique de front-end amplifié, incluant des tests sur les RPC en situation réelle dans la caverne ALICE. En effet, si une R&D est lancée dès 2012, il semble envisageable, d'un point de vue planning, d'équiper entièrement une des RPC d'ALICE, pendant l'arrêt LHC de 2013-2014, puis de réaliser une production et de remplacer complètement l'électronique de front-end pendant l'arrêt d'hiver de 2015. 18 physiciens de l'IPN d'Orsay, du LPC de Clermont et de Subatech (Nantes) sont impliqués dans ce projet.

3.6 Analyse Quarkonium et Saveurs Lourdes dans ALICE au LHC

ALICE permettra d'étudier la production de saveurs lourdes ouvertes et de quarkonia avec une acceptance unique au LHC dans deux domaines distincts en rapidité $|y| < 0.9$ et $2.5 < y < 4$ jusqu'à une impulsion transverse (p_t) nulle pour les quarkonia. Plusieurs systèmes de collisions seront délivrés par le LHC avec des collisions de noyaux lourds (Pb-Pb), de noyaux légers (Ca-Ca) ainsi que l'étude de système asymétrique tels que p-Pb (Pb-p). Ces derniers seront déterminants afin d'évaluer les effets nucléaires froids susceptibles d'apporter une contribution non négligeables

sur les mesures des différents observables citées ci-dessous. Les premières collisions p-Pb sont attendues fin 2012.

3.6.1 Analyse des quarkonia

La campagne de prise de données Pb-Pb de 2010 à 2.75 TeV a permis de mesurer pour la première fois le facteur de modifications nucléaire R_{AA} du J/ψ dans le domaine en rapidité $2.5 < y < 4$ au LHC. Les résultats montrent une importante suppression, de l'ordre de 0.5, qui est moins importante que celle observée au RHIC et est indépendante de la centralité de la collision. La prise de données d'ions lourds de 2011 a permis d'accroître de manière significative la statistique de quarkonia reconstruits et permettra une étude différentielle du R_{AA} du J/ψ (fonction de l'impulsion transverse) ainsi que les premières mesures de son asymétrie azimuthale. De plus la mesure du Υ ainsi que les premières mesures du ψ' sont désormais accessibles.

Plus d'un demi-million de J/ψ par an seront reconstruits par le spectromètre à muon d'ALICE quand les luminosités prévues seront atteintes, à l'horizon de 2014. Cela permettra d'étudier en détail la dépendance en centralité du facteur de modification nucléaire du J/ψ , pour des $p_t = 0$ et jusqu'à des impulsions transverses inexplorées (20-30 GeV/c). Une observable clef pour comprendre la physique sous-jacente, sera également d'étudier dans les années à venir avec une grande précision l'anisotropie azimuthale du J/ψ , ou flow elliptique, et cela en fonction de la centralité, de l'impulsion transverse et de la rapidité. Par ailleurs deux nouveaux canaux de quarkonia seront accessibles avec la mesure du ψ' ainsi que celle du Υ . Ces résonances permettront à terme, de part leurs températures de dissociation différentes, de comprendre les phénomènes de production et de suppression mis en jeu dans le Plasma de Quarks et de Gluons.

Il est important de souligner que ces différentes mesures seront complémentaires avec celles menées par la collaboration CMS, puisqu'elles couvriront un domaine en rapidité différents. De plus, il fut montré au RHIC que la suppression de J/ψ était différente suivant le domaine en rapidité considéré, avec une suppression plus importante pour des rapidités élevées. Enfin, les processus de suppression et de régénération pourront être mieux compris en mesurant les taux de productions de particules belles et charmés de part leur différente section efficace de production.

3.6.2 Analyse des saveurs lourdes ouvertes

En ce qui concerne les saveurs lourdes ouvertes, il sera possible de différencier le R_{AA} et le flot elliptique des particules charmés et belles avec le spectromètre à muons. Ces analyses se feront avec la mesure de muons simples dans le spectromètre à muons dans un large domaine en impulsion transverse. Ainsi les différentes pertes d'énergies par radiation des quarks lourds dans le Plasma de Quarks et de Gluons pourront être étudiées. Ces mesures ne furent pas accessibles au RHIC et permettront donc de mettre en évidence ou non la prédiction du « dead cone effect » et permettront d'obtenir des informations quant à la densité du milieu déconfiné. Une mesure de référence qui sera faite avec les muons simples sera celle du vecteur d'interaction faible W pour des énergies transverses allant de 30 à 60 GeV/c. Étant insensible à l'interaction forte et donc au plasma de quarks et de gluons, aucune modification nucléaire n'est attendue. Dans la partie centrale du détecteur ALICE, de nouvelles mesures de baryons charmés seront également accessibles avec par exemple la mesure du Λ_c .

Enfin, de nouvelles analyses pourront également être menées telle que la mesure de la fraction de J/ψ venant de la décroissance de hadrons beaux en sélectionnant des événements contenant au moins trois muons dans l'acceptance du spectromètre. De plus, la mesure de dileptons issus de la décroissance de saveurs lourdes ouvertes en combinant les données des parties centrale et avant du détecteur ALICE permettra d'étudier leurs productions dans un domaine en rapidité inédit pour ALICE.

L'analyse des quarkonia et des saveurs lourdes se poursuivra au delà de 2018 grâce aux différentes mises à jour (« upgrade ») d'ALICE, avec en particulier l'upgrade du spectromètre à muons (3.7). Les laboratoires impliqués dans l'analyse des différents canaux de physique discutés sont les suivants : LPC, Clermont-Ferrand ; Subatech, Nantes ; IPN, Lyon ; IPN, Orsay ; Irfu, Saclay et IPHC, Strasbourg. Environ 34 physiciens participent à ces analyses.

3.7 Mésons vecteurs, Quarkonia et Upgrade ALICE MUON : MFT

Le programme de physique du spectromètre à muons d'ALICE comprend des études sur les mésons charmés et beaux ouverts (D et B) à travers leur canal de désintégration en muons ainsi que les quarkonias (J/ψ , ψ' et $\Upsilon(1s,2s,3s)$) et les mésons vecteurs de faible masse (ρ , ω , ϕ) à travers leur canal de désintégration en di-muons. Cette physique est étudiée dans les collisions p-p pour étudier les spectres perturbatif et non-perturbatif de QCD et Pb-Pb pour sonder les propriétés du QGP. Ces études seront menées également en collisions pA pour l'étude des effets nucléaires froids. Les performances du spectromètre actuel sont contraintes par la présence d'un épais absorbeur utilisé pour stopper un grand nombre de pions et de kaons avant leur décroissance muonique. La présence de cet absorbeur empêche la mesure précise des propriétés des muons due aux effets de perte d'énergie et de collisions multiples. Ceci impose un certain nombre de limitations sur la physique qui lui est accessible. En effet, seule la production inclusive de J/ψ peut-être étudiée car il n'est pas possible de distinguer les J/ψ provenant de la décroissance de la beauté. Nous pouvons également indiquer le fait que l'étude des mésons charmés et beaux ouverts n'est actuellement pas une mesure directe et dépend de modèles pour déterminer les formes des spectres. Finalement, la zone des basses masses en di-muons souffre d'une forte contamination du bruit de fond combinatoire (décroissance semi-muonique des pions et kaons) ainsi que d'une perte de résolution en masse.

La construction du « Muon Forward Tracker » (MFT) est essentiellement motivée par l'amélioration rendue possible grâce à la mesure du DCA (« Distance of closest approach ») des muons simples et du vertex des di-muons. En conséquence les mésons charmés ouverts ($c\tau < 150 \mu\text{m}$) et beaux ($c\tau < 500 \mu\text{m}$) seront clairement identifiés permettant une étude indépendante des modèles jusqu'à un p_T de 1 GeV/c. Le MFT permettra de démêler les charmonia directs (J/ψ , ψ') de leurs productions provenant de la désintégration des B qui représente environ 20% pour le J/ψ et 40% pour le ψ' . Ceci permettra l'étude de la production de la beauté jusqu'à des p_T nuls ce qui est une caractéristique unique au LHC. La quantification de ces mesures est importante en vue de comprendre l'effet direct du QGP sur la production des charmonia. Le MFT, grâce à sa capacité de reconstruction de traces, permettra également d'améliorer la résolution en masse des résonances afin d'obtenir une meilleure séparation entre les états « ρ , ω , ϕ », « J/ψ , ψ' » et les différents états de la famille des Υ . En outre, il contribuera à rejeter une fraction importante de muons provenant de la désintégration des pions et des kaons par la mesure de DCA, améliorant ainsi le rapport signal sur bruit de fond et la sensibilité aux dimuons thermiques. Enfin, le MFT permettra la mesure directe de la multiplicité de particules chargées dans l'acceptance du spectromètre, événement par événement.

La conception du MFT doit répondre à deux exigences : la mesure des vertex secondaires et la possibilité d'associer les traces provenant du spectromètre à muons avec celles correspondantes dans le MFT. Ces deux exigences impliquent la nécessité d'avoir une très bonne granularité afin de séparer les différentes traces en particulier en collision Pb-Pb. Le MFT devra être capable de supporter des taux de collisions du LHC de 2 MHz en collision p-p et 50 kHz en collision Pb-Pb. Le setup actuellement proposé comprend 5 plans de pixels de Silicium (de taille $20 \times 20 \mu\text{m}^2$) également espacés entre 40 et 83 cm de l'IP avec une couverture angulaire identique à celle du spectromètre ($2^\circ - 9^\circ$). Un gros effort de simulation est en cours afin d'optimiser le setup en

terme de nombre de plans, de leur position et de la taille des pixels. La nécessité d'avoir un faible budget de matière et une très bonne granularité fait du senseur monolithique CMOS le candidat idéal pour équiper le MFT. Ces senseurs ont une épaisseur de 50 μm ce qui permet d'avoir un budget de matière de l'ordre de 0.3% de X_0 par plan de détection. Ces senseurs sont actuellement développés par le groupe Capteur CMOS de l'IPHC, notamment pour l'expérience STAR. Des R&D seront nécessaires pour le rendre totalement opérationnel et l'adapter aux exigences du MFT. Une partie de cette R&D peut être commune au MFT et au projet d'upgrade de l'ITS d'ALICE en collaboration avec le groupe de l'IPHC.

Les laboratoires français impliqués dans le projet sont : LPC, Clermont ; IPN, Lyon ; Subatech, Nantes ; IPN - Orsay et IRFU - Saclay. Environ 33 physiciens sont concernés par ce projet.

3.8 Expérience CHIC au SPS pour la mesure du χ_c en Pb-Pb

L'observation inattendue, à mi-rapidité, par l'expérience PHENIX du RHIC, d'une suppression de la production du J/ψ dans les collisions Au+Au similaire à celle observée par l'expérience NA50 au SPS dans les collisions Pb-Pb a depuis conduit à deux interprétations :

1. La plus grande suppression attendue aux énergies du RHIC (dix fois supérieures à celles du SPS) pourrait être compensée par un processus de recombinaison.
2. Certaines estimations provenant de calcul de QCD sur réseau prédisent que la température de dissociation du J/ψ dans un plasma pourrait être plus grande que prévue initialement (deux fois plus grande que la température de déconfinement), le J/ψ ne serait alors pas dissout ni au SPS ni au RHIC (sauf dans les collisions Au-Au très centrales au RHIC). La suppression observée serait par conséquent, dans les deux cas, une conséquence de la suppression du χ_c pour qui la température de dissociation est plus faible et qui contribue à environ 30% à la quantité de J/ψ mesurés.

Pour cette raison la mesure de la production du χ_c dans les collisions d'ions lourds fournirait une information décisive sur le processus de suppression séquentielle, qui n'a encore jamais été effectuée et ne pourra l'être de manière satisfaisante (c'est-à-dire avec une précision suffisante) auprès du RHIC et du LHC avant longtemps. De plus, afin de mettre en évidence ce mécanisme de suppression séquentielle de manière non-ambiguë, il conviendrait d'effectuer la mesure du χ_c à une énergie où le mécanisme de recombinaison est faible voire inexistant, c'est-à-dire à l'énergie du SPS.

Techniquement, la difficulté de cette mesure réside dans l'identification du photon issu de la désintégration du χ_c ($\chi_c \rightarrow J/\psi + \gamma$) dans un environnement à forte multiplicité de π^0 . Les développements technologiques récents sur la calorimétrie électromagnétique (collaboration CALICE) rendent cette mesure accessible pour des expériences sur cible fixe. Nous proposons donc d'effectuer cette mesure auprès du SPS afin de mettre en évidence pour la première fois la suppression séquentielle (en fonction de la température) des charmonia ($\chi_c, \psi', J/\psi$). Cette nouvelle expérience aurait également pour but de mesurer les effets nucléaires froids dans une gamme de rapidité plus large que celle précédemment sondée au SPS afin de tester les modèles de shadowing dont certains prédisent que les mesures effectuées en Pb-Pb au SPS devraient être corrigées d'effet d'anti-shadowing, avec pour conséquence d'augmenter la section efficace de l'absorption nucléaire normale et ainsi de réduire la suppression provenant du QGP. Cette nouvelle expérience, très compacte, s'appuie sur des techniques de détection actuellement développées pour les futures expériences sur collisionneur : un détecteur de vertex pour mesurer le vertex et la centralité de la collision, un spectromètre silicium plongé dans un champ magnétique pour mesurer les traces chargées en amont d'un absorbeur de hadrons instrumenté destiné au déclenchement de l'acquisition sur des paires de muons. L'ensemble est associé à un calorimètre

ultra-granulaire dédié à l'identification et la mesure des photons issus de la désintégration du χ_c .

Ce projet dénommé CHIC (Charm In Heavy Ion Collisions) peut aujourd'hui être réalisé grâce aux importants développements de la calorimétrie électromagnétique actuellement mis en œuvre, au LLR notamment. Compte tenu de l'enjeu scientifique et de son coût modeste, il pourrait voir le jour dans un avenir proche et servir à la compréhension des résultats obtenus au RHIC et au LHC. Après avoir démontré la faisabilité de l'expérience le projet a été présenté et discuté lors d'une réunion d'experts du domaine en juillet 2011 et a reçu un écho favorable. Il convient maintenant de procéder aux optimisations fines de l'appareillage et de formaliser un partenariat avec les groupes, en France et à l'étranger, intéressés pour y participer.

3.9 Expérience AFTER au LHC

Les résultats obtenus au RHIC ont mis en évidence la complexité et l'importance des effets nucléaires froids qui interviennent dans les collisions p+A et A+A à $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV et qui affectent l'étude des effets chauds liés à la formation du plasma de quarks et de gluons. D'importantes modifications des taux de production des quarkonia en fonction de la rapidité ont, par exemple, été observées dans les collisions d+Au. Mais ces mesures souffrent d'incertitudes importantes et ne permettent pas de dresser un tableau clair et non ambigu de ces effets. Une limitation importante vient du fait que depuis la mise en fonctionnement de la machine (en 2000) seules des collisions d+Au ont été mises en œuvre pour étudier ces effets. Même si des études en fonction de la centralité ont été effectuées, la dépendance en fonction du nombre de collisions binaires N_{coll} , par exemple, est mal maîtrisée. De ce point de vue, les expériences sur cible fixe semblent mieux placées puisqu'elles offrent l'opportunité d'étudier facilement un grand nombre de systèmes (voir, par exemple, les expériences NA38/NA50/NA60), donnant accès à plusieurs valeurs de N_{coll} bien définies. A contrario, l'énergie dans le centre de masse y est beaucoup faible (une vingtaine de GeV au SPS contre 200 GeV au RHIC) ce qui réduit de fait la gamme de x-Bjorken x_B qu'il est possible de sonder. Les effets liés aux nPDF (nuclear Parton Distribution Functions) y sont par exemple très sensibles. Une solution serait donc d'effectuer ces mesures sur cible fixe à des énergies dans le centre de masse proches de celles du RHIC.

Le projet AFTER propose une expérience sur cible fixe au LHC, d'énergie dans le centre de masse de 115 GeV qui permettrait d'étudier avec une grande précision la matière nucléaire froide et la physique du QGP à des énergies proches de celles du RHIC. Techniquement, une partie du halo du faisceau serait extraite au moyen de cristaux courbés. La technologie est connue des experts du CERN et n'introduit pas de perturbation du faisceau primaire. L'intensité ainsi extraite serait de l'ordre de $5 \cdot 10^8$ protons/seconde (quelques % de la quantité totale de protons accumulés dans l'anneau), ce qui conduit à une luminosité intégrée de l'ordre du fb^{-1}/an , soit quelques $10^8 J/\psi/\text{an}$.

Les avantages décisifs d'utiliser une telle expérience cible fixe pour la physique du QGP sont :

- une grande souplesse sur le choix des cibles qui permet d'étudier un grand nombre de systèmes.
- une cinématique vers l'avant qui permet de couvrir, dans le système du centre de masse, toute la région de rapidité négative $y_{cms} = [-4.6, 0]$ à $\sqrt{s_{NN}} \sim 115$ GeV. De la même manière, en cinématique inverse, Pb-p par exemple, la région $y_{cms} = [0, 4.2]$ à $\sqrt{s_{NN}} \sim 72$ GeV.
- Avec un faisceau de plomb, il serait possible d'étudier plusieurs systèmes Pb-A pour étudier précisément l'influence du volume de la réaction dans la production du QGP.

Technologiquement, cette expérience s'appuierait en partie sur les choix adoptés pour l'expérience CHIC avec une calorimétrie électromagnétique et hadronique ultra-granulaire pour

permettre d'identifier et de séparer tous les produits de la réaction.

La physique accessible avec une telle expérience dépasse le seul champ de la physique des ions lourds. Une telle expérience permettrait notamment d'étudier la QCD à grand x_B et de faire des études de spin avec des cibles polarisées (voir groupe 8 « Structure du nucléon, QCD, physique diffractive »).

Le projet AFTER est exploré actuellement par plusieurs personnes de l'IPN-Orsay et du LLR. Sa réalisation se situe à moyen terme (horizon 2020). Deux rencontres scientifiques centrés sur AFTER (ainsi que sur CHIC) ont eu lieu en juillet et octobre 2011 à l'IPN-Orsay. Un effort important est actuellement réalisé pour parcourir les différents champs de physique d'un tel projet et pour établir un design préliminaire du détecteur adapté aux objectifs de physique.

3.10 Analyses dans l'Expérience CMS

Grâce à sa large acceptance et à sa grande bande passante, l'expérience CMS permet d'explorer les aspects du plasma de quarks et de gluons sondés par les processus les plus durs. Avec l'augmentation de la luminosité, cette spécificité se verra renforcée dans les années à venir.

Les membres actuels du groupe du Laboratoire Leprince-Ringuet (deux permanents, trois postdocs et un étudiant) ont développé des compétences d'analyse sur les muons, les électrons et la reconstruction des jets, en particulier par l'utilisation des algorithmes de *particle flow*. Ils ont significativement contribué¹ aux premières mesures de CMS des bosons électrofaibles (voir section 2.4), des jets (section 2.6) et des quarkonia (section 3.6.1), en particulier avec une première indication de la suppression des états excités de l'Upsilon.

Ces analyses seront raffinées avec l'augmentation de la luminosité, permettant d'atteindre des précisions statistiques et des impulsions transverses de plus en plus élevées. Elles seront également répétées pour tout autre collision d'ions que le LHC opérera : p-Pb probablement en 2012, qui permettront d'estimer les effets nucléaires froids sur les sondes susmentionnées ; collisions symétriques d'ions plus légers après le premier *shutdown*, qui permettront d'échantillonner des conditions initiales plus variées.

D'autres mesures sont envisagées ou en cours, autour des quarkonia (corrélation avec le plan de la réaction, ψ' , etc.) mais aussi au travers de l'identification des jets provenant des quarks b , des corrélations photon-jet ou, lorsque la luminosité nominale sera atteinte, de corrélations Z-jet (des événements isolés ont été observés en 2011). La comparaison des corrélations photon-jet et Z-jet permettra de distinguer les jets issus des quarks ou des gluons. Il est à noter que la contribution des J/ψ qui proviennent du B a été extraite pour la première fois et donne déjà des indices que le quark b subit une forte perte d'énergie qu'il convient d'estimer avec précision.

Du fait de son fort champ magnétique, l'expérience CMS est essentiellement aveugle à la physique des basses impulsions transverses et/ou des basses masses pour des particules identifiées, domaine que seul ALICE couvre. À titre d'exemple, l'acceptance de CMS pour les J/ψ ne démarre qu'à 6.5 GeV/c à mi-rapidité. En revanche, la bande-passante et la couverture angulaire de CMS permettent de couvrir des régions de grandes impulsions et de grandes masses. À la masse des Upsilon, l'acceptance à bas p_T est non-nulle et le spectre complet peut être mesuré. L'excellente résolution permet de plus de séparer les différents Upsilon, et d'augmenter le rapport signal/bruit. Les deux expériences sont donc essentiellement complémentaires.

L'activité CMS ions lourds n'a d'autre coût que sa masse salariale. Elle provient aujourd'hui pour moitié de contrats européens, en particulier d'une *starting grant* du Conseil européen de la recherche (ERC) qui terminera en fin 2015. Un renforcement du tier-2 GRIF a été consenti sur ce financement et a permis un traitement local et renforcé des données ions lourds de CMS.

1. Pour les quatre sujets cités, un membre du groupe est rédacteur principal et/ou *contact person* pour l'analyse d'un article publié et d'autres sont en préparation.

Des renforcements ultérieurs pourraient être pertinents. Il est à noter qu'à l'échelle de CMS dans son ensemble, le groupe d'ions lourds est encore de taille modeste et ne peut pas exploiter tout le potentiel des données acquises. Tout nouvel arrivant participe rapidement à des analyses majeures de l'expérience, produit des résultats de physique nouveaux, et se voit souvent confier d'importantes responsabilités².

En conclusion, l'équipe concernée souhaite poursuivre une activité d'analyse sur les données de CMS acquises sur l'ensemble du programme d'ions lourds du LHC.

3.11 Analyse des Jets dans l'Expérience ALICE

Les analyses liées à la physique des jets et des photons sont complexes et n'en sont qu'à leurs débuts. Les données actuellement collectées dans les collisions $p-p$ et $Pb-Pb$ donneront lieu à des analyses de physique qui devraient s'étendre jusqu'en 2013/2014. L'exploitation des données à venir qui exploiteront les *triggers* rares grâce au calorimètre EMCal d'ALICE devrait courir bien au-delà de 2014 jusqu'à ce qu'elles soient supplantées par les projets d'*upgrade* en 2014 et 2018 qui exploiteront une énergie de faisceau nominale et l'augmentation de luminosité du LHC.

Le point fort de la mesure des jets dans ALICE réside dans l'utilisation de trajectomètres qui permettent de cartographier jusqu'à des très bas p_T (150 MeV/c) le contenu en particules chargées des jets mais aussi les effets de *quenching*. Cependant, l'utilisation seule de ces derniers introduit des fluctuations particules chargées / neutres qui modifient l'information sur l'énergie du jet reconstruit. L'introduction d'un calorimètre a été essentielle pour réduire leur effet et améliorer la connaissance de cette énergie. Il apporte, de plus, la possibilité de n'enregistrer que des événements rares (de type production de photons ou de jets de p_T élevé) avec une bonne statistique sur un domaine cinématique plus grand. Actuellement, ALICE mesure les sondes dures dans les collisions d'ions lourds dans un domaine en p_T plutôt bas³ complémentaire à ATLAS et CMS et qui en fait sa particularité. Ce domaine de mesure devrait être étendu grâce à l'utilisation des *triggers* de EMCal et à ses *upgrades*. Ils devraient nous permettre de mesurer des jets et des photons dits " *triggers* " à plus grand p_T et récupérer des jets de recul opposés en azimut de p_T suffisant pour n'être que peu modifiés par la présence de l'événement sous-jacent.

A l'avenir, nous souhaitons mettre l'accent sur les aspects d'analyse de physique énoncés ci-dessous.

Du fait de son système de trajectographie dédié aux collisions d'ions lourds, la ligne directrice d'ALICE pour l'étude des photons et des jets restera le domaine de rapidité centrale. C'est dans ce domaine que seront étudiées dans les collisions $p-p$ et $Pb-Pb$ les distributions transverse (j_T , k_T , etc.) et longitudinale (*hump-backed* plateau, fonctions de fragmentation) des jets *triggers* et jets de recul en scannant des domaines de p_T des hadrons les plus bas possibles moyennant un bon contrôle de l'UE. La perte d'énergie pourra être étudiée également par la mesure du facteur de modification nucléaire des jets mais également en étudiant la répartition des particules produites de façon globale dans le milieu produit.

Que ce soit pour les mesures de jet quenching ou les contraintes de QCD, l'ensemble des observables accessibles en inclusif ou en mesures corrélés peuvent tirer profit d'une augmentation en acceptance du calorimètre mais également d'une amélioration de l'identification.

Une extension du calorimètre au minimum en azimut pourrait également nous permettre d'envisager des études d'événements corrélés entre un jet/photon mesuré du côté du calorimètre et une particule identifiée de grand p_T à l'opposée en azimut en exploitant un autre projet d'*upgrade* d'ALICE qui est en train de voir le jour : le VHMPID. Ces études devraient nous

2. Les permanents du groupe furent respectivement *convener* du groupe de physique ions lourds de CMS en 2010-11, et coordinateur de ses aspects logiciels depuis 2011, date de son entrée CNRS.

3. 1-25 GeV/c pour les π^0 , 20-150 GeV/c pour les jets et 5-100 GeV/c pour les photons directs [à revoir]

permettre de mieux comprendre les mécanismes de hadronisation au LHC ainsi que la perte d'énergie.

Jets et milieu dense produit sont difficilement décorrélables. Il sera essentiel dans les années à venir de comprendre leurs interactions. Les corrélations à deux particules en η et en ϕ , par exemple, montrent actuellement que les cinq premières harmoniques de la décomposition en série de Fourier de la distribution azimutale des particules contribuent de façon non négligeable à la structure de l'UE complexe des collisions d'ions lourds. Etant donné le couplage fort qui semble exister entre l'énergie perdue par le parton dur et la restitution de cette énergie par le milieu, il sera important dans l'avenir d'étudier précisément le couplage entre les signatures traditionnelles de la physique à hauts p_T (R_{AA} , fonction de fragmentation) et les observables du milieu (comme le flot).

3.12 Projet d'extension de la calorimétrie au sein de l'expérience ALICE

L'expérience ALICE a mis en oeuvre tardivement la construction du calorimètre électromagnétique EMCal afin de permettre la détection des sondes électromagnétiques et des jets, et d'étudier les différentes corrélations entre particules et jets. Actuellement la couverture de ce calorimètre n'est que partielle, avec environ un quart de la partie centrale de détection. Une première extension d'EMCal a vu le jour avec le projet DCal (pour *Di-jet calorimeter*). En cours de construction, il sera installé en position opposée en azimut du calorimètre EMCal afin d'étendre son acceptance et favoriser les études d'événements corrélés à résolution équivalente.

Nous présentons dans la suite plusieurs projets d'extension de la calorimétrie, qui sont possibles auprès de l'expérience ALICE et dont les motivations physiques sont sensiblement différentes :

Projet FullCal Le projet de grande envergure FullCal d'ALICE, propose une extension des calorimètres EMCal/DCal pour atteindre une couverture quasi complète en ϕ et éventuellement d'étendre cette couverture pour des rapidités $|\eta| < 2$. Les motivations physiques sont d'augmenter les acceptances de mesure pour les sondes électromagnétiques et les jets ainsi que pour les mesures de corrélation tout en gardant un couplage avec la partie centrale d'ALICE.

Projet HMPID/Cal Le projet propose de coupler les informations du calorimètre électromagnétique pour la mesure des jets avec celle du détecteur Cerenkov VHMPID pour l'identification des hadrons (protons, pions et kaons). Une des versions possibles est de placer sur une même acceptance des modules de VHMPID devant ceux du calorimètre. Les motivations physiques sont d'accroître les performances d'identification des hadrons au sein des jets de grande impulsion transverse.

Projet FoCal Un projet de calorimétrie aux rapidités avant est également en cours de discussion. Celui-ci, qui est basé sur une technologie différente de celle du calorimètre EMCal, permettrait de coupler les informations aux rapidités avant ($2.5 < |\eta| < 4.7$) avec celles du tonneau central. Des mesures réalisées en p-p, p-Pb et Pb-Pb permettent d'accéder aux fonctions de distributions partoniques aux petits x et d'étudier les corrélations dans ce nouveau régime cinématique.

La position de la communauté française, constituée des laboratoires LPSC et Subatech Nantes (~ 8 physiciens) dépendra des arbitrages, qui seront pris au sein de la collaboration ALICE et du LHCC.

4 Synthèse des perspectives du groupe QGP

La Chromodynamique Quantique (QCD), théorie fondamentale des interactions fortes, prédit dans ses calculs sur réseau l'existence d'un état déconfiné de la matière nucléaire, appelé *plasma de quarks et de gluons* (QGP), à très haute température et densité d'énergie. Selon le modèle cosmologique standard, l'Univers serait passé par cet état dans ses premières microsecondes d'existence après le Big Bang. Les conditions nécessaires à la production du QGP peuvent être atteintes en laboratoire avec des collisions d'ions lourds à très haute énergie. Depuis plus de 25 ans, un important programme expérimental dédié à l'étude des collisions d'ions lourds aux énergies ultra-relativistes a été mis en place. Les premières indications du déconfinement ont été observées sur l'accélérateur SPS au CERN avec la mesure de la suppression des charmonia dans les collisions Pb-Pb les plus centrales. Depuis l'an 2000, le RHIC au BNL (USA) a obtenu d'importants résultats qui ont donné lieu à l'annonce officielle de la découverte d'un nouvel état de la matière se comportant comme un fluide idéal. Parmi les observables pertinentes qui ont conduit à une telle conclusion, les sondes dures, à travers le phénomène de jet quenching, ont été déterminantes au RHIC motivant leur étude auprès du LHC où l'énergie disponible dans le centre de masse est vingt fois supérieure.

Deux campagnes de mesures en Pb-Pb ont eu lieu en 2010 et 2011 et une prise de données en p-Pb est prévue pour fin 2012. Ce programme se poursuivra jusqu'en 2017 et au delà, avec une augmentation de la luminosité et avec des systèmes plus légers. Elle va permettre de caractériser en détail les différentes propriétés du QGP. En particulier, l'étude des propriétés d'hadronisation et de thermalisation du QGP pourra être étendue du secteur de l'étrangeté vers le charme. La perte d'énergie des partons de haute énergie dans le QGP pourra être étudiée plus en détail à l'aide des processus photon-jet ou Z +jet, mais également dans le secteur des quarks charmés et beaux. De plus, la physique de formation des quarkonia, basée sur les propriétés de déconfinement et de recombinaison, pourra être étudiée en détail dans les secteurs du charme et de la beauté. Finalement, de nouvelles surprises nous attendront probablement dans la *terra incognita* explorée par le LHC.

Depuis les années 80, les groupes français ont participé aux différents programmes d'ions lourds, qui se sont déroulés auprès du SPS et de RHIC. Ils ont ainsi pu développer une grande expérience dans ce domaine de recherche et acquérir une reconnaissance internationale. En particulier, un investissement humain et financier important a été fourni pour la construction du spectromètre à muons, du détecteur de vertex au silicium à micropistes et du détecteur d'interaction V0 d'ALICE. Depuis 2006, ils se sont également impliqués dans la construction du calorimètre électromagnétique d'ALICE. Depuis 2008, un groupe a rejoint la collaboration CMS pour contribuer au programme des ions lourds.

Les collaborations ALICE et CMS, ont déjà fourni des résultats surprenants, notamment pour des analyses où les groupes français ont été leaders, portant sur les données Pb-Pb de 2010 et 2011. Les premiers résultats d'ALICE ont porté sur les mesures de multiplicité et d'écoulement elliptique des hadrons, pour lesquels le détecteur V0 a joué un rôle clef. L'expérience CMS a observé une asymétrie en énergie dans les événements di-jets de très grande impulsion transverse pour les collisions Pb-Pb les plus centrales. Cette étude apporte des premières informations sur la perte d'énergie des partons dans le milieu et sur la façon dont l'énergie est dissipée dans le QGP. De façon complémentaire, ALICE s'est concentrée sur l'étude des fluctuations du bruit de fond dans les jets en montrant l'importance de ce dernier dans leur reconstruction. Les premiers résultats sur les quarkonia ont été obtenus à l'aide du bras di-muons d'ALICE et CMS, qui ont mesuré le facteur de modification nucléaire du J/ψ à petites et grandes impulsions transverses, respectivement. Ces premiers résultats suggèrent que les processus de recombinaison de quarks charmés après une phase de déconfinement pourraient fortement contribuer à la production de

J/ψ à faible impulsion transverse. La collaboration CMS a fourni des résultats dans le secteur des bottomonia, avec une suppression des états excités (2S et 3S) par rapport à l'état fondamental (1S). Il faut également noter que les premières mesures de production des particules multi-étrange dans ALICE sont en bon accord avec les modèles statistiques et que CMS a mesuré pour la première fois en ions lourds des bosons Z et W.

À ce jour les résultats obtenus ne représentent qu'une faible fraction des résultats scientifiques attendus avec le programme d'ions lourds au LHC. Les données Pb-Pb de 2011, avec une statistique 20 fois supérieure à celle de 2010, sont actuellement en cours d'analyse. Par ailleurs, la prise de données p-Pb prévue en 2012 permettra la première étude des effets nucléaires froids au LHC, et en particulier l'étude des fonction de distributions partoniques à très petits x . Entre 2014 et 2017, les nouvelles prises de données Pb-Pb permettront de gagner un ordre de grandeur sur la luminosité intégrée, et une nouvelle prise de données p-Pb à haute luminosité et vraisemblablement une prise de données avec des ions légers seront réalisées. Elles permettront à la fois d'améliorer la précision des mesures mais également d'étudier plus en détail les mécanismes de production des différentes sondes utilisées en multipliant les différents systèmes. De ce point de vue, les projets d'analyse sur les jets, photons, quarkonia et saveurs lourdes ouvertes pour tous ces systèmes sera une priorité de notre communauté pour les six prochaines années, voire après 2018, en fonction des résultats obtenus par ALICE et CMS.

La communauté est actuellement très impliquée dans les projets d'amélioration de l'expérience ALICE pour le LHC à haute luminosité, après 2018. Un premier objectif déjà approuvé par la collaboration ALICE, sera l'amélioration du dispositif expérimental existant pour profiter de l'augmentation d'un ordre de grandeur de la luminosité en collisions Pb-Pb. Munie d'un nouveau système de trajectographie interne (ITS) aux performances largement supérieures à celles d'aujourd'hui, l'expérience aura également accès à l'étude de la production des baryons charmés. Au delà des améliorations nécessaires du spectromètre à muons pour les hautes luminosités, la communauté française est fortement impliquée dans le projet MFT qui consiste en un trajectographe composé de plusieurs plans de pixels assemblés devant l'absorbeur du spectromètre à muons. Associé au spectromètre à muons, il serait le seul capable de mesurer les mésons vecteurs et les charmonia J/ψ et ψ' en Pb-Pb au LHC jusqu'à des faibles impulsions transverses, où le phénomène de régénération devrait jouer un rôle. Le programme de R&D a d'ores et déjà démarré. Les groupes engagés actuellement dans la construction du calorimètre EMCal d'ALICE, poursuivent leur réflexion sur une implication possible auprès de plusieurs projets d'amélioration. Deux d'entre eux proposent une extension du calorimètre avec un couplage possible avec un détecteur Cerenkov pour identifier les particules au sein des jets, tandis qu'un autre projet propose d'étendre la mesure des corrélations dans le domaine des petits x . Ces projets sont actuellement en cours d'évaluation par la collaboration ALICE. L'expérience CMS ne nécessite pas de développement spécifique pour fonctionner après 2018 en ions lourds.

De nouvelles idées ont émergé récemment avec les projets CHIC et AFTER. Le projet CHIC se propose de mesurer la production du charmonium χ_c dans les collisions Pb-Pb aux énergies du SPS, mesure indispensable pour mettre en évidence la séquence de déconfinement des quarkonia. À plus long terme, le projet AFTER a l'ambition de construire un programme scientifique autour d'une expérience sur cible fixe au LHC, qui permettrait d'étudier un grand nombre de systèmes et pourrait s'appuyer sur les choix technologiques de l'expérience CHIC. Ces projets auront besoin de mobiliser une masse critique minimale de chercheurs en France et à l'étranger.

Finalement, l'expérience CBM à FAIR se focalisera sur l'étude de la transition de phase près du point critique. Aujourd'hui, notre communauté exprime une faible motivation pour s'impliquer dans ce programme, bien qu'une activité R&D pour un détecteur de vertex à pixels est en cours.

Annexe 1

TABLE 1 – Communauté IN2P3/Irfu des chercheurs, enseignants-chercheurs, post docs et étudiants en thèse travaillant dans le domaine du QGP

Priorité	Nom du projet	Type de projet	Etat d'avancement	Années de début et fin des investissements	Pays partenaires	Nombre de physiciens français participant au projet permanent (non-permanent)	Nombre de techniciens et ingénieurs français participant au projet en nombre d'hommes par an	Commentaires
	ALICE VZERO Upgrade	Détecteur	étude de faisabilité	2011 - 2014		3	1.5	voir 3.4
	ALICE MUON Upgrade	Détecteur	étude de faisabilité	2012 - 2018		18 (9)	7	voir 3.5
	ALICE hadronisation	Analyse	en cours	2009 - 2015 (étrangereté); > 2018 (charme)	Allemagne, CERN, Slovaquie, Brésil, Angleterre, Italie, ...	4		voir 3.1
	ALICE ITS Upgrade	Détecteur	R&D	2011 - 2014 (R&D); 2014 - 2016 (production); 2016 - 2018 (intégration/commissioning)	Italie, Angleterre, Ukraine, Russie, Chine, Slovaquie, Pakistan	7	5	voir 3.2
	ALICE quarks lourds	Analyse	en cours	2012-2022	Allemagne, Italie, Inde, Afrique du Sud, Hollande, Suisse	23 (11)		voir 3.6
	ALICE MFT	Détecteur	R&D	2012-2018		33	15	voir 3.7
	CHIC	Détecteur	étude de faisabilité, simulations	à définir	recherche de partenaires en cours	1, recherche de partenaires en cours	-	voir 3.8
	AFTER	Détecteur						voir 3.9
	CMS	Analyse	en cours			2 (4)		voir 3.10
	ALICE Jets	Analyse	en cours	2012-22	USA, Allemagne, Italie	7	0	voir 3.11
	Calorimétrie ALICE	Détecteur	Etude de faisabilité	2012-18	USA, Japon, Italie	7	4	voir 3.12
	CBM	Détecteur						voir 3.3

Annexe 2

TABLE 2 – Estimation financière et planning des projets actuellement prévus pour la période 2013-2023

Priorité	Nom du projet	Type de projet	Etat d'avancement	Années de début et de fin des investissements	Cout total en incluant le personnel(en M Euro)	Contribution IN2P3+CEA (hors personnel) en M Euro	Contribution IN2P3+CEA (en incluant le personnel) en M euro	Autres contributions Françaises en M Euro
	ALICE VZERO Upgrade	Détecteur	étude de faisabilité	2011 - 2014				voir 3.4
	ALICE MUON Upgrade	Détecteur	étude de faisabilité	2012 - 2018		1.5		voir 3.5
	ALICE ITS Upgrade	Détecteur	R&D	2011 - 2014 (R&D); 2014 - 2016 (production); 2016 - 2018 (intégration/commissioning)	12	2 - 4		voir 3.2
	ALICE MFT CHIC	Détecteur	R&D	2012-2018 à définir	5.4	5.4		voir 3.7 voir 3.8
	AFTER Calorimétrie ALICE	Détecteur	étude de faisabilité, simulations					voir 3.9 voir 3.12
	CBM	Détecteur	Etude de faisabilité	2012-18	???	0.500 ?	0.800 ?	voir 3.3