

ALICE et la physique des ions lourds

Conseil Scientifique de l'IN2P3, 8 février 2018

Mise à jour 09 janvier 2018

Les objectifs scientifiques

La collaboration ALICE exploite les collisions proton-proton (pp), proton-Plomb (p-Pb) et Plomb-Plomb (Pb-Pb) du LHC à diverses énergies pour étudier une région précise du diagramme des phases de la matière nucléaire (à très grandes températures et à densité baryonique nette quasi nulle) afin de comprendre comment l'interaction forte organise dans ces conditions un système à N corps de ses constituants fondamentaux.

La physique des ions lourds permet d'étendre le domaine d'application du Modèle Standard de la physique des particules à des systèmes de taille finie, complexes et dynamiques. En particulier, elle a pour objectif de comprendre comment apparaissent, à partir des lois microscopiques de la physique des particules élémentaires, des phénomènes collectifs et des propriétés macroscopiques mettant en jeu un grand nombre de degrés de liberté. La réalisation de ce programme scientifique passe par une caractérisation du plasma de quarks et de gluons (QGP), l'état déconfiné de la matière nucléaire, créé dans les collisions d'ions lourds accélérés à des énergies ultra-relativistes.

L'expérience ALICE, actuel fer de lance de ce vaste programme, exploite les collisions noyau-noyau, proton-noyau et proton-proton du LHC pour déterminer de façon très précise les propriétés fondamentales du QGP comme, par exemple, la température critique du déconfinement, les degrés de liberté pertinents, la vitesse du son dans le milieu, la viscosité et, de manière générale, les coefficients de transport de la matière partonique déconfinée.

L'état QGP de la matière aurait été, selon le modèle cosmologique du Big Bang, l'état primordial de la matière dans l'Univers naissant, entre le moment de la transition de phase électrofaible et le moment du confinement, correspondant à une nouvelle transition de phase de la matière. Connaître la structure du QGP ainsi que ses propriétés dynamiques est ainsi un prérequis pour comprendre l'évolution de l'Univers.

Aux énergies du LHC ($\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ et $5,02$ TeV), les collisions de noyaux de plomb permettent de créer les conditions optimales pour l'obtention en laboratoire de cette matière primordiale, avec des températures plusieurs fois supérieures à la température critique établie par la théorie et avec une densité baryonique nette voisine de zéro. Notre compréhension actuelle des phénomènes mis en jeu dans ces collisions définit le Modèle Standard de la physique des ions lourds. Il s'appuie principalement sur des théories et modèles, permettant de décrire d'une part les propriétés statiques de la matière nucléaire à haute température et d'autre part, ses propriétés dynamiques.

La Chromodynamique Quantique (QCD), la théorie de l'interaction forte

La théorie QCD prévoit qu'à des températures ou des densités baryoniques élevées, la distance moyenne entre partons étant suffisamment petite, la valeur du couplage α_s diminue (propriété de liberté asymptotique de l'interaction forte). La théorie de jauge sur réseau (LQCD), une approche non-perturbative pour résoudre les équations de QCD, simule la fonction de partition de QCD sur un réseau d'espace-temps à partir des principes premiers de la théorie QCD. Cette approche permet de déterminer l'équation d'état de la matière nucléaire à température élevée et de prédire, au-delà d'une température critique ($T_c \approx 154 \pm 9$ MeV à $\mu_B^1 = 0$, soit avec un excès minimum de quarks par rapport aux anti-quarks, ce qui est la région directement accessible au LHC), l'existence d'un changement de phase continu². Ce changement est la conséquence de la restauration de la symétrie Z_3 du Lagrangien QCD et fait évoluer la matière hadronique confinée vers la matière de partons déconfinés (appelée QGP), matière dont la nature exacte des degrés de liberté en fonction de la température reste toutefois délicate à déterminer numériquement. Parallèlement, au voisinage de la même température critique, la restauration de la symétrie chirale, autre symétrie du

¹ potentiel chimique baryonique, relié à la conservation du nombre baryonique et déterminant l'abondance relative de baryons et d'anti-baryons

² continu, par opposition à une transition de phase accompagnée de discontinuité des paramètres thermodynamiques

Lagrangien QCD et dont la brisure est à l'origine de la masse constituante des quarks de valence, est prédite. Cependant, seules les propriétés thermodynamiques de la matière sont actuellement calculables, les propriétés dynamiques restant hors de portée de cette théorie.

Les théories de transport, modèles de la dynamique

Ces théories, décrivant la dynamique de la collision d'ions lourds, constituent le deuxième pilier du Modèle Standard de la physique des ions lourds. Elles décomposent l'évolution spatio-temporelle de la collision en trois phases consécutives.

1. La transformation des champs de couleur, présents dans les noyaux en interaction, en matière QCD (c'est-à-dire constituée de quarks et de gluons) en voie de thermalisation. Les gluons, constituants dominants de la fonction de structure du noyau aux très petites valeurs de x_b (fraction de l'impulsion du nucléon portée par les gluons) pertinentes aux énergies du RHIC ($\approx 10^{-2}$) et du LHC ($\approx 10^{-3}$), potentiellement dans un régime de saturation (décrit par le modèle CGC, un condensat de verre de couleur), sont libérés et suivent une évolution non linéaire pour former un état précurseur du QGP appelé glasma.
2. La thermalisation rapide du glasma en moins de 1 fm/c, conduit au QGP thermalisé ($T \approx 2-3 T_c$) dont l'expansion explosive est décrite par les équations relativistes de l'hydrodynamique faiblement visqueuse. Ces équations déterminent les aspects collectifs mesurables de l'état final à partir des propriétés du fluide (équation d'état, paramètres de viscosité, vitesse du son) calculables *ab initio* par LQCD, par exemple, et des conditions aux limites (géométrie, gradient de pression, fluctuations) de l'état initial.
3. En dessous de la température critique, la condensation du QGP en hadrons conduit vers un état final pour lequel, dans un premier temps, la composition chimique est figée (gel chimique) et dont la dynamique est décrite par les équations de transport de Boltzmann, et ce, jusqu'au second gel établissant les distributions définitives en impulsion (gel cinématique). Le phénomène d'hadronisation ayant lieu à l'échelle non-perturbative n'est pas calculable et doit faire appel à des modèles phénoménologiques (fragmentation des partons, coalescence, ...) contraints par les mesures expérimentales.

Le scénario de la dynamique des collisions d'ions lourds a été validé par les données expérimentales accumulées ces dix dernières années par les expériences du RHIC et plus récemment par celles du LHC. L'ensemble de ces mêmes données converge de façon cohérente vers la prédiction de LQCD, à savoir qu'aux densités d'énergie atteintes, bien au-delà de la valeur critique de la théorie, la matière forme un état partonique thermalisé. Des mesures détaillées visant une caractérisation quantitative de cet état indiquent que ses propriétés sont celles d'un liquide (les constituants sont fortement couplés), que sa viscosité est faible (interactions non dissipatives) conduisant à une valeur de η/S (viscosité de cisaillement / entropie) proche de la valeur limite prédite théoriquement pour un

liquide quantique (raison pour laquelle le liquide obtenu est qualifié de *parfait*), et que cette matière QCD est opaque aux charges de couleur mais transparente aux bosons de jauge tels que les photons et Z.

Les acquis des Runs 1 & 2

Les résultats obtenus à partir des données de collisions pp à $\sqrt{s} = 2,76, 5,02, 7$ et 13 TeV, p-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 2,76, 5,02$ et 8 TeV et Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ et $5,02$ TeV ont permis la description fine de la dynamique des collisions et d'en déduire que les propriétés du système partonique formé à très haute température et $\mu_B \approx 0$ sont celles d'un liquide parfait (non dissipatif) et opaque aux sondes colorées les plus dures.

Les conditions thermodynamiques de l'état formé dans les collisions Pb-Pb aux énergies du LHC ont été déterminées par ALICE. D'une part, une température initiale de l'ordre de 400 MeV pour les collisions centrales a été déduite de la comparaison du spectre de photons directs mesuré à basses impulsions transverses avec les prédictions de modèles de production de photons thermiques. D'autre part, une valeur quasi nulle de μ_B a été extraite de la production en quantité égale de particules et d'anti-particules. Des résultats similaires sont obtenus à partir de l'analyse des productions de hadrons dans le cadre de modèles de hadronisation statistique : la valeur de la température du gel chimique (la composition hadronique de l'état final est figée mais pas encore les distributions en impulsion) correspond à celle de la température de hadronisation et le potentiel chimique baryonique est quasiment nul.

L'extension spatio-temporelle du système à la fin de son évolution est déduite d'analyses interférométriques Hanbury-Brown Twiss : le volume corrélé au moment du gel cinématique (les interactions entre hadrons dans l'état final sont gelées) pour les collisions Pb-Pb à l'énergie la plus basse du LHC est deux fois plus grand que celui mesuré au RHIC et la durée de l'expansion longitudinale de la collision jusqu'au gel cinématique est de l'ordre de $10 \text{ fm}/c = 3,3 \times 10^{-23} \text{ s}$.

La matière déconfinée produite dans les collisions d'ions lourds se comporte encore comme un fluide quasi parfait (non visqueux). La comparaison des résultats des calculs d'hydrodynamique relativiste avec les anisotropies azimutales mesurées dans la production des hadrons dans l'état final (coefficients de Fourier, v_n) indique que la viscosité du fluide formé est particulièrement faible. De combien s'approche le QGP d'un fluide idéal peut être quantifié par le rapport viscosité de cisaillement sur entropie dont la valeur empirique est estimée à $1 < \eta/S < 2,5$ en unités $\hbar/4\pi k_B$, une valeur inférieure à celle de toute autre substance connue, y compris l'hélium liquide superfluide. Elle est par ailleurs très proche de la valeur $\hbar/4\pi k_B$ calculée dans le cadre de théories des champs forts dans la limite de couplage infini. Ce résultat suggère que, tandis que les partons sont libres de se mouvoir hors du carcan hadronique, le QGP est un milieu en interaction forte extrêmement *intense*.

La question essentielle de la thermalisation des quarks lourds semble en voie d'être résolue dans le secteur du charme : en raison de la valeur strictement positive de l'anisotropie elliptique (v_2) mesurée pour les hadrons charmés, nous pouvons affirmer que les quarks charmés participent à l'expansion collective du QGP. Leur degré de thermalisation n'est cependant pas encore suffisamment contraint. La thermalisation dans le secteur de la beauté reste une question ouverte.

La perte d'énergie des jets attribuée à l'interaction de partons traversant le milieu a été observée dans les collisions Pb-Pb pour tous les types de hadrons de l'état final. De plus une suppression moindre a été mesurée pour la production de J/ψ provenant de la décroissance de mésons B (contenant un quark beau) par rapport à la production des hadrons légers (π) et des mésons D (contenant un quark charmé). L'observation d'une telle différence était attendue du fait d'effets d'interférence qui dépendent de la masse de la particule considérée. De l'analyse détaillée de la structure des jets, il ressort que la distribution intra-jet des hadrons ne change quasiment pas que le jet soit produit dans le vide (collisions pp) ou qu'il perde de l'énergie dans le milieu formé dans les collisions d'ions-lourds. L'énergie perdue se retrouve sous forme de particules de basse impulsion transverse émise à grand angle par rapport à l'axe du jet. Cette observation n'a pas encore trouvé d'explication théorique satisfaisante. La compréhension de la perte d'énergie des partons et de suppression des jets est l'un des enjeux majeurs pour les années à venir.

Du fait du grand nombre de quarks charmés produit au LHC dans chaque collision noyau-noyau, une augmentation non négligeable de la production des J/ψ a été mesurée à basse impulsion transverse par rapport à la suppression mesurée à hautes impulsions transverses, conduisant à une suppression globale moindre que celle mesurée à plus basse énergie. Cette observation est compatible avec la compétition entre le mécanisme de dissociation thermique des états du charmonium et un mécanisme de recombinaison de quark et anti-quark charmés initialement produits par deux processus durs distincts. Préciser la dynamique temporelle de cette compétition nécessitera des données supplémentaires incluant d'autres états du charmonium.

Les productions de matière et d'anti-matière étant quasiment égales au LHC, les collisions d'ions lourds sont par conséquent une source abondante d'anti-noyaux. Dès lors la comparaison des propriétés des noyaux et des anti-noyaux, à la recherche d'effets de violation de la symétrie CPT, devient possible. Une telle comparaison a été réalisée pour les masses de l'anti-deuton à l'anti ^3He avec une précision telle qu'elle fournit le test le plus sévère de la violation CPT dans le secteur de l'interaction forte : aucun effet de violation n'a été observé.

Les collisions impliquant des petits systèmes (comparativement aux collisions Pb-Pb), pp et p-Pb, ont fourni leur lot de surprises. Fait simple mais singulier : la multiplicité (nombre de particules chargées mesurées par unité de pseudo-rapacité, $dN_{\text{ch}}/d\eta$) mesurée dans les collisions p-Pb à $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5,02$ TeV est comparable à celle produite dans les collisions périphériques Pb-Pb à $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2,76$ TeV, suggérant une densité d'énergie similaire pour une multiplicité de particules comparable. Ce rapprochement oblige à revoir, au moins en partie, nos attentes a priori; il s'agit alors de déterminer

à quel point les collisions pp et p-Pb sont gouvernées certes par des effets de l'état initial (*i.e.* effets non-attribuables à un QGP) mais aussi par d'éventuelles interactions dans l'état final (*i.e.* généralement associées à un QGP). En effet, des observations faites dans les mesures de corrélations à multiples particules, dans le secteur des saveurs légères notamment, ont montré la possible présence de collectivité. Ces corrélations, d'une amplitude certes plus faible qu'en Pb-Pb et qui signe usuellement une évolution hydrodynamique pour le milieu formé, sont visibles pour les collisions ayant une multiplicité suffisante.

Dans la suite nous mentionnons les principaux résultats obtenus avec l'implication de chercheurs de l'IN2P3.

Saveurs légères et lourdes

Les spectres en impulsion transverse des hadrons de l'état final ont été mesurés de façon systématique avec les données ALICE des Runs 1 & 2, pour les différents systèmes (pp, p-Pb, Pb-Pb). Ces mesures concernent les hadrons *identifiés* de saveurs légères (u , d , s) et couvrent les populations des plus abondamment (n , K , p) aux plus rarement produites (hypérons Λ , Ξ , Ω ; noyaux légers d , t , ^3He , ^4He ; hypernoyaux $^A_\Lambda\text{H}$), répartissant les taux de production intégrée en impulsion transverse sur 9 ordres de grandeur³. En Pb-Pb, dans les collisions centrales, il résulte d'une analyse quantitative des divers spectres que la boule de feu créée se dilate collectivement à une vitesse radiale moyenne $\langle\beta_R\rangle \approx 0,65c$. La comparaison de la production des mésons et des baryons dans le secteur de l'étrangeté (Λ/K_s^0)⁴ permet d'identifier la dynamique de production de ces particules; elle permet d'éprouver, en Pb-Pb notamment, l'idée d'une hadronisation originale par coalescence de quarks. Ces résultats sont appuyés par des mesures similaires obtenues dans le secteur des quarks u et d (p/n) et des études encore plus différentielles attribuent clairement l'origine de tels processus au *bulk* de la collision, par opposition aux jets qui en sont exempts⁵.

L'exploration du secteur du charme a considérablement progressé, au travers notamment des mésons D (D^0 , D^+ , D^{*+} , D_s^+) aux rapidités nulles et les charmonia (J/ψ , $\psi(2S)$) aux grandes rapidités. Dans les deux cas, saveurs légères ou charmés, les mesures de hadrons identifiés ont également été étendues, en Pb-Pb notamment, jusqu'aux anisotropies azimutales de leur émission : $v_2(u, d, s)$, $v_{3,4,5}(n, K, p)$ ⁶, $v_2(D^0, D^+, D^{*+}, D_s^+)$ et $v_2(J/\psi)$ ⁷. Ces valeurs mesurées non-nulles quantifient la sensibilité des différentes saveurs au mouvement collectif imprimé par l'expansion du QGP (v_2) et aux fluctuations géométriques initiales ($v_{3,4,5,\dots}$).

³ [arXiv:1710.07531](https://arxiv.org/abs/1710.07531).

⁴ [Phys. Rev. Lett. 111 \(2013\) 222301](https://arxiv.org/abs/1305.3471).

⁵ [Nucl. Part. Phys. Proc. 276-278 \(2016\) 181-184](https://arxiv.org/abs/1605.08046).

⁶ [JHEP 06 \(2015\) 190](https://arxiv.org/abs/1506.07825); [JHEP 09 \(2016\) 164](https://arxiv.org/abs/1605.08046)

⁷ [Phys. Rev. Lett. 111 \(2013\) 102301](https://arxiv.org/abs/1305.3471), [arXiv:1707.01005](https://arxiv.org/abs/1707.01005); [Phys. Rev. Lett. 111 \(2013\) 162301](https://arxiv.org/abs/1305.3471), [Phys. Rev. Lett. 119 \(2017\) 242301](https://arxiv.org/abs/1305.3471).

Saveurs lourdes : désintégrations semi-leptoniques

La production des saveurs lourdes ouvertes (charme et beauté) mesurée avec le spectromètre à muons est associée à de très faibles valeurs de x_b ($< 10^{-6}$). Les mesures dans les collisions pp^8 , en bon accord avec les calculs perturbatifs de QCD, représentent une référence indispensable pour la mesure du facteur de modification nucléaire dans les collisions Pb-Pb (R_{AA}) et p-Pb (R_{pA}). Le R_{AA} des muons de décroissance du charme et de la beauté mesuré avec grande précision dans les collisions Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV sur une large gamme d'impulsion transverse, jusqu'à 20 GeV/c, indique dans les collisions centrales une forte suppression et par conséquent des pertes d'énergie importantes dans le QGP. En revanche, le facteur de modification nucléaire mesuré dans les collisions p-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV compatible avec l'unité⁹, indique que les effets nucléaires froids y sont négligeables. Par ailleurs, les mesures d'anisotropie azimutale pour la production des muons de décroissance du charme et de la beauté révèlent une asymétrie elliptique v_2 non nulle dans les collisions Pb-Pb¹⁰, ce qui peut être légitimement interprété comme une signature de la participation des quarks lourds au mouvement collectif du QGP.

Saveurs lourdes : quarkonia

L'étude détaillée de la production du J/ψ , identifié par sa décroissance en 2 muons, et du facteur de modification nucléaire dans les collisions Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ TeV et 5 TeV permet de conclure que le J/ψ est un témoin direct, et unique à ce jour, du déconfinement du QGP. En effet, la comparaison avec les résultats du RHIC, la dépendance du facteur de modification nucléaire avec l'impulsion transverse et avec la rapidité convergent vers la découverte dans les collisions Pb-Pb d'un nouveau mécanisme pour la production des états du charmonium, à savoir la recombinaison de quarks c et anti-c déconfinés présents dans le QGP¹¹. Cette conclusion est renforcée par la mesure d'une anisotropie azimutale non nulle ($> 3\sigma$) généralement attribuée à l'écoulement collectif du QGP (écoulement elliptique)¹². Dans le secteur de la beauté, la suppression observée de $Y(1S)^{13}$ est plus forte que celle prédite les modèles. Dans les collisions pp , les sections efficaces différentielles de production de $Y(1S)$ et $Y(2S)$ ont été mesurées¹⁴ ainsi qu'une polarisation non nulle du J/ψ ce qui est en désaccord avec les prédictions des principaux modèles.

La photoproduction du J/ψ a été étudiée dans les collisions ultra-périphériques Pb-Pb et les résultats ont permis de mettre en évidence le phénomène de *shadowing* des gluons dans le noyau aux énergies du LHC¹⁵ et dans les collisions p-Pb que la photo-production a lieu par les gluons du proton

⁸ [Phys. Lett. B 708 \(2012\) 265](#), [Phys. Rev. Lett. 109 \(2012\) 112301](#).

⁹ [Phys. Lett. B 770 \(2017\) 459](#).

¹⁰ [Phys. Lett. B 753 \(2016\) 41](#).

¹¹ [Phys. Rev. Lett. 109 \(2012\) 072301](#).

¹² [Phys. Rev. Lett. 111 \(2013\) 162301](#), [Phys. Rev. Lett. 119 \(2017\) 242301](#).

¹³ [Phys. Lett. B 738 \(2014\) 361](#).

¹⁴ [Eur. Phys. J. C 74 \(2014\) 2974](#).

¹⁵ [Phys. Lett. B 718 \(2013\) 1273](#), [Eur. Phys. J. C 73 \(2013\) no.11, 2617](#).

à petites valeurs de x_B ¹⁶. L'excès inattendu dans la production du J/ψ observé à très faible impulsion transverse (< 300 MeV/ c) dans les collisions Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ TeV et dans les collisions semi-centrales à $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV a été attribué à une photoproduction cohérente, posant non seulement des questions fondamentales sur les mécanismes cohérents mais aussi ouvrant la possibilité de produire un QGP par processus électromagnétique¹⁷.

Enfin, la section efficace de production du boson électrofaible W a été mesurée dans les collisions pp à $\sqrt{s} = 8$ TeV et p-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV¹⁸ pour étudier la modification des fonctions de distribution de partons dans le noyau.

Jets

L'interprétation la plus plausible de la suppression de la section efficace de production de jets dans les collisions d'ions lourds au RHIC et au LHC est que les partons issus de diffusions dures interagissent avec le QGP, ce qui conduit à une atténuation de leur impulsion par perte d'énergie radiative et collisionnelle. Quand bien même un certain nombre de modèles théoriques parviennent à reproduire les principales observations, le détail des mécanismes microscopiques à l'œuvre reste largement inconnu. Tandis qu'au cours du Run 1 du LHC, l'essentiel de l'effort s'est porté sur l'estimation et la déconvolution du bruit de fond¹⁹ afin d'extraire avec précision le signal de jets, le Run 2 a permis, à partir d'observables différentielles comme la production semi-inclusive de jets, d'étudier l'élargissement angulaire inter- and intra-jets dans les collisions Pb-Pb centrales²⁰. Par ailleurs, l'étiquetage des jets beaux a d'ores et déjà débuté par l'évaluation d'algorithmes utilisant le paramètre d'impact des traces dans un jet sur les données des collisions p-Pb collectées par ALICE en 2016.

Photons et mésons neutres

Les photons et les mésons neutres, π^0 et η , sont détectés et identifiés par leur décroissance en 2 photons par les calorimètres électromagnétiques PHOS et EMCal ou par la conversion des photons de décroissance à l'aide de la TPC. Les spectres des π^0 et η ont été mesurés pour tous types de collisions et à toutes les énergies²¹ délivrés par le LHC. Les données recueillies lors de collisions pp fournissent une excellente base de test pour les calculs pQCD et servent de référence pour les mesures effectuées en collisions Pb-Pb où la perte d'énergie mesurée des jets est compatible avec celle mesurée pour tous les autres hadrons légers. De plus, des mesures de corrélation π^0 - hadrons ont permis de préciser la répartition de l'énergie dans le phénomène de perte d'énergie des jets²².

¹⁶ [Phys. Rev. Lett. 113 \(2014\) no.23, 232504.](#)

¹⁷ [Phys. Rev. Lett. 116 \(2016\) no.22, 222301.](#)

¹⁸ [JHEP 02 \(2017\) 077.](#)

¹⁹ [JHEP 03 \(2012\) 053.](#)

²⁰ [arXiv:1702.00804](#), [arXiv:1705.03383](#).

²¹ [Eur. Phys. J. C 77 \(2017\) 339](#), [arXiv:1708.08745](#).

²² [Phys. Lett. B 763 \(2016\) 238-250.](#)

L'identification des photons directs et la faisabilité des mesures de corrélation photons directs - hadrons ont été testées et validées pour les collisions pp.

Dimuons aux masses basse et intermédiaire

L'analyse du spectre dimuons à basses masses ($m_{\mu\mu} < 1 \text{ GeV}/c^2$) permet l'étude des mésons légers η , ρ/ω et ϕ , offrant la possibilité de caractériser la production de particules dans le secteur des saveurs légères à haute rapidité. Aux masses intermédiaires ($1 < m_{\mu\mu} < 3 \text{ GeV}/c^2$) elle permet l'étude du continuum dû au charme et à la beauté ouverts et des photons virtuels d'origine thermique. Pour les données des Runs 1 & 2, les analyses ont porté essentiellement sur les mésons ω et ϕ en collisions pp²³ et sur le méson ϕ en collisions p-Pb et Pb-Pb²⁴. Les résultats des observations en collisions pp donnent une indication précieuse pour le réglage des paramètres des modèles phénoménologiques (dans un domaine où les calculs de QCD perturbatifs ne sont pas possibles), ainsi que la base pour une interprétation correcte des données en collisions p-Pb et Pb-Pb. Les observations en collisions p-Pb ont donné accès à la mesure du facteur de modification nucléaire R_{AA} du méson ϕ , à intégrer avec les résultats des analyses en fonction de la multiplicité des particules chargées, actuellement en préparation. Les résultats en collisions Pb-Pb ont permis de mettre en évidence l'évolution du spectre d'impulsion transverse du méson ϕ entre collisions pp et Pb-Pb, dont l'interprétation logique en terme d'écoulement radial de type hydrodynamique est actuellement en discussion.

QGP dans certaines collisions pp et pPb ?

En ce qui concerne les saveurs légères, ALICE a observé pour certaines collisions pp et p-Pb une augmentation inattendue de la production d'étrangeté, qui semble converger, pour les collisions caractérisées par des multiplicités très élevées, vers la production mesurée dans les collisions centrales Pb-Pb²⁵. L'interprétation de ces résultats invoque aussi bien l'hypothèse d'une expansion hydrodynamique d'une goutte de QGP de la taille d'un proton que des corrélations imprimées dans la fonction d'onde des noyaux en collision dans une description de type CGC.

Dans le secteur des saveurs lourdes, d'importants effets de productions corrélées ont été détectés dans les collisions de petits systèmes : la mesure de la corrélation entre la production de sondes dures (quarkonia et charme ouvert) et la multiplicité globale de particules chargées issues de la collision s'interprète en termes d'effets non-QGP, avec une compétition des mécanismes d'interaction partonique multiple, hadronisation de jets et phénomène de saturation, ou en terme d'état final avec l'hadronisation d'une goutte de QGP. L'interprétation de la régularité de la corrélation mesurée en fonction de la nature de la sonde dure, du système et de l'énergie reste une question ouverte.

²³ [Phys. Lett. B 710 \(2012\) 557-568.](#)

²⁴ [Phys. Lett. B 768 \(2017\) 203-217.](#)

²⁵ [Nature Physics 13, 535-539 \(2017\).](#)

État des lieux & upgrade

L'expérience ALICE a été conçue pour la mesure et l'identification des hadrons, leptons et photons de très basse à modérément haute impulsion transverse avec une large acceptance et dans un environnement de densité hadronique élevée. Les améliorations des systèmes de détection et de leur électronique associée visent, tout en préservant les performances actuelles, à améliorer les performances de localisation des vertex primaires et secondaires et les performances de lecture des données.

Le détecteur actuel

Le système de détection de l'expérience ALICE consiste en un sous ensemble de détecteurs offrant une couverture des rapidités centrales et de tout l'azimut et prenant en charge la reconstruction des traces des particules chargées. Ce même sous-ensemble associé à d'autres détecteurs offrant une couverture limitée en azimut est également en charge de l'identification des particules et de la caractérisation des collisions. En combinant l'acceptance de l'ensemble des détecteurs, une plage en η comprise entre -4 et +5 est couverte.

Reconstruction des traces

Cette tâche est assurée par les détecteurs du tonneau central ($-0,88 < \eta < 0,88$) incluant ITS (2 couches de détecteurs Si à pixels, 2 couches de détecteurs Si à dérive et 2 couches de détecteurs Si à pistes), TPC (chambre à projection temporelle), TRD (détecteur de radiation de transition) et TOF (détecteur de temps de vol). Le tonneau est plongé dans un champ magnétique solénoïdal uniforme de 0,5 Tesla maximum. Cet ensemble permet d'identifier le vertex principal avec une précision de l'ordre de 10 μm et les vertex secondaires avec une précision sur le paramètre d'impact de l'ordre d'une centaine de μm jusqu'à une vingtaine de μm dépendant de la nature et l'impulsion transverse (p_T) des particules de décroissance. La précision sur la mesure de p_T est en-deçà de 10% pour des p_T inférieurs à 50 GeV/c, et typiquement inférieure à 1% pour $p_T \approx 1$ GeV/c. L'efficacité de reconstruction des traces varie de 80% à 90% pour des p_T variant de 100 MeV/c à 100 GeV/c.

Identification des particules

La plupart des techniques connues sont exploitées par ALICE pour identifier les particules. Pour les particules chargées émises à rapidité centrale : mesure de la perte spécifique d'énergie (dE/dx) dans des matériaux (Si pour ITS et gaz pour TPC), mesure du temps de vol (TOF), mesure de la radiation de transition (TRD pour la discrimination e et π) et mesure du rayonnement Cerenkov (HMPID). Combinant les différentes techniques, les hadrons chargés et les électrons peuvent être identifiés par des méthodes statistiques, typiquement de 0,1 à 5 GeV/c. Les photons sont identifiés

par mesure calorimétrique (PHOS et EMCAL) et par mesure des électrons de conversion (ITS, TPC). Les particules de courte durée de vie sont identifiées par la topologie de leur désintégration.

Le spectromètre de muons

Ce détecteur, situé à grande rapidité ($-4 \leq \eta \leq -2,5$), est destiné à l'identification des saveurs lourdes ouvertes et des bosons de jauge électrofaible par la détection d'un muon de désintégration, des états du charmonia et du bottomonia par la détection des deux muons de décroissance, et à la mesure du spectre de masse $\mu^+\mu^-$ (mésons vecteurs et continuum). Le spectromètre consiste en un assemblage d'absorbeurs, de chambres proportionnelles multifilaires (MWPC) pour la trajectographie (Muon Tracking) et de chambres à plaque résistive (RPC) pour le déclenchement (Muon Trigger).

Caractérisation des collisions

La géométrie de la collision (paramètre d'impact) est déduite d'une part de la mesure des résidus de la collision à l'aide de calorimètres de protons et de neutrons (ZDC) situés à ≈ 115 m de part et d'autre du point d'interaction nominal et d'autre part de la mesure du nombre de particules produites dans la collision et de leur distribution spatiale à l'aide de détecteurs (FMD, V0, T0) couvrant un domaine d'acceptance en rapidité plus grande que le tonneau central.

Les projets d'amélioration

Exploitant les taux de collisions jusqu'à 0.2-1 MHz en pp et 50-100 kHz en Pb-Pb, plus de 10 fois supérieurs en Pb-Pb aux taux actuels, attendus après LS2, le programme de physique se resserrera autour des mesures de sondes rares du QGP de rapports S/B très faibles (saveurs lourdes, quarkonia, photons réels/virtuels, jets et leurs corrélations avec d'autres particules), nécessitant l'accumulation de quantités importantes de données de haute précision, y compris aux basses impulsions transverses. La stratégie d'amélioration du dispositif expérimental de l'expérience ALICE vise ainsi à augmenter d'un facteur 10 (événements rares) à 100 (événements de biais minimum) la luminosité intégrée en collisions Pb-Pb. Ceci nécessite d'enregistrer *toutes* les collisions Pb-Pb délivrées et d'augmenter les performances de reconstruction des traces de l'ensemble des systèmes de détection, tout en conservant les performances actuelles du point de vue de la résolution de traces et l'identification des particules. L'implémentation du programme d'amélioration inclut les projets suivants (en gras sont précisés les projets impliquant des laboratoires de l'IN2P3):

- **Remplacement de l'électronique de lecture par une électronique sans temps mort pour la plupart des détecteurs²⁶, y compris le spectromètre MUON. Le chip de l'électronique frontale est un projet commun à MUON et TPC.**

²⁶ [CERN-LHCC-2013-019](#).

- **Intégration d'un nouveau trajectographe, MFT²⁷, en amont de l'absorbeur du spectromètre MUON.**
- **Remplacement de l'ITS par un nouveau trajectographe²⁸ à haute résolution et à faible budget matériel.**
- Remplacement des chambres de lecture à fils de la TPC²⁹ par des chambres avec détecteurs gazeux de type GEM et remplacement de l'électronique de lecture par une lecture sans temps mort, à un taux d'interactions de 50 kHz en Pb-Pb.
- Nouveau détecteur de déclenchement à grand angle intégrant les fonctionnalités des détecteurs T0 et V0 actuels.
- **Nouvelle architecture des calculateurs en ligne et augmentation de leurs puissances de traitement. Nouvelle architecture pour l'environnement logiciel de reconstruction et d'analyse hors ligne³⁰.**

L'ensemble de ces améliorations, toutes approuvées par les instances du CERN et par l'IN2P3 pour celles concernant l'institut, sera installé pendant la période d'arrêt LS2 du LHC.

ITS

Le nouvel ITS consistera en 7 (au lieu de 6 actuellement) couches de détecteurs Si-CMOS à pixels de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ (contre 3 technologies pixel, drift et strip actuellement) et couvrira une gamme de pseudo-rapacité un peu plus large (au minimum $\pm 1,2$ unités contre $\pm 0,88$ aujourd'hui). Avec notamment *i)* la première couche placée à environ 23 mm (39 mm actuellement) du point d'interaction dans la direction radiale *ii)* un budget de matière par couche grandement réduit (0,3% longueur de radiation pour chacune des 3 couches internes) et *iii)* une résolution spatiale par couche d'environ $5 \mu\text{m}$, la précision de pointage des traces globales sera, pour un p_T de $1 \text{ GeV}/c$, d'environ $20 \mu\text{m}$, soit meilleure qu'actuellement d'un facteur 3 dans le plan transverse et 5 longitudinalement. L'efficacité de reconstruction des traces sera également fortement accrue (à $p_T = 100 \text{ MeV}/c$, $\epsilon \approx 75\%$ avec le nouvel ITS contre $\epsilon \approx 10\%$ actuellement). Les 7 couches seront assemblées à partir de puces ALPIDE basées sur la technologie CMOS $0,18 \mu\text{m}$, intégrant à la fois la partie capteur et l'électronique de lecture. Cette dernière permettra d'enregistrer des événements à un taux de 50 kHz pour les collisions Pb-Pb de biais minimum et jusqu'à quelques centaines de kHz pour les collisions pp.

²⁷ [CERN-LHCC-2015-001](#).

²⁸ [CERN-LHCC-2013-024](#).

²⁹ [CERN-LHCC-2013-020](#), [CERN-LHCC-2015-002](#).

³⁰ [CERN-LHCC-2015-006](#).

L'IPHC Strasbourg assemblera 20% des modules (2x7 chips collés et bondés sur un circuit imprimé flexible) dédiés aux 4 couches extérieures. La contribution financière de l'IN2P3 au coût *core* du projet, hors R&D, est de 800 k€.

ALICE-France (IPHC) est également en charge de la coordination de l'environnement logiciel pour la simulation, la calibration, l'alignement, le contrôle qualité des données, la reconstruction des traces des particules et l'identification des vertex secondaires. Ces traitements seront réalisés sur une ferme de calcul distribué exploitant les architectures matérielles modernes à base d'accélérateurs GPU (*Graphics Processing Unit*). Le logiciel de reconstruction autonome ITS devra satisfaire à des exigences sans précédent : l'efficacité devra être quasi parfaite, la précision devra permettre d'identifier des vertex secondaires déplacés de quelques dizaines de microns par rapport au vertex principal de la collision. En plus, ce logiciel devra être très rapide afin de pouvoir reconstruire les données en ligne et ce, alors que la densité de traces sera telle que la probabilité d'association aléatoire entre charges spatiales et traces sera loin d'être négligeable.

MUON tracking

L'ensemble de l'électronique frontale actuelle (cartes MANU et châssis d'acquisition CROCUS) sera remplacé afin de soutenir un taux de collision Pb-Pb jusqu'à 100 kHz. La nouvelle électronique de lecture est basée sur le circuit SAMPA également utilisé pour la TPC. Les cartes DualSampa, de la même taille que les cartes actuelles, peuvent lire 64 canaux et profitent des capacités bien supérieures en termes de traitement de signal du circuit SAMPA, en particulier, des modes de calcul-suppression en temps réel de la ligne de base et la compression des données numérisées. Les données sont véhiculées par des PCB/Flex vers les châssis d'acquisition SOLAR pour ensuite atteindre l'infrastructure commune d'acquisition CRU (Common Readout Units). Les tests en faisceaux (septembre 2017) ont validé le design des cartes DS345 en termes de bruits électroniques et résolution en position. La version 2 des prototypes des cartes DS12 est en cours de production.

L'IPN Orsay conçoit et produit les 20.000 cartes DualSampa des 5 stations de trajectographie. Les prototypes finaux seront validés au premier semestre 2018 et le début de la production est prévu pour fin 2018/début 2019. Le coût total du projet, hors R&D, est de 1596 kCHF (hors circuits SAMPA qui seront fournis par le Brésil) dont 646 k€ de contribution de l'IN2P3¹⁸.

MUON ID

Le projet MID, qui vise à adapter l'ensemble de détection Muon Trigger actuel aux luminosités élevées attendues pendant les Runs 3 & 4, inclut trois modifications majeures : i) le remplacement, pris en charge par l'INFN Turin, d'un tiers des détecteurs RPC (Resistive Plate Chambers), les plus exposés aux radiations ; ii) le passage à une électronique frontale avec amplification (projet FEERIC, pour Front-End Electronics Rapid Integrated Circuits) afin de ralentir le vieillissement des détecteurs RPC, en minimisant la charge produite dans le gaz ; iii) la carte FEERIC dont une

pré-série est opérationnelle en caverne ALICE depuis février 2015 a été validée en février 2015. Les circuits intégrés (ASIC) et les cartes FEERIC ont été conçus au LPC et sont maintenant produits et validés (2.720 cartes). À noter le développement innovant, réalisé au LPC, d'un système de distribution sans fil (protocole Xbee) des seuils de discrimination, utilisant le bus numérique I2C pour la liaison avec les cartes FEERIC. SUBATECH prend en charge le remplacement de toute l'électronique de lecture soit 250 cartes numériques complexes, en liaison avec les cartes de lecture CRU (Common Readout Unit) standard ALICE. Une pré-série, correspondant à 1/16 du projet total, est en cours de test. La revue de production est planifiée pour mars 2018, pour une production en 2018.

Le coût de ce projet est évalué à 677 kCHF dont 430 k€ à la charge de l'IN2P3³¹. Les Laboratoires IN2P3 impliqués, leaders de ce projet, sont le LPC Clermont-Ferrand et Subatech Nantes.

MFT

MFT (Muon Forward Tracker) complète le spectromètre de muons d'un détecteur de vertex en amont de l'absorbeur hadronique du spectromètre ($-3,6 < \eta < -2,45$). Il est composé de 10 plans de 5 disques chacun équipé de capteurs Si à pixels ALPIDE initialement développés pour le nouvel ITS. Chaque disque du MFT a une épaisseur équivalente à 0,7% de X_0 . Le premier plan de détection est situé à 46 cm du point d'interaction nominal et le dernier à 77 cm. Les capteurs ALPIDE sont collés sur des circuits PCB flexibles et connectés électriquement par fils pour former 280 échelles de 4 types différents à 2, 3, 4 ou 5 capteurs, soit 936 capteurs ALPIDE. Les données de chaque ALPIDE sont lues à 1,2 GHz par un système d'acquisition développé en commun avec ITS. L'objectif du MFT est d'augmenter de manière très significative la résolution de pointage des traces muons au niveau du vertex d'interaction primaire et ainsi de discriminer l'origine des états du charmonium entre la production prompte et la production par décroissance de hadrons beaux et ce, dans les collisions centrales Pb-Pb, de façon unique au LHC jusqu'à une impulsion transverse nulle. Par ailleurs, le MFT permettra également d'améliorer la résolution sur la mesure de la masse invariante di-muon à basse masse ($m_{\mu\mu} < 1,5 \text{ GeV}/c^2$).

La coordination du projet est assurée par la France. Les laboratoires français impliqués sont : SUBATECH, LPC, IPNL et CEA-IRFU. Le projet est organisé en 10 lots de travail (WP), les ingénieurs et chercheurs français en coordonnent 9. En 2017, 35 personnes de l'IN2P3 travaillent sur le projet : 21 ingénieurs et techniciens, 11 physiciens, 2 post-docs et un doctorant. 2018 et 2019 seront les années de production du MFT qui sera installé au printemps 2020. La contribution financière de l'IN2P3 au coût *core* du projet, hors R&D, est de 1.370 k€.

³¹ [CERN-RRB-2015-065](#).

RO et O2

L'objectif d'ALICE est d'inspecter chacune des collisions produites et de collecter au total 13 nb^{-1} en collisions Pb-Pb de biais minimum à l'énergie de 5,5 TeV (10^{11} interactions). ALICE a choisi de changer la méthode de lecture des données, d'un mode déclenché à un système de lecture en continu. La carte de lecture CRU (*Common Readout Unit*) a été développée par ALICE pour ses 11 détecteurs, à partir de la carte PCIe40³² conçue par le CPPM pour l'expérience LHCb. Un microprogramme adapté pour ALICE est en cours de développement sous la responsabilité du LPSC. La difficulté de ce développement réside dans le fait que certains sous-détecteurs, dont le plus important est la TPC qui utilisera 360 CRU, ont besoin d'implémenter un microprogramme propre dans le CRU. Il s'agira donc, outre de s'assurer du bon fonctionnement du CRU au milieu des différentes interfaces (vers les détecteurs, vers le trigger central et vers le système d'acquisition O2), de donner un appui technique à ces sous-détecteurs et des outils leur permettant une intégration aisée.

Une nouvelle capacité de traitement en-ligne, adaptée à réduire le taux de données de 3,4 TB/s à 120 GB/s, est prévue. En pratique, des tranches temporelles contenant $O(1000)$ collisions seront prises en charge (incluant une partie de l'étalonnage et de la reconstruction) au sein d'une ferme de calcul (dimensionnée pour traiter 25 TB/s), ce qui représentera une innovation technique inédite pour la physique des hautes énergies.

Projets futurs

D'autres projets visant à étendre le domaine scientifique couvert par ALICE ou à améliorer encore davantage les performances de l'expérience sont actuellement à l'étude.

L'ajout d'un double calorimètre électromagnétique et hadronique Si-W de très grande granularité couvrant un domaine limité à très grande pseudo-rapacité ($3,2 < \eta < 4,5$) capable de discriminer les photons directs des photons de décroissance π^0 est à l'étude. Il permettra de tester l'hypothèse du CGC (Color Glass Condensate, état de la matière postulé lorsque la densité de gluons dans le proton ou le noyau est saturée) et étendre les mesures tomographiques par photons et jets aux grandes rapidités.

Tirant profit de l'expérience acquise avec la technologie Si CMOS, des études sont menées pour le développement d'un détecteur Si de grande surface (de la taille d'une galette Si) s'appuyant sur l'imagerie CMOS et la technologie de *stitching*. Un tel détecteur permettrait de réduire de façon significative le budget matériel d'un futur détecteur de vertex et améliorer de façon conséquente les performances pour deux mesures essentielles du programme scientifique de ALICE, à savoir la

³² [JINST 11 P02013](#).

mesure du spectre di-électron à basse masse et masse intermédiaire ainsi que l'identification des hadrons de saveurs lourdes ouvertes.

D'autres idées, encore embryonnaires, sont poursuivies notamment pour réaliser des collisions en cible fixe utilisant la technologie SMOG développée par LHCb ou des collisions électron-proton en remplaçant le faisceau de Pb^{82+} totalement ionisé par un faisceau de Pb^{81+} . Pour ce dernier point, des études machines sont programmées en 2018 au LHC.

Performances et programme scientifique pour les Runs 3 & 4

Pour répondre aux questions ouvertes posées par plus de 20 ans de physique des ions lourds, l'objectif des Runs 3 & 4 est de multiplier par 10 la luminosité intégrée pendant les Runs 1 & 2 avec des performances de mesures accrues dans le secteur du charme et de la beauté ainsi que pour les sondes électromagnétiques.

Questions ouvertes

Le programme expérimental de la physique des ions lourds cherche à explorer le comportement de la Chromodynamique Quantique à température et à densité finies. L'attention s'est essentiellement portée ces dernières années sur la compréhension de la dynamique qui conduit rapidement un système gouverné par l'interaction forte, tel que formé dans les collisions entre ions lourds, vers un état qui se traduit par des phénomènes collectifs dans l'état final. Une des découvertes majeures du LHC indique pour les systèmes en collision les plus petits (pp, p-Pb) la présence de comportements que l'on attribue, habituellement, dans les collisions noyau-noyau à des phénomènes collectifs. Parmi les questions posées par l'ensemble de ces observations, celles qui seront adressées dans les années à venir sont les suivantes :

- Est-ce que les mécanismes d'équilibration du système sont encore plus efficaces qu'anticipé et rendent l'équilibration jusqu'à la thermalisation possible même dans les plus petits systèmes en collision ? Ou bien est-ce que d'autres mécanismes entrent en jeu et miment un comportement collectif même dans les collisions noyau-noyau ?
- Si des phénomènes collectifs sont possibles dans les petits systèmes, quels sont les mécanismes qui permettent d'atteindre la densité d'énergie normalement associée à la transition de phase ? Quelles sont les variables les plus pertinentes pour différencier les collisions d'ions lourds, *i.e.* le nombre et la nature exacte des participants dans l'état initial (nucléons, clusters partoniques, partons, condensat de couleur, ...) ?
- Étant donné que le phénomène de *jet-quenching* résulte de l'interaction de partons durs avec le milieu et que ces partons éventuellement thermalisent avec le milieu, dans quelles

mesures les sondes dures peuvent-elles nous apporter un éclairage nouveau sur les propriétés du QGP et sur les mécanismes d'équilibration ?

- Comment les sondes dures peuvent-elles nous informer sur la nature physique des degrés de liberté de la matière QCD à haute température ?
- Est-ce-que l'exploitation d'observables électromagnétiques permettra de mesurer encore plus précisément la température de l'état initial et d'apporter un éclairage sur le mécanisme de brisure de la symétrie chirale ?
- Finalement, concernant le but ultime de la physique des ions lourds, quelle précision devons-nous atteindre lors de la détermination expérimentale des paramètres fondamentaux de QCD à température finie calculables à partir des principes premiers (par exemple les coefficients de viscosité, les coefficients de transport,...) ?

Pour répondre à ces questions, ALICE s'appuiera d'un côté sur un programme d'upgrade des détecteurs améliorant de façon significative la précision sur les mesures de vertex secondaires, un atout pour la physique du charme et de la beauté. D'un autre côté le programme scientifique bénéficiera d'une statistique grandement améliorée, la luminosité intégrée des collisions Pb-Pb prévue est égale à 13 nb^{-1} et la statistique des sondes non-déclenchables sera augmentée d'un facteur 100, par rapport à celle des Runs 1 & 2. Seules les observables que les collaborateurs de l'IN2P3 privilégieront sont revues dans la suite du document.

Saveurs lourdes (ouvertes) à mi-rapidité

Aux rapidités nulles notamment, en pp, p-Pb comme Pb-Pb, l'étude du charme pourra s'appuyer sur un ensemble de mesures relatives à la production *i)* prompte, i.e. soustraction faite de la composante issue de la désintégration de la beauté *ii)* sur une gamme d'impulsions aussi grande que possible ($0 < p_T < 50\text{-}75 \text{ GeV}/c$) et ce, pour toute une famille de hadrons identifiés (D^0 , D^+ , D^{*+} , D_s^+ , Λ_c via les canaux hadroniques; J/ψ , $\psi(2S) \rightarrow e^+e^-$).

Aux basses impulsions transverses ($0 < p_T < 3\text{-}4 \text{ GeV}/c$) - là où se trouve l'essentiel de la section efficace - l'objectif pour le charme est, d'une part, de mesurer avec précision la section efficace totale de production c/anti-c et, d'autre part, de caractériser la réponse du charme à la dynamique collective du milieu (coefficients v_n). Aux impulsions intermédiaires ($2\text{-}3 < p_T < 6\text{-}8 \text{ GeV}/c$), ces analyses contribueront à éclaircir la question de la hadronisation du QGP, notamment avec les rapports Λ_c/D : les hadrons charmés sont-ils en partie formés par coalescence de quarks c déconfinés, comme cela est envisagé pour expliquer la production relative entre baryons et mésons légers (Λ/K_s^0 , p/π) aux p_T intermédiaires ? Quel est, suivant l'impulsion, le poids des différents mécanismes à l'œuvre (hadronisation statistique, coalescence, fragmentation) ? Aux plus hautes impulsions, ces mesures permettront d'étudier avantageusement la dépendance en saveur du transport des quarks dans le QGP et en particulier des mécanismes de perte d'énergie (via la mesure R_{AA}).

Enfin, des analyses avec des aspirations similaires seront portées autant que faire se peut au secteur de la beauté ouverte identifiée (B^0 , $B^\pm$, B_s , Λ_b).

Saveurs lourdes à grande rapidité

Plusieurs processus entrent en jeu pour la production des états des quarkonia dans le secteur du charme et de la beauté. Ils incluent leur dissolution par écrantage de couleur et leur régénération par coalescence de quarks déconfinés dans le QGP, et les processus liés à la matière nucléaire froide telle leur interaction dans l'état initial et final avec l'environnement hadronique. L'identification du rôle joué par chacun des processus requiert la mesure de la production des états excités du charmonium et une meilleure précision sur la mesure des états du bottomonium dans les collisions p-Pb aussi bien que dans les collisions Pb-Pb. ALICE est unique pour les mesures de la production à basse impulsion transverse des états du quarkonia transverse ainsi que pour la détermination des propriétés collectives identifiées dans les anisotropies azimutales. L'ajout du MFT rendra possible, par mesure des vertex décalés, l'identification des muons de décroissance du charme et de la beauté. Associé à la statistique accrue des Runs 3 & 4, le MFT et les performances uniques de ALICE permettront d'étendre le programme scientifique actuel entre autres dans les domaines suivants :

- La dynamique des charmonia dans le QGP: rôle respectif des mécanismes de dissociation et de régénération, notamment la mesure du $\psi(2S)$ jusqu'à impulsion transverse nulle.
- Thermalisation des quarks lourds dans le milieu. Mesure des anisotropies azimutales v_n du charme et de la beauté jusqu'à impulsion transverse nulle.
- Transport des quarks lourds par le QGP. Mesure du spectre de production du charme et de la beauté via le canal semi-muonique et via les canaux de décroissance en J/ψ et semi-muonique pour la beauté.

Dimuons aux masses basse et intermédiaire

La mesure des photons directs et des di-leptons est source d'informations directes de la dynamique initiale de la collision. Ces informations incluent celles issues du rayonnement thermique du QGP et celles signalant la transition de phase chirale qui peut être observée dans la fonction spectrale de mésons vecteurs. Ces mesures particulièrement difficiles requièrent un lot d'événements statistiquement conséquent et des conditions de bas bruit de fond (photons de conversion dans les matériaux des détecteurs) : elles constituent un des objectifs majeurs des Runs 3 & 4.

Jets

Les énergies élevées des collisions au LHC ont ouvert la voie aux mesures exploitant les jets pour sonder les propriétés du QGP. Les mesures de perte d'énergie des jets, phénomène maintenant clairement identifié, interrogent sur le(s) mécanisme(s) à l'origine de la redistribution de l'énergie

des jets à très grands angles. Les mesures les plus adaptées pour aborder ce problème sont celles impliquant un jet et un photon direct dont l'énergie mesurée fournit l'énergie initiale du jet. Des résultats quantitatifs, nécessaires pour discriminer les différents scénarios de perte d'énergie dans le QGP, ne pourront venir que des statistiques élevées attendues pendant les Runs 3 & 4. De nouvelles observables seront aussi exploitées, tels les jets issus de la fragmentation de quarks lourds, par l'implémentation d'algorithmes d'étiquetage exploitant les propriétés des hadrons charmés et beaux et grâce à la reconstruction très précise des traces de particules chargées garantie par le nouveau détecteur à pixels. Les jets complets seront également mesurés en combinant les traces chargées et les amas calorimétriques des détecteurs EMCal/DCal. Un meilleur étalonnage des calorimètres et leur électronique de déclenchement dédiée rendront accessible une mesure précise de la sous-structure des jets de gluons, quarks légers et lourds et de leurs corrélations avec un photon/ n^0 .

Photons directs

Avec les progrès qui seront réalisés dans les techniques d'identification des photons directs dans les collisions Pb-Pb et des lots d'événements, statistiquement bien plus significatifs que ceux existants, attendus pendant les Runs 3 & 4, il sera possible de réaliser des mesures de corrélation multi-paramétrique. Les mesures tomographiques pilotées par photons directs deviendront alors une réalité.

Collisions pp et p-A de haute multiplicité

L'objectif des études abordant les collisions pp et p-Pb sous une perspective commune avec Pb-Pb est d'aboutir à une compréhension globale de la dynamique en QCD. Il s'agira de poursuivre les mesures multi-différentielles de production pour des hadrons identifiés, en fonction de l'impulsion, l'azimut, la rapidité et, donc, la multiplicité de l'événement. Pour les saveurs légères, l'accent sera notamment mis sur les (anti)baryons étranges (Λ , Ξ , Ω) et sur les (anti)noyaux légers produits (d, t, ^3H , ^4He et hypernoyaux $^{\Lambda}_{\Lambda}\text{H}$). De par l'abondance des données, de plus amples études seront également permises pour les saveurs lourdes (D^0 , D^+ , D^{*+} , D_s^+ , J/ψ , ...). La présence de l'ITS et du MFT devrait autoriser une caractérisation corrélée de l'événement, par exemple en mesurant précisément les multiplicités de traces chargées entre les rapidités nulle et à l'avant. Pour des collisions p-A, l'opportunité de mettre en collision un noyau au nombre de masse bien inférieur à celui du ^{208}Pb est envisagée (ex : p-He, p-O).

Stratégie de la prise de données Runs 3 & 4

Pendant les Runs 3 & 4 ALICE collectera des données pour les collisions pp à $\sqrt{s} = 14$ et 5,52 TeV, p-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5,52$ et 8,8 TeV et Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5,52$ TeV, ces dernières au

maximum de la luminosité du LHC. Le remplacement des faisceaux de Pb par d'autres noyaux est en cours de discussion.

Pour atteindre les objectifs décrits précédemment, ALICE devra accumuler des données statistiquement plus significatives pour une luminosité intégrée Pb-Pb, à l'énergie maximale du LHC, de 10 nb^{-1} , supérieure d'au moins un ordre de grandeur par rapport à celle des Runs 1 & 2. Parallèlement, la même statistique en terme de nombre de traces devra être accumulée pour les collisions pp et p-Pb préférablement à la même énergie par collision nucléon-nucléon que celle des collisions Pb-Pb et ce, pour disposer de mesures de référence en collisions élémentaires modifiées ou non par le milieu nucléaire froid. De plus, les données accumulées en collisions pp et p-Pb à l'énergie maximale du LHC seront exploitées pour étudier les phénomènes similaires aux phénomènes collectifs observés dans ces collisions élémentaires associées à des multiplicités hadroniques élevées.

Ces objectifs pourront être atteints en répartissant la prise de données sur la durée des Runs 3 & 4, selon un scénario (voir Table 1 et Figure 1) prévoyant chaque année 1 mois de collisions pp et 1 mois de collision p-Pb ou Pb-Pb. Pour la phase HL-LHC (Run 4), l'opportunité de prendre des données avec d'autres espèces de noyaux, en plus ou en remplacement du plomb, est en cours de discussion au CERN.

Table 1 : *Stratégie de prise de données d'ALICE envisagée pour les Runs 3 & 4.*

Année	Système	$\sqrt{s_{NN}}$ (TeV)	L_{INT}	$N_{collisions}$
Run 3-0	pp	14,0	0,4 pb ⁻¹	$2,7 \times 10^{10}$
	Pb-Pb	5,5	2,85 nb ⁻¹	$2,3 \times 10^{10}$
Run 3-1	pp	14,0	0,4 pb ⁻¹	$2,7 \times 10^{10}$
	Pb-Pb	5,5	2,85 nb ⁻¹	$2,3 \times 10^{10}$
Run 3-2	pp	14,0	0,4 pb ⁻¹	$2,7 \times 10^{10}$
	pp	5,5	6,0 pb ⁻¹	$4,0 \times 10^{11}$
Run 4-0	pp	14,0	0,4 pb ⁻¹	$2,7 \times 10^{10}$
	Pb-Pb	5,5	2,85 nb ⁻¹	$2,3 \times 10^{10}$
Run 4-1	pp	14,0	0,4 pb ⁻¹	$2,7 \times 10^{10}$
	Pb-Pb	5,5	1,4 nb ⁻¹	$1,1 \times 10^{10}$
	p-Pb	8,8 / 5,5	50,0 nb ⁻¹	$1,0 \times 10^{11}$
Run 4-2	pp	14,0	0,4 pb ⁻¹	$2,7 \times 10^{10}$
	Pb-Pb	5,5	2,85 nb ⁻¹	$2,3 \times 10^{10}$



Figure 1 : *Calendrier LHC du Run 2 et calendrier préliminaire des Runs 3 & 4.*

La collaboration ALICE-France

Implication des laboratoires de l'IN2P3 dans la construction des détecteurs et les analyses de physique.

La collaboration ALICE-France inclut des physiciens, étudiants, ingénieurs et techniciens des laboratoires de l'IN2P3 et du CEA. Pour ce qui est de l'IN2P3, elle compte 24 chercheurs permanents CNRS, 11 enseignants-chercheurs, 4 chercheurs post-doctorants et 11 doctorants. Les laboratoires IPHC (Strasbourg), IPN (Lyon), IPN (Orsay), LPC (Clermont-Ferrand), LPSC (Grenoble) et SUBATECH (Nantes) sont membres de la collaboration ALICE.

Historiquement les laboratoires de l'IN2P3 ont contribué de façon significative à la construction et au financement du spectromètre MUON (IPNL, IPNO, LPC, SUBATECH), du trajectographe interne ITS (IPHC), du détecteur déclencheur de niveau 0 et de centralité V0 (IPNL) et du calorimètre électromagnétique EMCal (LPSC, SUBATECH). Les physiciens des laboratoires impliqués contribuent à la maintenance et à l'exploitation de ces détecteurs.

Les laboratoires de l'IN2P3 sont engagés de façon importante dans le projet d'amélioration de l'expérience pour les Runs 3 & 4³³. Les physiciens de l'IN2P3 sont porteurs du projet MFT (Muon Forward Tracker) et les laboratoires impliqués ont une charge prépondérante pour le financement et la construction de ce détecteur (IPNL, LPC, SUBATECH). Les physiciens et ingénieurs des laboratoires de l'IN2P3 sont également fortement impliqués dans la construction de la nouvelle électronique des stations de trajectographie (IPNO, SUBATECH) et d'identification (LPC, SUBATECH) du spectromètre MUON et de l'assemblage de modules du nouvel ITS (IPHC). Le laboratoire LPSC contribue aux améliorations de EMCAL/DCAL et avec son groupe d'électronique au développement du microprogramme pour CRU, le module de lecture des données commun à l'ensemble des détecteurs ALICE.

Les principales thématiques scientifiques étudiées par les physiciens de l'IN2P3 concernent la physique des quarkonia (IPNO, LPC, SUBATECH, IPNL), la physique de l'étrangeté (IPHC) et des saveurs lourdes ouvertes (IPHC, LPC), la physique des photons directs (LPSC, SUBATECH), la physique des jets (LPSC) et la physique des di-leptons de basse masse (IPNL).

³³ Voir Conseil Scientifique de l'IN2P3 du 15 janvier 2014.