

SYNTHÈSE DE L'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Domaine : Physique Nucléaire

Présentée par :

Rachid NOUICER

Docteur de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, France
Physicien à Brookhaven National Laboratory, New York, U.S.A.

Titre :

**Signatures d'un Nouvel État de la Matière Nucléaire
"Fluide Quasi Parfait de Quarks et de Gluons"
dans les Collisions des Ions Lourds aux Énergies du RHIC**

Laboratoire :

Unité mixte de Recherche CNRS-IPHC et Université de Strasbourg

Garant de l'HDR :

Monsieur Christian BECK

Directeur de Recherche

Unité mixte de Recherche CNRS-IPHC et Université de Strasbourg

SYNTHÈSE DE L'HDR

Cette thèse d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR) est constituée de six chapitres. Le chapitre I est consacré à une description de mon parcours scientifique, un récapitulatif de mes travaux de recherche, expériences professionnelles, productions scientifiques, liste de mes présentations orales dans des conférences et liste de mes publications. Le chapitre II introduit l'objectif de recherches de la physique des ions lourds, les axes principaux de recherche du collisionneur RHIC et le plan du manuscrit. Le chapitre III présente le contexte physique du plasma de Quarks et de Gluons (PQG) incluant les aspects théoriques, les aspects expérimentaux, les signatures du déconfinement et la physique du SPS au RHIC. Le chapitre IV porte principalement sur ma contribution personnelle à la construction, l'assemblage, l'installation, le fonctionnement, l'évaluation du signal et la maintenance des détecteurs pixel au silicium pour la mesure de la multiplicité des particules chargées pour l'expérience PHOBOS et le traceur de vertex en silicium (VTX) dont le but est de différencier les mesures des quarks lourds charme et beauté dans l'expérience PHENIX au RHIC. Le chapitre V présente mon travail d'analyse par la méthode de "hit-counting" (4π) qui permet d'obtenir les distributions de pseudorapidité de densité des particules chargées dans PHOBOS au RHIC. Ce chapitre illustre également mes prédictions pour le LHC ainsi que mes publications comme auteur principal et mes responsabilités comme "co-conveneur" du groupe de multiplicité des particules chargées. Finalement, le chapitre VI présente les points culminants des résultats du RHIC: "Fluide Quasi Parfait de Quark et de Gluons". Ce chapitre illustre une grande richesse de découvertes scientifiques, et quelques grandes surprises produites au RHIC. Celles-ci ont fourni des aperçus nouveaux dans les calculs de QCD ainsi ont réalisé que les nucléons et noyaux soulèvent une multitude de questions passionnantes et irrésistibles. À la fin de ce chapitre, j'essaye de conclure en répondant à la question: Qu'avons-nous appris et où en sommes-nous?

Depuis la fin de ma thèse en 1997, mon travail de recherche s'inscrit dans le domaine de la physique des ions lourds ultra-relativistes. Ce domaine de recherche affiche aujourd'hui une ambition scientifique qui vise à comprendre de manière globale comment se construit la matière nucléaire. Le thème central de mes activités de recherche est l'étude des propriétés et du comportement de la matière nucléaire dans des conditions extrêmes de température et de densité d'énergie. Cette étude est basée sur l'analyse des réactions noyau-noyau produites au RHIC. Avec le RHIC, la densité d'énergie au coeur de la collision de deux noyaux pourrait atteindre $\sim 8 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ (suffisamment au dessus du seuil de formation d'un plasma de quarks et de gluons tel qu'il est prédit par QCD; i.e $1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$). Mon travail de recherche s'effectue au sein des collaborations internationales formées autour de l'expérience PHOBOS (1998 à 2009) et dans celles autour de l'expérience PHENIX (depuis 2003 à présent) installées, toutes les deux auprès du collisionneur RHIC au BNL (U.S.A.).

Pour étudier la sous-structure nucléaire, il a été suggéré qu'il est nécessaire de déposer suffisamment d'énergie dans le noyau pour exciter ses degrés de liberté internes. Cette idée est semblable au phénomène de l'ionisation causée par le dépôt d'énergie dans les atomes qui a permis de révéler la structure atomique, on a cru qu'un processus semblable pourrait exister pour que les systèmes nucléaires libèrent des quarks. Malheureusement, les quarks et les gluons ne se comportent pas d'une façon conventionnelle. Leurs interactions sont décrites en termes de la Chromodynamique Quantique (anglais: QCD) et bien que l'ionisation d'un hadron dans ses quarks constitutifs ne soit pas possible, QCD tient compte de la formation "d'un gaz idéal" des quarks et des gluons (appelé Plasma de

Quarks et de Gluons: PQG). Sous une extrême densité, les hadrons peuvent se recouvrir à un tel degré qu'ils perdent leur identité, laissant seulement un système constitué de quarks et de gluons. Ainsi si une quantité d'énergie suffisamment grande pouvait être déposée dans la matière nucléaire, il peut être possible d'observer une transition de phase pour un tel état.

J'ai rejoint les expériences de RHIC bien avant que le collisionneur RHIC ait commencé à produire les premiers faisceaux. La première étape pour faire la physique était donc de construire des détecteurs pour mesurer des observables importantes qui mèneront aux grandes découvertes physiques. Ma contribution personnelle technique ("hardware") se situe dans la construction du détecteur pixel en silicium pour l'expérience de PHOBOS et le traceur de vertex en silicium pour l'expérience PHENIX.

- dans un premier temps (de 1998 à 2005), j'étais le physicien responsable de la construction, de l'assemblage et de l'opération du détecteur pixel en silicium pour la mesure de la multiplicité des particules chargées par l'expérience PHOBOS. J'ai dirigé le laboratoire de silicium à l'Université de l'Illinois à Chicago pendant la phase de construction puis je me suis déplacé au laboratoire national de Brookhaven pour diriger en personne l'installation finale et l'opération du détecteur. J'ai été profondément impliqué dans tous les aspects de la construction du détecteur, y compris dans les négociations de la fabrication des senseurs en silicium, les tests effectués, et de l'étude des détecteurs silicium dans la phase d'opération avec les faisceaux. Pendant la durée de fonctionnement de PHOBOS à RHIC (1999 à 2005), j'étais l'un des deux experts qui ont dirigé et supervisé le fonctionnement du détecteur et assuré la qualité des données. C'était une responsabilité essentielle puisque les détecteurs de silicium peuvent être facilement affectés par des flashes intenses de rayonnements pendant les instabilités de l'accélérateur. Le détecteur pixel en silicium a continué à fonctionner sans faute pour la durée de vie de PHOBOS et pendant des augmentations importantes de la luminosité des faisceaux de RHIC.
- dans un deuxième temps (de 2003 à présent), je suis "député/acting subsystem manager durant la construction et manager durant l'opération" en charge du détecteur stripixel traceur de vertex en silicium (VTX) dans le cadre de la mise à jour de l'expérience PHENIX. Celle-ci assure les mesures des quarks lourds charme (c) et beauté (b) et l'étude de la structure de spin du proton aux énergies du RHIC. Mes responsabilités se résument à la construction, l'assemblage, le fonctionnement et la mise en service de ce détecteur pour l'expérience PHENIX durant l'acquisition des données au RHIC. J'ai travaillé sur la conception et à la construction de détecteur en tant que contact principal et co-directeur du détecteur de stripixel. Avant tout, j'ai joué un rôle déterminant dans la résolution d'un problème de conception technique qui aurait pu de manière significative retarder le projet. J'ai personnellement surveillé chaque étape de la construction. Après que le projet du VTX ait été accompli et soit entré dans la phase d'opération, j'ai été nommé en tant que directeur de projet du détecteur de stripixel dans le plan d'opération de VTX dans l'expérience PHENIX.

Dans ces deux projets, j'ai montré ma capacité importante de direction et d'enseignement (tutelle) à un haut niveau avec la physique et les technologies des détecteurs en silicium. Mes travaux de recherche dans le domaine du hardware ont été valorisés par plusieurs participations à des congrès en tant qu'invité, et par des publications dans des revues à comité de lecture:

Publications choisies: Rachid Nouicer et al.

- * Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A461 (2001) 143
Titre: "Silicon Pad Detectors for the PHOBOS Experiment at RHIC"
- * Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 499 (2003) 603
Titre: "The PHOBOS detector at RHIC"
- * Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 261 (2007) 1067
Titre: "PHENIX upgrade: Novel stripixel detector for heavy quark detection and proton spin structure measurements at RHIC energies"
- * Proceedings of Science VERTEX2007 (2007) 042
Titre: "Silicon Vertex Tracker for PHENIX at RHIC: Capabilities and Detector Technology"
- * Journal of Instrumentation, JINST 4 P04011 (2009)
Titre: "Status and Performance of New Silicon Stripixel Detector for the PHENIX Experiment: Beta Source, Cosmic-rays and Proton Beam at 120 GeV"

Parallèlement à mon rôle dans la construction des détecteurs, j'ai joué un rôle important dans l'analyse des données expérimentales et la publication des résultats. Ma contribution personnelle dans l'analyse des données expérimentales se résume en deux parties:

- dans un premier temps, j'ai joué un rôle principal dans l'analyse de données et la publication des résultats sur les distributions en pseudorapidité des particules chargées mesurées dans des collisions Au+Au, Cu+Cu et d+Au à plusieurs énergies de RHIC : 19.6, 22.4, 62.4, 130 et 200 GeV, aussi bien dans des collisions de p+p à 200 et à 410 GeV en utilisant le même détecteur en silicium. Ceci a permis de faire une étude systématique complète de la production de particules en fonction de l'énergie dans ces collisions. J'étais l'auteur correspondant sur trois publications de physique et j'ai joué un rôle essentiel ou principal dans la rédaction de huit articles de physique. Pendant ma période sur PHOBOS, en plus de participer à la mesure de $dN/d\eta$ pour presque chaque combinaison d'énergie disponible et espèces, j'étais également co-coordonateur du groupe de travail de la multiplicité aussi bien un membre du comité d'examen interne de physique du flot. Certaines de mes publications significatives sont :

▷ Publications (auteur principal) : exécutant l'analyse de données, écrivant l'article, interagissant avec l'éditeur et les réfères du journal

- * Physical Review Letters 102 (2009) 142301
Titre: "System Size, Energy and Centrality Dependence of Pseudorapidity Distributions of Charged Particles in Relativistic Heavy Ion Collisions"
- * Physical Review C72 (2005) 031901(R)
Titre: "Scaling of Charged Particle Production in d+Au Collisions at 200 GeV"
- * Physical Review Letters 93 (2004) 082301
Titre: "Pseudorapidity Distribution of Particles in d+Au Collisions at 200 GeV"

▷ **Publications (auteur clé) : analyse des données, contribution importante à l'article:**

- * Physical Review C83 (2011) 024913
Titre: "PHOBOS Results on Charged Particle Multiplicity and Pseudorapidity Distributions in Au+Au, Cu+Cu, d+Au, and p+p Collisions"
- * Physical Review C74 (2006) 021901(R)
Titre: "Particle Pseudorapidity Distributions in Au+Au Collisions at 62.4 GeV"
- * Physical Review C70 (2004) 021902(R)
Titre: "Collision Geometry Scaling of $dN_{ch}/d\eta$ in Au+Au from 19.6 to 200 GeV"
- * Physical Review Letters 91 (2003) 052303
Titre: "Significance of the Fragmentation Region in Heavy Ion Collisions"

▷ **Membre du comité de revues internes sur les mesures de flot :**

- * Physical Review Letters 98 (2007) 242302
Title: "System Size, Energy, Pseudorapidity, and Centrality Dependence of Elliptic Flow"
 - * Physical Review Letters 97 (2006) 012301
Titre: "Energy Dependence of Directed Flow Over a Wide Range of Pseudorapidity in Au+Au Collisions at RHIC"
 - * Physical Review C72 (2005) 051901(R)
Titre: "Centrality and Pseudorapidity Dependence of Elliptic Flow for Charged Hadrons in Au+Au Collisions at 200 GeV"
 - * Physical Review Letters 94 (2005) 122303
Titre: "Energy Dependence of Elliptic Flow Over a Large Pseudorapidity Range in Au+Au Collisions at RHIC"
- dans un deuxième temps, analogue à mon rôle dans la construction de VTX, j'étais co-coordonateur de "Global-Hadrons Physics working group". Les co-coordonateurs sont responsables de la supervision et de la qualité de toute l'analyse dans PHENIX, aussi bien que pour la planification du prochain run de données, donnant un avis sur l'optimisation de la reconstruction de données, et contrôler la préparation et la rédaction des papiers de la collaboration. Après la construction du détecteur de VTX et les succès des prises de données par le détecteur VTX des collisions d' Au + Au dans Run-11 et p + p dans Run-12 à RHIC, j'ai joué un rôle principal dans l'analyse de données de la production du charme et de la beauté par l'intermédiaire des mesures des électrons et positrons issus de la décroissance des mésons D et de B produits dans les collisions Au + Au et p + p à 200 GeV. À la conférence de Quark Matter en 2012, j'ai présenté les premiers résultats du charme et de beauté mesurés par PHENIX à RHIC. Le titre de ma présentation était: "Probing Hot and Dense Matter with Charm and Bottom Measurements with PHENIX VTX Tracker". Certaines de mes publications significatives récentes sont :

Publications choisies recentes :

- * Nuclear Physics A 904-905C (2013) 647
Rachid Nouicer et al.
Titre: “Probing Hot and Dense Matter with Charm and Bottom Measurements with PHENIX VTX Tracker”
- * Journal of Physics: Conference Series 420 (2013) 012021
Rachid Nouicer et al.
Titre: “Heavy Flavor Physics in PHENIX”
- * Nuclear Physics A 862–863 (2011) 62
Rachid Nouicer et al.
Titre: “Recent Results from PHENIX Experiment at RHIC: Exploring the QCD Medium”
- * Phys. Rev. C 87 (2013) 034904
PHENIX Collaboration
Titre: “Transverse-Momentum Dependence of the J/ψ Nuclear Modification in d+Au Collisions at 200 GeV”
- * Physical Review Letters 105 (2010) 062301
PHENIX Collaboration
Titre: “Elliptic and Hexadecapole Flow of Charged Hadrons in Au+Au Collisions”
- * Physical Review C80 (2009) 024909
PHENIX Collaboration
Titre: “Systematic Studies of Elliptic Flow Measurements in Au+Au collisions”

Les recherches au RHIC ont produit une grande richesse de découvertes scientifiques, et quelques grandes surprises. Celles-ci ont fourni de nouvelles avancées dans les calculs de QCD ouvrant une foule de questions ouvertes et passionnantes. Les expériences de RHIC incluant les deux expériences, PHOBOS et PHENIX, dont je suis collaborateurs ont fourni des preuves solides sur la création d’un nouvel état de la matière nucléaire thermalisée ayant une densité d’énergie très élevée et un comportement collectif dynamique semblable à un liquide presque parfait. Il y a des indications fortes que cette matière thermalisée est issue d’un état de densité de haute énergie de gluons avec les propriétés probablement universelles.

Cette nouvelle matière du RHIC, sa densité et sa section efficace d’interaction importante ne sont pas compatibles au degré de liberté hadronique. Au contraire le milieu montre l’expansion collective avec un rapport viscosité sur entropie extraordinairement petit, suggérant l’emploi du terme “liquide parfait”.

Qu’avons-nous appris et où en sommes-nous ?

RHIC est l’un des plus grands succès du programme de recherche de la physique nucléaire. Cela a été une installation pilote; il était le premier collisionneur d’ions lourds ultra-relativistes (RHIC) et également le seul collisionneur produisant des faisceaux de protons polarisé. Le RHIC permet d’augmenter l’énergie (jusqu’à $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV dans le centre-de-masse) et l’intensité des faisceaux. Il produit une grande variété de faisceaux de collisions. Ceci est crucial parce qu’il facilite

une série de découvertes définitives dans un régime important de la matière nucléaire. Les expériences de RHIC ont publiés des preuves solides sur la création d'un nouvel état de la matière nucléaire thermalisée caractérisée par une densité d'énergie très élevée et avec un comportement collectif dynamique semblable à un liquide presque parfait.

Ici je resume quelques points qui ont été élaborés en détail dans ma thèse d'HDR, points qui pourraient permettre de dessiner une conclusion quant à la formation de cette nouvelle matière nucléaire :

- ▷ **Densité d'énergie :** la densité d'énergie des collisions d'ions lourds à RHIC est bien supérieure à celle prédite par QCD pour la transition de phase d'un gaz hadronique à un plasma de quarks et de gluons.
- ▷ **Équilibre chimique :** la production de particules semble être réalisée à partir d'un système en équilibre chimique, le rapport de particules est bien reproduit par les calculs des modèles thermiques, et les spectres en impulsion transverse sont compatibles avec ceux produits par une source en équilibre thermique animée d'une expansion avec une vitesse collective comme l'indique le modèle hydrodynamique.
- ▷ **Flot elliptique :** le flot elliptique obtenue des collisions d'ions lourds à RHIC est important en raison des fortes interactions dans le milieu dense et la limite hydrodynamique est atteinte avec un temps de thermalisation tres court.
- ▷ **Viscosité du milieu :** ces mesures de flot elliptique ont été très bien reproduites par les calculs du modèle hydrodynamique idéal ayant une viscosité extrêmement petite. Ceci indique que la matière nucléaire produite au RHIC dans les collisions non central Au + Au s'écoule comme un liquide avec une viscosité libre que l'a nome "liquide quasi parfait".
- ▷ **Dépendance de particules mésons versus baryons :** mise en évidence d'un dépendance de particules mésons versus baryons sur les observables liées au flot elliptique. Elle est prédite par les modèles décrivant la formation des hadrons par coalescence de quarks dans un milieu dense et thermalisé.
- ▷ **Jet quenching :** le facteur de modification nucléaire élucide clairement une forte suppression de la production de particules de grande impulsion transverse qui est une forte indication du processus du "jet quenching" dans les collisions centrales Au + Au. Le "quenching" des jets de particules correspond à une grande perte d'énergie due aux interactions de partons initiaux de grandes impulsions transverses durant leur traversée dans le milieu de grande densité créé.
- ▷ **Milieu de PQG opaque :** une autre observation inattendue relie au milieu crée, la forte suppression (traduit par la suppression du facteur de la modification nucléaire) étonnante des électrons et positrons de saveurs lourdes de grandes impulsions transverses, celle-ci a été observée dans des collisions Au + Au. Ceci indique que le millieu crée est opaque.

Maintenant, le RHIC est entré dans une nouvelle phase, phase II (ou RHIC-II), qui est dédiée à l'étude des propriétés de ce *Nouvel État de la Matière Nucléaire "Fluide Quasi Parfait de Quark et de Gluons"* en répondant aux questions suivantes:

- ★ Quelle est la nature de la matière de QCD à une basse température mais à une densité élevée de gluon, et comment il affecte la formation de plasma?
- ★ Comment le plasma se thermalise-t-il tellement rapidement?
- ★ Le QCD est fortement couplé, mais à quelle échelle? contient-elle des quasi-particules, ou l'accouplement fort élimine-t-il complètement l'excitation collective de longue durée de vie ("long-lived")?
- ★ Quel est le mécanisme des interactions de parton-plasma, et comment le plasma répond au dépôt d'énergie?

Les deux complexes RHIC et LHC sont complémentaires quand il s'agit d'exécuter avec succès le programme de recherche décrit : le LHC permet d'accéder aux sondes de hautes énergies (comme les jets de hautes énergies, quarkonia, et les particules $W/Z/\gamma$) avec taux au delà de celui accessible à RHIC. Cependant RHIC a un accès complémentaire aux sondes de hautes énergies dans des régions de la cinématique dans la région d'énergie inférieure. Avant tout, RHIC peut explorer en détail une région plus large du diagramme de phase de QCD comme le point critique, la structure de phase et la densité de baryon. En conclusion, le RHIC et le LHC sont deux complexes complémentaires qui permettent d'avoir une compréhension de la matière nucléaire.