

Plasma de Quarks et de Gluons

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

Groupe de Travail

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

10 septembre 2004

Table des matières

Synthèse	3
1 Physique du Plasma de Quarks et de Gluons et collisions d'ions lourds ultrarelativistes	6
1.1 Motivations générales	7
1.2 Collisions d'ions lourds ultrarelativistes	8
1.3 Les vingt-cinq années d'aventures extraordinaires de la recherche du plasma de quarks et de gluons	8
1.3.1 Prologue	8
1.3.2 Où notre histoire commence étrangement	8
1.3.3 Où le charme de notre aventure apparaît	8
1.3.4 Où l'écoulement latéral des partons et leurs pertes d'énergie interviennent	9
2 Programmes de Physique	10
2.1 Quarkonia	10
2.1.1 Nombre de quarkonia au RHIC et au LHC	11
2.1.2 Techniques d'analyses	13
2.1.3 Implication des physiciens français	15
2.2 Etrangeté	15
2.2.1 Composition chimique	16
2.2.2 Dynamique d'expansion et mécanismes d'hadronisation	17
2.2.3 Processus durs et étrangeté: effets de jet-quenching	18
2.2.4 Matière exotique : dibaryons étranges	19
2.2.5 Bilan de RHIC et nouvelles possibilités au LHC	19
2.2.6 Implication des physiciens français	19
2.3 Photons et jets	20
2.3.1 Aspects théorique de la pertes d'énergie des partons durs	20
2.3.2 Perspectives expérimentales au LHC	21
2.3.3 Production des photons directs	22
24 Saturation des distributions de partons	23
2.5 Domaine des hautes densités baryoniques	23
2.5.1 Propriétés de la matière baryonique à haute densité	23
2.5.2 Implication des physiciens français dans le projet CBM	24
3 Bilan et perspectives pour la physique	25
4 La communauté "Ions Lourds Ultrarelativistes" DAPNIA/IN2P3	27
4.1 Répartition des physiciens par laboratoire et par expérience	27
4.2 Moyens nécessaires pour les prochaines années	27
4.3 Articulations entre les diverses activités	30
Annexes	32
Nature des diverses contributions par laboratoire	32
Liste des acronymes	34

Synthèse

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

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

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

Situation actuelle et à moyen terme

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

RHIC (implication de 6 laboratoires français)

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

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

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

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

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

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

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

LHC (implication de 6 laboratoires français)

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

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

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

De plus, toujours au plan de la physique, les chercheurs qui se sont investis dans les études relatives aux phénomènes de *jet quenching* au RHIC poursuivront leurs investigations aux énergies du LHC.

Enfin, des physiciens français ont démontré l'importance et l'intérêt d'étudier la production

de quarkonia auprès de l'expérience CMS. Des simulations ont permis de justifier que cette physique soit considérée comme un programme à part entière dans CMS, qui apparaît aujourd'hui comme un axe tout à fait complémentaire du programme dimuons d'ALICE.

Perspectives

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

RHIC

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

LHC

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

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

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

CBM

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

Théorie

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

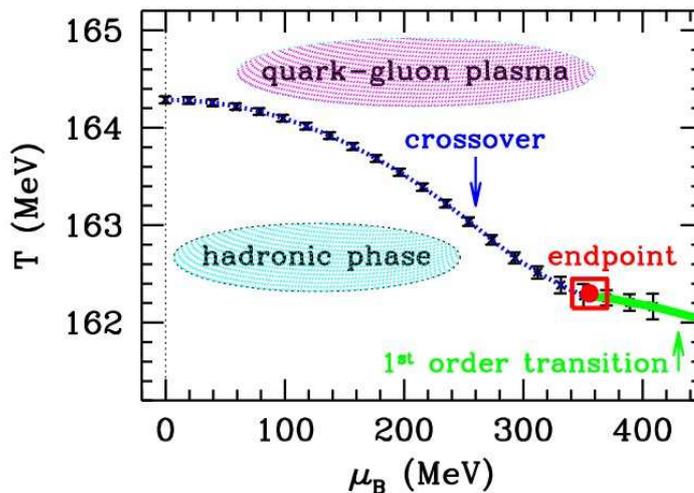
1 Physique du Plasma de Quarks et de Gluons et collisions d'ions lourds ultrarelativistes

1.1 Motivations générales

Le vide de la mécanique quantique, loin d'être vide, est source de fluctuations de toute nature. Certaines d'entre elles génèrent des effets si subtils qu'ils ne peuvent être mis en évidence qu'à partir de mesures de très haute précision. D'autres, en particulier celles qui mettent en jeu des interactions suffisamment intenses, sont d'ampleur telle qu'elles peuvent se condenser en un état propre d'un champ quantique particulier. De tels condensats (tel le condensat de paires quark-antiquark présent dans le vide de la QCD) donnent au vide les propriétés d'un milieu qui modifie les caractéristiques des particules élémentaires qui le traversent.

Suivant la suggestion de T.D. Lee, prédisant qu'il serait possible d'explorer des phénomènes nouveaux en distribuant une grande densité d'énergie ou bien une grande densité de nucléons dans un volume étendu, les collisionneurs d'ions lourds ont été mis en œuvre afin de créer en laboratoire les conditions sous lesquelles le vide de la QCD change d'état et donc de structure, et dans lesquelles les propriétés des particules fondamentales et de leurs interactions sont modifiées.

Figure 1 Diagramme de phase de la matière nucléaire dans le plan température – potentiel chimique baryonique. Les points indiquent la transition de phases calculées par la QCD sur réseau.



Les simulations de QCD sur réseau prédisent qu'à densité baryonique nulle, au-delà d'une certaine température critique ($T_c \sim 170$ MeV) et d'une certaine densité d'énergie critique ($\epsilon \sim 1$ GeV/fm³), le vide est dans un nouvel état de structure plus simple, un Plasma de Quarks et de Gluons (QGP), dans lequel le condensat de paires quark-antiquark est dissout et la symétrie chirale restaurée, c'est-à-dire que les quarks de saveurs légères ont retrouvé leur petite masse générée par le champ de Higgs. La transition de phase, probablement sans discontinuité, se traduit par une augmentation brutale du nombre de degrés de liberté à température quasi constante. L'équation d'état tend asymptotiquement, très au-delà de la température critique T_c , vers l'équation d'état d'un gaz parfait de Stefan-Boltzmann. Les énergies des collisionneurs d'ions lourds ont été ajustées pour atteindre ces conditions : au RHIC avec $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, $T \sim 2T_c$ et au LHC avec $\sqrt{s_{NN}} = 5500$ GeV, $T \sim 5 T_c$. Il est également possible d'étudier cette transition de phase dans un autre secteur du diagramme de phases,

notamment à densité baryonique élevée et à faible température comme le propose le futur FAIR. La transition, se situant au-delà du point critique, serait alors une transition du premier ordre, voir figure 1.

L'exploration de ce changement d'état du vide présente un intérêt à plus d'un titre. En effet, cet état est la forme ultime de la matière QCD primordiale à température élevée, du moins jusqu'à l'échelle électrofaible. Selon les théories cosmologiques, cette forme de la matière aurait prévalu durant les premières microsecondes après le Big Bang. La matière peut également exister dans cet état de façon naturelle dans les objets cosmiques au sein desquels règnent une forte densité baryonique et une faible température comme au cœur des étoiles à neutrons. De plus, une telle étude apportera un nouvel éclairage sur l'origine de la masse des quarks dans les hadrons et sur le mécanisme d'hadronisation.

1.2 Collisions d'ions lourds ultrarelativistes

Le défi d'un tel programme expérimental est d'identifier les observables capables de caractériser l'état de la matière formée dans les collisions d'ions lourds et d'en déduire quantitativement des grandeurs calculées à partir des premiers principes de la QCD. La théorie, par exemple avec les simulations sur réseau, traite la thermodynamique à l'équilibre, formulée en termes de degrés de liberté fondamentaux, quarks et gluons, et les observables sont exprimées en termes de paramètres d'ordre, température, potentiel chimique, pression, densité d'énergie. A partir des données expérimentales, les collisions d'ions lourds, quant à elles, sont décrites comme l'évolution d'un milieu dense de quarks et de gluons, puis de hadrons, en interaction ; les observables sont déduites à partir de la mesure de hadrons, leptons et photons et paramétrées en termes d'énergie et de multiplicité de particules. Le lien entre les observables expérimentales et les premiers principes de la théorie se fait à l'aide de modèles décrivant la dynamique de la collision, les interactions dans l'état final...

Les sondes hadroniques interagissant fortement fournissent une image de l'état final de la collision au temps du gel (*freeze-out*), lorsque l'expansion a dilué le milieu au point que les interactions cessent. Cependant, l'étude détaillée de la composition chimique et de l'occupation de l'espace de phase des hadrons de petite impulsion transverse ($p_T < 2 \text{ GeV}/c$) permet, à l'aide de modèles dynamiques, de remonter à l'état initial de la collision et éventuellement à ses propriétés, comme l'équation d'état calculable à partir des premiers principes de la QCD.

La dynamique de la phase hadronique étant peu connue, il est judicieux de recourir également aux sondes dites dures, peu influencées par la phase hadronique, pour tester directement les propriétés de la phase déconfinée de la QCD. Les sondes dures sont par définition celles produites dans des processus au cours desquels l'impulsion transférée est très supérieure aux échelles d'énergie intervenant globalement : l'échelle de la QCD, Λ_{QCD} , l'échelle de saturation et la température initiale du milieu. Les sondes dures présentent un intérêt double : d'une part, étant émises sur une échelle de temps courte comparée à la durée de la collision, elles permettent de tester la matière formée très peu de temps après le début de la collision lorsque la densité est la plus élevée ; d'autre part, le modèle partonique permet, dans l'approximation perturbative, d'effectuer des calculs fiables concernant leurs propriétés. Ces sondes incluent les dileptons Drell-Yan produits dans le processus d'annihilation quark-antiquark, les photons directs produits principalement par diffusion Compton sur les quarks et les gluons, ainsi que les états liés de saveurs lourdes et les jets de grande impulsion transverse produits dans les diffusions dures de partons.

1.3 Les vingt-cinq années d'aventures extraordinaires de la recherche du plasma de quarks et de gluons

1.3.1 Prologue

C'est donc dans les années soixante-dix que plusieurs théoriciens ont conçu l'idée d'un plasma formé de quarks et de gluons. Certains de leurs calculs prédirent même le scénario idéal pour les expérimentateurs : une transition de phase brutale pour une certaine température critique entre les états confinés et déconfinés. Le « crime » de déconfinement des partons serait dans ce cas loin d'être parfait et laisserait pour les physiciens toute une série d'empreintes. Rapidement, un cortège de programmes expérimentaux a vu le jour au début des années quatre-vingts aussi bien aux Etats-Unis (AGS avec $\sqrt{s_{NN}} = 5$ GeV) qu'en Europe (SPS avec $\sqrt{s_{NN}} = 20$ GeV), pour aboutir finalement à la récente mise en service à Brookhaven du premier collisionneur d'ions lourds (RHIC avec $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV).

1.3.2 Où notre histoire commence étrangement

Dans les collisions entre nucléons, la production de quarks étranges s se voit défavorisée par rapport à celle des quarks légers u ou d , car ces quarks s sont beaucoup plus lourds, et absents de surcroît des états initiaux. Dans un QGP, ce déficit relatif doit être en partie compensé par des mécanismes liés au caractère thermique de la production et de la diffusion de certains partons. C'est ainsi que rapidement, auprès de l'AGS au BNL, une augmentation de la production de mésons étranges a été observée par plusieurs expériences dans les collisions entre un faisceau de silicium et des cibles de noyaux lourds. L'augmentation de l'étrangeté a représenté la première signature observée expérimentalement et laissait entrevoir la pleine justification des programmes de collisions d'ions lourds. Quelques mois après ces premiers résultats de Brookhaven, les expériences auprès du SPS du CERN avec un faisceau de soufre allèrent plus loin et plus fort. Elles observèrent une augmentation de la production de mésons et de baryons étranges, l'effet étant beaucoup plus important pour des particules composées de plusieurs quarks s . Comme il se doit, les mêmes résultats furent obtenus avec les premières mesures pour des anti-baryons. Avec les données du CERN et du BNL, apparut un caractère essentiel de l'augmentation de l'étrangeté : une saturation avec l'énergie du faisceau ou la densité d'énergie des collisions. La moisson de résultats engrangés récemment auprès du collisionneur RHIC établit définitivement ce phénomène de saturation en soulignant même une légère diminution de l'amplitude de l'effet aux énergies les plus hautes.

Pour chaque programme, les expérimentateurs ne se sont évidemment pas contentés de mesurer la production de particules étranges. Ils se sont intéressés à l'abondance de toutes les particules produites dans les différentes collisions. Avec le temps, l'augmentation de l'étrangeté et son phénomène de saturation globale prirent alors une autre allure que celle d'une signature très particulière de la formation du plasma. Une description générale de la production des particules est en effet possible dans le cadre d'un équilibre chimique dépendant de l'énergie mais pas du type de la collision ou du type de la particule produite. Au delà de l'énergie du SPS cet équilibre est atteint pour une température "universelle" de 170 MeV et représente le point d'« hadronisation » du plasma, en accord avec les prédictions théoriques de température « critique » de confinement. Ce scénario explique merveilleusement et avec une précision remarquable l'abondance de toutes les particules produites, étranges ou non, dans les collisions.

1.3.3 Où le charme de notre aventure apparaît

C'est aux collisions Pb-Pb produites auprès du SPS au milieu des années quatre-vingt-dix que nous devons une autre manifestation expérimentale de la production du plasma : la suppression des états liés de paires formées d'un quark et d'un antiquark charmés. La formation de n'importe quel plasma physique se traduit par l'existence d'une grandeur caractéristique, le rayon de Debye, qui définit une taille critique maximale pour la survie

d'un état lié. La valeur de ce rayon dépend de la température, du type des interactions et de la densité de charge de ce milieu. Cela explique qu'il fallut attendre les collisions Pb-Pb et des densités d'énergie très élevées pour observer la dissolution par le plasma de l'état fondamental des charmonia, caractérisé par une extension spatiale très petite. Il faut remarquer que la disparition des états liés dans le plasma touche l'ensemble des hadrons, en particulier les plus « gros » comme les protons, pions ou kaons possédant une énergie de liaison bien inférieure à celle des charmonia. L'intérêt des charmonia réside paradoxalement dans leur résistance courageuse au plasma et dans leur difficulté, étant donné la grande masse des quarks c , à être produits au point d'« hadronisation » du plasma. Les très récents calculs sur réseau pour les interactions fortes soulignent magnifiquement la très grande résistance de l'état fondamental des charmonia dans le plasma. Sa dissolution ne doit se produire que pour une température au moins deux fois supérieure à la température critique, atteinte probablement au CERN dans les collisions Pb-Pb à très faible paramètre d'impact. En règle générale, la corrélation entre la formation du plasma et la disparition des états liés de quarks est devenue au fil des années de plus en plus floue. Il est maintenant admis que même des états de quarks légers (u , d ou s) peuvent rester liés légèrement au-delà de la température critique de déconfinement. Les mésons, composés d'une paire quark-antiquark, seraient plus résistants à la dissolution que les baryons, composés de trois quarks.

La suppression importante des charmonia observée expérimentalement au CERN pourrait disparaître aux énergies du RHIC ou, du moins, saturer en intensité, et se transformer en surproduction aux énergies du LHC. Dans le plasma, la production des quarks lourds c ou b va dépendre, non seulement de l'énergie incidente, mais aussi de la température et du temps de vie du milieu qui augmentent lorsque l'on passe des énergies du SPS à celles du RHIC. C'est alors que pourrait intervenir lors du refroidissement du plasma le phénomène de recombinaison des quarks, de coalescence statistique entre quarks qui pourrait être à l'origine de la formation des hadrons. Une compétition féroce entre le mécanisme de dissolution et le mécanisme de recombinaison pourrait ressusciter les charmonia au RHIC et donc atténuer, voire faire disparaître, leur suppression. Cette idée de recombinaison de quarks au point d'hadronisation du plasma est une idée assez ancienne et se propose en fait d'expliquer la production de toutes les particules à l'exception bien évidemment de celles qui auraient survécu à la phase déconfinée. Ce mécanisme de « condensation » est très différent du mécanisme de fragmentation des partons à l'origine de la production des hadrons dans les collisions entre nucléons ou entre électrons et positons. Comme ces collisions ne produisent pas un état déconfiné, le mécanisme de recombinaison devient une empreinte de qualité pour la production du plasma. Sans aucun doute, les nombreux résultats du RHIC plaident largement en faveur du mécanisme de recombinaison des quarks, tout au moins pour la production des particules avec une impulsion transverse faible ou modérée, inférieure à 2 GeV/c. La production des baryons est quantitativement, par exemple, identique à celle des mésons, en contradiction avec un phénomène de fragmentation. Les résultats encore à venir sur la production des quarkonia au RHIC confirmeront ou non, l'efficacité de ce mécanisme à combiner entre eux les quarks lourds pour former des charmonia.

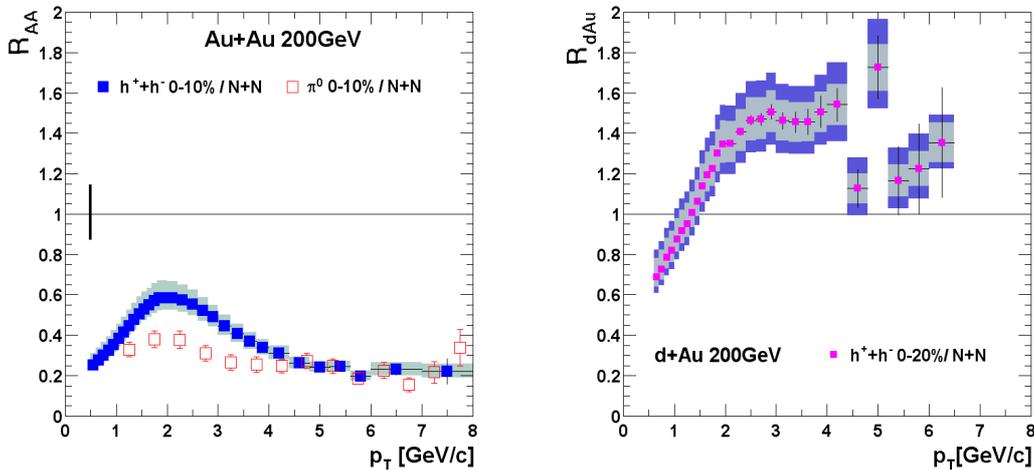
1.3.4 Où l'écoulement latéral des partons et leur perte d'énergie interviennent

L'écoulement latéral ou flot (*flow* en anglais) des hadrons mesuré aux énergies du RHIC a pris le contre-pied des extrapolations raisonnables des mesures obtenues à basse ou moyenne énergie. Il se traduit expérimentalement par une anisotropie azimutale de la distribution des impulsions transverses des hadrons. L'intensité de ce phénomène est plus grande au RHIC qu'au SPS. L'existence d'un gradient de pression capable de produire cet important écoulement latéral des particules constitue la surprise des premières campagnes de mesures du RHIC. Elle s'est transformée en excellente surprise lorsque l'ensemble des données a démontré que cet écoulement concernait en fait les partons, et non les hadrons, en se produisant par conséquent durant la phase de déconfinement. Nous semblons enfin tenir une

preuve du caractère fortement collectif de la phase déconfinée qui pourrait justifier le terme de « plasma ». D'ailleurs, les calculs hydrodynamiques qui attribuent au plasma l'équation d'état d'un fluide, reproduisent extraordinairement bien les mesures de l'écoulement latéral. A la différence néanmoins de ce qui était attendu, la comparaison entre toutes ces données et de nombreux modèles hydrodynamiques démontre que le plasma produit au RHIC n'est pas un gaz parfait mais plutôt un fluide quasi parfait caractérisé par une viscosité très faible et un degré d'équilibre thermique qui pourrait être important d'où la qualification de sQGP pour *strongly interacting QGP*.

Ce fluide parfait composé de quarks et de gluons doit nécessairement affecter la production de jets de partons. Ceux-ci doivent en effet céder en traversant ce milieu relativement opaque une quantité importante de leurs énergies cinétiques. Il doit en résulter une suppression relative des jets, une empreinte expérimentale de la formation de la phase déconfinée. Une suppression très forte de hadrons a été observée pour la première fois au RHIC aux grandes impulsions transverses, supérieures à 2 GeV/c, voir figure 2. Comme pour le phénomène de l'écoulement collectif, les conclusions issues de la comparaison théorie-expérience sont claires. Cette suppression concerne directement la production des jets de partons et n'intervient en aucune manière dans la phase hadronique de la collision entre noyaux. Des mesures azimutales d'une précision inouïe sur la suppression des jets corroborent les conclusions tirées des mesures de l'écoulement collectif des partons. L'origine de la suppression des jets est bien une perte d'énergie très importante des partons, environ 30 fois supérieure à la perte d'énergie des partons dans la matière hadronique froide. Des calculs perturbatifs laissent entendre que cette perte d'énergie par interaction forte s'explique par une densité de gluons dans le plasma de l'ordre de 100 fois supérieure à celle attendue dans une phase confinée.

Figure 2 Suppression des hadrons de grande impulsion transverse mesurée par PHENIX. Rapport du nombre de hadrons produits dans les collisions Au-Au centrales avec celui extrapolé avec les collisions p-p en fonction de l'impulsion transverse (figure de gauche). Le même rapport pour les collisions d-Au qui ne présente pas la même suppression (figure de droite).



2 Programmes de physique

2.1 Quarkonia

Les résonances de saveurs lourdes telles que le J/ψ ou le Υ sont créées très tôt dans la collision en un temps (environ 1 fm/c) proche de celui de formation d'un éventuel QGP. Elles constituent donc une sonde judicieuse de ce plasma, d'autant plus que dans le cas d'un plasma, une suppression de leurs taux de production est attendue. Ces résonances se désintègrent ensuite en une paire de leptons qui sont très peu affectés par le milieu. Les

résonances des familles du J/Ψ et du Υ , ayant des potentiels de liaison différents, vont être affectées différemment en fonction de la température et/ou de la densité d'énergie atteinte par le système, conduisant ainsi à différents scénarios de suppression des résonances selon ces paramètres.

Au SPS, l'expérience NA50 a observé une suppression anormale du nombre de J/ψ dans les collisions centrales Pb-Pb et a montré l'importance des études en mode proton-proton et proton-noyau pour étalonner indépendamment l'absorption nucléaire classique de type Glauber. Le processus de Drell-Yan, non perturbé par le plasma, a été utilisé comme référence pour normaliser la production de charmonia. La statistique atteinte dans le processus Drell-Yan est toutefois plus faible que celle du charmonia et domine donc l'erreur statistique sur le rapport. Une approche alternative, appelée méthode de « biais minimum » et mise en œuvre par nos physiciens, utilise les mesures inclusives de centralité pour calculer le nombre de J/ψ par collision noyau-noyau à centralité donnée, et le comparer à des modèles théoriques. Cette méthode récupère toute la statistique du J/ψ mais demande une bonne connaissance de l'acceptance et de l'efficacité de détection du J/ψ en fonction de la centralité.

Alors qu'au SPS, seuls les charmonia étaient mesurables, les énergies du RHIC et surtout du LHC doivent permettre la mesure des bottomonia. En effet, à ces énergies, l'augmentation des processus durs se traduit notamment par une augmentation importante de la section efficace de production des saveurs lourdes. La fraction des particules produites par les processus durs est respectivement de 2, 50 et 98% aux SPS, RHIC et LHC. D'autre part, l'augmentation de l'énergie des faisceaux conduit à une absorption nucléaire moindre dans la voie finale mais aussi vers des régions en x_{Bjorken} petits où les effets de *shadowing* (modification de la fonction de structure des gluons dans le milieu nucléaire) dans la voie initiale deviennent importants et donc à considérer. Les processus de création de paires de quarks lourds étant dominés, aux énergies du RHIC et du LHC, par la fusion de gluons, c'est le *shadowing* qui doit être pris en compte. Les données prises en d-Au par PHENIX au RHIC semblent confirmer cette diminution de l'absorption nucléaire et le rôle du *shadowing*.

Au LHC, la production de charmonia devrait se compliquer par rapport au RHIC et au SPS. En effet, avec un grand nombre de paires $c\bar{c}$ produites par collision, de l'ordre de la centaine, une importante production secondaire est attendue en plus de la production directe par processus durs. Cette production secondaire peut provenir de la phase plasma (recombinaison cinétique) ou hadronique (hadronisation statistique, désintégration des mésons B , annihilation $D\bar{D}$). Des mécanismes autres que l'écrantage de couleur peuvent donc révéler la formation d'un plasma à condition de pouvoir séparer les différentes sources par des études systématiques appliquées aux charmonia et saveurs lourdes ouvertes.

En ce qui concerne le Υ (1S), sa dissolution par écrantage de couleur est prédite pour des températures que seul devrait atteindre le LHC.

Bien que les mécanismes de production des quarkonia et du continuum diffèrent en fonction de l'énergie du système, la continuité des programmes auprès du SPS, du RHIC et du LHC permettent d'étudier le même état de la matière à des températures différentes. Les paragraphes suivants présentent la statistique mesurée ou attendue auprès du RHIC et du LHC, ainsi que certains points d'étude à mener afin de mieux cerner un éventuel QGP.

2.1.1 Nombre de quarkonia au RHIC et au LHC

2.1.1.1 RHIC

PHENIX est la seule expérience du RHIC dédiée à l'étude des résonances lourdes dans leurs voies de désintégration en paires de muons. Le J/ψ est mesuré dans les deux spectromètres à muons pour des impulsions de muon $p_{\mu} > 2 \text{ GeV}/c$ et à une pseudo-rapacité $1,2 < |\eta| < 2,4$.

PHENIX peut aussi détecter les charmonia dans leur désintégration en diélectron dans le spectromètre central pour des impulsions $p > 0,2 \text{ GeV}/c$, à une pseudo-rapidité $|\eta| < 0,35$.

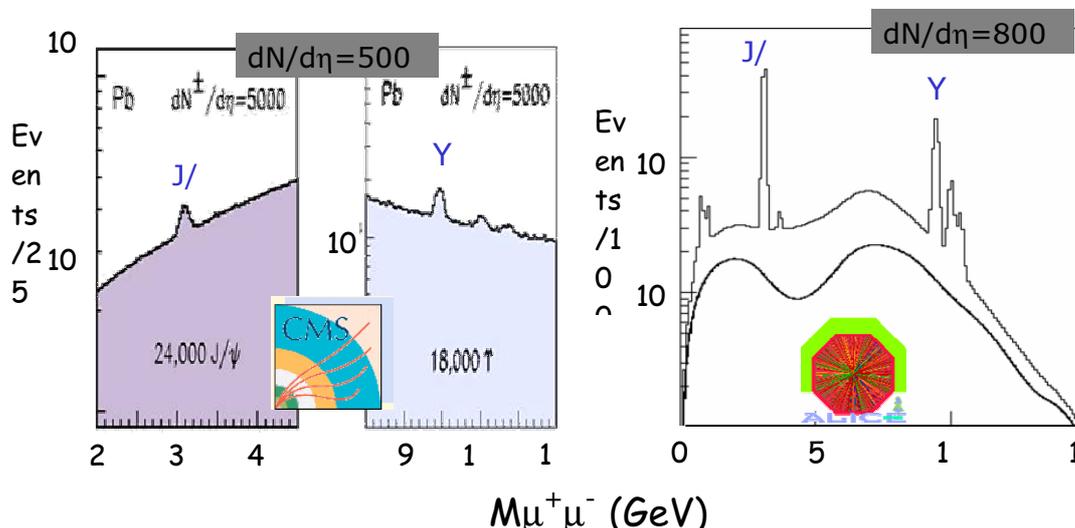
Les données prises par PHENIX en d-Au et p-p (2002-2003) comptent 2000 J/ψ détectés en deux muons et en deux électrons. La faible luminosité des prises de données Au-Au de 2000 à 2002 et l'absence du spectromètre à muons nord n'ont pu permettre une étude de la production du J/ψ . Les prises de données 2004 (Au-Au à $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$) ont largement atteint la luminosité attendue. Avec une luminosité intégrée réelle de $240 \mu\text{b}^{-1}$, 5500 J/ψ en dimuons sont attendus en ne prenant en compte que l'absorption nucléaire normale, autorisant la première étude vraiment significative du J/ψ au RHIC.

Les prochaines données en Au-Au à $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ et à haute luminosité seront prises en 2008, avec 20000 J/ψ attendus en muons dans le bras nord soit environ 35000 en cumulant les deux bras. Le nombre d'upsilon correspondant ne serait que de quelques centaines, insuffisant pour une étude réelle. Dans une période plus lointaine (~2011-2013), une amélioration des performances est prévue avec RHIC II : un facteur 40 sur la production de J/ψ est attendu par rapport à 2008.

2.1.1.2 LHC

Le LHC démarrera en 2007 mais les collisions Pb-Pb à haute luminosité sont planifiées pour 2009-2010. Deux expériences vont y explorer le domaine des résonances lourdes : l'une, ALICE, est dédiée à l'étude du QGP, avec une forte contribution française dans la construction du bras dimuon et sa physique associée, celle des quarkonia ; l'autre, CMS, avant tout dédiée à la physique du modèle standard, possède un excellent détecteur pour la physique des grands p_T , jets et quarkonia, avec cependant une présence française trop réduite dans sa communauté « ions lourds ».

Figure 3 Signaux de quarkonia reconstruits par CMS et ALICE avec des données simulées.



a) Les quarkonia dans ALICE

Le spectromètre à muons d'ALICE couvre une région en pseudo-rapidité $2,5 < \eta < 4$ pour laquelle J/ψ et Y peuvent être étudiés jusqu'à des $p_T=0$. On notera un bon rapport signal/bruit et une bonne signification pour la famille des upsilon ainsi que la possibilité de corrélérer ces signaux avec ceux mesurés dans le détecteur central ($|\eta| < 0,9$).

Des simulations ont été réalisées, afin de connaître le nombre de quarkonia attendus dans le bras dimuon, en collision Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5,5 \text{ TeV}$. Elles ont montré que 500 000 J/ψ sont

attendus (230 000 avec une coupure en masse à 1σ) ainsi que 6400 Υ , 1800 Υ' et 1000 Υ'' . Cela équivaut pour les 10% de collisions les plus centrales ($\sim 40\%$ de la production totale) à 2600 Υ et 900 Υ' . Parmi les 6400 Υ , environ 2400 sont produits directement, 3000 proviennent de la désintégration du $\chi_b(1P)$, 600 du $\chi_b(2P)$, 400 du Υ' .

b) Les quarkonia dans CMS

Les performances de CMS (évaluées pour un mois de run Pb-Pb, une multiplicité de 5000 particules chargées à $\eta=0$) sont de 24000 J/ψ avec un rapport signal sur bruit (S/B) de 0,2, 18000 Υ avec $S/B = 0,4$, 5400 Υ' avec $S/B = 0,1$ et 3400 Υ'' avec $S/B = 0,08$. Ces statistiques sont très dépendantes des distributions cinématiques utilisées et des coupures sur le p_T des muons, ici de 3.5 GeV/c. Une étude plus récente avec le trigger de CMS s'affranchit de cette coupure sur le p_T du muon et conduit à des statistiques considérablement plus élevées, d'un facteur 10 environ, pour le J/ψ . Une analyse du bruit de fond sous les résonances montre qu'il s'agit de paires de muons décorrélés qu'il est alors possible de soustraire à partir des distributions de paires de muons de même signe.

Grâce à la détection des Z^0 , insensible aux effets du plasma, CMS disposera, en plus de la distribution inclusive de centralité, d'une référence supplémentaire pour la mesure de la suppression des quarkonia. En un mois de faisceau Pb-Pb on espère mesurer 10000 Z^0 .

Le programme de physique de CMS avec des faisceaux d'ions lourds et les performances du détecteur seront décrits en détail dans le futur TDR de physique de la Collaboration qui doit être édité à la fin 2005. D'ici là des simulations intensives et complètes devront être menées utilisant les outils officiels de simulation et d'analyse.

ALICE et CMS contribueront de façon importante à l'étude des quarkonia dans la matière dense, mesurant indépendamment les mêmes observables (RHIC a montré l'importance de telles mesures conjointes), dans des régions de rapidité différentes. Les deux expériences offriront, conjointement, une couverture complète en rapidité.

2.1.2 Techniques d'analyse

Quelles que soient les expériences, nous retrouverons les mêmes méthodes et types d'étude à la fois pour extraire les quarkonia du fond et pour les étudier en fonction de divers paramètres.

Le nombre de quarkonia peut être obtenu à partir d'un ajustement global du signal et du fond total. Il peut l'être aussi à partir d'un ajustement après soustraction du fond non corrélé (l'erreur statistique sur le signal est alors entachée par cette soustraction). Cette méthode de soustraction du fond non corrélé utilisant les paires de même signe, appliquée au SPS, est plus discutable au LHC où le fond combinatoire contient une fraction importante de leptons de la désintégration de mésons B et où les paires $B\bar{B}$ produisent non seulement des paires corrélées de signe opposé mais aussi de même signe. En conséquence, la méthode de soustraction de paires de même signe retire du spectre en masse invariante $\mu^+\mu^-$ non seulement la composante non corrélée mais aussi une partie du signal corrélé. La méthode de mélange d'événements n'est pas affectée par cet effet.

Une fois le signal obtenu, il sera étudié en fonction de la centralité (afin d'identifier le schéma de suppression/augmentation), de la taille du système (afin de séparer la suppression normale et anormale), du p_T (afin de distinguer des modèles de QGP), etc., et aussi en liaison avec d'autres signaux.

Différents mécanismes peuvent en effet masquer ou simuler les effets propres au plasma sur les résonances lourdes :

- l'absorption nucléaire doit décroître lorsque l'énergie des faisceaux augmente (le temps de collision ou de traversée des noyaux des faisceaux est plus court).

- le shadowing entraîne une suppression des quarks lourds produits par fusion de gluons. Cette suppression est plus importante pour des petites valeurs de x_{Bjorken} atteintes lorsque l'énergie augmente. ALICE et CMS couvrant des domaines de rapidité différents (donc des valeurs de x_{Bjorken} différentes), elles procureront une comparaison intéressante de l'ampleur du shadowing.
- la coalescence se fait en présence de plasma mais une recombinaison peut se produire pendant la phase hadronique.

Nous reprenons dans les paragraphes suivants quelques points selon les expériences.

J/ψ dans PHENIX

Avec environ 10 paires $c\bar{c}$ attendues par collision, le processus de coalescence devrait rester faible. En revanche, le shadowing nécessite une étude détaillée. En effet, le charme ouvert faisant intervenir les mêmes processus de fusion de gluons pour créer les c et \bar{c} , est soumis aux mêmes effets de shadowing que le J/ψ . Cet effet est dominant puisque le charme ouvert n'est pas affecté par l'absorption nucléaire. Il est par ailleurs, après soustraction du fond non corrélé, la composante principale du continuum sous le J/ψ et pourrait être extrait statistiquement. Il ne sera probablement pas étiqueté en muons (pour le Run 2008) mais pourrait l'être en électrons par un détecteur de vertex dans la partie centrale ; le domaine en x_{Bjorken} serait alors différent mais pourrait peut-être suffire pour contraindre les modèles de shadowing. Le J/ψ quant à lui, en l'absence d'absorption nucléaire, pourrait être étudié en fonction de x_{Bjorken} mais avec une statistique bien moindre.

Faut-il définir un processus de référence ? Une comparaison J/ψ , paires $D\bar{D}$ corrélées élimine l'effet du shadowing mais peut être affectée différemment par une éventuelle perte d'énergie des quarks lourds dans le plasma. Dans tous les cas, les erreurs statistiques seraient importantes sur le rapport, dues à la faible statistique attendue pour les paires $D\bar{D}$ corrélées sous le J/ψ .

Enfin, la comparaison entre résonances d'une même famille n'est ici pas possible puisque les ψ' ne seraient plus présents.

J/ψ dans ALICE-dimuons

Nous retrouvons les points précédents à la différence que le continuum est ici principalement des paires $B\bar{B}$ corrélées (après soustraction du non corrélé) dans le bras dimuon et donc les effets de shadowing ne sont pas les mêmes que pour le J/ψ . De plus, avec plus de 100 paires $c\bar{c}$ par collision, l'effet de recombinaison serait important.

La signature du QGP n'est donc plus seulement un écrantage de couleur conduisant à une suppression de la production du J/ψ mais d'autres effets peuvent même conduire au contraire à une augmentation. Il faut cependant séparer parmi ces effets ceux venant du plasma et ceux venant de la phase hadronique.

En outre, la mesure du flot de J/ψ permettrait de renseigner sur la collectivité des partons à des températures environ deux fois plus élevées que la température critique.

La famille du Υ dans ALICE-dimuons

Avec environ 5 paires $b\bar{b}$ par collision, nous retrouvons le même type d'étude que pour le J/ψ à PHENIX. Le $B\bar{B}$ corrélé domine le continuum sous le Υ (après soustraction du fond non corrélé) ; comme à PHENIX, il n'y a pas d'étiquetage des B dans le bras dimuon mais celui en électrons est possible dans le détecteur central. La différence importante est que le Υ' ne devrait pas être complètement supprimé, rendant possible une étude du rapport Υ/Υ' en fonction de la centralité et du p_T .

La famille du Υ dans CMS

Comme déjà mentionné, le continuum est totalement dominé par le fond non corrélé. La mesure du Z^0 en dimuon, environ 10000 attendus par mois de prise de données en Pb+Pb,

sera utilisée comme référence puisqu'elle ne devrait pas dépendre de la centralité. Le domaine cinématique est cependant très différent de celui du Υ ainsi que le mécanisme de production et donc les effets de shadowing.

2.1.3 Implication des physiciens français

Les implications du type développements logiciels sont résumées sous forme d'items dans la section 3.1, pour chacun des laboratoires impliqués. Seules les contributions instrumentales sont décrites ici.

2.1.3.1 PHENIX

Les deux spectromètres à muons appelés « bras sud » et « bras nord » comportent chacun un aimant équipé d'un trajectographe composé de 3 stations de chambres à cathodes à pistes et un identificateur de muons formé de 5 plans de détection intercalés entre des murs de fer.

Le LLR et le DAPNIA-Saclay ont pris en charge la réalisation de l'électronique de lecture des chambres à pistes du spectromètre nord, avec une implication importante des groupes d'électronique et d'informatique du LLR quant à la préparation et au suivi de la production, ainsi que la mise au point d'un nouveau banc de test. La réparation du bras sud, l'installation du bras nord et le démarrage à l'automne 2002, coordonnés par le LLR, ont également fait appel à la participation importante des physiciens et thésards des groupes de Clermont-Ferrand, Orsay et Saclay.

La maintenance de l'électronique est prévue jusqu'à la fin du MoU, fin 2006.

2.1.3.2 ALICE-Dimuon

Le spectromètre à dimuons d'ALICE est dédié à la physique des quarkonia, identifiés par leur désintégration en deux muons. Il est constitué d'un absorbeur frontal, de 10 chambres de trajectographie de haute granularité, d'un aimant dipolaire de grande acceptance, d'un filtre à muons, de 4 chambres de déclenchement, d'un blindage du tube faisceau, d'un système de contrôle de l'alignement des chambres de trajectographie, et enfin du détecteur V0 (sous-système des détecteurs à l'avant) pour le déclenchement de niveau zéro et le rejet des interactions faisceau-gaz.

Quinze instituts de six pays différents sont impliqués dans le bras dimuon dont 5 laboratoires français (LPC Clermont-Ferrand, IPN Lyon, SUBATECH Nantes, IPN Orsay, DAPNIA/SPhN Saclay) soit environ 25 physiciens permanents. Les laboratoires français ont une forte contribution dans la conception et la construction des chambres de trajectographie, dans la prise en charge de l'électronique des chambres RPC du système de déclenchement, dans le système de contrôle de l'alignement des chambres de trajectographie ainsi que dans le détecteur V0. Les services techniques et de nombreux physiciens contribuent à la phase de construction, qui a démarré, et contribueront à celle d'assemblage et d'installation au CERN pendant les années 2005-2006. La période de mise en service en 2006-2007 sera principalement assurée par les physiciens avant les premiers faisceaux prévus courant 2007.

2.2 Etrangeté

Parmi les observables pertinentes pour caractériser le QGP, la production d'étrangeté, notamment celle de baryons et d'anti-baryons multi-étranges, tient une place privilégiée, à la fois dans le secteur des processus "mous" ($p_T < 2$ GeV/c) où elle permet de sonder les conditions globales de freeze-out chimique et cinétique et dans le domaine des processus durs, où il est essentiel de pouvoir mesurer les impulsions transverses les plus élevées possibles.

La mesure des hadrons étranges permet d'apporter une information substantielle sur la composition chimique et la dynamique des systèmes formés lors des collisions. Elle s'inscrit

dans l'analyse des abondances relatives et des distributions en impulsion transverse des produits de la réaction, qui permet de sonder le degré de thermalisation et les effets collectifs (flot transverse, flot elliptique) auxquels est soumis le système dans son état final, avec l'objectif d'en tirer indirectement des renseignements sur sa nature initiale: hadronique ou partonique. D'autre part, la production d'hypérons pourrait également servir de sonde directe du milieu car suivant certaines prédictions théoriques, la création de paires quark-antiquark étranges et la formation subséquente de baryons et d'anti-baryons étranges devraient être plus abondante dans un QGP que dans un milieu hadronique. Des densités baryoniques importantes, comme celles atteintes à l'AGS au GSI et au SPS, peuvent aussi conduire à une augmentation relative de la production de particules étranges, mais avec une modulation en fonction du type de particule qui dépend de la densité baryonique. Ces études menées jusqu'à présent au SPS et au RHIC devront être conduites également en priorité au LHC de manière à déterminer comment l'image globale de la collision évolue avec ce saut important en énergie (des exemples seront donnés en 2.2.1 et 2.2.2).

Parallèlement au "bulk" de hadrons de bas p_T , des particules de haut p_T sont produites en fonction de l'énergie incidente, résultant de processus durs entre partons au tout début de la réaction. Au RHIC, l'importance de ces processus durs a ouvert la voie à l'étude de nouvelles sondes du QGP, en particulier les effets de jet-quenching (voir 2.2.3). Au LHC, l'influence de ces processus durs devrait être encore bien plus grande, si ce n'est dominante, offrant ainsi beaucoup de nouvelles possibilités d'analyse dans lesquelles les hadrons étranges de haut p_T joueront un rôle primordial.

Notre programme de Physique a trait à l'ensemble de ces aspects et comporte également un élément plus exotique (voir 2.2.4) relatif à la possible existence, sous forme métastable, de nouvelles formes de matière étrange.

2.2.1 Composition chimique

Au RHIC comme au SPS, l'analyse de la composition chimique des systèmes formés, au moyen de modèles statistiques qui font l'hypothèse d'un équilibre thermique et chimique, permet de reproduire les abondances relatives des divers types de particules produites, au moyen de deux paramètres principaux: la température et le potentiel chimique baryonique.

L'excellent accord entre ces modèles et les données suggère qu'un degré élevé d'équilibration chimique est atteint et que la formation d'un QGP pourrait être le moteur conduisant à cet équilibre. Déjà au SPS et plus particulièrement au RHIC, les abondances relatives de particules conduisent à des températures de freeze-out chimique (~ 160 MeV) très proches de la transition de phase prédite par les calculs QCD sur réseau, suggérant que le système est, au préalable, au-dessus de cette limite et que les hadrons observés se sont formés à partir d'une phase de partons déconfinés. L'argument selon lequel une équilibration chimique après hadronisation est improbable vu la faible durée de vie du gaz de hadrons amène à conclure que les hadrons sont « nés en équilibre ». Même si ces approches sont quelque peu controversées quant à leur interprétation, elles ont permis de construire une image statistique unifiée, de SIS jusqu'au RHIC, en passant par l'AGS et le SPS.

On peut s'attendre à une production de particules au LHC caractérisée par la même systématique que celle du SPS et du RHIC : les taux de production suivant des ordres statistiques donnés par les valeurs de la température (proche de celle du RHIC) et de potentiel chimique. Cependant, des déviations par rapport à ces prédictions seraient très intéressantes car elles pourraient mettre en évidence l'importance des processus durs.

Une autre question cruciale concerne l'évolution du facteur de Wroblevski (λ_s), rapport entre les paires quark-antiquark étranges et les paires quark-antiquark légers (u, d) nouvellement créées. Il devrait aussi être quasiment constant entre RHIC et LHC, en raison de la faible

variation attendue de la température au freeze-out chimique. Mais suivant d'autres prédictions, impliquant des scénarios hors équilibre et la possibilité d'avoir une sursaturation de l'étrangeté, une très haute température initiale dans le QGP devrait provoquer un fort accroissement de la production d'étrangeté et conduire à une augmentation de λ_s . Les différents modèles statistiques utilisés aujourd'hui aux énergies du SPS et du RHIC déterminent d'ailleurs le paramètre de saturation de l'étrangeté avec une certaine imprécision qui n'exclut donc pas des phénomènes de sursaturation déjà à ces énergies.

Ces scénarios s'inscrivent dans la continuation de prédictions théoriques plus anciennes qui montrèrent que l'accroissement de l'étrangeté pouvait être considéré comme une signature robuste du QGP. Suivant ces prédictions, la production relative de Λ , Ξ , Ω devrait être « anormalement » élevée dans un QGP par rapport à celle dans un gaz hadronique, et ceci de façon d'autant plus marquée que la particule a un contenu en étrangeté important.

En comparant les rapports d'hypérons (Ω/Ξ , Ξ/Λ , ...) produits dans un système hadronique p-p ou proton-noyau, i.e., où l'on est sûr que la densité d'énergie n'a pas dépassé le seuil critique de formation d'un QGP, avec ces mêmes rapports issus d'une collision noyau-noyau où l'on espère former un QGP, un tel comportement a été effectivement observé au SPS puis au RHIC.

Mais son interprétation n'est pas sans ambiguïté car il a été montré par la suite que cet effet pouvait être qualitativement reproduit par des calculs statistiques dans le cadre d'un modèle de gaz de hadrons, à condition d'utiliser l'ensemble canonique qui est le traitement correct des productions rares. Ceci est le cas des hypérons dans les collisions p-p et p-noyau. 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 par rapport à une formulation avec l'ensemble grand canonique. Ceci pourrait constituer l'essence même de la suppression d'étrangeté observée dans p-p et p-noyau par rapport à noyau-noyau.

Ces conclusions ne sont pas du tout contradictoires avec la formation d'un QGP. Car ce sont des mécanismes de percolations des quarks étranges et légers sur un grand volume qui sont les plus aptes à fournir une explication physique à la reproduction des taux d'hypérons mesurés par ces modèles statistiques.

Selon les prédictions du modèle statistique dans cette formulation canonique, cet effet devrait s'atténuer lorsque l'énergie des collisions augmente. Ceci est effectivement le cas si l'on compare les données du RHIC et celles du SPS. Dans ce contexte, il sera très important d'observer si cette tendance subsiste jusqu'à l'énergie du LHC.

2.2.2 Dynamique d'expansion et mécanismes d'hadronisation

Les particules étranges jouent également un rôle essentiel dans l'étude de la dynamique d'expansion du système et dans la compréhension des mécanismes d'hadronisation. Les spectres en masse transverse mesurés au RHIC dans les collisions centrales indiquent que les baryons multi-étranges Ξ semblent se démarquer de toutes les autres particules en ce qui concerne le comportement au freeze-out thermique. L'ajustement de ces distributions au moyen de modèles de type *blast-wave* (inspirés de l'hydrodynamique) montre en effet que leur température de découplage cinétique est plus élevée et se rapproche de la température de freeze-out chimique. Ceci pourrait signifier que les Ξ se découplent plus tôt du système en raison de leur faible section efficace d'interaction avec le milieu. Mais en même temps, ces particules sont soumises à un flot transverse important, ce qui suggère que ce mouvement collectif s'est développé, au moins partiellement, dans une phase pré-hadronique.

La nature partonique de ce flot pourrait être actuellement corroborée par la mesure du flot elliptique de ces particules dans les collisions semi-centrales.

De nombreux résultats montrent que l'amplitude du flot elliptique des hadrons augmente fortement lorsque l'on passe de l'énergie de l'AGS à celles du SPS et du RHIC où elle atteint les valeurs prédites par l'hydrodynamique. Ceci suggère qu'une thermalisation quasi complète

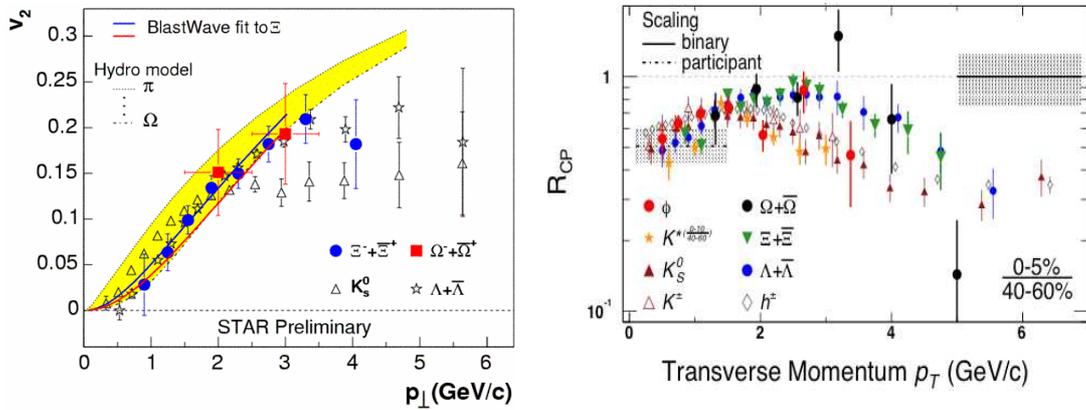
a eu lieu très rapidement. Cette conclusion se fonde sur l'argument intuitif selon lequel la limite hydrodynamique, limite où les ré-interactions se produisent infiniment vite (conduisant donc à un équilibre thermique local instantané), produit les effets de flot elliptique les plus marqués et que les données semblent saturer cette limite. Ces preuves de forte pression et de thermalisation très rapide sont considérées comme de fortes évidences de la formation d'un plasma.

Dans ce contexte, la mesure systématique du flot elliptique des particules étranges et multi-étranges présente un intérêt supplémentaire car, du fait de leur faible section efficace d'interaction, elles pourraient révéler directement la présence de flot partonique. En effet, dans l'éventuelle phase partonique précédant la phase hadronique, les sections efficaces de réaction des hadrons n'ont aucune influence. Donc, si le flot elliptique des différentes espèces de hadrons mesurés s'avère être indépendant de leurs sections efficaces, cela pourrait signifier que ce flot elliptique s'est construit durant la phase partonique.

Les résultats actuels du RHIC vont dans ce sens puisqu'ils montrent que les Ξ et les Ω sont effectivement soumis à un flot elliptique important, comparable à celui des hadrons plus légers. Au LHC, on prévoit que le flot elliptique devrait saturer dans la phase QGP, ce qui signifie que ce type d'effets devrait y être plus clairement interprétable.

Il a également été montré récemment au RHIC, voir figure 4, que les différences observées entre mésons et baryons au niveau du flot elliptique et au niveau des taux de production (rapport baryon/méson > 1), à p_T intermédiaire, pouvaient s'expliquer remarquablement bien dans le cadre d'un scénario où la production de hadrons est dominée par des mécanismes de coalescence de quarks. Cette conclusion est en particulier renforcée par le comportement du méson ϕ , qui semble exclure un effet de masse. Ces observations constituent donc une indication supplémentaire de la présence de degrés de liberté partoniques.

Figure 4 : Flot elliptique des particules étranges (à gauche) et rapport de modification nucléaire R_{CP} en fonction de l'impulsion transverse (à droite).



2.2.3 Processus durs et étrangeté: effets de jet-quenching

Une suppression très nette des hadrons de haut p_T a été observée dans les collisions centrales Au-Au au RHIC. En revanche, aucune suppression n'a été relevée dans le système de référence hadronique d-Au. Ceci a conduit à la conclusion que cette suppression n'est pas compatible avec des effets "hadroniques" dans l'état initial mais qu'elle est due à des effets dans l'état final, en l'occurrence une perte d'énergie des partons dans un milieu dense en gluons. Il est important de mesurer ces effets de suppression pour différents types de hadrons en différenciant mésons et baryons. Cela est possible pour les particules étranges identifiées par leur topologie de décroissance jusqu'à des impulsions transverses très élevées, bien au-delà

des limites des méthodes d'identification utilisant la perte linéique d'énergie ou le temps de vol. Il a été montré que la suppression des mésons K_s^0 commençait à plus faible p_T que celle des baryons Λ et que pour chaque espèce, ce seuil de suppression correspondait remarquablement bien au début de la saturation du flot elliptique. Ces comportements et cette corrélation sont probablement le résultat d'une imbrication complexe entre deux mécanismes d'hadronisation: la coalescence de quarks à p_T intermédiaire et la fragmentation de partons à haut p_T .

Le LHC permettra d'étudier ces phénomènes jusqu'à des p_T plus élevés qu'au RHIC et avec une meilleure statistique à p_T intermédiaire.

2.2.4 Matière exotique: dibaryons étranges

Selon de nombreuses prédictions, un état lié de six quarks (uuddss) pourrait exister en raison du caractère attractif des forces de couleurs magnétiques qui permettrait à l'état fondamental de cette configuration de se situer en dessous du seuil de désintégration par interaction forte ($M_{\Lambda\Lambda} = 2231$ MeV). Cet objet, H-dibaryon ou H^0 , possède une hypercharge nulle, une durée de vie comprise entre 10^{-8} et 10^{-10} s et une masse proche de $M_{\Lambda\Lambda}$. Parmi les quelques modes de désintégration envisageables, le seul que nous puissions étudier est celui où tous les produits finals sont chargés, c'est-à-dire la séquence $H^0 \rightarrow \Lambda p \pi^- \rightarrow p \pi^- p \pi^-$.

Des spéculations théoriques récentes indiquent en outre que d'autres états liés dibaryoniques pourraient exister dans le domaine hadronique, se désintégrant par interaction faible. D'après ces prédictions, ces dibaryons auraient des énergies de liaison de quelques MeV et des distances de vol de quelques centimètres. Leurs taux de production ont été estimés au moyen de simulations combinant modèle de transport avec mécanisme de coalescence. Au RHIC, les mécanismes de coalescence de quarks commencent à jouer un rôle important, ce qui conforte l'espoir de pouvoir créer de telles particules aux énergies des collisionneurs: les taux de production prévus au RHIC et au LHC sont de l'ordre de 10^{-2} - 10^{-3} par unité de rapidité.

La recherche de ces particules a commencé dans les données de STAR avec l'analyse de près de cinq millions d'événements. Mais les distributions en masse invariante $M_{(\Lambda p \pi^-)}$ n'ont révélé pour l'instant aucun signal significatif. Cette recherche doit évidemment continuer dans le futur, aussi bien au RHIC qu'au LHC.

2.2.5 Bilan du RHIC et nouvelles possibilités au LHC

Le saut en énergie important, apporté par le LHC, doit offrir de nouvelles possibilités d'investigation. Les densités d'énergie plus élevées qu'au RHIC (donc des températures, volume, temps de vie du système plus importants) produiront des conditions générales plus favorables pour étudier le QGP.

En même temps, la forte augmentation de la multiplicité combinée à une influence plus marquée des processus durs permettra des analyses originales dans le cadre de l'expérience ALICE. Il sera par exemple possible d'extraire les conditions de freeze-out événement par événement et d'obtenir une distribution complète de paires T , μ_B . La largeur de cette distribution pourra être comparée à la largeur statistique afin de tester le degré de thermalisation. De plus, différentes classes d'événements dans le plan T , μ_B permettront d'étudier la variation de la dynamique. De même, une analyse de la composition chimique des événements contenant des jets devrait permettre de déterminer les corrélations entre la phase initiale des processus durs et la phase de freeze-out des processus mous.

A titre d'illustration, les résultats actuels de nos simulations montrent déjà qu'il sera possible de reconstruire entre 10 et 15 Λ par événements et d'obtenir une statistique utile jusqu'à des impulsions transverses de l'ordre de 15 à 20 GeV/c.

2.2.6 Implication des physiciens français

Les implications du type développements logiciels sont résumées en annexe, pour chacun des

laboratoires impliqués. Seules les contributions instrumentales sont décrites ici.

2.2.6.1 STAR

L'IReS et SUBATECH ont couvert la quasi-intégralité de la conception et de la construction du SSD pour STAR. Celui-ci est installé, dans son entièreté depuis août 2004, entre la TPC et les couches internes du détecteur de vertex. Constitué de 320 modules de silicium à micropistes, il a été réalisé afin d'améliorer la trajectographie des particules, plus spécifiquement celle des particules de faible impulsion transverse qui n'atteignent pas la TPC mais aussi et surtout pour la reconstruction des particules étranges.

L'IReS a pris en charge les conception, réalisation et tests de tous les éléments s'articulant autour du module (capteurs silicium, circuits intégrés ALICE 128C, puces de contrôle, hybrides et modules proprement dits) ainsi que le contrôle global et d'alimentation du SSD.

SUBATECH a pris en charge l'électronique en aval des modules (cartes ADC, de contrôle et de lecture des données), la mécanique, le système de refroidissement et l'assemblage du SSD. Les premières données ont été prises durant 2004 (avec une moitié de SSD) et les analyses ont montré le fonctionnement tout à fait satisfaisant de ce détecteur.

2.2.6.2 ALICE-ITS

En collaboration avec d'autres laboratoires européens, l'IReS et SUBATECH sont chargés des conception, réalisation et assemblage des couches externes de l'ITS d'ALICE. Ces couches de SSD sont, à l'instar du SSD de STAR, destinées à améliorer la trajectographie. Aussi, le développement de ces modules d'ALICE a de nombreux points communs avec celui qui a été mené pour STAR. L'installation des SSD est prévue à partir de mi-2005, laissant un an pour fabriquer les 2000 modules nécessaires (l'IReS doit en produire un tiers). SUBATECH doit développer un banc pour assembler ces modules sur leur support mécanique.

2.3 Jets et photons

2.3.1 Aspects théorique de la pertes d'énergie des partons durs

Les diffusions multiples subies par un parton dur (un quark ou un gluon dont l'impulsion transverse est grande comparée aux échelles typiques du milieu) lors de sa traversée du plasma quarks-gluons induisent l'émission de gluons mous qui emportent une fraction d'énergie de ce parton. Ce mécanisme des pertes d'énergie fournit donc une indication indirecte sur la densité du milieu produit dans les collisions d'ions lourds de haute énergie.

Des travaux importants ont été réalisés au cours des années 90 afin de calculer perturbativement le spectre de gluons rayonnés par un parton dur, aussi bien dans la matière nucléaire froide que dans le plasma quarks-gluons. Les spectres de gluons furent tout d'abord déterminés dans deux limites distinctes, dans lesquelles le parton ne subit qu'une diffusion dans le milieu (limite "fine") ou un nombre infini de diffusions (limite "épaisse"). Cette seconde limite, dont le formalisme a été en partie développé par la communauté théorique en France, devrait être plus appropriée pour décrire les collisions les plus centrales à l'énergie du LHC. La perte d'énergie moyenne est directement proportionnelle à la densité de gluons ainsi qu'à la longueur au carré parcourue par le parton dur dans le milieu, une propriété spécifique à QCD provenant de la rediffusion du gluon rayonné. Il est à noter que des travaux plus récents permettent de prendre en compte un nombre arbitraire de diffusions du parton dur dans le milieu. L'activité théorique est actuellement dédiée au calcul des spectres de gluons dans les canaux de saveurs lourdes.

Par la suite, l'effort a porté sur l'étude phénoménologique de ces pertes d'énergie dans le but de prédire et comprendre les résultats expérimentaux. Ces travaux sont notamment facilités

par le calcul récent de la distribution de probabilité dans la perte d'énergie, qui relie d'une part les spectres de rayonnement de gluons aux observables expérimentales d'autre part. Les différentes analyses théoriques de la production de particules de grande impulsion transverse mesurée dans les collisions Au-Au à RHIC semblent toutes indiquer que la perte d'énergie typique requise pour décrire les données est beaucoup plus importante (d'environ un ordre de grandeur) que celle extraite dans la matière nucléaire froide à partir de la production de paires de Drell-Yan dans les collisions hadron-noyau ou la production de hadrons en diffusion profondément inélastique semi-inclusive auprès de HERA.

Alors que ces données indiquent que le milieu produit à RHIC est vraisemblablement très dense, elles ne permettent cependant pas de comprendre le lien entre les pertes d'énergie et le processus de fragmentation. La production de photons durs corrélée à celle d'un jet ou d'un hadron de grand p_T peut se révéler une observable intéressante dans ce sens, afin de contraindre les fonctions de fragmentation de pions ou de photons dans les réactions d'ions lourds, et ainsi les modèles théoriques sous-jacents. Une étude théorique de ce canal dans les collisions proton-proton et plomb-plomb au LHC vient d'être proposée.

2.3.2 Perspectives expérimentales au LHC

Les résultats obtenus au RHIC ont démontré la relevance des sondes dures pour tester la matière et les phénomènes dynamiques en action. Au LHC, les sondes dures, incluant les quarks lourds, constitueront d'autant plus une sonde privilégiée qu'elles sont abondamment produites sur une gamme d'impulsions transverses dépassant d'un ordre de grandeur les impulsions accessibles au RHIC.

Les jets hadroniques, pour la première fois en physique des ions lourds, pourront être identifiés directement par calorimétrie offrant ainsi de nouvelles observables permettant de quantifier les propriétés du milieu. Multiplicité hadronique et dispersion des jets en sont deux exemples. Alors que l'énergie rayonnée par le parton dans le milieu est proportionnelle à qL^2 où q est le coefficient de transport caractéristique du milieu et L la distance parcourue dans le milieu, la modification de ces deux paramètres est proportionnelle à qL rendant cette observable beaucoup moins dépendante de la géométrie de la collision. L'observable la plus complète sera cependant la fonction de fragmentation des jets mesurée en fonction de x , la fraction d'impulsion transverse du jet emportée par les hadrons. Sa mesure permettra non seulement de quantifier la perte d'énergie des hadrons de grande impulsion transverse mais aussi de retrouver avec les hadrons de petite impulsion transverse la perte d'énergie rayonnée par les gluons. Cette mesure requiert deux conditions expérimentales. L'une est la possibilité de mesurer et d'identifier avec de bonnes résolutions les hadrons de petite impulsion transverse, en dessous de quelques centaines de MeV/c pour garantir une bonne sensibilité aux plus petites valeurs de x . L'autre condition est la possibilité de déterminer avec une bonne précision l'énergie initiale du jet avant l'interaction avec le milieu. Pour cela, il sera fait appel à l'étiquetage des jets par photons ou par Z^0 détectés dans la direction opposée du jet.

Le milieu sera également sondé en étudiant l'interaction avec le milieu des jets de quarks lourds c et b . Des différences importantes, directement reliées à la masse des quarks, sont attendues dans le mécanisme de perte d'énergie par rayonnement de gluons entre quarks légers et lourds. La comparaison de la modification du spectre des impulsions transverses des mésons porteurs de charme ou de beauté ouverte permettra de tester à la fois le scénario de perte d'énergie des partons dans le milieu et de quantifier les caractéristiques du milieu. L'identification des particules est indispensable pour ce type de mesure.

En faisant varier l'impulsion transverse des jets traversant le milieu, l'étude de la dynamique du milieu et de la dynamique des partons pourra être abordée dans le détail. Les partons de petite impulsion transverse ($p_T < 2$ GeV/c) seront totalement absorbés par le milieu et fourniront ainsi une sonde du mécanisme de thermalisation du QGP. Les partons d'impulsion transverse intermédiaire (2 GeV $< p_T < 6-7$ GeV/c) fragmenteront dans le milieu et fourniront ainsi un éclairage nouveau sur la dynamique du mécanisme d'hadronisation. Finalement les

partons de grande impulsion transverse ($p_T > 8-10 \text{ GeV}/c$) en traversant le milieu et fragmentant dans le vide fourniront l'outil de mesure tomographique du milieu.

2.3.3 Production des photons directs

Les photons directs constituent une autre sonde dure particulièrement intéressante. Plusieurs mécanismes de production co-existent :

1) Un photon direct peut être produit, lors d'une collision dure entre les partons des projectiles incidents, par diffusion Compton, par annihilation quark-antiquark ainsi que par bremsstrahlung d'un quark ou d'un gluon, ce dernier processus étant particulièrement important au LHC, pour une impulsion de photon de quelques dizaines de GeV. Ces mécanismes sont identiques à ceux qui expliquent la production de photons directs dans les collisions proton-proton: ils sont calculables dans le cas de la chromodynamique perturbative et conduisent à un spectre décroissant comme une puissance de l'impulsion transverse.

2) Dans les collisions d'ions lourds se superposent d'autres mécanismes où le photon est produit lors des interactions secondaires entre les partons issus des collisions multiples entre les nucléons des noyaux incidents. Pour calculer ce taux, on a coutume de supposer que les partons secondaires, se thermalisent après un temps très court (hypothèse qui peut être vérifiée ou infirmée en étudiant le flot des hadrons par exemple (voir sec 1.3.4)) pour former une bulle de plasma de quarks et de gluons qui se refroidit lors de son expansion et devient, après une transition de phase, une bulle de hadrons chauds. Des photons sont évidemment produits lors des collisions entre les quarks et les gluons dans le plasma QGP ainsi que dans les collisions entre les résonances de la matière hadronique chaude. Le spectre en impulsion transverse a une forme exponentielle et dépend de façon essentielle de la température initiale de la matière chaude. Les calculs montrent que, si à RHIC la production de tels photons thermiques est plutôt dominée par la phase hadronique, au LHC c'est la production dans la phase QGP qui est la plus importante. Des études préliminaires montrent que ces mécanismes jouent un rôle dominant jusqu'à une impulsion transverse d'une dizaine de GeV au LHC, impulsion au delà de laquelle les mécanismes perturbatifs du paragraphe précédent dominent.

3) Il existe des mécanismes de production de photons qui sont encore peu étudiés, car plus difficiles à modéliser, mais qui pourraient jouer un rôle important. Ils font intervenir l'émission de photons lors de collision entre un parton produit dans une collision primaire dure avec un quark ou un gluon du plasma.

En conclusion, dans les collisions d'ions lourds on devrait observer un net excès de photons directs comparé au taux qu'on attendrait d'une extrapolation triviale du cas proton-proton, signalant ainsi la formation d'un plasma de quarks et de gluons. De plus la normalisation du spectre devrait permettre une mesure de la température initiale du plasma. La grande difficulté du point de vue expérimental est que les mécanismes thermiques conduisent aussi à une production accrue de π^0 , η qui se désintègrent en photons et contribuent ainsi à une augmentation du bruit de fond au signal de photon direct. Pour éviter le problème causé par le fond π^0 , il sera intéressant d'envisager la mesure du spectre de dileptons à petite masse invariante (quelques centaines de MeV) à grande impulsion transverse (quelques GeV). Le taux de production est évidemment plus faible que celui de photon direct mais le fond étant de nature différente, cette voie pourrait présenter un complément intéressant au photon direct pour la mise en évidence du plasma QGP.

Une autre utilisation des photons directs, dans un régime cinématique différent, consisterait à étudier le spectre de hadrons émis par le jet de recul d'un photon produit à plusieurs dizaines de GeV d'impulsion transverse. En comparant les données proton-proton aux données plomb-plomb on pourrait étudier la modification des propriétés de fragmentation d'un jet causée par le milieu chaud (voir section 2.3.1).

2.4 Saturation des distributions de partons

Les degrés de liberté impliqués dans les étapes initiales d'une collision de noyaux à haute énergie sont des partons principalement des gluons dont la densité augmente avec l'énergie (i.e. lorsque leur fraction d'impulsion x diminue). Cette augmentation du nombre de gluons dans la fonction d'onde d'un hadron a été bien établie par les expériences de diffusion profondément inélastique à HERA. Cependant, on s'attend à ce que cet accroissement finisse par « saturer », lorsque les effets non-linéaires spécifiques à QCD commencent à devenir importants.

L'existence du régime de saturation a été prédite il y a longtemps, ainsi qu'une estimation de l'échelle d'impulsion transverse typique qui caractérise ce phénomène. Mais ce n'est que durant la dernière décennie qu'une description théorique quantitative du régime de saturation a été obtenue (ce formalisme est connu sous le nom de « *Color Glass Condensate* »). Une propriété remarquable de ce régime qui émerge de cette description est que le système dense de partons qui constitue un hadron à haute énergie possède des propriétés universelles qui sont les mêmes pour tous les hadrons et noyaux. Il s'ensuit que les premiers instants d'une collision de noyaux à haute énergie sont gouvernés par ces fonctions d'ondes universelles, dont les propriétés peuvent en principe être calculées à partir de QCD. Ceci est une perspective très excitante, qui justifie que des signatures du phénomène de saturation soient activement recherchées dans les expériences de collisions d'ions lourds.

L'échelle d'impulsion transverse, appelée échelle de saturation qui gouverne ce phénomène, croît approximativement comme $x^{-0.15}$ (x étant la fraction d'impulsion des partons sondés par le processus étudié) et comme $A^{1/6}$ où A est le numéro atomique des noyaux utilisés. Les effets de saturation sont d'autant plus importants (et plus faciles à prédire) que cette échelle de saturation est grande. On voit donc que l'on peut jouer sur deux paramètres: rendre x aussi petit que possible et/ou augmenter A . Pour un x fixé, les collisions de noyaux tels que le plomb permettent d'avoir une échelle de saturation environ 2,5 fois plus grande que pour des collisions proton-proton. Par ailleurs, x diminue comme l'inverse de l'énergie de la collision $\sqrt{s_{NN}}$: toutes choses étant égales par ailleurs, le LHC permettra donc de diminuer x d'un facteur 25 comparé au RHIC. On peut également diminuer x en jouant sur les paramètres cinématiques des particules observées: le domaine le plus intéressant de ce point de vue est celui des petits p_T et des grandes rapidités.

De façon générale, les observables les meilleures afin d'étudier le régime de saturation sont celles qui sont le moins affectées par des effets dans l'état final. Par conséquent, les observables globales comme la multiplicité en fonction de la rapidité (dN/dy) ou en fonction de A (i.e. en pratique de la centralité de la collision) sont d'assez bons candidats et ont déjà été étudiés au RHIC. Une autre observable proposée récemment est la mesure de paires de leptons à grande rapidité et faible impulsion transverse (domaine accessible par les expériences du LHC).

Une autre manière de s'affranchir des interactions dans l'état final est d'étudier des collisions asymétriques comme proton-noyau. Dans ces collisions la formation d'un plasma de quarks et de gluons n'est pas attendue, et par conséquent l'impulsion des particules observées reflète fidèlement leur impulsion au moment de leur production. La récente mesure par BRAHMS des spectres en p_T des particules produites à grande rapidité dans les collisions deuteron-noyau effectuées au RHIC semble indiquer que ceci est une voie très prometteuse pour étudier la saturation.

2.5 Domaine des hautes densités baryoniques

2.5.1 Propriétés de la matière baryonique à haute densité

Le futur complexe d'accélérateurs FAIR du GSI-Darmstadt (Allemagne) offrira dans la

prochaine décennie, grâce à son large éventail de faisceaux primaires (des protons jusqu'à 90 GeV et des ions lourds jusqu'à 45 GeV/nucléon) et secondaires (isotopes rares et anti-protons) très intenses, de nouvelles perspectives de recherche dans différents domaines : structure des noyaux et astrophysique nucléaire, physique hadronique, étude de la matière baryonique à haute densité, physique des plasmas et physique atomique. Le projet de construction de cette nouvelle machine a été recommandé par le NuPECC et approuvé en février 2003 par le gouvernement fédéral allemand. Son coût global (incluant machine, infrastructure et expériences) est évalué à 675 M€ dont 25% au moins devra venir de partenaires européens.

L'expérience CBM est l'une des expériences majeures planifiées auprès de l'accélérateur FAIR. CBM est un détecteur de nouvelle génération couvrant un grand angle solide et capable de mesurer simultanément les hadrons, les électrons et les photons. Ce détecteur comprendra différents éléments de détection devant opérer à des taux de collisions extrêmement élevés, jusqu'à 10^7 par seconde. Ceci requiert des détecteurs aux performances sans précédent, notamment en termes de vitesse de lecture et de tenue aux rayonnements intenses. Afin de relever ces défis et de répondre aux exigences de l'expérience, la collaboration CBM a lancé plusieurs projets très ambitieux de recherche et de développement. Ces activités R&D sont menées actuellement dans le cadre de programmes européens soutenus par le 6ème PCRD. Les physiciens de l'IReS contribuent activement à cet effort R&D.

Le domaine d'énergie couvert par FAIR pour les ions lourds (2-45 GeV/nucléon) permettra l'exploration du diagramme de phases de la matière nucléaire dans la région, très peu connue, des hautes densités baryoniques nettes. Cette approche est complémentaire aux activités du RHIC et du LHC qui se situent dans la région des hautes températures et des faibles densités baryoniques nettes. Les principaux objectifs se résument ainsi :

Rechercher la transition de phase de la matière hadronique vers le QGP dans la région du point tri-critique du diagramme de phases (étude de la production de charmonia pour signer son éventuelle suppression, particules multi-étranges ; effets de fluctuations supposés être considérablement amplifiés au voisinage d'un point tri-critique, sur différentes observables, mesurées événement par événement)

Contraindre l'équation d'état de la matière à très haute densité (écoulements collectifs)

Explorer les signatures d'une restauration possible de la symétrie chirale à travers l'étude des modifications des propriétés des hadrons dans la matière baryonique super dense (mésons vecteurs de faible masse à travers leur désintégration en paires de dileptons ; modification des propriétés - masse, largeur - des mésons charmés D^0 , D^+ , D^- en particulier au seuil de leur production).

Découvrir de nouvelles formes de la matière (pentaquarks, strangelets) et de nouveaux phénomènes tels la supraconductivité de couleur.

CBM permettra donc les mesures d'observables diverses qui n'ont encore jamais été réalisées dans le domaine d'énergie 2-45 GeV/nucléon. Ces études portent sur des questions fondamentales de QCD, telles que le confinement des quarks et l'origine de la masse des hadrons. Elles présentent, en outre, un grand intérêt au plan astrophysique, notamment pour la stabilité des étoiles à neutrons et la dynamique des supernovae.

2.5.2 Implication des physiciens français dans le projet CBM

Une collaboration internationale, comptant environ 250 physiciens de 14 pays différents, travaille à la conception de cette expérience. Une Lettre d'Intention, dont un groupe de physiciens français de l'IReS sont cosignataires, a été soumise récemment (février 2004) au comité scientifique de FAIR. Au plan instrumental, ce groupe, en collaboration avec d'autres laboratoires européens, est fortement engagé dans un programme de développement de capteurs semi-conducteurs à pixels monolithiques ultrarapides et de haute précision, destinés

à équiper le détecteur de vertex de l'expérience CBM.

L'un des attraits de cette nouvelle technologie réside dans la possibilité de réaliser des capteurs très minces ($<100\mu\text{m}$) offrant une résolution spatiale du micron. Ces performances en font un très bon candidat pour équiper le détecteur de vertex de CBM dont la tâche est de reconstruire des particules charmées. Pour cela, les capteurs doivent satisfaire un cahier des charges avec de fortes contraintes (une durée de lecture $\leq 10\mu\text{s}$, une résolution spatiale $<10\mu\text{m}$, une épaisseur $\leq 50\mu\text{m}$ et une radiorésistance de $\sim 10^{14}n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ et $\sim 10\text{Mrad}$).

Le programme R&D mené à l'IReS vise à mettre au point un capteur répondant à ces exigences drastiques. Il s'agit notamment de réduire le temps de lecture des capteurs actuels (quelques millisecondes) d'un facteur cent à mille tout en préservant leur précision micrométrique et en maintenant la dissipation thermique dans des limites acceptables, et d'améliorer leur résistance aux rayonnements d'un facteur dix à cent. L'objectif est de réaliser un prototype d'une des deux stations du détecteur de vertex à la fin 2007.

3 Bilan et perspectives pour la physique

Notre vision du plasma de quarks et de gluons est aujourd'hui assez différente de celle imaginée par quelques pionniers il y a une trentaine d'années : celle d'un gaz parfait sans interaction. Sa définition reste en revanche toujours la même, à savoir le déconfinement des quarks et des gluons tout simplement. Cela signifie la disparition complète de la composante attractive à portée longue des interactions fortes. Dans le plasma, les quarks et les gluons n'évoluent plus nécessairement dans les hadrons, mais dans un milieu aux dimensions largement supérieures et fortement coloré par les interactions fortes. Une idée semble cependant avoir résisté au temps et aux calculs de plus en plus réalistes : la restauration partielle dans le plasma d'une certaine symétrie du vide des interactions fortes, la chiralité qui doit diminuer significativement la masse des quarks légers.

Le bilan de nos vingt-cinq années de recherche est le suivant. La température « critique » de déconfinement se situe aux environs de 170 MeV, correspondant approximativement à une valeur de $1\text{ GeV}/\text{fm}^3$ pour la densité d'énergie, en accord avec de nombreux arguments et calculs théoriques. La montée progressive en énergie (AGS, SPS et RHIC) des faisceaux d'ions lourds a donné successivement accès à l'observation de nombreuses manifestations de la production de l'état déconfiné, certaines des plus significatives d'entre elles ayant été présentées dans ce texte. Les données du RHIC en particulier ont permis d'écrire le premier scénario du passage d'un état confiné vers un état déconfiné. Les degrés de liberté partoniques sont absolument nécessaires pour rendre compte des résultats expérimentaux. Nous devons admettre que nos tentatives d'isoler une preuve irréfutable d'une transition de phase entre les deux états de la matière ont toutes échoué. Ceci peut se comprendre si l'on accepte les arguments en faveur d'un plasma encore dominé par certains aspects non perturbatifs des interactions fortes. Ainsi, la transition entre l'état confiné et déconfiné de la matière hadronique apparaît comme une transition douce, lorsque la densité d'énergie augmente grâce à l'énergie cinétique de noyaux de plus en plus lourds. Il ne s'agit donc plus d'attribuer la découverte du plasma de quarks et de gluons à tel ou tel programme expérimental mais à l'ensemble des efforts entrepris il y a environ vingt-cinq années.

Pour terminer ce bilan, nous devons rappeler un résultat remarquable des expériences du RHIC qui pourrait avoir un rapport direct avec la production de l'état déconfiné. Il s'agit d'une probable mise en évidence dans la matière nucléaire froide d'un phénomène non linéaire des interactions fortes aboutissant à une « condensation » de gluons dans un état quantique quasi cohérent. Il semble apparaître expérimentalement pour des gluons possédant une très faible fraction de l'impulsion totale du nucléon (petits x). Il n'est pas spécifique aux collisions entre noyaux mais serait déjà présent, dans des conditions cinématiques encore plus limitées que dans un noyau, à l'intérieur d'un proton ou d'un neutron. Ce phénomène de condensation des gluons pourrait signifier la formation d'un nouvel état de la matière

nucléaire froide, bien différent du plasma à haute température, et dénommé condensat de verre de couleur ou « Color Glass Condensate » (CGC).

Finalement, pouvons-nous aujourd'hui définitivement crier victoire en affirmant haut et fort la découverte du plasma ? La majorité des physiciens théoriciens répond affirmativement à cette question. Les physiciens expérimentateurs sont plus nuancés. Une certaine fraction d'entre eux met en avant que la preuve absolue, irréfutable, non ambiguë, n'a pas été encore trouvée. Mais comme nous l'avons déjà signalé, cet échec est probablement lié au fait que le plasma formé d'une manière progressive au SPS et au RHIC ne correspond pas à un gaz quasi parfait de partons. Le très riche programme des ions lourds va continuer au RHIC pour encore au moins une dizaine d'années. Des résultats en qualité et en quantité impressionnantes sont attendus et nous permettrons au fur et à mesure de compléter les détails de notre scénario actuel du déconfinement des partons. Entre-temps, il ne fait aucun doute que les modèles théoriques feront eux aussi des progrès importants dans la compréhension des résultats expérimentaux et leurs implications fondamentales pour la compréhension du mécanisme de confinement des interactions fortes.

Vers la fin de cette décennie, le LHC du CERN va produire des collisions entre noyaux lourds à des énergies ($\sqrt{s_{NN}}$) trente fois supérieures à celles du RHIC. A la suite des vingt-cinq dernières années de recherche, quels espoirs devons-nous placer dans les futurs résultats du LHC ? Ils pourraient certes enfin créer la grande surprise en nous donnant la preuve unique et irréfutable de l'état déconfiné, en démontrant par exemple le caractère « discontinu » d'une ou plusieurs signatures en fonction de la densité d'énergie du milieu. Nos connaissances sur le plasma nous inclinent à renoncer presque définitivement à ce mythe : la formation d'une phase déconfinée apparaît en effet de plus en plus comme progressive en fonction de la densité d'énergie des collisions. Cette remarque ne diminue en aucune façon le très grand intérêt du programme ions lourds avec le futur LHC. Ses contributions devraient être multiples et primordiales, comme par exemple :

- **Déterminer les propriétés du milieu directement calculables à partir des premiers principes de la théorie.** Ceci requiert des mesures de précision étendant les données vers de plus grandes impulsions transverses pour cartographier, par mesure tomographique multidimensionnelle, les propriétés de la matière à haute densité d'énergie formée dans les collisions. Ces mesures seront étendues aux quarks lourds. La mesure des photons constituera un outil privilégié et indispensable pour obtenir une image non perturbée de la dynamique de la collision et pour réaliser les mesures de jets étiquetés. L'ensemble de ces mesures sera réalisé en variant les paramètres de contrôle de la collision (nombre de participants, masse du système en collision et énergie de collision).
- **Construire des fonctions d'excitation étendues pour différentes observables.** Les mesures qui caractérisent le degré de collectivité atteint par le système indiqueront si le LHC a permis d'atteindre le régime idéal d'un gaz à l'équilibre thermodynamique ou comment il s'en rapproche par rapport aux systèmes obtenus à plus basse énergie. Ainsi il devrait être possible d'étudier une véritable thermodynamique de l'état déconfiné.
- **Caractériser l'état du système initial.** Le CGC existe-t-il ? Peut-on établir un lien entre cet état de la matière et le plasma ? En particulier, est-il oui ou non une condition préalable à la formation du plasma ? Ceci requiert l'étude des systèmes simples tels p-A et d-A et la mesure de sondes porteuses de très petites valeurs de x .
- **Observer de nouvelles empreintes de la phase déconfinée.** Nous avons, dans le passé, mis en évidence de nouvelles signatures à chaque fois que nous avons pu augmenter l'énergie des faisceaux. Il n'y a aucune raison objective pour que cela s'arrête.

Une partie de ce programme peut être réalisée au RHIC dans la perspective d'une augmentation de la luminosité et de l'amélioration des détecteurs existants. Cependant le LHC contribuera de façon majeure à ce programme, l'augmentation d'énergie impliquant une augmentation conséquente des sections efficaces des processus nécessaires à ces études ainsi

que de la région des petits x couverte. De plus, la complémentarité des expériences CMS (et ATLAS) pour leur excellente calorimétrie, et ALICE pour ses performances de trajectographie et ses capacités d'identification des particules constitue un atout majeur.

A l'opposé du LHC, la future machine du GSI et l'expérience CBM proposent d'étudier les densités extrêmes à relativement faible température, domaine reposant plus sur les théories de restauration de la symétrie chirale, symétrie fondamentale de QCD. Ces recherches permettront de compléter celles réalisées au LHC dans une autre région du diagramme de phases de la matière nucléaire qui se trouvera ainsi largement couvert.

4 La communauté « Ions Lourds Ultrarelativistes » DAPNIA/IN2P3

4.1 Répartition des physiciens par laboratoire et par expérience

Tableau 1 Nombre de physiciens permanents et équivalent temps plein (en gras)

Machines Expériences	SIS FOPI	SPS NA60	RHIC BRAHMS	RHIC PHENIX	RHIC STAR	LHC ALICE*	LHC CMS	FAIR CBM	Total par labo en 2004
LPC-Clermont	4-1,5	4-2,7		2-1,5		9-5,5			11,2
IPN-Lyon		2-2				3-3	1-1		6
SUBATECH- Nantes				3-1,5	4-3	7-5			9,5
IPN-Orsay				2-2		4-2,5			4,5
LLR-Palaiseau				5-5					5
DAPNIA-Saclay				2-2		3-3			5
IreS Strasbourg	1-0,25		1-0,5		3-1	3-2		2-0,8	4,5
Total par exp en 2004	1,75	4,7	0,5	12	4	21	1	0,8	45,75

(* ALICE comprend les activités ALICE-Dimuon et/ou ALICE-ITS)

Le tableau 1 présente le nombre de physiciens permanents par expérience (situation au 2 juillet 2004) d'une part, non pondéré par des activités annexes et d'autre part en **équivalent temps plein**. Les dernière colonne et dernière ligne totalisent respectivement, les effectifs par laboratoire et les effectifs par expérience, en **équivalent temps plein**. Les contributions de chaque laboratoire sont détaillées en annexe.

4.2 Moyens nécessaires pour les prochaines années

Moyens humains

Le tableau 2 recense le nombre de physiciens permanents actuels (situation au 2 juillet 2004), **projeté en 2008** (sans tenir compte d'éventuels embauches ou renforts) et **nécessaire pour mener à bien le projet** (voir discussion sur les moyens). Ces chiffres ne sont pas pondérés par d'éventuelles activités de recherche autres que celles répertoriées dans ce tableau et/ou par des activités d'enseignement. Les dernière colonne et dernière ligne totalisent respectivement, les effectifs par laboratoire et les effectifs par expérience, tels qu'ils ont été projetés pour 2008.

Tableau 2 Nombre de physiciens permanents actuels - projeté en 2008 (en rouge deuxième chiffre) - nécessaire pour mener à bien le projet (en bleu troisième chiffre)

Machines Expériences	SIS FOPI	SPS NA60	RHIC BRAHMS	RHIC PHENIX	RHIC STAR	LHC ALICE*	LHC CMS	FAIR CBM	Total par labo en 2008
LPC-Clermont	4-0	4-0		2-0		9-7-9			7-9
IPN-Lyon		2-0				3-4-5	1-1-5		5-10
SUBATECH-Nantes				3-1	4-2	7-7-9			10-9
IPN-Orsay				2-1		4-3-5			4-5
LLR-Palaiseau				5-5					5
DAPNIA-Saclay				2-0		3-4-5			4-5
IReS Strasbourg	1-0		1-0		3-1	3-3-5		2-2-5	6-9
Total par exp. en 2008	0	0	0	7	3	28-38	1-5	2-5	

Ce tableau nécessite quelques commentaires. Il faut tout d'abord souligner la baisse, *de facto*, des effectifs lors des prochaines années, en raison des départs en retraite et des changements de thématiques des chercheurs. En outre, il apparaît clairement que l'implication des physiciens français cessera en 2008 sur les expériences FOPI, NA60 et BRAHMS. Concernant PHENIX et STAR, sans renfort, le nombre de physiciens qui seraient impliqués est sous critique : il faut en effet noter que pour PHENIX, les effectifs sont concentrés dans un seul laboratoire (LLR). Une précision doit enfin être apportée à propos de CBM : les effectifs sont dramatiquement faibles pour 2008 mais un certain nombre de physiciens est intéressé pour participer à cette expérience. Leur réflexion est en cours et par conséquent, ils ne sont pas encore recensés dans ce tableau.

Autour des quarkonia

Comme cela était perceptible dans la section 2.1, les quarkonia ont été et demeurent une sonde clé de la physique du QGP ; de la même façon que le J/ψ a joué un rôle fondamental au SPS et le fera également au RHIC en complément de la physique à grand p_T , la famille du bottomonium deviendra au LHC une sonde nouvelle et cruciale.

Il paraît naturel que la communauté d'ores et déjà impliquée dans ce domaine de physique, ait ses perspectives largement tournées vers le futur de la discipline que constitue le LHC. Il est néanmoins important que la contribution française à l'analyse des dernières données de PHENIX en collision Au-Au demeure suffisante pour la mener pleinement à son terme. Outre l'importance du résultat, très attendu, l'expérience acquise sera bénéfique aux futures analyses au LHC.

Afin de maintenir la contribution française dans la construction des détecteurs et surtout la développer pour les phases de mise en service, de prises de données et d'analyse, des embauches de physiciens permanents doivent être réalisées à court terme. En particulier pour l'immédiat, la préparation des logiciels qui seront utilisés pour ces différentes phases manque d'effectifs. Le remplacement des départs en retraite est de plus nécessaire, principalement à l'horizon du démarrage du LHC.

En ce qui concerne CMS, la communauté CMS-Ions Lourds comprend une cinquantaine de chercheurs, majoritairement Américains et Russes. Les Français, initiateurs de cette physique

dans CMS, ne sont plus que 2, c'est très insuffisant pour espérer jouer un rôle important dans le futur. A l'horizon de 5 ans, il est impératif de renforcer cette présence sous peine de la voir disparaître complètement. Le travail notamment dans les dimuons est suffisamment volumineux pour occuper assidûment une équipe expérimentale de 5-6 physiciens.

Autour de l'étrangeté

Au plan de l'étrangeté, la France est depuis 1995 fortement impliquée dans les expériences STAR au RHIC et ALICE au LHC, les différents points de physique sur lesquels elle se concentre ayant été décrit dans la section 2.2.

Le SSD de STAR (section 2.2.5.1) collectera des données, pour la première fois dans sa configuration complète, en 2005. Quantifier l'apport de ce détecteur en terme de reconstruction de particules étranges, analyser les données de STAR avec ce SSD, apparaissent comme des tâches tout à fait enthousiasmantes et prometteuses, après ces années vouées à la construction et à la mise en œuvre du détecteur proprement dit.

Cependant, et comme c'est le cas sur PHENIX, on assiste à un dépeuplement des effectifs, d'autant plus marqué que la date de démarrage du LHC se rapproche. Si la communauté souhaite poursuivre ses efforts au RHIC, au moins jusqu'au démarrage du LHC, elle devra être vigilante pour maintenir des effectifs significatifs. Il est tout à fait légitime, aujourd'hui, de se demander, si la France, vu les engagements qu'elle a pris sur les expériences du LHC, a les moyens de continuer sur plusieurs expériences au RHIC ou si elle est contrainte de les regrouper sur une seule.

Doit-on se concentrer, sur le thème de physique (quarkonia, autrement dit PHENIX) qui regroupe très largement le plus grand nombre d'entre nous ? Doit-on renforcer les équipes qui viennent aujourd'hui de délivrer un détecteur (STAR) et souhaiteraient travailler sur la physique pour laquelle elles l'ont construit ?

En ce qui concerne ALICE, parmi l'ensemble des tâches à effectuer, deux des grandes priorités étaient de disposer d'une simulation la plus réaliste possible de tous les détecteurs et d'optimiser la trajectographie dans la partie centrale. Ces programmes donnent à présent des résultats qui permettent d'évaluer dans de bonnes conditions le potentiel d'ALICE pour la quasi-totalité des mesures que l'on envisage. Depuis deux ans, utilisant l'expérience acquise dans STAR, le groupe français a pris en charge le développement des algorithmes de reconstruction des particules étranges « standard » et exotiques. Ce groupe étudie également le potentiel d'ALICE pour la physique de l'étrangeté en développant les outils d'analyse correspondants.

Ce travail est fait actuellement par deux physiciens. Pour pouvoir obtenir une visibilité forte dès les premières analyses qui se feront au démarrage du LHC, il faudrait que le groupe comporte dès à présent 4 physiciens afin de préparer de manière optimale les outils nécessaires à ces analyses.

Autour des hautes densités

Le groupe français engagé dans ce projet est constitué actuellement de 2 physiciens de l'IReS avec une implication à 40%. Quelques physiciens d'autres laboratoires français manifestent un certain intérêt envers ce projet, laissant espérer qu'ils rejoindront CBM prochainement. Par ailleurs, il faut souligner que plusieurs théoriciens français s'intéressent de près au programme de physique de l'expérience CBM.

Nous considérons qu'un minimum de 4-5 chercheurs est nécessaire pour envisager de prendre en charge, entièrement ou en partie, le détecteur de vertex, avec comme objectif ultime de réunir une communauté plus large (10 à 15 physiciens) sur cette expérience. Concernant les personnels techniques, il faut souligner qu'une partie des ingénieurs et des techniciens engagés actuellement dans la construction des détecteurs du LHC devrait être disponible après 2007, ce qui coïncide parfaitement avec le début de la construction de CBM. Du point de vue financier, le coût du détecteur de vertex devrait se situer entre 1 et 2 M€.

Prospectives

En dehors des projets LHC déjà prévus de longue date, seul la participation à l'expérience CBM au GSI a été évoquée pour le futur. Il faut néanmoins rappeler que la communauté américaine s'engage actuellement fortement dans la phase d'upgrade du RHIC qui démarrera en 2008. RHIC proposera alors parallèlement au LHC des collisions à plus faible énergie mais avec une grande luminosité et sur une machine en grande partie dédiée aux ions lourds relativistes.

Le LHC quant à lui doit d'abord suivre le programme de collisions d'ions lourds déjà décidé pour ses cinq premières années (à raison de un mois par an). Suivant les résultats de physiques qui seront obtenus, des projets d'upgrade de détecteurs ne manqueront pas d'émerger et d'intéresser la communauté française (la montée en luminosité du LHC vers 2011 ne concernera que les collisions p-p).

4.3 Articulations entre les diverses activités

L'articulation RHIC-LHC

Actuellement, les groupes impliqués au RHIC sont en pleine analyse sur les thèmes de physique qui ont été présentés : quarkonia, étrangeté et photons. L'analyse des données du RHIC prises en 2004 qui devrait permettre une meilleure caractérisation du milieu créé grâce à la très grande statistique disponible, est en cours. De plus, les futures campagnes de mesure réalisées à des énergies et/ou avec des systèmes différents et qui permettront une interprétation robuste des résultats des données 2004, nécessiteront encore quelques années d'investissement au moins jusqu'aux années 2007.

Il est indéniable que la participation au RHIC est une excellente préparation aux analyses de physique pour le LHC qui exigent cependant de se préparer techniquement dès à présent. Or, les équipes qui se sont fixé cet objectif, ont également en charge la construction d'un détecteur, bras dimuon ou ITS. Il existe, clairement, une surcharge au niveau de certains groupes qui ne peuvent mener sereinement de front, l'analyse au RHIC, la préparation de celle au LHC et l'investissement instrumental.

Le démarrage du LHC devrait marquer l'arrêt des activités sur RHIC pour la majorité des groupes. Néanmoins il faut noter que les premières données ions lourds du LHC coïncident avec le début de la phase haute luminosité du RHIC. Il apparaît d'ores et déjà relativement indéniable que la communauté française du LHC ne pourra faire fructifier ses efforts entrepris depuis bientôt 10 ans et être visible au plan de la physique si ses effectifs restent constants.

L'articulation ALICE-CMS

En France, la majorité des physiciens concernés par la physique des ions lourds au LHC travaille sur ALICE. Aujourd'hui, seules deux personnes représentent la communauté CMS ions lourds en France, parmi une cinquantaine de physiciens dans le monde. Or, ce sont les physiciens français qui ont lancé le programme Ions-Lourds dans CMS. L'impact d'un groupe français pourrait donc être important. Si la communauté CMS Ions-Lourds française ne se renforce pas, il paraît certain qu'elle disparaîtra.

Possibilités pour CBM

Les premières données de l'expérience CBM ne sont prévues que vers 2012 mais la R&D des détecteurs a déjà débuté. Actuellement, deux chercheurs de l'IReS participent au développement des capteurs à pixels du trajectographe. Cette implication peut évoluer vers une prise de responsabilité plus importante dans le trajectographe suivant le nombre de physiciens qui rejoindra ce groupe.

Effort théorique et lien avec l'expérience

Il est bien évidemment indispensable que l'effort expérimental s'accompagne d'un effort théorique de même ampleur. Les calculs sur réseau, par exemple, contribueront au développement de concepts théoriques et à l'analyse des observables expérimentales dans un certain nombre de domaines tels que la description du diagramme de phases, l'équation d'état et l'expansion hydrodynamique, la dynamique de thermalisation... La description de l'état initial en termes quantifiables des champs de QCD et son évolution vers un QGP est une autre priorité théorique.

Les laboratoires français ont la chance de compter parmi leurs théoriciens des spécialistes entre autre de l'hydrodynamique (flot elliptique), de l'état initial (CGC), de la perte d'énergie de partons dans la matière et de la production des photons. Les discussions relatives à l'élaboration de ce document ont montré l'utilité et la nécessité de rencontres entre ces théoriciens et les expérimentateurs. Il est souhaitable et souhaité par tous qu'une structure permette des échanges organisés.

Annexes

Nature des diverses contributions par laboratoire (thème de physique, implication software, implication hardware)

LPC-Clermont-Ferrand:

1. Expérience FOPI :
 - Physique : production d'étrangeté et phénomènes collectifs aux énergies SIS.
 - Software : développement des codes d'analyses et des codes associés au « Mur Interne »
 - Hardware : responsabilité du sous-détecteur « Mur Interne »
2. Expérience NA60 :
 - Physique : quarkonia (production de charme et beauté)
 - Software : développement des codes d'analyses pour l'étude des quarkonia.
 - Hardware : responsabilité du spectromètre dimuon
3. Expérience ALICE-Dimuon :
 - Physique : quarkonia (production de charme et beauté)
 - Software : développement et maintenance des programmes pour le trigger de niveau 0. Optimisation des performances du trigger de niveau 0. Développement des codes pour les études de dépendance en centralité des productions de quarkonia et des coïncidences électron-muon.
 - Hardware : conception, production, tests, installation et maintenance de l'électronique front-end pour le système de trigger et de l'électronique pour le trigger de niveau 0. R&D autour des chambres type RPC (Resistive Plate Chamber).
4. Expérience PHENIX :
 - Physique : étude du continuum $\mu^+\mu^-$ (Drell-Yan, charme et beauté).
 - Software : production de simulation et développement de codes pour les études en dimuon.

IPN-Lyon :

1. Expérience NA60 :
 - Physique : quarkonia (production de charme et beauté) résonances de faible masse dans les collisions p-p et A-A)
 - Software : développement de codes d'analyses pour la reconstruction des quarkonia.
2. Expérience ALICE-Dimuon :
 - Physique : quarkonia (production de charme et beauté)
 - Software : développement d'algorithmes de reconstruction des quarkonia
 - Hardware : coordination, construction et assemblage du détecteur V0 et du système de contrôle de l'alignement (Geometry Monitoring System) des chambres à trajectographie du spectromètre dimuon.
3. Expérience CMS :
 - Physique : Quarkonia (production de charme et beauté)
 - Software : développement des algorithmes de reconstruction des saveurs lourdes.

SUBATECH-Nantes :

1. Expérience PHENIX
 - Physique : processus durs (jet quenching) et photons directs
 - Software : mise au point d'algorithmes de reconstruction des jets.
2. Expérience STAR

- Physique : particules multi-étranges, phénomènes à haut p_T , corrélation de particules non-identiques
- Software : coordination et développement des programmes de trajectographie dans la partie centrale de STAR, incluant le SSD et des logiciels associés au traitement des données du SSD
- Hardware : coordination, conception, construction et assemblage du SSD
- 3. Expérience ALICE-Dimuon :
 - Physique : quarkonia (production de J/ψ , charme ouvert)
 - Software : développement des codes de trajectographie pour le spectromètre dimuons. Coordination des programmes offline pour MUON. Coordination de la DAQ pour le spectromètre muons.
 - Hardware : construction, et assemblage de chambres à muon (stations 3-4-5). Prise en charge de la construction des cartes de contrôle régionale et de la carte DARC d'acquisition du système de déclenchement du spectromètre.
- 4. ALICE-ITS :
 - Hardware : participation à l'assemblage des couches de silicium à micropistes

IPN-Orsay :

1. Expérience PHENIX :
 - Physique : quarkonia (production de charme dans les collisions p-p et A-A), et étude du bruit de fond combinatoire dans NA50 (SPS) ainsi que de l'étrangeté dans les paires de muons (ϕ),
 - Software : production de données simulées pour l'étude de la production de quarkonia.
2. Expérience ALICE-Dimuon :
 - Physique : quarkonia (production de charme et beauté),
 - Software : introduction dans le programme général de la station 1 « réaliste »,
 - Hardware : Construction et assemblages de chambres pour le spectromètre dimuon (stations 1 & 2) ; conception et réalisation de l'ensemble de l'électronique pour les cinq stations ; intégration des stations 1 et 2 ; coordination de la trajectographie du bras dimuon ; contribution au slow control.

LLR-Palaiseau :

1. Expérience PHENIX
 - Physique : quarkonia (J/ψ , charme ouvert, Drell-Yan des collisions p-p à Au-Au)
 - Software : développements d'algorithmes de reconstruction et d'analyses de données ; installation des softs de PHENIX au CCIN2P3 pour participer à l'effort de reconstruction des données ; reconstruction des données « muons » filtrées et production de nanoDST pour l'analyse.
 - Hardware : après les production, tests et installation de l'électronique de l'un des deux spectromètres à muons, responsabilité de la maintenance de l'électronique des deux spectromètres.

DAPNIA-Saclay :

1. Expérience PHENIX :
 - Physique : quarkonia (J/ψ , charme ouvert, Drell-Yan des collisions pp à AuAu)
 - Software : développement des codes d'analyses
 - Hardware : réalisation de l'électronique de lecture des chambres à pistes de cathode de l'un des deux spectromètres.
2. Expérience ALICE-Dimuons :
 - Physique : quarkonia (production de charme et beauté)
 - Software : développement de codes de reconstruction pour les quarkonia
 - Hardware : réalisation de chambres des stations 3, 4, 5, design et réalisation d'une partie

de leur support, intégration des trois dernières stations et leur refroidissement.

IReS-Strasbourg :

1. Expérience FOPI :
 - Physique : Etude des phénomènes collectifs aux énergies SIS.
 - Software : Développement des codes d'analyses.
 2. Expérience STAR :
 - Physique : étude des particules multi-étranges.
 - Software : développement de codes pour la reconstruction des particules étranges, des logiciels liés au SSD et de la base de données de production.
 - Hardware : conception, réalisation des tests de tous les éléments s'articulant autour des modules (capteurs silicium, électroniques, hybrides), du contrôle global et des alimentations du SSD.
 3. Expérience BRAHMS:
 - Physique : caractérisation globale des événements et des phénomènes à l'avant.
 - Hardware : réalisation et conception des chambres à projection temporelle.
 4. Expérience ALICE-ITS :
 - Physique : Signaux hadroniques (composition chimique, dynamique d'expansion), production d'étrangeté et de matière exotique étrange.
 - Software : Développement des codes de reconstruction des vertex secondaires, des désintégrations des cascades et des outils d'analyse pour la physique des particules étranges ainsi que de la base de données de production et du contrôle en ligne du SSD.
 - Hardware : Conception et réalisation des modules silicium à micropistes pour les couches SSD, conception de l'électronique de lecture et production en série des modules.
- Expérience CBM :
- Software : simulations afin de définir la géométrie du détecteur de vertex et pour les études relatives au charme ouvert qui seront incluses dans le Technical Proposal soumis début 2005 au comité scientifique de FAIR.
 - Hardware : R&D sur les capteurs CMOS pour le détecteur de vertex.

Liste des acronymes figurant dans le document

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

SIS	Schwer Ionen Synchrotron
SPS	Super Proton Synchrotron
SSD	Silicon Strip Detector
STAR	Solenoidal Tracker At Rhic