

## Le plasma de quarks et de gluons dans CMS

Raphaël Granier de Cassagnac, Matthew Nguyen, François Arleo  
Laboratoire Leprince-Ringuet, École polytechnique, CNRS/IN2P3

### Résumé

Depuis longtemps, la recherche et l'étude du plasma de quarks et de gluons font l'objet d'une attention particulière au Laboratoire Leprince-Ringuet (LLR). Aujourd'hui, des membres du groupe CMS analysent à cette fin les collisions d'ions lourds du LHC. Cette équipe est impliquée dans les mesures de jets, de quarkonia et de bosons faibles dans les collisions proton-plomb (pPb) et plomb-plomb (PbPb). Elle est constituée de trois chercheurs permanents (deux membres de CMS et un théoricien associé à l'expérience) accueillant un nombre important d'étudiants en thèse et de chercheurs post-doctorants, financés auprès de diverses agences (ERC, ANR, IN2P3, bourses Marie Curie, Polytechnique...). Le but de nos recherches est la compréhension du plasma de quarks et de gluons, ainsi que l'étude de différents aspects de chromodynamique quantique comme les distributions partoniques nucléaires. Depuis le démarrage du Large Hadron Collider (LHC), nous avons mené des mesures parmi les plus emblématiques effectuées dans les collisions pPb et PbPb. Citons par exemple les (premières) mesures des trois *upsilons* ou des jets de quarks *b* en collisions PbPb, ainsi que des bosons *W* en pPb.

Nos contributions sont reconnues aussi bien au sein de la collaboration CMS que plus généralement dans la communauté des ions lourds, en France et à l'étranger, et ce malgré le nombre réduit de chercheurs permanents. Nos profils sont différents et complémentaires (expertise variée entre jets, quarkonia et activité phénoménologique). Les résultats importants et l'originalité de notre groupe ont contribué à le rendre attractif auprès de jeunes chercheurs, dont la plupart ont rapidement obtenu des responsabilités importantes au sein de la collaboration CMS.

À l'avenir, de nombreuses mesures de processus rares sont envisagées dans les collisions pPb et PbPb, avec les runs 3 et 4 du LHC à haute luminosité, et possiblement au-delà. Dans le secteur des jets, nous suggérons par exemple la mesure de la production associée de photons et de jet de saveurs lourdes, ainsi que l'observation des premiers quarks *top*. En ce qui concerne les quarkonia, nous proposons d'explorer les possibilités de mesures de mésons exotiques comme le  $B_c$  dans les collisions d'ions lourds, tout en poursuivant les analyses de production des trois états de l'upsilon. Ce programme de recherche ambitieux ne serait pas exploité si le groupe n'était *in fine* plus constitué que de ses trois permanents.

## 1. Enjeux scientifiques

Ce projet s'inscrit dans l'étude du **plasma de quarks et de gluons**. L'existence de cet état de la matière fut prédite par la **chromodynamique quantique** dès les années 70 [1]. Il consiste en une libération des quarks et des gluons, habituellement confinés dans les hadrons dans les conditions ordinaires propres à la matière nucléaire. Chauffés ou comprimés de façon extrême, les hadrons sont supposés fondre et former ce plasma de quarks et de gluons. Les températures et les densités d'énergie prédites pour cette transition sont de l'ordre de 175 MeV et 1 GeV/fm<sup>3</sup>, respectivement. Logiquement, l'Univers se trouvait dans un tel état pendant ses premières microsecondes, et il est probable qu'un plasma de quarks et de gluons forme le cœur de certaines étoiles hyperdenses. En laboratoire, il est possible de le recréer et de l'étudier grâce aux **collisions d'ions lourds**.

Lors de ces collisions, le plasma de quarks et gluons peut être créé dans un petit volume (quelques dizaines de fm<sup>3</sup>) et pendant un temps très court (quelques fm/c). Les produits de ces collisions peuvent être modifiés par la présence fugace du plasma, et forment autant de **signatures** prédites par les théoriciens et étudiées par les expérimentateurs.

Les premières collisions d'ions lourds supposées atteindre les conditions susmentionnées ont eu lieu dans les années 1990, à l'*Alternative Gradient Synchrotron* (AGS) de Brookhaven et au *Super Proton Synchrotron* (SPS) du CERN, dans des expériences sur cibles fixes. Au CERN, la collaboration NA50 a observé une suppression anormale des quarkonia  $J/\psi$  et  $\psi'$  qui fut proposée comme une première preuve expérimentale du déconfinement des quarks et des gluons [2]. Le Laboratoire Leprince-Ringuet (LLR) était moteur dans cette expérience : son porte-parole était Louis Kluberg, et un de ses membres, Michel Gonin, a obtenu en 2000 une médaille d'argent du CNRS pour cette découverte.

En 2000 justement, a démarré à Brookhaven un collisionneur dédié à l'étude du plasma de quarks et de gluons, le *Relativistic Heavy Ion Collider* (RHIC). Le passage au mode collisionneur a permis un saut d'un facteur 10 en énergie dans le centre de masse par rapport au SPS. Ses collaborations expérimentales (BRAHMS, PHENIX, PHOBOS, STAR) ont produit une moisson de résultats, mettant en évidence d'autres signatures du plasma de quarks et de gluons, en particulier l'atténuation des gerbes hadroniques (*jet quenching*), et le flot elliptique rappelant l'asymétrie azimutale de la surface de collision (*elliptic flow*). L'observation de plusieurs signatures simultanées a conforté la communauté dans l'existence du plasma de quarks et de gluons, et a permis de commencer à estimer ses propriétés (température, viscosité, densité, etc.). De nombreux articles de revues critiques des résultats de RHIC furent rédigés, en particulier par les auteurs de ces lignes [3]. La surprise que RHIC a apportée réside dans le fait que les quarks et les gluons sont en très forte interaction dans leur plasma (qui ne mérite donc pas son nom).

Plusieurs groupes de l'IN2P3 se sont impliqués dans le programme de physique du RHIC, et celui du LLR fut des plus dynamiques, comme en attestent le nombre de thèses soutenues, les responsabilités confiées, les articles rédigés, les invitations en conférence en particulier pour des revues critiques, etc.

L'occasion suivante et naturelle résidait au *Large Hadron Collider* (LHC) du CERN susceptible d'accueillir et d'accélérer, en plus des protons dédiés à la recherche fructueuse du boson de Higgs et d'éventuelle physique nouvelle, des ions lourds à des énergies 25 fois plus importantes qu'à RHIC. Auprès du LHC, l'expérience ALICE fut conçue pour l'étude du plasma de quarks et de gluons dès les années 90. À côté d'elle, les expériences généralistes ATLAS et CMS se sont avérés avoir des capacités intéressantes

et complémentaires, avec des points forts évidents tels que la couverture angulaire (dictée par la nécessité de mesurer l'énergie transverse manquante), la bande passante d'acquisition (dictée par la nécessité de mesurer des phénomènes rares), et d'excellentes performances de reconstruction (pour les jets et les muons). Les désavantages d'ATLAS et CMS résident dans les capacités très limitées d'identification de particules, et la difficulté de les mesurer à basse impulsion transverse (à cause des champs magnétiques colossaux). La collaboration LHCb n'avait initialement pas de programme d'ions lourds, mais elle en développe actuellement un, sans avoir encore exploité les collisions PbPb les plus centrales. La possibilité d'injecter du gaz au point d'interaction (SMOG) et de revenir ainsi à des collisions sur cibles fixes de plus basse énergie lui est unique.

Depuis 2009, les expériences ALICE, ATLAS et CMS ont produit de nombreux résultats. L'augmentation en luminosité et en énergie a donné accès à de **nouvelles sondes**, en particulier dans CMS : les jets complètement reconstruits, les bosons électrofaibles, les *upsilons*, les quarks *b* (jets ou mésons), et même le quark *top*, tout récemment observé en collisions pPb [4]. Comme nous avons contribué à nombre d'entre elles, nous y reviendrons dans la section 3. La surprise qu'a apporté le LHC réside dans le fait que certaines des manifestations attribuées au plasma de quarks et de gluons ont été observées en collisions proton-noyau, essentiellement les manifestations liées à la physique *soft* : les corrélations elliptiques vues très tôt dans CMS, y compris en collisions proton-proton [5], ou l'augmentation de l'étrangeté vue par ALICE [6], entre autres.

Aujourd'hui, la communauté bénéficie d'énormément de mesures des différentes signatures du plasma de quarks et de gluons, et sa compréhension du comportement de la matière nucléaire dans ces conditions extrêmes évolue rapidement. Les enjeux scientifiques que ces résultats soulèvent sont importants. Ils concernent le secteur du modèle standard le moins bien connu actuellement, le confinement des quarks et des gluons en hadrons leur conférant leur masse (et donc l'essentiel de la masse des atomes), une des transitions de phase du big-bang (même si la quasi-absence de reliques cosmologiques rend les deux disciplines pour l'instant éloignées), l'équation d'état de la matière nucléaire en conditions extrêmes... La complexité des systèmes étudiés rend les interprétations des résultats non triviales et nécessite une partie importante de modélisation de la part de théoriciens en lien avec les résultats expérimentaux.

Pour conclure sur les enjeux scientifiques, mentionnons quelques apports déterminants des résultats du LHC sur notre compréhension de la matière confinée comme déconfinée, sans prétendre à l'exhaustivité. Dans les collisions proton-plomb, les mesures de production de bosons faibles ou de jets ont permis de contraindre assez fortement les distributions partoniques au sein des noyaux (nPDF), qui étaient mal connues avant l'avènement du LHC. De plus, la production de quarkonia et de mésons lourds s'est révélée compatible avec des scénarios de pertes d'énergie cohérentes dans la matière nucléaire et d'interaction inélastique des états excités dans l'état final. Les mesures en collisions plomb-plomb ont quant à elles conduit à une compréhension plus fine du phénomène de *jet quenching*, en particulier grâce à l'étude des jets (par exemple des paires photon-jet ou di-jets), ou encore la sous-structure des jets afin de sonder les effets de cohérence dans le mécanisme des pertes d'énergie. Les données de production de bottomonia (les trois *upsilons* 1S, 2S et 3S) dans les collisions d'ions lourds présentent un schéma simple de fonte séquentielle, ce qui conduit *in fine* à l'étude du potentiel des quarks lourds dans le plasma et à l'établissement d'une sorte de thermomètre. Les mesures de charmonia ( $J/\psi$ ,  $\psi'$ ) se sont révélées plus surprenantes encore et sont actuellement interprétées comme provenant d'une recombinaison statistique, initiant ainsi l'étude de la dynamique des quarks lourds dans le plasma.

## 2. Projet

Notre projet consiste essentiellement à poursuivre l'exploitation des collisions d'ions lourds avec l'expérience CMS. Les montées en luminosité attendues vont permettre des mesures nouvelles, dont certaines sont listées ci-dessous. Le run 1 (2010-12) a permis d'accumuler  $150 \text{ mb}^{-1}$  de collisions PbPb à 2,76 TeV, alors que le run 2 (2015-18) devrait permettre d'approcher  $1 \text{ nb}^{-1}$  de PbPb à 5 TeV. Par ailleurs, la stratégie de CMS a toujours été de réclamer des statistiques équivalentes<sup>1</sup> en collisions pPb, ainsi qu'en collisions pp aux énergies correspondantes.

Au run 3 (2021-23), nous espérons environ<sup>2</sup>  $10 \text{ nb}^{-1}$  de données PbPb soit dix fois plus que ce que nous aurons obtenu à la fin du run 2. Par ailleurs, nous profitons de l'amélioration des performances due aux *upgrades* de phase 1 (nouveau *tracker* et extension des chambres à muons), qui augmentent nos capacités à faire presque toutes nos mesures (muons, jets, déclenchement, etc.).

Sans prétendre à l'exhaustivité, voici une liste de mesures phares que nous aimerions conduire :

- Dans la lignée de nos premiers articles mentionnés ci-dessous (4, 5 et 8), mesurer précisément la dépendance en centralité de la suppression des trois  $Y(nS)$ <sup>3</sup>, une chance unique de s'approcher du scénario idéal de fonte séquentielle, et d'estimer une température du plasma (des théoriciens comme Michael Strickland commencent à l'extraire de nos premières données [7]) ;
- Avec les mêmes données, mesurer pour la première fois le flot elliptique des upsilons et le comparer à celui du  $J/\psi$  (mesuré par ALICE à bas  $p_T$ ) afin de quantifier l'impact de la recombinaison, absente dans le canal  $Y(nS)$ , sur le paramètre de flot elliptique  $v_2$  ;
- Dans la lignée de notre ANR *HotShowers* en cours, mesurer avec une statistique significative la production associée photon+jet, en identifiant la saveur du jet (quark léger, charme ou beauté) ou entre deux jets de quarks b, dans le but de comprendre la dépendance en saveur du *jet quenching* ;
- Mener des recherches exploratoires sur les hadrons exotiques comme le méson  $B_c$  : leur production très défavorisée en collisions pp pourrait être augmentée dramatiquement en collisions PbPb en raison de la recombinaison des quarks lourds issus de collisions nucléon-nucléon indépendantes (gardons en mémoire qu'une collision centrale PbPb produit une centaine de paires  $c\bar{c}$ ), dans des proportions difficiles à prévoir. Il est à noter qu'aucune des expériences du LHC n'est idéale pour une telle mesure (limite en impulsion pour ATLAS et CMS, en luminosité pour ALICE, en centralité pour LHCb) et chacune a sa chance d'apercevoir quelque chose. De notre côté, nous proposons un sujet de stage puis une thèse sur ces aspects. Un signal positif apporterait des informations cruciales sur la dynamique des quarks lourds dans le plasma, ainsi que sur le mécanisme de liaison des quarks dans ces hadrons ;
- Participer aux premières mesures du quark top dont les statistiques resteront faibles, mais dont l'intérêt à long terme nous paraît pertinent pour la contrainte

---

<sup>1</sup> C'est à dire des nombres égaux de collisions élémentaires nucléon-nucléon, donnés par l'équivalence  $1 \text{ pb}^{-1} (\text{pp}) \approx 5 \text{ nb}^{-1} (\text{pPb}) \approx 25 \text{ } \mu\text{b}^{-1} (\text{PbPb})$  en luminosité.

<sup>2</sup> Voir par exemple <https://indico.cern.ch/event/647676/>

<sup>3</sup> Quelques 300, 40 et 7 milliers de  $Y(1S)$ ,  $(2S)$  et  $(3S)$  sont attendus pour  $10 \text{ nb}^{-1}$ .

des distributions de partons nucléaires (collisions proton-plomb, une première observation ayant déjà été réalisée [4]) et la mesure du *quenching* des quarks  $b$  (collisions plomb-plomb).

À plus long terme, l'intérêt de poursuivre lors du run 4 (2026-29, avec une luminosité comparable à celle du run 3) et au-delà (avec des luminosités bien supérieures) est discuté et nous sommes persuadés qu'il y aura des analyses à faire dans CMS, entre autres dans la lignée de celles déjà mentionnées. Citons dans ce contexte que notre laboratoire est à l'avant-garde de l'un des upgrades de phase 2 : un calorimètre de haute granularité vers l'avant, HGCal, dont l'intérêt pour les ions lourds n'a pas encore été précisément évalué, mais devrait permettre, avec les autres upgrades, de mesurer et d'identifier des jets vers l'avant. C'est un sujet que nous aimerions approfondir.

Notre production scientifique sera directement proportionnelle au nombre de membres de l'équipe. L'expérience passée (exposée à la section 3) montre que nous pilotons un article tous les 2,5 homme.an, sans compter des analyses plus collectives. Chaque chercheur que nous accueillons, doctorant, postdoc ou permanent, est ainsi responsable d'au moins une analyse menant à un article, en plus de contributions à de nombreux aspects de l'expérience (déclenchement, performance, management, etc.).

En l'état, après une production scientifique exceptionnelle au run 1 (14 articles de premier plan, voir la section suivante), nous pensons contribuer significativement au run 2 (7 articles envisagés dont 4 déjà publiés ou bien avancés), mais sommes inquiets quant à notre capacité à contribuer au run 3, et au-delà. Cette décroissance est fortement corrélée à celle du personnel. L'essentiel de nos forces est en effet constitué de postdocs (10 dont 2 encore présents) et de thésards (5 dont 2 encore présents) dont les financements proviennent de sources diverses, mais essentiellement tarées à l'horizon du run 3 (voir les détails à la section 5).

### 3. Genèse et calendrier

#### Au commencement...

Courant 2008, après quelques années fructueuses passées à étudier le plasma de quarks et de gluons auprès de l'expérience PHENIX à Brookhaven, les physiciens du groupe du LLR ont réfléchi à leur avenir. À l'approche du démarrage du LHC, **Raphaël Granier de Cassagnac** (initialement accompagné de Frédéric Fleuret) a envisagé de rejoindre une des expériences pouvant produire de la physique des ions lourds. L'expérience CMS offrant des capacités intéressantes et peu exploitées pour la physique des quarkonia<sup>4</sup>, ainsi qu'un groupe fort et historique au LLR, c'est cette voie qui a été privilégiée et présentée à la direction de l'IN2P3. Avec son soutien, cette activité a démarré courant 2009. Elle est passée devant le Conseil scientifique de l'IN2P3 en juillet 2010, et ses conclusions sont recopiées ici.

*« Le CS estime que les motivations scientifiques d'une implication pour l'étude de la physique des ions lourds auprès de CMS sont solides. Le détecteur CMS dispose d'un potentiel d'exploration qui lui est spécifique car en grande partie complémentaire de celui d'ALICE. La petite communauté IN2P3 qui souhaite s'engager, bien que jeune, a montré sa qualité lors de l'exploitation des données de PHENIX. Elle dispose donc d'atouts indéniables pour jouer un rôle moteur dans CMS-HI. Par ailleurs, la collaboration CMS indique maintenant son souhait de développer la composante de physique ions-lourds pour*

---

<sup>4</sup> Ces capacités ont été en grande partie démontrées par un physicien de l'IPN de Lyon, Marc Beddjan, qui est parti à la retraite à peu près quand nous avons rejoint CMS.

## Le plasma de quarks et de gluons dans CMS

*l'instant très minoritaire dans son programme. La matérialisation de cet intérêt devra être encouragée au sein de l'IN2P3 en particulier en favorisant l'interaction du groupe avec la communauté CMS-p-p. Néanmoins, à terme, la viabilité d'un engagement CMS-HI de l'IN2P3 dépendra d'une croissance du personnel permanent impliqué qui, à son niveau actuel, est insuffisant pour une contribution scientifique pérenne. Le CS estime qu'un engagement de l'Institut dans ce domaine devra être associé à une démonstration de l'attractivité de cette thématique au sein de la communauté IN2P3 actuelle. Avec ces réserves, l'avis du CS est que l'IN2P3 devrait soutenir cette intéressante proposition d'implication dans CMS-HI.»*

(<http://www.in2p3.fr/actions/conseilsscientifiques/media/CSjuillet2010.pdf>)

Le projet ne reposant alors que sur un seul physicien, la première étape a consisté à recruter des collaborateurs. Après quelques tentatives infructueuses, cette entreprise a finalement été couronnée de succès, en particulier grâce à l'obtention d'une *consolidating grant* de l'European Research Council (ERC) de 1 133 600 € pour cinq ans (2010-15), dont les objectifs étaient de mesurer les quarkonia et les bosons électrofaibles dans CMS. En trois ans, l'équipe est passée d'un physicien à neuf (deux permanents, trois postdocs, trois thésards, un théoricien associé).

L'IN2P3, suivant les recommandations de son conseil scientifique mentionnées ci-dessus, a pour une seule fois dans son histoire récente de fléchage exclusif, affiché un poste ouvert à un éventuel recrutement pour notre projet : en 2011, un poste CR2 était ouvert pour «la physique des ions lourds au LHC». Le candidat retenu, **Matthew Nguyen**, a soutenu sa thèse à RHIC et il était alors CERN *fellow* sur CMS. Il a naturellement rejoint l'équipe, en apportant une compétence nouvelle sur la physique des jets. Avant de nous rejoindre, Matthew était en effet l'auteur correspondant du premier article, fort retentissant, de CMS sur cette physique [8]. Depuis, il a approfondi cette expertise et obtenu une ANR jeune sur ce thème, *HotShowers*, de 369 952 € pour quatre ans (2017-20). Son objectif est de faire des mesures différentielles avec les jets du run 2 : fragmentation de jets en  $J/\psi$  pour tester l'idée d'une perte d'énergie universelle ne dépendant pas de la nature du hadron observé, et étude de la sous-structure de jets de  $b$  pour tester certains effets de cohérence dans les pertes d'énergie [9]. Ce contrat a permis l'embauche de nos deux dernières recrues, en postdoc et en thèse.

Enfin, le groupe s'est renforcé avec l'arrivée d'un théoricien venant du LAPTh, **François Arleo**, à la fin de l'année 2012. Alors porteur d'une bourse ANR (*PartonProp*) de 281 586 € pour quatre ans (2012-16) à laquelle Raphaël participait également, François a notamment permis l'embauche d'un postdoc sur CMS dont le but était l'étude expérimentale du *jet quenching*, en lien avec les aspects phénoménologiques et théoriques du projet ANR, jetant ainsi un pont entre théorie et expérience.

Au total, **dix postdocs et cinq doctorants** sont passés dans le groupe, la liste exhaustive est donnée à la section 5.

### Production scientifique passée

Nous décrivons ici notre production scientifique dans l'ordre quasi chronologique, en listant les **19 articles** de CMS dans lesquels nos contributions (que nous précisons) ont été fondamentales. Ne sont pas listés les articles que nous avons chapeautés ou revus en tant que *convener* ou membre de comités de revue interne.

En 2009, juste avant que ne démarre la première prise de données, Raphaël (alors *convener* du sous-groupe *dilepton*<sup>5</sup>) a d'abord revu le programme de physique accessible avec les leptons et défini notre stratégie d'analyse et de déclenchement. Notre potentiel, résumé en trois points, consistait en : **a/** CMS a d'excellentes capacités de mesures des muons d'impulsion relativement grande, ce qui en fait la meilleure expérience pour mesurer les trois upsilons 1S, 2S et 3S en collisions d'ions lourds, avec une excellente résolution (50 MeV/c<sup>2</sup> à rapidité centrale). **b/** À cause du champ magnétique colossal, nous ratons les muons et les J/ψ de basse impulsion transverse à mi-rapidité, mais l'expérience ALICE couvre cette zone cinématique, et nous conservons d'excellentes capacités à plus grande impulsion transverse ou rapidité. À notre avantage, notre détecteur de vertex permet de séparer aisément les J/ψ directs de ceux provenant des mésons B, bruit de fond nouveau au LHC qu'il est important de maîtriser et qui contient sa propre physique d'intérêt crucial (la perte d'énergie des quarks b). **c/** Enfin, une première mesure des bosons électrofaibles Z en collision d'ions lourds devait être possible, et nous avons décidé de démarrer par cette analyse relativement simple, et une *première* dans les collisions d'ions lourds.

À l'arrivée des premières données fin 2010, cette publication est effectivement devenue la première de CMS ions lourds à être acceptée :

1. CMS collaboration, *Study of Z boson production in PbPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV*, PRL 106 (2011) 212301, [arXiv:1102.5435](https://arxiv.org/abs/1102.5435), 116 citations. Coordination et rédaction (Raphaël).

Après cet article sur le Z, le management de CMS nous a encouragés à regarder le boson W. Ce n'était pas une priorité du groupe ions lourds, par manque de ressources humaines et d'intérêt, les W étant (un peu) plus difficiles à analyser sans être plus modifiés par le plasma de quarks et de gluons que les Z. Raphaël, alors *convener* de l'ensemble des activités ions lourds de CMS (2010-11), a donc démarché des physiciens hors du groupe et trouvé une physicienne « p+p » disponible pour faire cette analyse. Si elle a conduit toute l'analyse, il l'a aidée sur les aspects spécifiquement « ions lourds » et a rédigé la première version de la publication, aujourd'hui publiée dans Phys. Lett. B. Il s'agit du *premier* article disponible sur les bosons W en collisions d'ions lourds.

2. CMS collaboration, *Study of W boson production in PbPb and pp collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV*, PLB715 (2012) 66, [arXiv:1205.6334](https://arxiv.org/abs/1205.6334), 116 citations. Initiative et rédaction (Raphaël).

En parallèle, un article conséquent sur la production des quarkonia (J/ψ prompt et nonprompt, ainsi que Y(1S)) était piloté par notre postdoc **Torsten Dahms** et publié dans JHEP. Nous y montrons que les J/ψ de haut p<sub>T</sub> sont fortement supprimés, plus qu'à

---

<sup>5</sup> L'activité ions lourds de CMS est divisée en cinq sous-groupes : *dilepton*, *flow*, *forward*, *highpt* et *spectra*, et nous sommes leader historique du groupe *dilepton*, et contributeurs majeurs au groupe *highpt*.

RHIC. À noter que nous y opérons, *pour la première fois* dans des collisions d'ions lourds, la séparation des  $J/\psi$  qui viennent des mésons B et qui nous renseignent sur la physique toute différente du *jet quenching* des saveurs lourdes :

3. CMS collaboration, *Suppression of non-prompt  $J/\psi$ , prompt  $J/\psi$ , and  $Y(1S)$  in PbPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$* , JHEP 1205 (2012) 063, [arXiv:1201.5069](https://arxiv.org/abs/1201.5069), 358 citations. Coordination de l'analyse et *contact*<sup>6</sup> (Torsten et al.).

Nous avons sous-estimé la capacité de CMS à mesurer les états excités de l'upsilon,  $Y(2S)$  et  $Y(3S)$ , dès la première année (et grâce aux données proton-proton de référence à 2,76 TeV prises en mars 2011). Quand les premières distributions de masse invariante furent disponibles, Raphaël a décidé de publier rapidement sur le sujet, sous la forme d'un double rapport des taux de production des états excités,  $Y(2S)$  et  $Y(3S)$ , sur l'état fondamental  $Y(1S)$ , dans les collisions PbPb par rapport aux collisions pp. L'article (qu'il a rédigé) a été soumis pendant la conférence *Quark Matter* (en mai 2011 au terme d'une procédure d'approbation alors record dans CMS) à la revue Phys. Rev. Lett. qui l'a rapidement accepté et y a consacré un « synopsis ». Avec la seconde prise de données fin 2011, cette analyse a été refaite et raffinée sur une luminosité intégrée vingt fois supérieure, et publiée à nouveau dans Phys. Rev. Lett. :

4. CMS collaboration, *Indications of Suppression of Upsilon excited states in PbPb collisions at a nucleon-nucleon centre-of-mass energy of 2.76 TeV*, PRL 107 (2011) 052302, [arXiv:1105.4894](https://arxiv.org/abs/1105.4894), 208 citations. Initiative, coordination, rédaction, *contact* (Raphaël).
5. CMS collaboration, *Observation of sequential Upsilon suppression in PbPb collisions*, PRL 109 (2012) 222301, [arXiv:1208.2826](https://arxiv.org/abs/1208.2826), 264 citations. Rôle inspirateur et consultatif (Raphaël, Torsten).

Avec le second lot de données acquis fin 2011, nous avons également commencé à faire la physique du charmonium excité  $\psi'$  que nous avons vu plus supprimé que le  $J/\psi$  à grand  $p_T$ . Un *indice* (statistiquement peu significatif) qu'il pourrait être moins (!) supprimé à petit  $p_T$  a suscité un certain émoi dans la communauté. Torsten et Raphaël ont travaillé essentiellement seuls sur ce sujet. Torsten a présenté ces résultats plusieurs fois, en particulier en session plénière de la conférence *Hard Probes 2012*. Finaliser la publication fut sa dernière activité dans l'expérience CMS, et l'article a été accepté par Phys. Rev. Lett.

6. CMS collaboration, *Measurement of prompt  $\psi(2S)$  to  $J/\psi$  yield ratios in PbPb and pp collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$* , PRL 113 (2014) 262301, [arxiv:1410.1804](https://arxiv.org/abs/1410.1804), 47 citations. Note d'analyse à trois auteurs, *contact* (Torsten).

Les données de 2011 furent également l'occasion de répéter l'analyse des  $J/\psi$  avec vingt fois plus de statistique que dans l'article 3 ci-dessus, et de l'étendre à une nouvelle observable : l'anisotropie azimutale que nous mesurons significative. Notre postdoc

---

<sup>6</sup> Dans CMS, le *contact* d'une analyse coordonne le travail et s'assure de son approbation, depuis la pré-approbation par les *conveners*, jusqu'aux réponses au *referees* du journal, en passant par une interaction poussée avec le comité de revue interne. Dans la plupart des cas, en particulier dans le groupe ions lourds, il est le principal contributeur à l'analyse (il est parfois même seul) et il rédige tous les documents, en particulier l'article.



**Camelia Mironov** a coordonné ce travail important, a présenté l'ensemble des résultats sur les quarkonia en session plénière à la conférence *Quark Matter 2012* et a finalisé, avec notre autre postdoc **Mihee Jo**, une publication testamentaire (un « legacy paper » comme on dit) sur les  $J/\psi$  qui contient la version ultime des résultats du run 1 :

7. CMS collaboration, *Suppression and azimuthal anisotropy of prompt and nonprompt  $J/\psi$  production in PbPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV*, EPJC77 (2017) 252, [arxiv:1610.00613](https://arxiv.org/abs/1610.00613), 21 citations. Coordination, *contact* (Camelia, Mihee).

La même approche a été appliquée aux  $Y(nS)$  et l'analyse finale a formé le cœur de la thèse de **Nicolas Filipovic**. L'inclusion de données pp précises a permis d'étendre la mesure à la dépendance de la suppression en fonction de la cinématique de l'upsilon, rapidité et impulsion transverse. Le fait que la suppression ne dépende pas de la cinématique renforce l'hypothèse d'une suppression séquentielle simple. Nicolas a soutenu sa thèse en 2015 et ses résultats sont publiés :

8. CMS collaboration, *Suppression of  $Y(1S)$ ,  $Y(2S)$ , and  $Y(3S)$  production in PbPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV*, PLB 770 (2017) 357, [arxiv:1611.01510](https://arxiv.org/abs/1611.01510), 26 citations. Analyse, *contact* (Nicolas).

Une autre postdoc, **Lamia Benhabib** a quant à elle répété l'analyse des bosons  $Z$ , l'étendant au canal diélectron, une des tâches que nous nous étions promis d'accomplir dans le cadre de l'ERC :

9. CMS collaboration, *Study of  $Z$  production in PbPb and pp collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV in the dimuon and dielectron decay channels*, JHEP03 (2015) 022, [arxiv:1410.4825](https://arxiv.org/abs/1410.4825), 38 citations. Note d'analyse à quatre auteurs, *contact* (Lamia).

En parallèle de nos analyses « leptoniques », nous avons développé autour de Matthew Nguyen une activité sur les jets. Il a en particulier conduit la première extraction des jets issus des quarks de  $b$ . Ce travail, conduit en toute indépendance a reçu un excellent accueil (un des prix de la meilleure présentation parallèle à *Quark Matter 2012*) et a été accepté pour publication par Phys. Rev. Lett. qui l'a sélectionné pour un *viewpoint*. L'analyse montre que les jets de  $b$  sont autant supprimés que les jets inclusifs, ce qui n'était pas forcément attendu.

10. CMS collaboration, *Evidence of  $b$ -jet quenching in PbPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV*, PRL 113 (2014) 132301, [arxiv:1312.4198](https://arxiv.org/abs/1312.4198), 87 citations. Analyse, *contact* (Matthew).

Avant de passer aux données pPb et au run 2, jetons un œil sur les figures suivantes, un résumé des facteurs de modification nucléaire présentés par CMS à la conférence *Quark Matter 2012* à Washington. Nos contributions à ces résultats sont majeures : seuls les photons, les particules chargées et les jets inclusifs ne sont pas notre fait. Notre production nous a valu deux présentations plénières à cette conférence (Raphaël et Camelia). Rétrospectivement, nous sommes fiers d'avoir accompli ces cinq « premières » en collisions d'ions lourds : mesures des  $Z$ , des  $W$ , des  $J/\psi$  déplacés, des états excités de l'*upsilon*, et des jets de quark  $b$ .

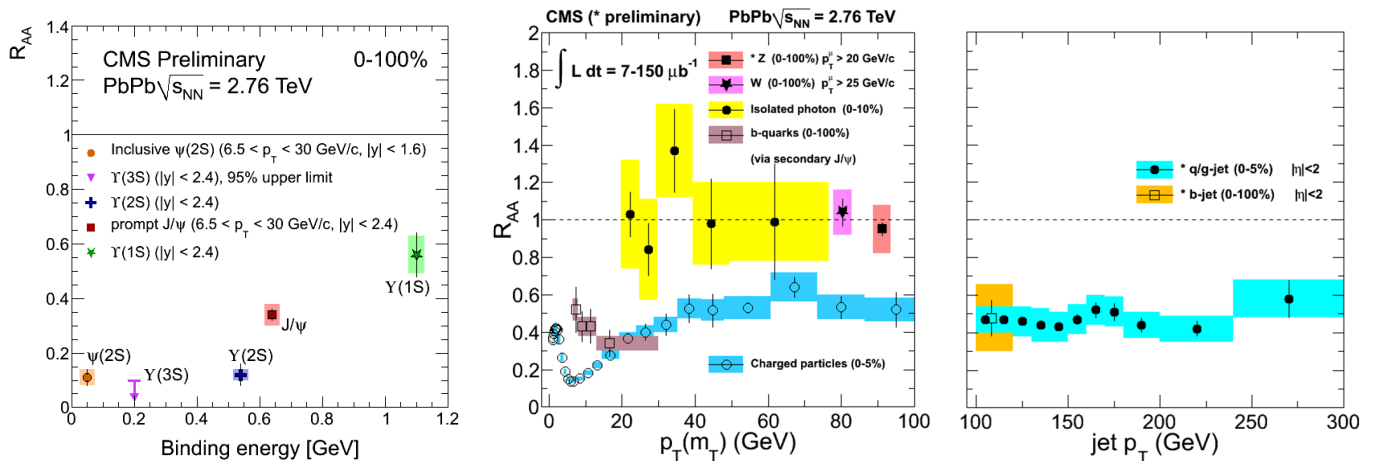


Figure 1 : Résumé des facteurs de modification nucléaire mesurés dans l'expérience CMS, présentés à Quark Matter 2012.

### Quelques analyses en données pPb

Toute analyse des collisions noyau-noyau doit s'accompagner de mesures similaires sur des noyaux légers pour estimer les effets nucléaires ordinaires. Au LHC, des collisions pPb ont été prises à cet effet, et nous avons contribué, dans le droit fil de nos analyses PbPb, aux publications suivantes :

Mesures des *upsilons* en pPb, dans la lignée des publications [4] et [5] et mise en évidence d'un effet (potentiellement trivial) en fonction de l'activité dans les collisions pPb, mais aussi pp :

11. CMS collaboration, *Event activity dependence of Y (nS) production in  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV pPb and  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV pp collisions*, JHEP04 (2014) 103, [arXiv:1312.6300](https://arxiv.org/abs/1312.6300), 88 citations. Coordination et contact (Camelia).

Parmi les mesures possibles en collisions pPb, nous avons identifié que le boson *W* était particulièrement intéressant pour contraindre fortement les distributions de partons nucléaires (nPDF). La statistique 10 fois plus grande que celle du *Z*, les deux états de charge permettant de différencier quarks *up* et *down*, et l'asymétrie de la collision pPb par rapport à PbPb sont autant d'avantages pour contraindre les nPDF. Après avoir qualifié la mesure d'énergie transverse manquante sur les données PbPb (un environnement plus difficile que les collisions pPb), notre thésarde **Alice Florent** s'est investie dans cette analyse qu'elle a conduite pour le canal muon, et coordonnée dans son ensemble, aboutissant à la publication suivante. À noter qu'elle y constate une déviation de l'asymétrie de charge qui pourrait être attribuée à une modification différente des quarks *up* et *down*, un effet qui n'était pas pris en compte dans certaines PDF nucléaires, mais l'est aujourd'hui :

12. CMS collaboration, *Study of W boson production in pPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV*, PLB750 (2015) 565, [arxiv:1503.05825](https://arxiv.org/abs/1503.05825), 47 citations. Analyse muons, coordination, contact (Alice).

Du côté des jets, deux analyses sont à porter à notre crédit. La première correspond à la publication 10 ci-dessus, et montre que les jets de quark *b* ne sont pas modifiés.

13. CMS collaboration, *Transverse momentum spectra of b jets in pPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV*, PLB 754 (2016) 59, [arxiv:1510.03373](https://arxiv.org/abs/1510.03373), 32 citations. Rôle inspirateur et consultatif (Matthew).

La seconde est une mesure des paires de jets, dont le décalage en rapidité est une contrainte forte sur les PDF nucléaires de gluons. Notre postdoc **Yetkin Yilmaz** a eu des contributions majeures à cette analyse, en même temps qu'il dirigeait le sous-groupe *highpt*.

14. CMS collaboration, *Studies of dijet transverse momentum balance and pseudorapidity distributions in pPb collisions  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV*, EPJC 74 (2014) 2951, [arxiv:1401.4433](https://arxiv.org/abs/1401.4433), 89 citations. Contributions majeures (Yetkin).

Nos résultats sur la production de dijets (réf. 14) et de W (réf. 12) sont utilisés dans les analyses les plus récentes de PDF nucléaires, comme EPPS16 [10] qui fait partie des sets de nPDF les plus utilisés par la communauté et la seule à présent à avoir utilisé les données du LHC.

## Quelques analyses du run 2

Après quelques années sans données (mais pas sans analyses), nous avons repris fin 2015 avec le run 2, à une énergie accrue. Notre ERC étant terminée, la voilure de notre groupe s'est trouvée réduite et nous avons dû définir des priorités dans nos analyses.

Côté quarkonia, nous nous sommes focalisés sur les charmonia dans l'idée d'élucider l'indice vu sur le  $\psi'$  (article 6), laissant les bottomonia à d'autres<sup>7</sup>. Deux articles sont sortis de cette étude, un premier rapide sur les rapports  $\psi'/\psi$  mené par notre postdoc **Émilien Chapon**, un deuxième plus détaillé sur les rapports de modification nucléaire des deux mésons, mené par son successeur, **Javier Martin Blanco**. De manière intéressante, le double rapport  $\psi'/\psi$  se révèle plus petit que l'unité dans tout l'espace des phases exploré. Autrement dit, le phénomène mesuré dans le papier 6 n'est pas observé à cette énergie plus haute, ce qui permettra *in fine* de contraindre les modèles de recombinaison des quarks lourds dans le plasma et l'existence d'une possible recombinaison séquentielle [11]. Par ailleurs, la mesure du facteur de modification nucléaire des  $J/\psi$  a été étendue à une gamme en impulsion transverse encore jamais atteinte, jusqu'à environ 40 GeV/c. Ces résultats permettent ainsi de sonder pour la première fois les effets de pertes d'énergie dans le canal du  $J/\psi$ .

15. CMS collaboration, *Relative modification of prompt  $\psi$  ( $2S$ ) and  $J/\psi$  yields from pp to PbPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV*, PRL 118 (2017) 162301, [arxiv:1611.01438](https://arxiv.org/abs/1611.01438), 16 citations. Coordination, analyse, contact (Émilien).
16. CMS collaboration, *Measurement of prompt and nonprompt charmonium suppression in PbPb collisions at 5.02 TeV*, submitted to EPJC, [arxiv:1712.08959](https://arxiv.org/abs/1712.08959). Coordination, analyse, contact (Javier).

---

<sup>7</sup> Il est à noter que, bien que l'analyse des charmonia soit plus complexe (séparation des non-prompts, plus basse impulsion des muons, plus grand bruit de fond, etc.), nos deux articles sont sortis avant les articles correspondants pour les bottomonia, ce qui ne montre rien d'autre que la petite taille du groupe *dilepton* de CMS.

Côté jets, nous avons réalisé une mesure de l'impulsion en asymétrie des paires de jets de quark  $b$ , ce qui nous permet d'éliminer le bruit de fond issu de la fragmentation de gluons. Cette analyse fut le cœur de la thèse de **Stanislav Lisniak**, et l'article est sur le point d'être soumis :

17. CMS collaboration, *Transverse momentum balance of  $b$ -jet pairs in PbPb collisions at 5 TeV*, PAS HIN-16-005 <http://cds.cern.ch/record/2202805> (préliminaires), soumission imminente. Initiative, analyse, *contact* (Stanislav, Matthew).

Enfin, nous sommes en train de finaliser l'analyse des bosons  $W$  en collisions pPb à 8 TeV dans l'idée d'approfondir la compréhension de la déviation de l'asymétrie de charge (réf. 12). À noter que contrairement au run 1, le mode en électron n'est pas inclus dans cette analyse, et que les bosons  $Z$  ne sont pour l'instant pas analysés, le groupe dilepton étant sous-critique... Notre thésard **André Ståhl** conduit cette analyse.

18. CMS collaboration, *Study of  $W$  boson production in pPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 8$  TeV*, analyse en cours, préapprobation imminente, *contact* (André).

Deux autres analyses sont encore en cours :

- Mesure de la fragmentation des jets en  $J/\psi$ , par notre nouvelle thésarde, **Batoul Diab**, et nouvelle postdoc, **Inna Kucher** ;
- Mesure de la modification du  $\psi'$  en collisions pPb, par nos collègues indiens et en particulier notre ancien postdoc, **Abulla Abdulsalam**.

#### Un théoricien dans l'équipe

La synergie entre expérience et théorie nous paraît essentielle, dans le but d'interpréter les résultats du LHC (et de CMS en particulier) et d'envisager de nouvelles mesures.

François Arleo a le statut de théoricien associé à CMS, ce qui lui permet de contribuer ponctuellement à des analyses et signer les publications correspondantes, sans prendre de shift ni coûter de frais de maintenance et d'opération. Il a aujourd'hui significativement contribué à quatre articles de CMS : les références 8, 12 et 15 ci-dessus, ainsi qu'à un article auquel les autres membres du groupe n'ont pas directement participé :

19. CMS collaboration, *Measurement of prompt and nonprompt  $J/\psi$  production in pp and pPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV*, EPJC 77 (2017) 269, [arxiv:1702.01462](https://arxiv.org/abs/1702.01462), 8 citations. Édition (François).

Par ailleurs, certains de ses articles théoriques résonnent fortement avec les travaux expérimentaux du groupe :

20. F. Arleo, S. Peigné, *Heavy-quarkonium suppression in pA collisions from parton energy loss in cold QCD matter*, JHEP 03 (2013) 122, [arxiv:1212.0434](https://arxiv.org/abs/1212.0434), 148 citations. Cet article a mis en évidence un nouvel effet de pertes d'énergie et propose des prédictions de la suppression de quarkonia dans les collisions pPb du LHC, en accord avec les mesures effectuées entre temps.
21. F. Arleo, É. Chapon, H. Paukkunen, *Scaling properties of inclusive  $W^\pm$  production at hadron colliders*, EPJC76 (2016) 214, [arxiv:1509.03993](https://arxiv.org/abs/1509.03993), 6 citations. Cet article

## Le plasma de quarks et de gluons dans CMS

écrit avec un postdoc du groupe est une conséquence directe de notre mesure de la production de  $W$  dans les collisions pPb, la thèse d'Alice (réf. 12).

22. F. Arleo, S. Peigné, *Disentangling Shadowing from Coherent Energy Loss using the Drell-Yan Process*, PRD95 (2017) 011502, [arXiv:1512.01794](https://arxiv.org/abs/1512.01794), 9 citations. Cet article propose la mesure de paires de Drell-Yan dans les collisions pPb, ce qui a conduit à une analyse en cours au sein de CMS et de LHCb.
23. F. Arleo, *Quenching of Hadron Spectra in Heavy Ion Collisions at the LHC*, PRL 119 (2017) 062302, [arXiv:1703.10852](https://arxiv.org/abs/1703.10852), 3 citations. Cet article est directement inspiré des mesures de production de hadrons au sein de CMS. Il propose également de nouvelles méthodes pour extraire les paramètres du plasma à partir de futures données au run 3.

Au-delà des articles susmentionnés, notre rayonnement scientifique peut se mesurer à l'aune des présentations que nous avons été invités à donner en conférence et des responsabilités qui nous sont confiées dans la collaboration.

### Présentations en conférence

Tous les membres du groupe, thésards, postdocs ou permanents sont invités à présenter leurs travaux en conférence internationale typiquement une fois par an.

Nous sommes par ailleurs particulièrement fiers d'avoir honoré les invitations à parler **en séance plénière** dans les conférences majeures suivantes, une visibilité qui est certes favorisée par la taille restreinte de la communauté des ions lourds dans CMS, mais qui nous paraît néanmoins unique en France (les présentations avec une étoile ne sont pas au nom de CMS) :

- **Quark Matter** : 2015 (Matthew\*), 2014 (Raphaël), 2012 (Raphaël & Camelia), 2011 (François\* & Bolek, le premier n'étant pas encore dans le groupe, le second y étant pour une année sabbatique) ;
- **EPS-HEP** : 2017 (Matthew\*), 2015 (Raphaël\*) ;
- **Strange Quark Matter** : 2013 (Raphaël\*) ;
- **Hard probes** : 2016 (François\* & Matthew\* pour un cours introductif), 2012 (Torsten).

### Responsabilités dans la collaboration

Matthew (2014-15) et Raphaël (2010-11) ont été coresponsables (*convener*) de toutes les activités ions lourds de l'expérience. Notre postdoc Camelia (2017-18) l'est devenue juste après avoir quitté le groupe, et d'autres pourraient suivre...

Nos postdocs ont été responsables de deux des cinq sous-groupes : *highpt* (Yetkin) et *dilepton* (Torsten et Camelia), en notant pour ce dernier que tous les responsables depuis le début de l'activité sont passés par notre laboratoire.

Nous assumons par ailleurs des responsabilités plus techniques : coordinateur du software pour les ions lourds (Matthew), responsable de la centralité (Javier), ainsi que d'autres par le passé (performance et déclenchement pour les muons ou les jets).

Par ailleurs, nous avons aussi des responsabilités plus transverses : Raphaël est membre des trois comités de publications (ions lourds), de carrières, et international de CMS, et Matthew est responsable national pour le calcul dans CMS.

En conclusion, et puisque le modèle de ce document nous invite à mentionner les éventuelles revues de notre activité, citons ici les conclusions du comité AÉRES du LLR en 2013, dans lesquelles nous nous reconnaissons :

*The LLR team is the most important European group (both quantitatively and qualitatively) carrying out the heavy-ions (HI) physics programme of the CMS experiment at CERN. Such leadership position is exemplified by the various CMS management roles taken by different members of the group during the last four years: two HI-Physics convenerships, plus various subgroups coordinators (dileptons, HI software, muon reconstruction). The work of the experimental team has strategically focused on interesting perturbative probes of the Quark-Gluon-Plasma (Upsilon states, W/Z bosons, and b-jets), which were for the first time accessible to measurement in heavy-ion collisions at the LHC. The research choice and expertise of the group has paid off with a number of interesting observations (e.g. Upsilon family suppression) resulting in highly cited publications.*

*The reputation and appeal of the group is very high as illustrated by the ERC starting grant achieved by the group leader in 2010, as well as by the additional three Marie-Curie postdoctoral fellowships attracted to the group. Two of the group researchers have also been (or are currently) conveners of the CMS-HI physics group, which guarantees an excellent visibility within the CMS experiment as well as within the international heavy-ion physics community at large.*

### 4. État de l'art, concurrence

La concurrence au sein de CMS est presque nulle. La communauté des membres de CMS qui étudient les collisions d'ions lourds, une soixantaine de physiciens, est suffisamment restreinte pour que chacun y trouve sa place, pour ne pas dire un boulevard !

Nous collaborons de longue date à l'étude de la physique des jets avec, entre autres, nos collègues du MIT (USA) et une compétition cordiale existe. Toutefois, Matthew a développé une expertise unique dans l'étiquetage des quarks  $b$  dans l'environnement des collisions d'ions lourds. Ce savoir-faire lui donne une visibilité importante, comme en témoignent par exemple les cours qu'il a donnés à la conférence *Hard Probes 2016*, qui rejailit sur le groupe dans son ensemble. De plus, l'augmentation de la luminosité auprès des runs 3 et 4 va permettre de sonder des processus plus rares, comme les productions associées de photons et de jets de saveurs lourdes, proposées par François dans deux articles [12] et pour laquelle l'expertise de Matthew sera idéale.

L'absence de compétition est encore plus flagrante en ce qui concerne les muons, pour lesquels les trois groupes impliqués à nos côtés (Korea University, BARC en Inde et UC Davis) n'ont pas assumé de *leadership*. Tenons en pour preuve que tous les conveners du groupe *dilepton* sont passés par notre laboratoire (Raphaël, Catherine Silvestre, Torsten, Lamia, Camelia, Émilien...) et ont occupé leur responsabilité pendant ou juste après leur passage chez nous (physiquement au CERN, en *fellow* ou autre).

Dans le même temps, il est à noter que la contribution des laboratoires basés aux États-Unis — qui a longtemps été au premier plan de l'activité de CMS dans les collisions ions lourds — diminue sensiblement, en raison de l'implication grandissante sur le projet sPHENIX auprès de l'accélérateur RHIC de Brookhaven, et de la politique budgétaire américaine actuelle.

Pour l'avoir vécu, il nous semble ainsi que réussir à « faire son trou » dans la communauté ions lourds de CMS est facile, et que toute nouvelle personne qui s'y intéresserait y arriverait sans aucune difficulté et deviendrait rapidement un expert doublé d'un leader, avec une production scientifique et une visibilité facilitées.

## Le plasma de quarks et de gluons dans CMS

La concurrence entre collaborations du LHC est bien sûr importante, mais leurs capacités de mesure extrêmement complémentaires, nous l'avons déjà mentionné à la section 1. Notre compétiteur immédiat est bien sûr ATLAS, dont les capacités sont proches de celle de CMS, mais dont la communauté des ions lourds est encore plus petite que la nôtre. Par ailleurs, CMS possède un véritable avantage sur la mesure des muons qui s'est avéré crucial pour les études des quarkonia, peu ou pas réalisées dans ATLAS.

Notre positionnement pour l'avenir est de miser tout sur l'augmentation de luminosité pour aller chercher les processus les plus rares, et il nous semble que notre expérience est bien placée pour cela.

Par ailleurs, mentionnons ici que Raphaël porte un projet pour renforcer la collaboration entre expériences du LHC sur la physique des ions lourds, qui sera incluse dans la future proposition de structuration de la communauté hadronique pilotée par Barbara Erazmus (INFRAIA-01-2018-2019). Ce projet, baptisé HonexComb et en cours de rédaction, est soutenu par une trentaine de physiciens européens impliqués dans les quatre expériences et reçoit un accueil très favorable.

### 5. Ressources et moyens

#### Ressources humaines

Le LLR est aujourd'hui le seul laboratoire de l'IN2P3 impliqué dans le programme d'ions lourds de CMS. Il est à noter que, avant 2010, des études préparatoires ont été effectuées à l'IPN de Lyon par Marc Bedjidian, aujourd'hui à la retraite. Notre équipe a évidemment bénéficié de l'excellente insertion de l'IN2P3 dans l'expérience CMS avec ses groupes à l'IPHC, à l'IPNL et surtout au LLR, sans oublier le groupe du Service de physique des particules du CEA.

Nous sommes heureux de compter dans notre équipe (ou d'avoir compté pour ceux entre parenthèses) :

#### Trois permanents

- **Raphaël Granier de Cassagnac**, DR2 CNRS, dans CMS depuis 2009, porteur de l'ERC *QuarkGluonPlasmaCMS* (2010-15), HDR (2014), à 75 % depuis 2016 ;
- **Matthew Nguyen**, CRCN CNRS depuis octobre 2011, porteur de l'ANR *HotShowers* (2017-20), HDR (26/01/2018), à 100 % ;
- **François Arleo**, CRCN CNRS, théoricien associé à CMS, au LLR depuis fin 2012, porteur d'une ANR *PartonProp* (2012-16), HDR (12/02/2018), peut être considéré comme étant à 25 % sur CMS ;

#### Dix postdocs (tous à 100 % CMS)

- **Inna Kucher**, financée par l'ANR *HotShowers*, arrivée en octobre 2017 ;
- **Javier Martin Blanco**, financé par l'IN2P3 pour 3 ans, arrivé en décembre 2015 ;
- **(Mihee Jo)**, d'abord financée par le LIA FKPPL, a obtenu une bourse Marie Curie, terminée à l'été 2017, aujourd'hui dans le privé ;
- **(Abdulla Abulsalam)**, financé pour 1 an par l'École polytechnique, prolongé pour 6 mois grâce à l'action prestige France, parti en 2017 pour un poste de professeur assistant en Arabie Saoudite ;
- **(Yetkin Yilmaz)**, d'abord financé par l'ANR *PartonProp*, a obtenu une bourse Marie Curie, terminée en 2016, aujourd'hui en postdoc au LAL ;
- **(Émilien Chapon)**, financé par l'ERC (dernier recrutement) pour 2 ans, puis 1 an par le laboratoire, de septembre 2013 à décembre 2016, aujourd'hui *fellow* au CERN ;

## Le plasma de quarks et de gluons dans CMS

- **(Torsten Dahms)**, financé par l'ERC pour 3 ans, de 2011 à 2013, aujourd'hui *junior research group leader* sur l'expérience ALICE à Munich ;
- **(Camelia Mironov)**, a obtenu une bourse Marie Curie, arrivée pour 2 ans en 2010, prolongée pour 1,5 an sur l'ERC, aujourd'hui *senior postdoc associate* au MIT et *convener* ions lourds CMS ;
- **(Lamia Benhabib)**, financée par l'IN2P3 pour 3 ans, prolongée de six mois sur l'ERC, de 2010 à 2013, puis *fellow* au CERN, aujourd'hui dans le privé ;
- **(Sarah Porteboeuf)**, phénoménologue d'origine, financée sur contrat européen (réseau retequarkonii), arrivée pour un an en octobre 2009, embauchée comme maître de conférences sur l'expérience ALICE à Clermont-Ferrand ;

### Cinq doctorants (tous à 100 % CMS)

- **Batoul Diab**, financée par l'ANR HotShowers, dir. Matthew, 2017-20 ;
- **André Ståhl**, financé par l'école doctorale PHENIICS, dir. Raphaël, 2015-18 ;
- **(Stanislas Lisniak)**, financé par le LabEx P2IO, dir. Matthew, 2013-16, dans le privé ;
- **(Nicolas Filipovic)**, financé par l'ERC, dir. Raphaël, 2012-15, en postdoc puis dans le privé ;
- **(Alice Florent)**, financé par l'ERC, dir. Raphaël, 2011-14, en postdoc ;
- Auxquels s'ajoutera un **probable thésard normalien**, pour une thèse théorique et expérimentale, dir. François et Raphaël, 2018-21 ;

### Autres

- **(Bolek Wyslouch)**, professeur du MIT et artisan au niveau international du programme d'ions lourds de CMS, a passé une année sabbatique à l'École polytechnique de juin 2010 à août 2011 ;
- Auxquels s'ajoutent une vingtaine de stagiaires de tous horizons.

L'évolution de ce personnel au fil des ans est portée sur le graphe suivant. La fin de l'ERC (2015 avec reliquat sur 2016) s'est traduite par une baisse qui aurait été catastrophique si Matthew n'avait obtenu un contrat ANR, permettant de maintenir une activité décente sur les jets jusqu'à 2020. L'activité *dilepton* initiée avec l'ERC mourra quant à elle fin 2018, avec le départ de Javier et d'André, à moins d'un miracle.

Il nous paraît illusoire de penser obtenir de nouveaux financements de type ANR ou ERC, plus adaptés à démarrer une activité qu'à la continuer. Nous avons néanmoins essayé (*advanced grant* pour Raphaël classée dans la première moitié, et *starting grant* pour Matthew, auditionné, lui valant une rallonge de financement à l'ANR).





### Ressources financières

En soi, notre implication ne coûte rien de plus que notre participation à CMS, soit notre coût individuel en maintenance et en opération (M&O), et nos frais de mission.

Aucune contribution technique spécifique n'est demandée pour les ions lourds, mais nous profitons naturellement des jouvences des détecteurs pour la physique proton-proton.

### 6. Réalisations techniques

Aucune réalisation technique spécifique n'est envisagée. Idéalement, nous aimerions nous impliquer dans les *upgrades* pour anticiper les mesures du futur, en particulier au côté de nos collègues du LLR sur HGCal. Un volet de la proposition à l'ERC de Matthew portait sur ce sujet, mais fut naturellement la partie sacrifiée sur l'autel de l'enveloppe réduite de l'ANR. Son but est d'étendre la couverture aux jets vers l'avant, où une plus grande proportion de jets issus de quarks contribuera à distinguer leur perte d'énergie de celle des gluons. Le développement de méthode de soustraction de l'événement sous-jacent en collisions d'ions lourds sera nécessaire, et l'avantage d'un calorimètre de haute granularité indéniable. L'association de HGCal au nouveau *tracker* (dont la couverture sera étendue jusqu'à des pseudo-rapidités de 4) permettrait de mesurer des jets avec précision dans une zone qui n'a jamais été explorée en collisions d'ions lourds.

Étant donné le manque de personnel, la disponibilité de données bien réelles, les besoins urgents en analyse, et le fait que l'ajout d'un sujet de physique spécifiquement « ions lourds » ne se trouve pas sur le chemin critique des *upgrades*, nous avons remis à plus tard ce type d'activités.

### 7. Auto-analyse SWOT / AFOM

#### Atouts (Strength)

- Expertises internationalement reconnues (quarkonia, jets...);
- Attractivité envers les étudiants et postdocs (Marie Curie...);
- Interface avec la théorie, présence d'un théoricien associé;

#### Faiblesses (Weaknesses)

- Rapport permanents / non-permanents;
- Manque d'implication dans les *upgrades*;

#### Opportunités (Opportunities)

- Haute luminosité du run 3, et au-delà;
- Excellentes performances du détecteur CMS;
- Dynamisme d'une petite communauté (responsabilités...);

#### Menaces (Threats)

- Tariessement des sources de financement;
- Rapport de forces entre expériences.

## Références

---

- 1 - G.F. Chapline, M.H. Johnson, E. Teller and M.S. Weiss, *Highly excited nuclear matter*, PRD8 (1973) 4302 ; J.C. Collins, M.J. Perry, *Superdense Matter: Neutrons or Asymptotically Free Quarks?*, PRL 34 (1975) 1353 ; E.V. Shuryak, *Quark-Gluon Plasma and hadronic production of leptons, photons and psions*, PLB 78, (1978) 150.
- 2 - NA50 Collaboration, *Evidence for deconfinement of quarks and gluons from the J / psi suppression pattern measured in Pb + Pb collisions at the CERN SPS*, PLB477 (2000) 28.
- 3 - Voir par exemple : R. Granier de Cassagnac, *What's the Matter at RHIC ?*, Int. J. Mod. Phys. A22 (2007) 6043.
- 4 - CMS Collaboration, *Observation of top quark production in proton-nucleus collisions*, PRL 119 (2017) 242001.
- 5 - CMS Collaboration, *Observation of Long-Range Near-Side Angular Correlations in Proton-Proton Collisions at the LHC*, JHEP 09 (2010) 091.
- 6 - ALICE Collaboration, *Enhanced production of multi-strange hadrons in high-multiplicity proton-proton collisions*, Nature Physics 13 (2017) 535.
- 7 - B. Krouppa, M. Strickland, *Predictions for bottomonia suppression in 5.02 TeV Pb-Pb collisions*, Universe (2016), 2(3), 16.
- 8 - CMS Collaboration, *Observation and studies of jet quenching in PbPb collisions at nucleon-nucleon center-of-mass energy = 2.76 TeV*, PRC 84 (2011) 024906, contact = M. Nguyen, 608 citations.
- 9 - J. Casalderrey-Solana, Y. Mehtar-Tani, C. A. Salgado and K. Tywoniuk, *New picture of jet quenching dictated by color coherence*, PLB725 (2013) 357-360.
- 10 - K. J. Eskola, P. Paakkinen, H. Paukkunen, C.A. Salgado, *EPPS16: Nuclear parton distributions with LHC data*, EPJC 77 (2017) 163
- 11 - X. Du and R. Rapp, *Sequential regeneration of charmonia in heavy-ion collisions*, NPA 943 (2015) 147
- 12 - T. Stavreva et al., *Probing gluon and heavy-quark nuclear PDFs with gamma+Q production in pA collisions*, JHEP 01 (2011) 152 ; T. Stavreva, F. Arleo, I. Schienbein, *Prompt photon in association with a heavy-quark jet in PbPb collisions at the LHC*, JHEP 02 (2013) 072.