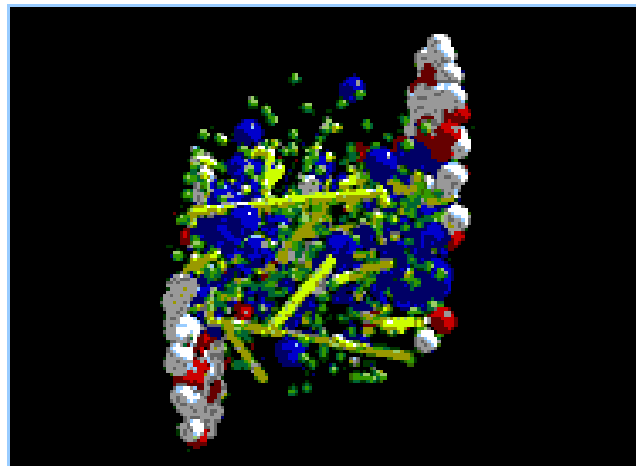


MAIRE Antonin
Promotion 2007

Mémoire de Stage de 1^{ère} année
Diplôme d'Ingénieur de l'E.N.S.P.S.

PLASMA de QUARKS et de GLUONS
et
HYDRODYNAMIQUE



Encadrant : Jérôme BAUDOT
- *Laboratoire IreS, Groupe ALICE / STAR*

septembre 2005

Étude d'un modèle Hydrodynamique

pour un Plasma de Quarks et de Gluons

Version 1.1
7th October 2005

Antonin MAIRE

Résumé

Le rapport présente l'étude d'un modèle d'hydrodynamique relativiste idéale, dans le cadre de recherches liées au concept de plasma de quarks et de gluons.

Il tente de trouver une approche en couches successives, allant du général au particulier, le but étant de faire cerner au mieux l'environnement de recherche côtoyé pendant la période de stage: de l'organisme d'accueil qu'est l'IReS au groupe ALICE/STAR qui a été intégré, de la physique du Modèle Standard à la physique du plasma de quarks et de gluons, des défis et enjeux actuels liés à ce plasma au travail particulier qui a été réalisé.

Abstract

This report presents the study of a modelling of relativistic ideal hydrodynamics, within the framework of research relating to the concept of quark-gluon plasma.

It tries to define the issue with successive layers, which go from the general to the particular, aiming at best describing the daily research environment: from the reception establishment to the group ALICE/STAR that was joined, from Standard Model physics to quark-matter physics, from the current stakes and challenges connected with this plasma to the particular work that was made.

Remerciements

Je voudrais ici remercier sincèrement celles et ceux qui m'ont entouré durant la période de stage. Je tiens particulièrement à remercier Jeff Speltz et Alexandre Shabetai, pour m'avoir aiguillé sous Linux et Root ; Christian Kuhn et Walter Geist, pour les entretiens qu'ils ont bien voulu m'accorder ; et enfin Jérôme Baudot et Boris Hippolyte, pour m'avoir consacré de la bonne humeur, du temps, des conseils et des réponses.

A cela, il faut ajouter les noms de Renaud Vernet, Àngel Sànchez i-Zafra, Benoit Clément, Vincent Siccardi, Anne-Catherine Le Bihan, Daniel Bloch et Isabelle Ripp-Baudot et finir sur un merci général... pour les conversations souvent utiles, toujours intéressantes, que j'ai pu avoir avec eux.

Table des matières

Entrée en matière	1
1 L'organisme d'accueil : l'IReS	3
1.1 Présentation du laboratoire	3
1.2 L'organisation interne du laboratoire	3
1.3 Le groupe ALICE/STAR	4
2 La physique du décor	7
2.1 Physique des particules et modèle Standard	7
2.2 Le concept de Plasma de Quarks et de Gluons	10
2.3 L'expérimentation du QGP	13
3 Transition : état des lieux	19
4 Travail exécuté lors du stage	21
4.1 Les Ingrédients de l'Étude	21
4.2 Un paramètre important : le booster α	24
4.3 Deuxièmes Exemples : un positif, un négatif	27
4.4 Inventaire avant conclusion	30
Conclusion	33
Bibliographie	35

Entrée en matière

Dans le cadre de la formation à l'École Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg (ENSPS), il est demandé en première année l'exécution d'un stage dit « découverte de l'entreprise ». Me destinant jusqu'à présent au milieu de l'enseignement-recherche, j'ai préféré faire des démarches dans le sens d'un stage en laboratoire, plus particulièrement dans le domaine de la physique des particules.

La physique des particules est un domaine qui m'attire. A priori. Un enjeu pour moi était donc de confronter, le plus tôt possible, mon intérêt aux réalités du *terrain*, voir si je suis *effectivement* intéressé par la physique du très petit. Il était donc question d'une vérification, et pour cela, trois candidatures ont été déposées auprès de trois organismes différents.

D'une part, à DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron, Hambourg et Berlin) et au CERN (Centre Européen de Recherche Nucléaire, Genève), soit dans une grande et une très grande structure de recherche dans le domaine. Toutes deux présentent la particularité de proposer un *Summer Student Programme* à l'intention de leurs stagiaires estivaux, c'est-à-dire complètent le stage pratique par un certain nombre de cours magistraux. Cependant, les deux programmes étant assez convoités, il valait mieux, comme on a pu me le conseiller (Olivier Schneider et Aurélio Bay - LPHE de Lausanne), chercher une troisième opportunité... D'autre part, donc, à l'IReS (Institut de Recherche Subatomique, Strasbourg). Les candidatures au CERN et à DESY ont demandé la constitution de dossiers, le premier, en ligne, le second, par courrier. En ce qui concerne celle de l'IReS, la démarche adoptée a été celle de la candidature spontanée : une dizaine de mails-apostrophes à l'intention d'une dizaine de chercheurs de différents groupes du laboratoire (D0, CMS et ALICE/STAR). Technique un peu cavalière, qui a pourtant amené un premier contact avec Jérôme Baudot.

Après une entrevue au cours de laquelle m'était laissé le choix entre un stage orienté soit vers l'instrumentation, soit vers l'analyse de données, soit enfin vers la simulation/modélisation, il a finalement été convenu que si mes candidatures étaient refusées, au CERN et à DESY, alors... je viendrais à l'IReS, dans le groupe ALICE/STAR, pour un stage concernant l'étude d'un modèle hydrodynamique du Plasma de Quarks et de Gluons pour l'expérience STAR du collisionneur RHIC du Brookhaven National

Laboratory, du 4 juillet au 26 août 2005.

Les demandes au CERN et à DESY ont été rejetées.
La préhistoire du stage s'arrête là, son histoire commence ici...

Chapitre 1

L'organisme d'accueil : l'IReS de Strasbourg

1.1 Présentation du laboratoire

L'Institut de Recherche Subatomique (IReS [1]) est localisé à Strasbourg, plus précisément sur le campus universitaire de Cronenbourg, rue du Loess. Il s'agit d'une unité mixte de recherche entre, d'une part, l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3) du Centre National de la Recherche Scientifique et, d'autre part, l'Université Louis Pasteur (ULP) de Strasbourg.

L'IReS en chiffres, c'est :

- une quarantaine de chercheurs CNRS,
- une vingtaine d'enseignants-chercheurs,
- 145 ingénieurs, techniciens et administratifs,

soit plus de deux cents permanents, pour quatorze groupes scientifiques, une quarantaine de doctorants, et un budget d'environ quatre millions d'euros, ce qui en fait le plus grand laboratoire de province dans son domaine.

1.2 L'organisation interne du laboratoire

L'IReS, à l'image de l'IN2P3, s'articule autour de deux thématiques principales de recherche : d'un côté la physique nucléaire et de l'autre la physique des particules. Cette dernière section est elle-même divisée selon deux axes essentiels : recherches autour du neutrino (groupes ANTARES¹, NEMO3²

¹pour Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch

²pour Neutrino Ettore Majorana Observatory

et OPERA³) et recherches « sur collisionneurs » (groupes D0⁴, CMS⁵ et ALICE/STAR⁶). La figure suivante donne plus en détails l'organisation du laboratoire.

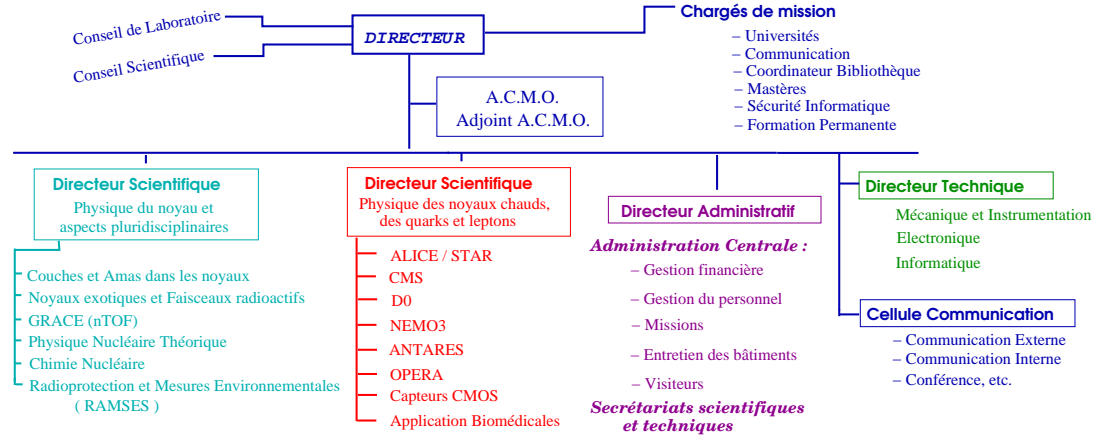


FIG. 1.1 – Organigramme de l'IREs

1.3 Le groupe ALICE/STAR

Structure et composition

Il faut peut-être présenter ici plus particulièrement le groupe qui a été intégré durant la période de stage, le groupe ALICE/STAR. Groupe éponyme puisqu'il porte le nom des deux expériences auxquelles il participe : ALICE⁷[2] est l'une des quatre expériences du LHC⁸ au CERN (livraison prévue pour 2007) ; STAR⁹[3], quant à elle, est l'une des quatre expériences du RHIC¹⁰ au BNL¹¹ (en fonctionnement depuis 2000).

Le groupe s'agence autour d'une quinzaine de personnes. Sa structure est, à l'image de la recherche à laquelle il s'attelle, formée par deux sous-groupes, avec pour une part, l'un dédié à la Recherche & Développement et la construction des détecteurs de particules, et pour l'autre, à la physique

³pour Oscillations Project with Emulsion-tRacking Apparatus

⁴nom d'une expérience sur le TeVatron, accélérateur du Fermilab à Chicago

⁵pour Compact Muon Solenoid, nom d'une des quatre expériences, du futur Large Hadron Collider, accélérateur du CERN

⁶cf. partie suivante

⁷A Large Ion Collider Experiment

⁸pour Large Hadron Collider

⁹Solenoidal Tracker At RHIC

¹⁰pour Relativistic Heavy Ion Collider

¹¹Brookhaven National Laboratory, état de New York

même de ces particules. Le groupe technique rassemble une dizaine de techniciens et ingénieurs et est mené par Jean-Robert Lutz ; le groupe physique, quant à lui, est constitué par six personnes et est coordonné par Christian Kuhn¹², également responsable administratif du groupe ALICE/STAR entier (voir Tableau 1.1).

Christian Kuhn	chargé de recherche	TAB. 1.1 – Composition du groupe physique d’ALICE/STAR
Jérôme Baudot	maître de conférence	
Boris Hippolyte	maître de conférence	
Renaud Vernet	doctorant (fin 3 ^e année)	
Jeff Speltz	doctorant (fin 2 ^e année)	
Alexandre Shabetaiï	doctorant (début 2 ^e année)	

Spécificité de la physique des particules : une collaboration sui generis

Une des raisons qui avait motivé ma candidature au programme d’été du CERN était la présomption d’un melting-pot ambiant. - En hébergeant l’accélérateur sine qua non d’une collaboration, la structure hôte devient du même coup le point privilégié de rencontre de ce partenariat. Il s’avère que j’avais assez mal présumé des choses... Au-delà du CERN, c’est en fait la physique des particules toute entière qui prend son essor à l’échelle internationale.

En effet, de manière générale, les installations expérimentales de physique des particules (détecteurs de neutrinos ; collisionneurs électron/positon, électron/proton, proton/antiproton, ion/ion, ...) se révèlent suffisamment onéreuses pour qu’un pays ne puisse plus à l’heure actuelle en assumer seul les coûts. De là un intérêt pratique à une réunion internationale de potentiels nationaux. Potentiels financiers¹³, certes, mais également humains ! A titres d’exemples ... l’expérience STAR réunit à elle seule 615 noms de 52 instituts de 12 pays différents ; ALICE - « A Larger Ion Collider ... » - en ce qui la concerne, c’est 29 pays, 86 instituts, pour un total de mille membres.

Une caractéristique forte de ces collaborations est, pourrait-on dire, qu’elles sont « multi-couches ». On observe, comme tente de le montrer la Fig 1.2, une collaboration entre les hiérarchies nationales et ce, à tous les échelons : entre ministères ou équivalents, entre administrations scientifiques nationales, entre les laboratoires hôtes d’accélérateur

¹²L’expérience ALICE compte quatre groupes physiques de travail : PWG1 - Performances, PWG2 - Soft Physics, PWG3 - Heavy Flavor, PWG4 - High pt & photon. Christian Kuhn est par ailleurs le responsable du PWG2 avec Luciano Ramello.

¹³La France par exemple verse au CERN 100 millions d’euros chaque année

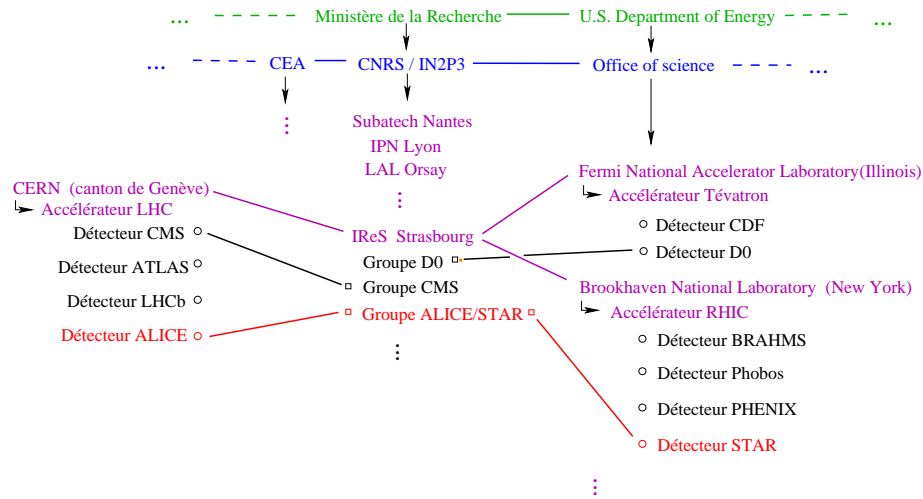


FIG. 1.2 – Le groupe ALICE/STAR et l’environnement de sa collaboration

et ceux du partenariat, entre l’expérience et les groupes de laboratoires.

Conclusion

Le groupe ALICE/STAR apparaît donc comme une cellule élémentaire dans laquelle se reflète le tout auquel elle appartient. On retrouve en effet beaucoup de cette recherche internationale en physique des particules, déjà, dans la corrélation systématique entre les deux composantes qui font le groupe, R&D et physique fondamentale, mais même à un degré plus fin encore, dans son imprégnation au quotidien par cette collaboration *à strates*.

Les orientations structurelles choisies et les pistes de recherche, les résultats physiques et les développements techniques, se font sans cesse sous l’impulsion de ou en concertation avec la communauté et ses hiérarchies. Les conférences téléphoniques jalonnent la semaine ; les déplacements vers les expériences, les trimestres ; les colloques¹⁴, les années. Dans ces conditions, les boîtes mails sont forcément vouées à être remplies, les signatures déposées pour une publication, à ne pas tenir sur moins d’une page...

¹⁴Il y a les colloques nationaux pour une expérience donnée (RHIC France à Etretat), les colloques nationaux pour le domaine de recherche, regroupement de plusieurs expériences parallèles (Ecole de Gif, Ecole Joliot-Curie de Maubuisson). Il y a aussi les séminaires internationaux d’une expérience (Star Proceedings, le dernier ayant eu lieu à Varsovie, début août 2005) qui précèdent généralement de peu les congrès internationaux du domaine de recherche (Quark Matter, la semaine suivante à Budapest).

Chapitre 2

La physique du décor

2.1 Physique des particules et modèle Standard

La typologie élémentaire : le modèle standard

La scène administrative montrée, il s'agit maintenant de planter la physique du décor... physique de la matière réduite à ses plus simples expressions. La toile de fond pourrait être un tableau, celui qui représente le Modèle Standard ([4], [5]). Sous ce nom se cache la description théorique la plus complète de ce qui fait l'Univers à son niveau le plus élémentaire¹.

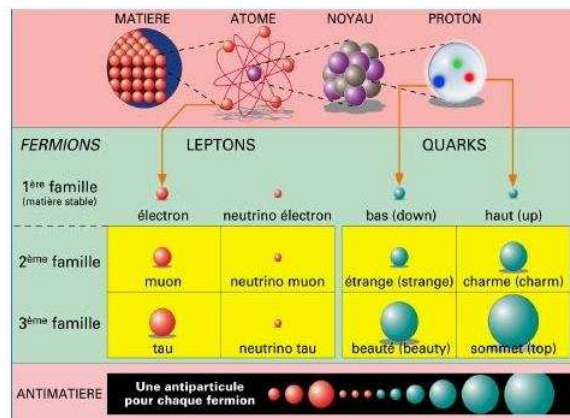


FIG. 2.1 – Le premier volet : les fermions du modèle standard (source IN2P3)

Le tableau est en fait un diptyque. Deux volets : d'un côté, la matière elle-même, de l'autre, les interactions de la matière.

¹du moins à celui que l'on connaît aujourd'hui comme étant le plus élémentaire...

Le premier volet représente les unités de base de la matière (échelle inférieure à 10^{-18} m), que sont les 12 premières particules élémentaires, fermions étiquetés selon deux catégories, leptons et quarks, et selon trois familles, I, II et III. Les membres des familles II et III se désintégrant rapidement en leurs homologues de la famille I, ces deux familles n'ont pas survécu aux premiers instants de l'Univers. La famille I, pour sa part, est stable ; ses quatre éléments constituent la matière que nous connaissons, de l'eau à l'air, en passant par la terre et le papier du rapport, l'auteur et le lecteur...

Le second volet définit les clés de l'étude comportementale des trois familles. Il traite et décrit les interactions possibles entre les différents fermions de la matière ; par là, il recense les bosons vecteurs que vont s'échanger les fermions lors d'une interaction (voir Tab. 2.1 ² et ³).

<p>Boson de jauge Interaction associée Théorie descriptive Grandeur quantique associée Particules concernées</p>	<p>le photon, γ électromagnétique Electrodynamique Quantique (QED) charge électrique quarks ; leptons et hadrons chargés</p>
<p>Bosons de jauge Interaction associée Théorie descriptive Grandeur quantique associée Particules concernées</p>	<p>les bosons massifs W^+, W^- et Z^0 faible théorie électrofaible charge « faible » quarks, leptons et hadrons</p>
<p>Bosons de jauge Interaction associée Théorie descriptive Grandeur quantique associée Particules concernées</p>	<p>les 8 gluons, g forte Chromodynamique Quantique (QCD) charge de couleur particules colorées(...)</p>

TAB. 2.1 – Le second volet : les bosons vecteurs du Modèle Standard

²A chaque élément de ce volet de relations correspond infailliblement au moins un prix Nobel de physique. La *Quantum Electrodynamics* est développée entre 1946 et 1950 par Tomonaga Shinichiro, Julian Schwinger et Richard P. Feynman, et fera l'objet du Nobel 1965. La *théorie électrofaible* fait son apparition en 1967, sous l'impulsion de Sheldon Lee Glashow, Abdus Salam et Steven Weinberg, qui recevront pour cela le prix Nobel en 1979. L'existence de bosons d'interaction W^+ , W^- et Z^0 est confirmée en 1983, lorsque ceux-ci sont produits et observés directement dans les collisions du SPS au CERN. Cette confirmation expérimentale vaudra *l'année suivante* le prix Nobel de physique à Carlo Rubbia et Siumon Van der Meer. La *théorie QCD* et les gluons émergent en 1973 - après des années 60 jalonnées par les affinements successifs du modèle de quarks (Murray Gellmann, prix Nobel 1969). Trois décennies plus tard, le prix Nobel de physique 2004 est décerné à David J. Gross, H. David Politzer et Frank Wilczek pour leur travaux sur les particules fondamentales et notamment la découverte de la liberté asymptotique de l'interaction nucléaire forte.

³Rien n'est dit ici sur le mystérieux boson de Higgs ou encore l'hypothétique graviton...

A ce diptyque vient se superposer en filigrane le tableau des antiparticules associées à chacune des particules précédentes. Soeurs siamoises mais « sororicides », la particule et l'antiparticule ont des grandeurs physiques communes (durée de vie, masse, spin, ...) mais des charges notamment électriques et de couleur qui elles sont opposées, antagonisme double qui les fera s'annihiler si elles viennent à se rencontrer⁴ et ⁵.

Le regroupement de quarks : les hadrons

L'interaction nucléaire forte à son niveau fondamental⁶ est décrite par la chromodynamique quantique (QCD) qui définit, comme le suggère son nom, le comportement des particules *colorées*. Les leptons n'ayant pas de charge de couleur, l'interaction nucléaire forte n'intéresse que⁷ les six saveurs de quarks : u, d, c, s, b, t. Or la QCD prévoit l'inexistence d'objet coloré isolé⁸, seuls peuvent émerger des objets *blancs*, dont la qualité de couleur n'est pas apparente. (Il existe trois couleurs possibles : rouge(*r*), vert(*v*), bleu(*b*), et trois anti-couleurs : anti-rouge (\bar{r}) ou cyan, anti-bleu (\bar{b}) ou jaune, anti-vert (\bar{v}) ou magenta. Les mélanges pour obtenir du « blanc » sont ceux auxquels l'optique nous a habitués.)

Les quarks vont donc chercher à se regrouper pour former une entité *blanche*, ils s'hadronisent. L'ensemble ainsi formé définit un *hadron*. Etant donné les règles chromatiques et la palette à disposition, il ne peut exister que deux natures différentes de hadron. Soit

⁴L'antiparticule d'une particule $\bar{p}a$ est notée $\bar{p}a$ ($\bar{e}^- = e^+$, \bar{u}/u , \bar{g}/g , ...).

⁵En définitive, il s'avère que les prédictions qui découlent de ce modèle présentent une certaine robustesse à l'expérience ; Le modèle standard a plutôt bien survécu jusqu'à présent. La théorie QED, par exemple, est très certainement l'une des théories les mieux validées de la physique actuelle, donnant lieu à des résultats avec une précision démesurée en terme de chiffres significatifs. Cependant, aujourd'hui, nous arrivons dans une période critique où des incohérences commencent à survenir (contrairement à ce que prétend le modèle, les neutrinos n'auraient finalement pas une masse nulle), où des inquiétudes apparaissent (le boson de Higgs ne s'est pas encore révélé), et des critiques font surface (les paramètres du modèle deviennent petit à petit de plus en plus nombreux, au point que l'on avoisine aujourd'hui la vingtaine de paramètres). Il est certain que cette période critique est également une période décisive pour l'avenir du modèle et de ses conséquences.

⁶L'interaction nucléaire forte à l'échelle d'un noyau, à « basse » énergie, ne trouve pas de prédiction à travers QCD. L'interaction forte à ce niveau constitue un phénomène complexe de second ordre que la QCD ne parvient pas réellement à expliquer. Vouloir décrire une *structure nucléaire* à l'aide de gluons relève d'une tâche quasi inextricable, au point qu'encore aujourd'hui les physiciens s'en remettent à la théorie *effective* de Hideki Yukawa (1935, Nobel en 1949), dans laquelle le gluon cède sa place de boson vecteur aux mésons π .

⁷Restriction pas tout à fait exacte. Voir la section suivante de ce même chapitre.

⁸Une particule seule colorée demanderait une énergie infinie. Voir la section suivante...

il s'agit un regroupement de trois quarks ou antiquarks, $q_1q_2q_3$, chacun ayant aléatoirement l'une des trois couleurs soit primaires soit complémentaires (rvb ou $\bar{r}\bar{v}\bar{b}$), c'est un *baryon*. C'est le cas par exemple du proton (duu), du neutron (ddu), du Λ (uds), de l'antiproton \bar{p} ($\bar{d}\bar{u}\bar{u}$), etc. Soit il s'agit d'un regroupement d'un quark q_1 et d'un antiquark \bar{q}_2 , le blanc résultant alors de la réunion d'une couleur et de sa couleur complémentaire, c'est un *méson*, catégorie incarnée par exemple par le pion $\pi^+(u\bar{d})$, son antiparticule $\pi^-(d\bar{u})$, ...⁹

2.2 Le concept de Plasma de Quarks et de Gluons

Liberté asymptotique et confinement des quarks

Le potentiel d'interaction donné par QCD présente une forme à laquelle les autres interactions fondamentales ne nous ont pas habitués : le potentiel augmente en effet avec la distance entre particules colorées au lieu de s'évanouir ([7], [8]). Cette curiosité tient essentiellement au fait que le gluon est lui même un objet coloré^{10 et 11}. Comme l'indique la Figure 2.3, le potentiel suit deux comportements particuliers, selon la distance entre particules. Pour une part, à r très faible (lire en fait « à haute énergie »...), le comportement « coulombien » (en $1/r$) domine, le couplage s'affaiblit, les particules interagissent peu et deviennent quasi-libres. De là, l'idée de *liberté asymptotique*. A l'inverse, le potentiel prend assez rapidement la forme linéaire d'un potentiel associé à la force de rappel d'un ressort ; il faut ainsi une énergie infinie pour séparer à l'infini deux quarks d'un hadron (méson comme baryon). En pratique, sans en arriver jusque là, dès lors que la valeur du potentiel $V_{c_1c_2}$ entre deux objets colorés dépasse une certaine énergie de seuil,

⁹Baryons et mésons pris dans leurs différentes résonances, la zoologie des hadrons connus dans la cadre du modèle standard répertorie à l'heure actuelle quelques deux cents entités distinctes [6].

¹⁰Il faut ici s'octroyer une pause, le temps d'une note de bas de page, pour faire mesurer la nouveauté de la chose. Les gluons sont colorés... Dès lors, la QCD n'intéresse plus seulement les quarks mais également les gluons eux-mêmes, ouvrant des possibilités de couplage inattendues. Une analogie qui ferait peut-être mieux appréhender le problème consisterait à imaginer le photon comme étant lui-même une entité électriquement chargée, devenant du même coup vecteur ET sujet de l'interaction qu'il incarne dans QED...

¹¹Une autre façon d'aborder cette particularité du potentiel qui augmente avec la distance passe par l'évolution de la constante de couplage, α_S . En QED, la constante de couplage est une constante par rapport à l'énergie : quel que soit le niveau d'énergie auquel on travaille, $\alpha_{QED} \approx 1/137$. En revanche, pour l'interaction nucléaire forte, le α_S chute avec l'augmentation du niveau d'énergie : à très haute énergie (les collisions du LHC), la constante de couplage est faible, le régime est perturbatif, on peut étudier les choses analytiquement ; à faible énergie (les noyaux atomiques dans leur état naturel), la constante de couplage est particulièrement forte, le régime n'est plus perturbatif, ...

celle de création d'une paire q_3/\bar{q}_3 , la paire q_3/\bar{q}_3 se crée, q_3 venant se lier à c_1 et \bar{q}_3 , à c_2 . c_2 est certes séparé désormais de c_1 , mais n'est pas pour autant isolé : il retrouve à sa proximité un autre objet coloré, formant ainsi une nouvelle entité pour laquelle le potentiel revient dans une zone de plus faible interaction, à r plus faible (voir Fig. 2.2). Un quark ne peut demeurer isolé. Cela impose inévitablement son incorporation dans d'un édifice qui est, d'une manière ou d'une autre (...), « blanc ». Le plus souvent, cela se traduit par son *confinement* au sein d'un hadron.

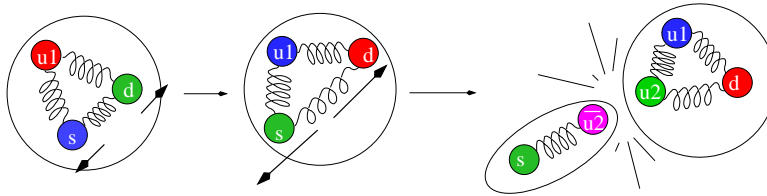


FIG. 2.2 – Libération d'un méson à partir d'un baryon (NB : Par souci de simplification ici, les interactions sont supposées mettre en jeu un seul gluon, lui même étant supposé incolore.)

Déconfinement et QGP

On peut toutefois imaginer un édifice blanc particulier. Au même titre qu'il existe un plasma électromagnétique globalement neutre électriquement, on peut songer à un plasma neutre en couleur...

Imaginons que l'on parvienne à comprimer un noyau. On augmente petit à petit le nombre de nucléons par unité de volume, jusqu'à atteindre le point critique où ceux-ci se chevauchent. Dû à la forte concentration des quarks en présence, un phénomène d'*écranage* apparaît, le potentiel d'interaction du système étudié vient saturer sous la valeur normale du potentiel d'un hadron de taille moyenne a_0 . C'est dans ces conditions que survient le *déconfinement* des quarks : les quarks restent perpétuellement en interaction, mais cette fois passent « de mains en mains » au sein de la communauté, ils perdent la mémoire identitaire de leur hadron d'origine, ayant ainsi accès à un volume plus important. C'est en cela que tient essentiellement le *plasma de quarks et de gluons* (Quark-Gluon Plasma, QGP) .

Les questions physiques d'un concept

Né à la fin des années 70, le concept de QGP se présente sous une forme relativement simple. Cependant, cette naïveté de l'idée vient bu-

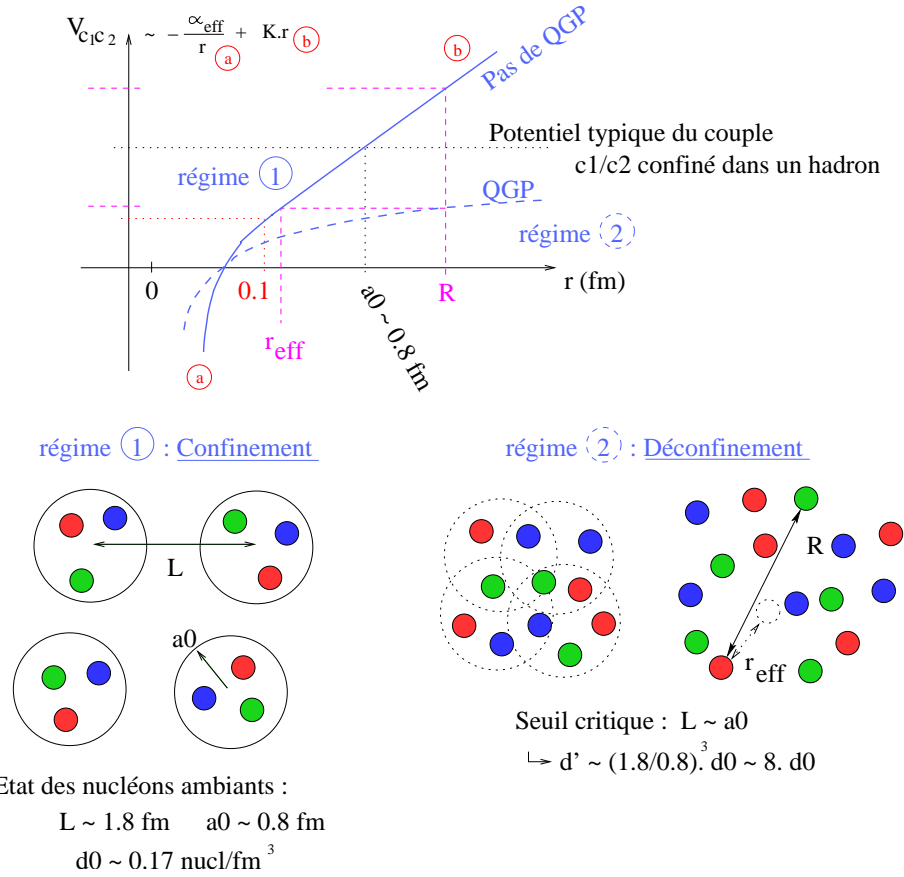


FIG. 2.3 – Potentiel $V_{c_1c_2}$ d’interaction de deux objets colorés en fonction de la distance r qui les séparent (repris depuis [7]).

ter contre une complexité analytique inextricable ; si les choses restent encore presque gérables dans le cadre d’un plasma électromagnétique, le QGP, lui, se montre encore plus retors. Il faut rappeler ici que les gluons sont eux-mêmes des objets colorés, et insister sur le fait qu’il s’agit bien d’un plasma de quarks *et* de gluons, spécificité sans pendant électromagnétique, puisque l’on ne peut parler de plasma de charges et de photons.

La difficulté aurait pu décourager... mais le QGP cache un certain nombre d’attraits que la physique ne peut ignorer.

Un premier aiguillon du QGP est qu’il place l’étude de l’interaction forte dans un nouveau cadre, qui, déjà, diffère de l’environnement hadronique usuel, mais également du contexte de Yukawa associé aux noyaux. Pris quelque part entre la physique des particules et la physique nucléaire, le QGP est une mise à l’épreuve inédite de la chromodyna-

mique quantique et du modèle standard ; il met en lumière de nouveaux aspects que l'on ne peut ignorer dans l'élaboration d'une description de systèmes complexes.

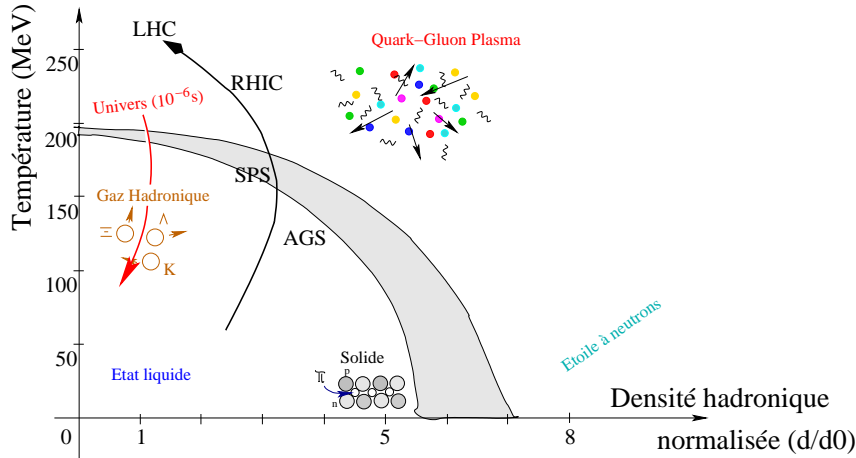


FIG. 2.4 – Diagramme des phases de la matière hadronique et zones « couvertes » par les différentes installations expérimentales (à partir de [7])

De façon plus pragmatique, comme le montre la Fig 2.4, étudier le QGP, c'est étudier un état potentiellement « naturel » de la matière, état que l'on suppose être, d'une part, celui du coeur d'une étoile à neutrons, et d'autre part, celui de l'Univers lui-même quelques microsecondes après le Big Bang [9].

2.3 L'expérimentation du QGP

Les installations dédiées au QGP

Le concept posé et jugé digne d'intérêts, on en vient alors à s'interroger sur les moyens à mettre en oeuvre pour étudier la chose. Dans la mesure où le QGP demeure un état extrême de la matière, il faut s'attendre à ce que sa recréation commence par un défi technologique : les accélérateurs d'ions lourds (Pb, Au, Cu, ...) (voir la Fig 2.4).

Après les accélérateurs d'ions lourds de première génération (machines à cible fixe) qu'étaient l'Alternating Gradient Synchrotron (AGS) et le Super Proton Synchrotron (SPS), respectivement au BNL et CERN, nous sommes aujourd'hui à l'heure des machines de seconde génération, avec encore dans ces mêmes laboratoires, le *Relativistic Heavy Ion Collider*, et sa surenchère, le *Large Hadron Collider*.

Particules accélérées	p/p	Au/Au
Energie maximale du faisceau	0.25 TeV	0.1 TeV par nucléon
Collisions par seconde		$\approx 3 \cdot 10^3$
Rayon du faisceau (10^{-6} m)		125
Circonférence (km)		3.834
Nombres d'aimants supraconducteurs		396 dipôles
Facteur de Lorentz, γ		≈ 100

TAB. 2.2 – Quelques caractéristiques techniques du RHIC (Chiffres 2002)

Particules accélérées	p/p	Pb/Pb
Energie maximale du faisceau	7 TeV	2.76 TeV par nucléon
Collisions par seconde		$\approx 10^4$
Rayon du faisceau (10^{-6} m)		16
Circonférence (km)		26.659
Nombres d'aimants supraconducteurs		1232 dipôles
Facteur de Lorentz, γ		7461

TAB. 2.3 – Quelques caractéristiques techniques attendues au LHC (2008)

Le RHIC est un collisionneur Au-Au en fonctionnement depuis 2000, et est exclusivement dédié à la physique des ions lourds. Il héberge sur son anneau quatre expériences dont une qui nous intéresse ici plus particulièrement, STAR.

Le LHC est quant à lui un outil hybride dédié à plusieurs physiques des particules, celles rattachées aux collisions pp (recherche du boson de Higgs, supersymétrie, ...) mais également aux collisions Pb-Pb. Cette dernière composante ions lourds sera opérationnelle d'ici 2008, avec la mise en place de l'expérience qui lui est consacrée, ALICE.

Evolution d'une collision

En janvier 1983 paraissait dans la revue *Physical Review* un article de J.D. Björken sur l'évolution d'une collision d'ions lourds, article devenu depuis une référence en la matière [10].

Que se passe-t-il au moment et à l'endroit où les deux noyaux se rencontrent (*vertex primaire*) ? Les noyaux accélérés à des vitesses proches de c dans le référentiel du laboratoire¹² se heurtent de front¹³. $t = 0$, le

¹²C'est en raison de ces vitesses relativistes que les noyaux représentés sur la Fig. 2.5 ont une forme de « smarties » ; étant donné le facteur de Lorentz, un observateur immobile dans le référentiel du laboratoire voit une contraction des longueurs. Le rayon d'un noyau de plomb est d'environ 10^{-14} m, le facteur de Lorentz sur le LHC vaut 7461, le rayon est donc divisé d'autant...

¹³La collision n'est pas forcément purement frontale : il peut exister un *décalage entre*

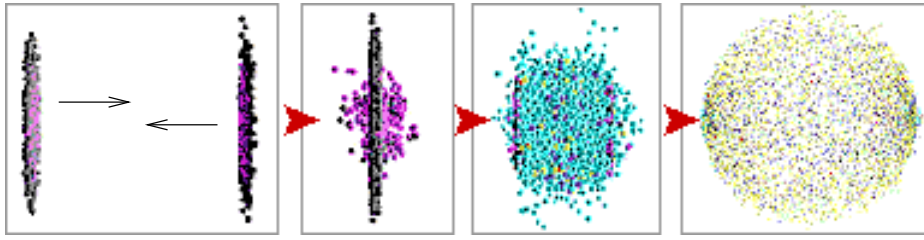


FIG. 2.5 – Simulation d'une collision Au-Au au RHIC

chronomètre *lié au système* démarre. Après une phase de pré-équilibre qui aboutit à un système en équilibre thermodynamique interne ($\approx 1 \text{ fm}/c = 3,3 \cdot 10^{-24} \text{ s}$), ce dernier, en expansion cylindrique, initialement constitué exclusivement de protons et de neutrons, franchit une densité critique d'énergie à partir de laquelle se forme la phase QGP. Le système couvre un volume de quelques fm^3 .

La deuxième étape consiste en un refroidissement marqué par deux moments cruciaux. Aux environs de $10 \text{ fm}/c$, la totalité du système est revenu dans une phase hadronique. Les quarks ont recommencé à s'hadroniser, mais les hadrons se forment et se défont, suite à de multiples collisions inélastiques au sein du milieu... Jusqu'à la température critique du *gel chimique*, où la composition hadronique du milieu est alors figée. Un baryon Ξ produit, par exemple, dans ce milieu ne changera désormais plus de forme, il gardera sa nature. Le milieu alors en présence constitue un gaz hadronique. Les collisions inélastiques n'ont plus cours ; en revanche, il existe encore des collisions élastiques entre hadrons. Les distributions de vitesses changent, le gaz se refroidit fortement et se détend, en couvrant un volume pouvant atteindre 10^5 fm^3 . A partir de $t \approx 20 \text{ fm}/c$, le gaz hadronique s'évanouit en hadrons libres. La composition du système est alors figée *ET* les impulsions de chaque particule sont fixées, c'est le *gel cinétique*¹⁴.

Troisième et dernier chapitre de l'histoire, les hadrons ainsi produits se déplacent librement vers les couches successives de détecteurs, dont la première se situe à quelques centimètres de là. Dans les étapes précédentes, l'interaction forte présidait aux mécanismes de création-transformation des particules (temps typique d'interaction $\approx 10^{-23} \text{ s}$

les centres des noyaux qui se rencontrent. Ce décalage est chiffré par deux paramètres équivalents : le *paramètre d'impact*, b (en femtomètre), ou la *centralité* (en pour cent) de la collision, paramètres auxquels on peut avoir accès à partir des données expérimentales via le modèle dit « de Glauber ». Ce décalage a son importance car selon sa valeur, c'est plus ou moins de nucléons qui participent à l'accident, donc plus ou moins d'énergie transférée à la boule de feu.

¹⁴Pour se fixer les idées, il est possible de visualiser des films de simulations sur le site <http://alice.web.cern.ch/Alice/html/cyberland/> Dernière visite le 5 septembre 2005.

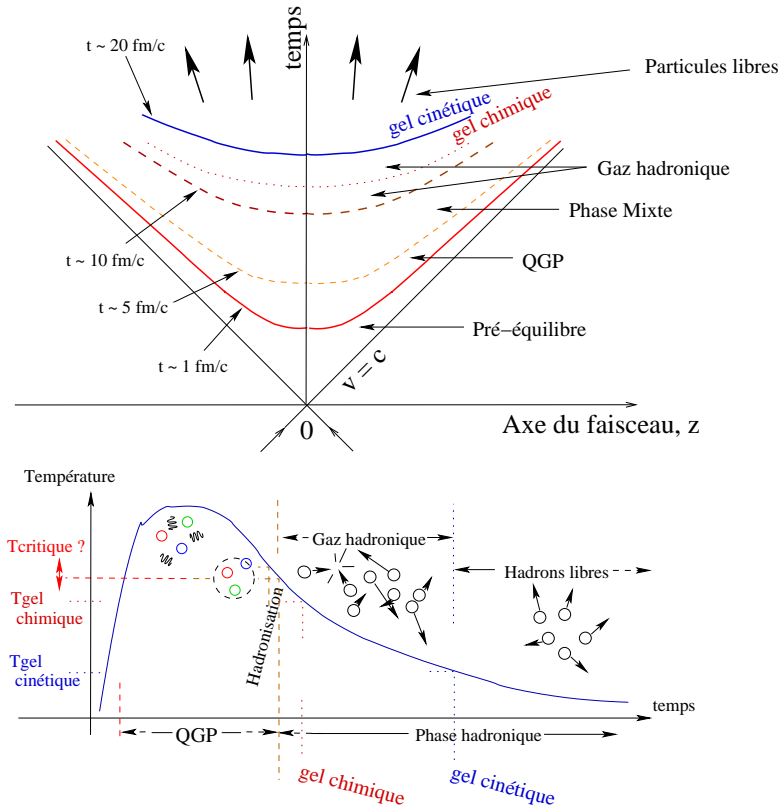


FIG. 2.6 – Deux visions du scénario de Bjorken

[4]). Ici, le relais est « classiquement » passé à l'interaction nucléaire faible : la majorité des hadrons produits est à durée de vie limitée, des quarks des familles II(s,c) et III(b,t) les constituent en partie, ces quarks sont instables, ils doivent se désintégrer vers u et d , et donc changer de saveur. Or la seule force qui permette ce genre de métamorphose est la force faible. Les mécanismes sont nettement plus lents ($10^{-8}s$ [4]) si bien que la plupart des désintégrations se font au sein même des détecteurs. (Voir Fig. 2.7.)

Etudier l'aval pour découvrir l'amont

Comme dit précédemment toutes les mesures sont faites dans l'étape 3 de la collision, autrement dit quand la collision est déjà finie. Il faut bien voir que l'on n'a pas et que l'on aura pas d'accès direct au plasma de quarks et de gluons ; ce que l'on a, c'est une forêt de traces encore inattribuées de particules qui se sont déplacées et désintégrées graduellement dans les mètres-cube de détecteurs.

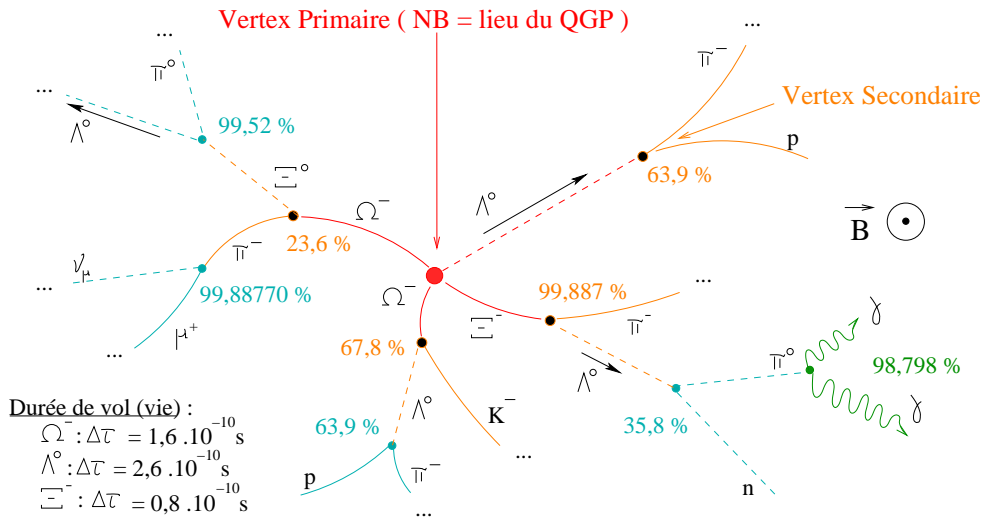


FIG. 2.7 – Exemples de chaînes de désintégration des hadrons produits. Les pourcentages qui figurent à côté des vertex donnent la probabilité de la voie de désintégration qui lui est rattachée (Plusieurs voies possibles de décroissance s’offrent en effet à un hadron instable).

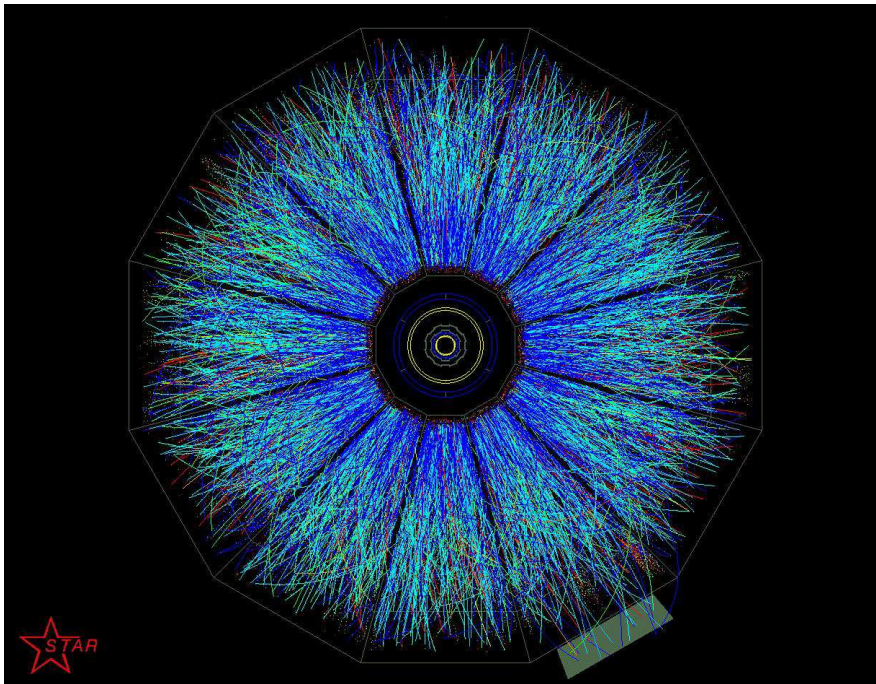


FIG. 2.8 – Exemple d’un évènement de STAR, vu dans le plan transverse des faisceaux

A hauteur du croisement des anneaux de STAR, il y a environ trois mille deux cents collisions par seconde, chacune produisant quelques milliers de particules ; les bons jours, cent évènements par seconde sont enregistrés, sur les dix heures de vie d'un faisceau (voir Fig 2.8). Pour ALICE, le nombre de collisions par seconde avoisinera les dix mille, les particules produites par collision, cinquante mille ...

A partir de ces données, il faut reconstruire et identifier plus ou moins précisément les particules, remonter toute la chaîne des vertex secondaires avant de cerner les hadrons issus du vertex primaire.

On cherche alors à extraire quatre informations, pour tout type de hadron donné :

1. le taux de production du type de particule considéré (*yield*), taux fixé au moment de gel chimique, par exemple pour $K^0(\bar{d}s)$, $\Lambda(uds)$, $\Omega(sss)$, proton(uud),..., $\partial N/\partial N_{total}$,
2. sa répartition spatiale dans un repère sphérique centré sur le vertex primaire, $\partial N/\partial\phi$,
3. sa distribution en impulsion ou en masse transverse et en rapidité (spectre), fixée au moment du gel cinétique, $\partial^2 N/\partial p_t \cdot \partial y$ ou $\partial^2 N/\partial m_t \cdot \partial y$,
4. la distribution spatiale de cette dernière distribution (v_2, v_4), $\partial^3 N/\partial p_t \cdot \partial y \cdot \partial\phi$.

L'expérimentateur se retrouve alors indices en main juste en aval des gels chimique et cinétique, indices nombreux et pourtant limités, pour cerner la fugacité de ce qui a pu se passer en amont, un éventuel plasma de quarks et de gluons.

Chapitre 3

Transition : état des lieux

A ce stade de recherche, il semble plus ou moins acquis que l'état de QGP ait été recréé expérimentalement, au RHIC et peut-être déjà au SPS. Il existe un certain nombre de signatures « globalement » acceptées par la communauté (suppression du charmonium $c\bar{c}$ et « Jet Quenching » notamment). Plus précisément, ce qui est vraiment acquis, c'est une incompatibilité : les systèmes que l'on obtient au RHIC ne peuvent manifestement pas être décrits par une physique hadronique habituelle, le système ne peut qu'être dans un état *autre...* et le premier candidat sur lequel on peut presque logiquement s'arrêter est le QGP.

L'étape suivante a trait à de l'hydrodynamique [11]. Si l'on admet l'hypothèse du QGP, il va s'agir alors d'en donner une description comportementale. On cherche actuellement à lui fournir le cadre d'une description *collective*, pour ainsi réduire sa représentation à quelques paramètres thermodynamiques (température, potentiel baryonique ou pression). Et un premier réflexe - une première approximation - a consisté à se tourner vers l'hydrodynamique, plus précisément vers de l'hydrodynamique relativiste et dénuée de viscosité soit idéale. Le but est de donner deux équations au QGP : la bonne équation d'état et la bonne équation de transport.

1. Si l'idée de recourir à l'hydrodynamique pour décrire le QGP est quelque part inspirée des hypothèses du QGP lui-même (il suppose un équilibre thermodynamique interne qui est également un pré-supposé de l'hydrodynamique), il faut tout de même voir que l'on flirte ici avec limites de validité de l'hydrodynamique. Un équilibre chimique et cinétique *local* est peut-être une double hypothèse hasardeuse pour un système somme toute relativement peu « consistant » : certes grâce à l'énergie libérée lors d'une collision Au/Au, on peut espérer passer d'un maximum initial de

2×197 nucléons dans le meilleur des cas¹ à déjà quelques milliers de particules à l'issue du pré-équilibre, mais quelques milliers reste un ordre de grandeur encore assez loin de la mole... L'hydrodynamique n'a pas trouvé d'écho à travers les données de l'AGS ou du SPS, ce n'est qu'à partir du RHIC seulement que des prédictions hydrodynamiques ont rencontré les données expérimentales. La première question est donc fondamentale : l'hydrodynamique elle-même est-elle le bon cadre de description ?

2. En allant plus dans les détails, les interrogations s'arrêtent alors sur la nature de l'hydrodynamique. L'hydrodynamique relativiste idéale est-elle suffisante ou sera-t-on quelque part contraint de s'orienter vers une hydrodynamique relativiste visqueuse ?

De manière générale en physique des particules, c'est toujours en vue d'un modèle théorique à hypothèse(s) que l'on travaille. - Il y a un QGP en équilibre thermodynamique interne, il existe une température de découplage, ... On cherche à partir des informations disponibles *en aval* d'une collision à remonter soit à l'histoire soit aux caractéristiques du système ; si le modèle reproduit les données expérimentales, alors on peut commencer à valider des hypothèses et conduire les interprétations dans une certaine direction. Cependant, dès lors que le modèle qui réussit n'est plus seul en lice, les succès des premiers temps commencent à paraître suspects... et c'est le problème actuel de l'hydrodynamique.

Il existe au moins trois modèles numériques d'hydrodynamique relativiste idéale à l'initiative de différents théoriciens (P. Kolb et U. Heinz, T. Hirano, ...). Chaque modèle est supporté par une clé de voûte qu'est l'équation d'état qu'il défend ; tester le modèle, c'est de loin en loin tester l'équation sur la pierre de touche que sont les données expérimentales. Le problème est que chacun marche, plus ou moins bien. Un modèle fournit d'excellentes prédictions pour tel résultat, là où un autre se révèle plutôt médiocre, et inversement. Alors si « prédire n'est pas expliquer »², que peut-on conclure vis-à-vis de prédictions qui marchent bien, mais sporadiquement ?

Telle est la question...

¹Comme mentionné à la note 10 du chapitre précédent, le *paramètre d'impact* b a son importance dans une collision, puisque le nombre de participants sera d'autant plus grand et donc le système d'autant plus gros, que b sera petit, i.e. que la collision sera frontale.

²livre du mathématicien René Thom

Chapitre 4

Travail exécuté lors du stage

4.1 Les Ingrédients de l'Etude

Les "sondes" utilisées : les hypérons du RHIC comme matière première

L'étude réalisée s'attarde essentiellement sur les particules contenant au moins un quark étrange s , les *hypérons*¹. Les particules étranges les plus fréquemment utilisées ici sont données dans le tableau comparatif suivant [6].

π^0 ($u\bar{u}-d\bar{d}$)/ $\sqrt{2}$ 135 MeV	ϕ ($\bar{s}s$) 1019 MeV	J/ Ψ ($c\bar{c}$) 3097 MeV
π^+ ($u\bar{d}$) 140 MeV	K^0 ($d\bar{s}$) 497 MeV	B^0 ($d\bar{b}$) 5279 MeV
-	K_{\pm}^+ ($u\bar{s}, s\bar{u}$) 494 MeV	-
p (udu) 938.3 MeV	Λ^0 (uds) 1115 MeV	Λ_c^+ (udc) 2285 MeV
n (udd) 939.6 MeV	Ξ^0 (uss) 1314 MeV	-
Δ^{++} (uuu) 1232 MeV	Ω^- (sss) 1672 MeV	-

TAB. 4.1 – Tableau comparatif autour des hypérons

Un premier avantage de l'étude des hadrons étranges ou multi-étranges tient à leur abondance relative dans les données expérimentales : les hypérons restent des particules relativement légères, donc exigent moins d'énergie pour leur création qu'un hadron « équivalent » charmé, par exemple. C'est ce qui en fait un outil avec une statistique assez fournie.

L'autre avantage, qu'il faut associer au précédent pour faire définitivement des hypérons des objets d'étude privilégiés, est que le quark s contenu dans le hadron étrange est forcément un résultat de la boule de feu elle-même. Les nucléons des noyaux qui se sont heurtés contiennent

¹Les hypérons sont la spécialisation du groupe ALICE/STAR

en effet exclusivement des quarks u et d^2 .

Enfin, les données que l'on veut extraire du RHIC³ vont logiquement être ici celles liées aux hypérons. Les conditions expérimentales de l'étude abordée vont être restreintes aux collisions Au+Au à $\sqrt{s_{NN}} = 62$ GeV⁴.

La matière théorique : le modèle AzHydro

Le modèle AzHydro [12] est un modèle numérique d'hydrodynamique idéale relativiste, codé en FORTRAN, rendu publique en septembre 2004, produit par P.F. Kolb et U.W. Heinz, deux théoriciens des particules. Le modèle a pour but de prédire des spectres (distributions en impulsion transverse et en rapidité) et des distributions spatiales en impulsion (v_2, v_4) pour 143 hadrons et anti-hadrons.

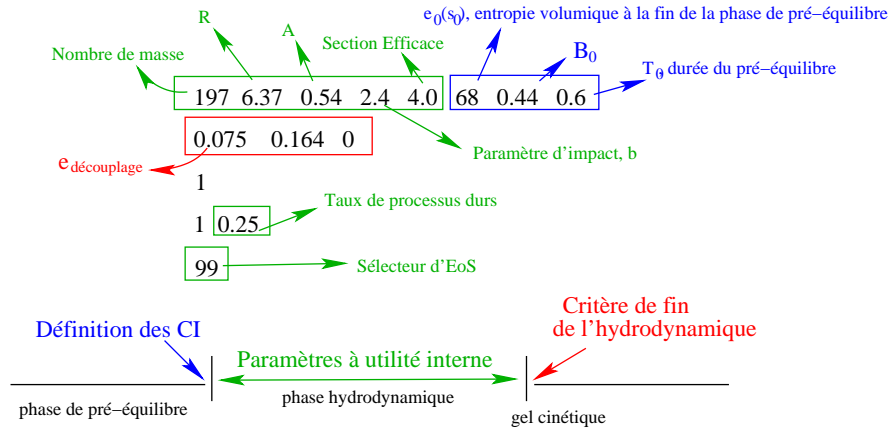


FIG. 4.1 – le fichier des paramètres d'entrée du modèle, AzHydrophy.inp

Le modèle AzHydro demande 15+1 paramètres d'entrée (voir Fig. 4.1) que l'on peut diviser en trois catégories :

1. les paramètres de conditions initiales, c'est-à-dire la description de la situation au moment où les hypothèses *sine qua non* de l'hydrodynamique - équilibre chimique et cinétique *local* - sont censées être valides, où le modèle prend le relais,
2. les paramètres qui vont *conditionner* le comportement interne à suivre pendant la phase hydrodynamique (type de collision, centralité, équation d'état (EoS), ...),

²On comprend alors l'attention particulière qui peut être consacrée au Ω^- , baryon triplement étrange, produit pur de la collision.

³cf. chapitre II.3 - *Expérimentation du QGP*

⁴ $\sqrt{s_{NN}}$ définit le maximum d'énergie disponible dans le centre de masse de deux nucléons qui vont se rencontrer.

3. les paramètres de sortie ou le critère d'arrêt de l'hydrodynamique, soit le moment où le modèle doit décréter le gel cinétique⁵.

Root, an object-oriented data analysis framework

Root [13] est un cadre d'analyse de données, dédié à la physique des hautes énergies. Héritier de PAW, Root est en fait une réponse qui se veut adaptée aux futurs besoins qui émergeront avec le LHC. Pour cela, les principaux développeurs que sont René Brun et Fons Rademakers ont pris le parti d'une programmation orientée objet. En effet, Root est basé sur le langage C++.

Root est un cadre d'analyse...

“Programming inside a framework is a little like living in a city. Plumbing, electricity, telephone, and transportation are services provided by the city. In your house, you have interfaces to the services such as light switches, electrical outlets, and telephones. The details, for example, the routing algorithm of the phone switching system, are transparent to you as the user. You do not care; you are only interested in using the phone to communicate with your collaborators to solve your domain specific problems.

Programming outside of a framework may be compared to living in the country. In order to have transportation and water, you will have to build a road and dig a well. To have services like telephone and electricity you will need to route the wires to your home. In addition, you cannot build some things yourself. For example, you cannot build a commercial airport on your patch of land. From a global perspective, it would make no sense for everyone to build his or her own airport. You see you will be very busy building the infrastructure (or framework) before you can use the phone to communicate with your collaborators and have a drink of water at the same time.

In software engineering, it is much the same way. In a framework, the basic utilities and services, such as I/O and graphics, are provided. In addition, ROOT being a HEP analysis framework, it provides a large selection of HEP specific utilities such as histograms and fitting. The drawback of a framework is that you are constrained to it, as you

⁵Le modèle hydrodynamique s'il peut être valide ne peut l'être en tout état de cause qu'entre la fin de la phase de pré-équilibre et le gel cinétique (voir scénario de Björken, ch.II, paragrapher 3). L'hydrodynamique ne se superpose donc pas exactement sur la période QGP ; l'hydrodynamique décrit un système qui peut en passer par le QGP, mais sans forcément prendre ce fait comme une hypothèse de travail. C'est ce qui fait la force et la limite d'un modèle hydrodynamique, celle qui consiste à s'appuyer sur des « particules ou cellules de fluide » indépendamment de leur nature interne, permettant ainsi d'éviter les calculs pointilleux et très complexes d'un modèle « microscopique ».

are constraint to use the routing algorithm provided by your telephone service. You also have to learn the framework interfaces, which in this analogy is the same as learning how to use a telephone. If you are interested in doing physics, a good HEP framework will save you much work...”(p.3 du RooT User’s Guide, [13])

A titre indicatif, on peut citer quelques éléments phares de RooT :

- un interpréteur C++ en ligne de commande, CINT,
- la gestion d’histogrammes et de l’adaptation de courbes,
- une interface graphique modulable,
- un ensemble conséquent de classes disponibles,
- possibilité de calcul parallèle (PROOF)...

4.2 Un paramètre important : le booster α

Parmi les 15+1 paramètres du modèle, il en est un qui ressort plus particulièrement. Initialement, ce paramètre était absent. Le modèle avait un jeu de quinze paramètres et manifestement, ne parvenait pas à reproduire les données expérimentales. L’idée d’un paramètre ad hoc supplémentaire fit alors son apparition, et implémentée dans le code, fixée à 0.02 fm^{-1} , l’idée déboucha sur un modèle AzHydro désormais en mesure de générer des courbes adaptées aux données expérimentales.

Le booster α fait partie du groupe de paramètres liés aux conditions initiales, il intervient à la fin de la phase de pré-équilibre, au début de la phase hydrodynamique. Physiquement, il consiste à dire qu’à ce moment, où l’équilibre chimique et cinétique local est atteint, le système n’est pas au repos (cas $\alpha = 0$), mais qu’il existe déjà un mouvement collectif du fluide, dont l’ampleur est quantifiée par la valeur de α .

Le booster apparaît donc comme une nécessité pour reproduire les données expérimentales du RHIC. Cependant, cette nécessité peut intriguer : on voit un paramètre prendre le rôle principal au sein du modèle, se démarquer en ayant l’influence la plus forte sur les courbes de sortie et, quelque part, devenir le paramètre qui assure la viabilité du modèle... et ceci, tout en étant un paramètre ad hoc⁶.

S’il demeure actuellement incontournable, le booster n’est pas pour autant acquis ou compris. C’est ce qui justifie que l’on s’attarde plus particulièrement sur son étude.

Peter Kolb et Ulrich Heinz avaient validé leur idée sur diverses particules (Ω , π , K , \bar{p} , ...) pour $\alpha = 0.02 \text{ fm}^{-1}$ à partir de données issues

⁶Il y a ici une hypallage hasardeuse... Ce n’est pas à proprement parler le paramètre qui est ad hoc, on connaît son interprétation physique, mais c’est en fait l’hypothèse qu’il incarne qui est, elle, ad hoc.

des collisions les plus centrales du RHIC, pour Au+Au à $\sqrt{S_{NN}} = 200$ GeV [12].

Un travail a consisté à reprendre le même genre d'étude - « AzHydro reproduit-il les spectres expérimentaux des collisions Au+Au du RHIC? » - mais dans un contexte ici différent :

- pour $\sqrt{S_{NN}}$ plus faible (62 GeV),
- pour différentes particules étranges (K , Λ , Ξ , Ω),
- et à différentes centralités, c'est-à-dire pour des collisions centrales ($b = 2.4$ fm, centralité 0-5%), des collisions intermédiaires ($b = 5.7$ fm, centralité 10-20%) et des collisions périphériques ($b = 10.5$ fm, centralité 40-60%).

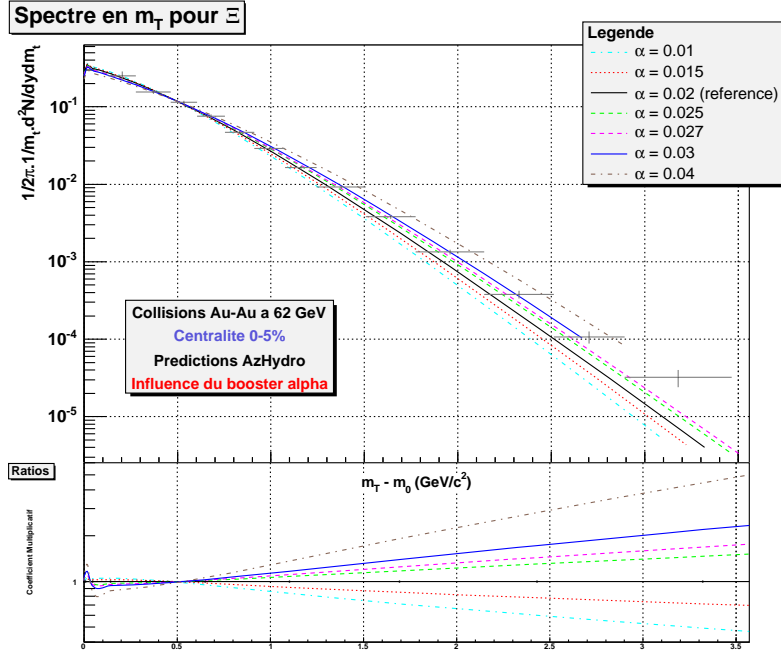


FIG. 4.2 – Résultat prédictif pour les particules Ξ dans le cas de collisions *centrales*

La Fig. 4.2 donne à titre illustratif le résultat obtenu pour les particules Ξ issues de collisions centrales. Les courbes prédictives issues du modèle sont représentées pour sept valeurs différentes de α et à mettre en regard des points expérimentaux signalés avec leurs barres d'incertitude. On remarque que la courbe associée à la valeur de référence $\alpha = 0.02 \text{ fm}^{-1}$ n'est pas la courbe qui épouse le mieux les points, la courbe liée à $\alpha = 0.03 \text{ fm}^{-1}$ semble la plus adaptée.

Si maintenant on regarde ce qui se passe pour des collisions intermédiaires et périphériques, on observe que la valeur retenue par

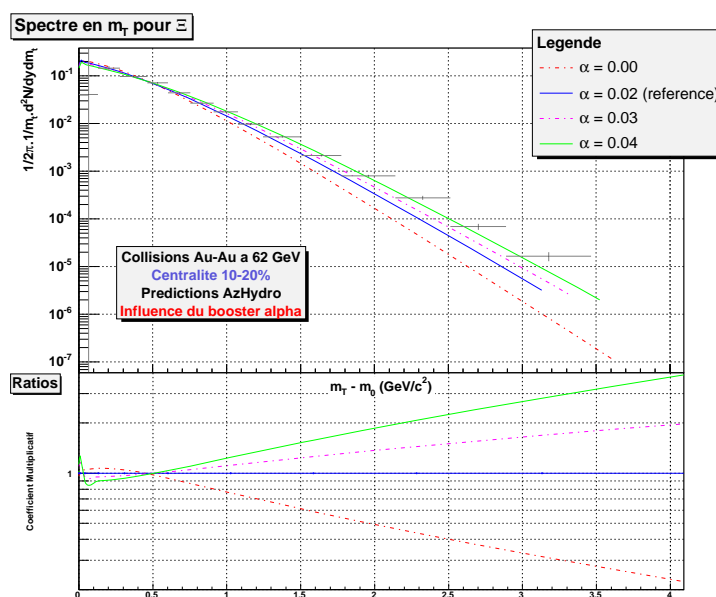


FIG. 4.3 – Résultat prédictif pour les particules Ξ dans le cas de collisions *intermédiaires*

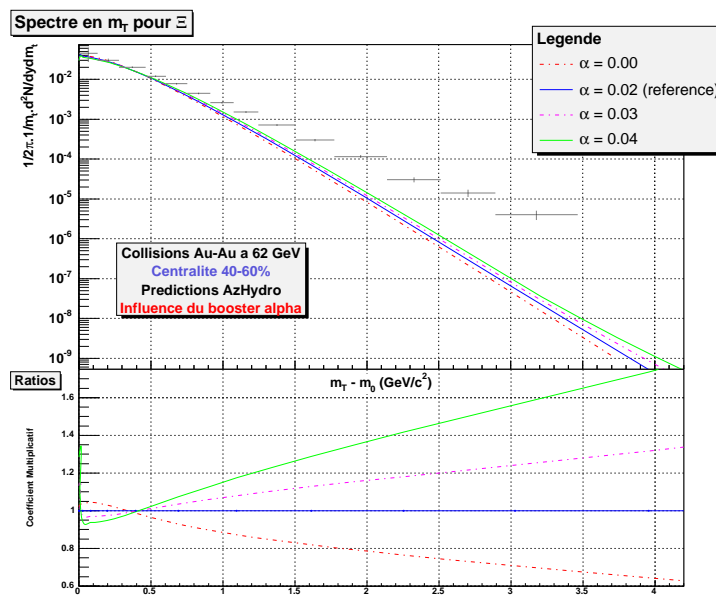


FIG. 4.4 – Résultat prédictif pour les particules Ξ dans le cas de collisions *périphériques*

Kolb et Heinz ne marche plus vraiment... au même titre que celle retenue précédemment pour les collisions centrales... Pour les collisions intermédiaires, on peut encore se satisfaire d'une nouvelle valeur, $\alpha = 0.04 fm^{-1}$, mais cette valeur devra elle-même être abandonnée dans le cas de collisions périphériques, manifestement pour une valeur encore plus élevée. Il faut bien préciser ici que cette évolution des choses n'est pas typiquement liée aux Ξ , les résultats rattachés aux autres baryons étranges vont dans le même sens.

Ainsi, ce qui ressort de ce travail, c'est une fois encore la nécessité d'un booster α pour reproduire les données expérimentales - comprenez la nécessité d'un booster non nul - mais également, et c'est ce qui est déjà plus inattendu, la nécessité de changer α avec la centralité, de l'augmenter au fur et à mesure que les collisions deviennent périphériques. Constat d'autant plus surprenant qu'il semblait plus ou moins acquis dans le milieu de recherche que α était fixé indépendamment de la centralité. Le travail effectué relativement au α est donc plutôt de nature à relancer les questions autour de ce paramètre qu'à clarifier la situation.

4.3 Deuxièmes Exemples : un positif, un négatif

Un exemple positif : l'espérance de p_t en fonction de la centralité

Parmi les autres résultats obtenus, on peut citer le graphe donnant l'évolution de l'espérance mathématique de l'impulsion transverse en fonction de la centralité⁷.

Expérimentalement, on retrouve le graphe de la Fig. 4.5. On constate pour toutes les particules que $\langle p_t \rangle$ est minimal pour les collisions les plus périphériques, augmente quand la collision devient de plus en plus centrale, mais semble par ailleurs saturer assez rapidement. Et c'est ce dernier point qui fait l'objet de l'illustration ici. Physiquement, on ne comprend pas encore cette saturation. Or, si l'on s'attarde sur le même résultat, mais cette fois livré par AzHydro (voir Fig. 4.6), on remarque le même comportement du $\langle p_t \rangle$, ce qui nous conduirait à penser que ce serait avant tout du côté de l'hydrodynamique qu'il faut chercher les réponses aux questions sur cette saturation.

Un exemple négatif : le rapport \bar{p}/p pour différents taux de processus durs

⁷Le nombre moyen de participants $\langle N_{part} \rangle$ est directement fonction de la centralité : plus la collision devient centrale, plus le nombre de participants augmente.

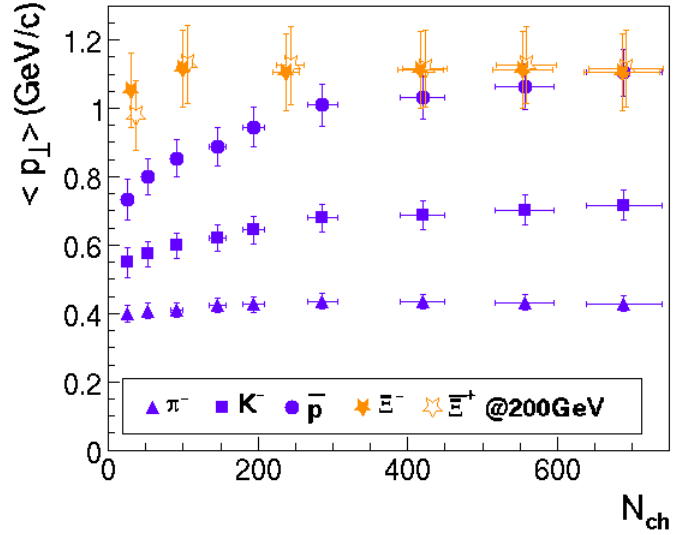


FIG. 4.5 – Espérance de l'impulsion transverse en fonction de $\langle N_{part} \rangle$ du point de vue expérimental du RHIC

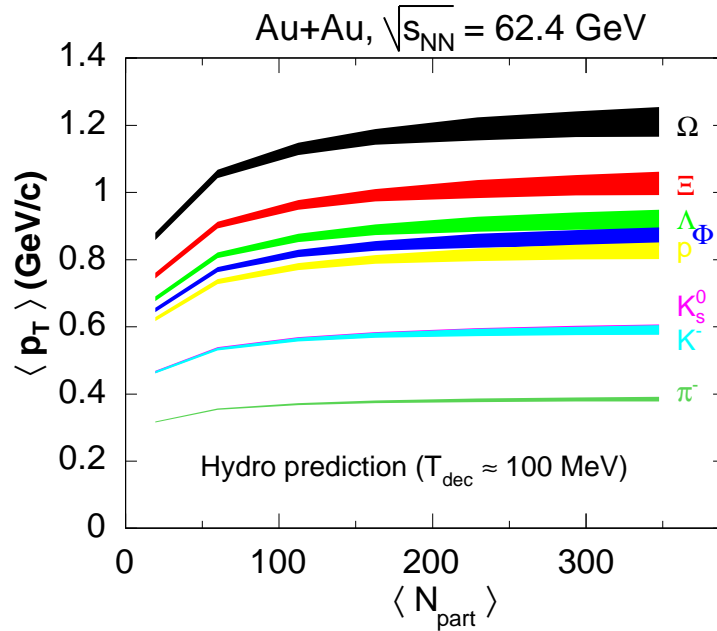


FIG. 4.6 – Espérance de l'impulsion transverse en fonction de $\langle N_{part} \rangle$ du point de vue modélisation par AzHydro

Un autre exemple, cette fois relatif au taux de processus durs, se montre de moins bon augure... Mettons de côté dans un premier temps le taux de processus durs - sur lequel nous reviendrons d'ici une vingtaine de lignes - pour expliciter différents points utiles à la compréhension du problème.

Le rapport \bar{p}/p des spectres de l'anti-proton et du proton est un indice, il permet d'évaluer la production de nouveaux quarks relativement aux quarks initialement présents. En effet, l'anti-proton est exclusivement composé de particules *produites* dans la boule de feu (\bar{u} et \bar{d}), le proton quant à lui peut comporter des quarks issus de la boule de feu mais également des nucléons initiaux.

$$\frac{\bar{p}}{p} = \frac{\text{anti-quarks produits}}{\text{quarks initiaux} + \text{quarks produits}} = \frac{\bar{x}}{q_i + x}$$

Cependant, en ce qui concerne la matière produite, q et \bar{q} sont forcément produits dans des quantités identiques; l'émergence dans la boule de feu d'un quark va forcément de paire avec celle d'un anti-quark.

$$\text{Or : } \bar{x} = x \quad \text{donc : } \frac{\bar{p}}{p} = \frac{x}{q_i + x} = f(x)$$

Le déséquilibre entre l'anti-proton et le proton provient donc exclusivement des quarks des nucléons initiaux. Or les probabilités de produire des paires \bar{u}/u et \bar{d}/d de basse impulsion transverse sont particulièrement fortes⁸. Le déséquilibre est donc noyé dans la quantité de paires créées.

$$f(500) = \frac{500}{q_i + 500} \rightarrow 1$$

En revanche, la création de nouvelles particules u , \bar{u} , d et \bar{d} avec une forte impulsion transverse est rattachée aux événements plus rares. Le déséquilibre ressort alors de façon plus évidente.

$$f(5) = \frac{5}{q_i + 5} < 1$$

Ainsi, de manière générale, on s'attend à voir chuter le rapport anti-proton/proton à haute impulsion transverse (f est une fonction

⁸Les paires \bar{u}/u et \bar{d}/d sont les paires les plus légères qui soient, leur création requiert le minimum d'énergie possible.

croissante(!) ...).

On revient alors sur la notion de processus durs. Lors d'une collision, on assiste d'une part à des chocs élastiques et d'autre part à des chocs inélastiques. Dans un cas, l'énergie cinétique initiale est prise et redistribuée, sur les partenaires de chocs ; dans l'autre, elle est prélevée et consommée, pour créer de nouvelles paires à partir des partenaires. Un choc élastique conserve l'énergie cinétique, un choc inélastique qui génère des particules génère forcément des particules à énergie cinétique plus faible.

Un processus dur pur est un choc clairement inélastique : l'intégralité de l'énergie initiale des partenaires est consommée pour la genèse de nouvelles particules. Ainsi, on s'attend à ce que la production de particules à forte impulsion transverse, dans le cas d'une collision à fort taux de processus durs, soit plus faible que dans le cas à faible taux ; la chute à haut p_t mentionnée au paragraphe précédent sera d'autant plus prononcée que le taux de processus durs est élevé.

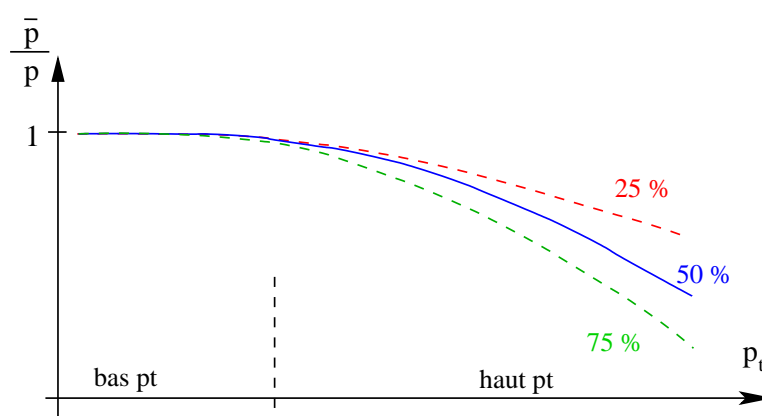


FIG. 4.7 – Ce que l'on attend vis-à-vis de l'influence du taux de processus durs

Or, si l'on cherche à voir le comportement d'AzHydro sur ce point bien établi expérimentalement, on aboutit au graphe de la Fig. 4.8, soit à un double problème : d'une part, l'absence de chute du rapport à haut p_t et d'autre part, l'absence de distinction (à 10^{-3} près) entre les courbes associées aux différents taux de processus durs...

4.4 Inventaire avant conclusion

Ce qui était déjà fait à t_0

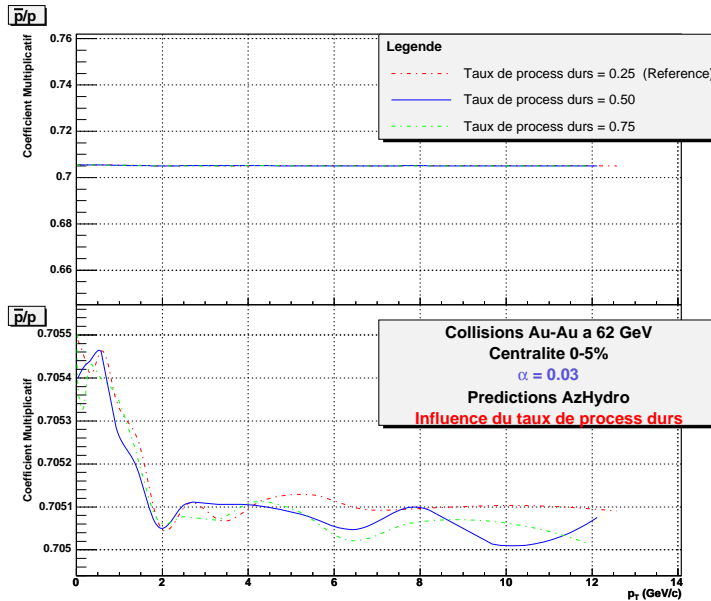


FIG. 4.8 – Résultat d’AzHydro vis-à-vis du rapport anti-proton/proton en fonction de p_t

Au 4 juillet 2005, Jeff Speltz et Jérôme Baudot avaient déjà écrit une macro sous RooT qui permet de récupérer systématiquement, à partir des fichiers .dat produits par AzHydro, les spectres en p_t et en m_t , ainsi que le v_2 (et le v_4), pour quinze particules choisies sur les 143 disponibles. La macro rassemble les données nécessaires, constitue les différents histogrammes associés et les écrit dans un fichier .root, dédié à RooT... Par ailleurs, Jeff Speltz avait déjà entamé l’exploitation du modèle, notamment à $\sqrt{S_{NN}} = 200$ GeV et 130 GeV.

Ce qui a été réalisé

Le travail effectué lors du stage se place dans le cadre des collisions Au+Au du RHIC à $\sqrt{S_{NN}} = 62$ GeV. Les tâches peuvent être divisées en deux grandes catégories :

1. Etude systématique de paramètres du modèle, parallèlement à des confrontations aux données expérimentales.
 - Influence du taux de processus durs (pour $K^0, \Lambda, \Xi, \Omega + \bar{p}/p$),
 - influence de la durée de pré-équilibre T_0 (pour $K^0, \Lambda, \Xi, \Omega$),
 - influence de la section efficace (pour $K^0, \Lambda, \Xi, \Omega$),
 - influence du α , à différentes centralités (pour $K^0, \Lambda, \Xi, \Omega$),
 - tentative d’identification du paramètre B_0 (\bar{p}/p),
 - reconstruction de l’espérance en p_t en fonction de $\langle N_{part} \rangle$.

2. Confrontation du modèle à des résultats théoriques
 - Le rapport $v_4/(v_2)^2 = 2$,
 - les spectres non pas en fonction de p_t mais en fonction p_t/m_0 (pour $K^0, \Lambda, \Xi, \Omega, \pi^0, p$).

L'ensemble de ces résultats a été produit sous RooT en C++ à l'aide de macros comportant cent à six cents lignes de code. Comme le montre la Fig. 4.9, le travail s'est déroulé en plusieurs étapes successives articulées autour de deux réunions-bilans avec les physiciens du groupe.

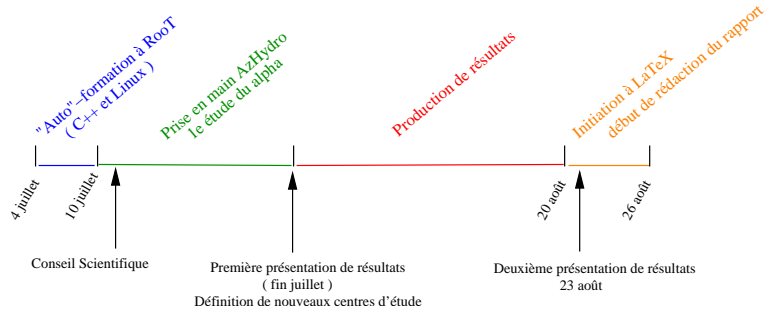


FIG. 4.9 – Déroulement du stage

Ce qui reste au final

Du point de vue de l'expérimentateur, il faut comprendre que le modèle AzHydro est en quelque sorte une boîte noire... C'est une équation d'état encapsulée dans un modèle numérique dont les tenants et aboutissants échappent, au moins en partie. Il s'agit donc de chercher, cerner, enquêter et comprendre le fonctionnement et les limites... d'une boîte.

Le travail réalisé a permis d'avancer cette étude, sans toutefois lever définitivement le voile sur l'hydrodynamique et le plasma de quarks et de gluons... les résultats étant parfois eux-mêmes équivoques, mais également en raison du caractère non-exhaustif de l'étude : il faudrait poursuivre sur les données du RHIC à différents $\sqrt{S_{NN}}$ (62, 130, 200 GeV), pour différents types de noyaux collisionnés (d-Au, Au+Au, Cu+Cu) en s'attardant sur d'autres particules (143 disponibles), avant de peut-être reconduire les mêmes études cette fois pour les futurs collisions du LHC.

Conclusion

Concrètement, le point central du stage a donc été l'étude du modèle d'hydrodynamique relativiste idéale qu'est AzHydro. Cette étude s'est heurtée comme souvent - au moins en physique des particules - à une double difficulté : la complexité de la physique *théorisée* et la complexité de la physique *expérimentée*. Le rapport a dernièrement insisté sur les mystères d'un modèle-boîte-noire mais il faut rappeler également que les données expérimentales ont elles aussi un caractère trouble. Les données expérimentales ne sont pas des résultats bruts et directs de la boule de feu, elles sont *élaborées*, elles intègrent elles-mêmes de façon sous-jacente un certain nombre de modèles (modèle de Glauber, modèle de Woods-Saxon, ...), d'hypothèses ou concepts et peuvent à leur tour se montrer non-fiables (problème de *feed-down*, barres d'erreurs importantes, ...). L'expérimentateur se retrouve donc ballotté, entre des théories en construction perpétuelle et des données expérimentales qui n'ont pas forcément le caractère infailible - plus exactement, le caractère *assertorique* - auquel on pouvait s'attendre.

Un des a priori que j'avais sur le monde de la recherche en physique tient en une image. La physique serait une carte, grandeur nature, calquée sur le réel, dont les continents seraient l'inventaire des territoires connus, les océans, des zones d'ombres cachant des terres à découvrir. Sur cette mappemonde, il y aurait nécessairement la recherche : les littoraux au climat tourmenté, des ports et des phares.

« La physique m'intéresse-t-elle *effectivement* ? ». C'était la question posée dans l'introduction, c'était la question de mon stage. Le mot *intérêt* n'est ici pas innocent. Il y a en philosophie un texte de Heidegger sur l'intérêt ; il y parle des gens qui se disent « intéressés » par la philosophie ; il y rappelle l'étymologie du mot intérêt. *Inter esse*.

Heidegger nous fait prendre conscience que, derrière un mot affaibli par l'usage, se cache en fait un sens fort, quelque chose de vital. Il s'agit d'« être entre » les choses, d'y vivre véritablement au milieu. Et c'est dans ce sens qu'était posée la question du stage.

La recherche en physique m'intéresse-t-elle ? ...

Il s'agissait de voir quelles étaient mes aptitudes au milieu des bour-

rasques et des roulis ; il s'agissait de savoir si je pouvais vivre sous un climat océanique, de vérifier si, comme je le présumais, j'avais le pied marin... Deux mois d'été pour y répondre, c'est évidemment un temps un peu court pour pouvoir se prononcer catégoriquement. A défaut, ce qui est sûr, c'est qu'avec un peu d'imagination, il est toujours possible de passer des vacances *intéressantes* sur un bord de mer...

Bibliographie

- [1] Site Internet de l'IReS, <http://ireswww.in2p3.fr/>
Site visité pour la dernière fois le 28 août 2005.
- [2] Site Internet d'ALICE, <http://alice.web.cern.ch/>
Site visité pour la dernière fois le 10 septembre 2005.
- [3] Site Internet de STAR, <http://www-star.bnl.gov/>
Site visité pour la dernière fois le 10 septembre 2005.
- [4] *Introduction à la Physique des Particules* (PHY - 10518)
Luc Marleau, Université de Laval, Canada.
<http://feynman.phy.ulaval.ca/marleau/notesdecours.htm>
Site visité pour la dernière fois le 10 septembre 2005.
- [5] *Introduction à la physique nucléaire et corpusculaire I*
Olivier Schneider, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.
<http://lphe.epfl.ch/oschneid/cours/2004-2005/cours3.html>
Site visité pour la dernière fois le 10 septembre 2005.
- [6] *Particle physics booklet*
Particle Data Group, Lawrence Berkeley National Laboratory
<http://pdg.lbl.gov/>
Site visité pour la dernière fois le 5 septembre 2005.
- [7] *Plasma de Quarks et de Gluons et matière étrange du SPS au LHC*
Christian Kuhn, Institut de Recherche subatomique
Ecole Joliot-Curie de Physique Nucléaire, Maubuisson, France
7-12 septembre 1998
Disponible sur demande sur le site Internet de l'Ecole de
Maubuisson, <http://www.cenbg.in2p3.fr/extra/autresites/joliot-curie/joliotcurie.html>
- [8] *Reconstruction et étude des baryons multi-étranges dans les collisions d'ions lourds ultra-relativistes à $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV avec l'expérience STAR au RHIC* - Chapitre I : Physique des ions lourds
Julien Faivre, Université Louis Pasteur de Strasbourg
1^{er} octobre 2004 (Thèse de doctorat d'état)

- [9] *A comparison between an ultra-relativistic Au + Au collision and the primordial Universe*
Jens Sören Lange, Institut für Kernphysik, Francfort
Disponible depuis la base de données de Stanford
<http://www.slac-stanford.edu/spires>, référence HEP-PH 0403104
- [10] *Highly relativistic nucleus-nucleus collisions : the central rapidity region*
J.D. Björken, Fermi National Accelerator Laboratory,
in Physical Review D, 1 janvier 1983, Volume 27, p.140-151
- [11] *Hydrodynamics at RHIC*,
Pasi Huovinen, School of Physics and Astronomy, University of Minnesota,
Cracow Epiphany Conference on Quarks and Gluons in Extreme Conditions,
Janvier 2002, Cracovie, Pologne
Disponible depuis la base de données de l'université de Stanford
www.slac-stanford.edu/spires, référence nucl-th/02044029v1
- [12] Page d'accueil du site consacrée au modèle AzHydro,
Peter Kolb, Ulrich Heinz, Division de Physique Théorique, CERN
www.cunuke.phys.columbia.edu/OSCAR/models/AZHYDRO/AZ-HYDRO_home.html
On y trouvera notamment deux articles importants :
1- un article donnant la philosophie du code AzHydro,
wwwl.physik.tu-muenchen-de/~pkolb/publications/prc62.pdf
P.F. Kolb, J. Sollfrank, U. Heinz, Physical Review C62 (2000) 05 49 09
2- une notice donnant les principaux résultats fondés sur AzHydro,
wwwl.physik.tu-muenchen-de/~pkolb/publications/qgp3.ps.gz
P.F. Kolb, U. Heinz, archive arXiv nucl-th/0305084
- [13] Page d'accueil de ROOT, <http://root.cern.ch>

Index

$\sqrt{s_{NN}}$, 22

AGS, 13

ALICE, 4

ANTARES, 3

antiparticule, 9

AzHydro, 22

baryon, 10

Big Bang, 13

BNL, 4, 13

booster α , 24

boson, 8

centralité, 15, 27

CERN, 1, 4, 13

CMS, 4

collisions élastiques, 15

collisions inélastiques, 15

confinement, 11

couleur, 9

D0, 4

déconfinement, 11

DESY, 1

écranage, 11

étoiles à neutrons, 13

fermions, 8

gaz hadronique, 15

gel chimique, 15

gel cinétique, 15

hadron, 9

hadronisation, 9, 15

hypéron, 21

interaction faible, 16

LHC, 4, 13

liberté asymptotique, 8, 10

méson, 10

Modèle Standard, 7

NEMO3, 3

Npart, 27

OPERA, 4

paramètre d'impact, 15, 20

phase hadronique, 15

potentiel d'interaction, 10

processus durs, 30

QCD, 8, 9

QED, 8

QGP, 11

RHIC, 4, 13

Root, 23

saveur, 9

spectre, 18, 22

SPS, 13

STAR, 4

v2,v4, 18, 22

vertex primaire, 14

yield, 18