Physique Hadronique à GSI et FAIR :
document pour le Conseil Scientifique de l'IN2P3, 8-9 Février 2018

Résumé

Nous proposons de contribuer aux expériences dans le domaine de la physique et la matière hadroniques sur l'installation FAIR (Facility for Antiproton and heavy Ion Research) en construction à Darmstadt, en Allemagne. Les premiers faisceaux sont prévus pour 2025, mais une activité intense de préparation (FAIR Phase-0) a démarré sur des machines existantes, et en particulier celle de GSI (Gesellschaft fuer SchwerIonenforschung). Ces dernières années, l'IN2P3 a eu un rôle très visible dans chacune des trois collaborations concernées CBM (Compressed Baryonic Matter), PANDA (AntiProton ANnihilation at DArmstadt) et HADES (High Acceptance Di-Electron Spectrometer).

CBM a pour objectif principal d'étudier la matière hadronique très dense produite dans les collisions d'ions lourds à des énergies de 10 à 15 GeV/nucléon au démarrage de FAIR (FAIR-phase 1) et 35 à 40 GeV/nucléon ultérieurement (FAIR-phase-2). L'IPHC à Strasbourg est très impliqué dans la collaboration et a conçu une nouvelle génération de détecteurs CMOS, dont les capacités en terme de vitesse de lecture, de tenue aux radiations et d'épaisseur sont parfaitement adaptées pour mesurer des vertex déplacés dans un environnement caractérisé par un très fort taux d'interactions et de grandes multiplicités de particules. Nous proposons un investissement de l'IN2P3 de 210-240 kEUR pour le développement et le test de différents prototypes pouvant déboucher sur la fabrication du détecteur de Micro Vertex de CBM.

Le dispositif PANDA équipera la ligne d'antiprotons de FAIR pour des études de structure des hadrons. L'IPNO a eu une contribution importante de 2004 à 2017 dans cette collaboration. Sur le plan technique, des études de R&D au niveau de la mécanique, de l'intégration et de la thermique ont été réalisées pour le calorimètre électromagnétique. Par ailleurs, plusieurs études de faisabilité, de nombreux travaux phénoménologiques, principalement dans le domaine de la structure du nucléon et des développements de codes pour la reconstruction et l'analyse de données ont aussi été fournis. Après la décision de l'IN2P3 en 2014 de ne pas participer à la construction du détecteur, ces activités se sont arrêtées progressivement, pour s'achever en 2017. Elles pourraient cependant être valorisées si une nouvelle participation de l'IN2P3 était proposée, comme celle en discussion actuellement au LAL au niveau du "slow control". Il s'agirait de mettre à profit l'expertise développée sur l'expérience LHCb pour concevoir, avec des moyens de l'ordre de 50 kEUR un système adapté aux conditions de l'expérience PANDA.

L'IPNO est depuis plus de quinze ans un membre très actif de la collaboration HADES à laquelle il contribue sur le plan technique, de la production scientifique et du management. Le programme scientifique d'HADES comporte à la fois un programme de mesures de matière hadronique à faible température et un programme d'études des résonances baryoniques en réactions élémentaires. Les expériences vont se poursuivre pendant quelques années sur l'accélérateur existant, tout en développant des synergies avec les collaborations CBM et PANDA, dans le cadre de l'opération FAIR-phase0, avant de se poursuivre sur FAIR. L'IPNO contribue à l'amélioration en cours du dispositif par une contribution au nouveau détecteur de tubes-paille qui couvrira les angles avant (somme demandée 40 kEUR dont 16.5 ont déjà été obtenus). Dans un premier temps, l'équipe de l'IPN s'investira plus particulièrement dans les expériences avec le faisceau de pions qui permettent des mesures des résonances baryoniques inédites pour la décroissance Dalitz ($R \to N e^+ e^-$) et inégalées en précision pour les canaux hadroniques. Puis, à partir de 2020, des expériences en réactions proton-proton pour l'étude des décroissances radiatives et Dalitz des hypérons pourront être réalisées. Le double programme d'HADES (ions lourds et réactions élementaires) sera ensuite poursuivi sur FAIR à plus haute énergie.

Ces trois projets sont très cohérents et complémentaires. Ils permettront une contribution très visible de l'IN2P3 dans les expériences de physique hadronique de FAIR, à la condition que les équipes soient renforcées dès maintenant.

1 Introduction

1.1 Contexte scientifique des expériences CBM, HADES et PANDA

L'interaction forte est à l'origine de la masse et du confinement des constituants de la matière. Son étude constitue donc un objectif fondamental de la physique moderne. Sa théorie fondamentale, la Chromodynamique Quantique (QCD) est bien établie, mais ne permet de décrire les phénomènes physiques qu'à grande énergie, correspondant à des distances bien plus petites que la taille du nucléon, où l'on peut utiliser la théorie des perturbations. La compréhension des manifestations de la QCD à grande distance ou faible énergie reste un problème ouvert que l'on cherche à résoudre expérimentalement par de nouvelles mesures dans différents régimes d'énergie visant principalement, soit à étudier la structure du spectre des hadrons, soit à explorer les différentes phases de la matière nucléaire. CBM (Compressed Baryonic Matter), HADES (High Acceptance Di-Electron Spectrometer) et PANDA (AntiProton ANnihilation at DArmstadt), les trois expériences ou projets de physique hadronique de GSI et FAIR, dans lesquels l'IN2P3 est impliqué s'inscrivent dans cette quête expérimentale. De façon très schématique, les dispositifs expérimentaux CBM et PANDA qui équiperont la future machine FAIR sont conçus pour explorer respectivement la matière dense produite dans les collisions d'ions lourds et le spectre des hadrons dans le domaine des quarks étranges et charmés. L'expérience HADES, quant à elle, développe depuis une quinzaine d'années à GSI un programme expérimental comportant à la fois des études de matière nucléaire à température modérée et des mesures de physique hadronique en réactions élementaires pour étudier en particulier les propriétés des résonances baryoniques.

1.2 GSI et FAIR

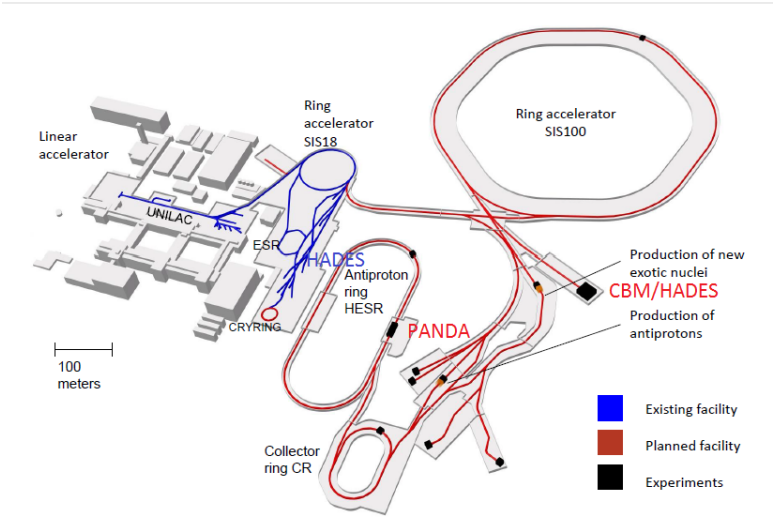

FIGURE 1 – dispositif FAIR avec la partie existante en bleu et la partie à construire en rouge. L'emplacement des expériences HADES, CBM et PANDA est indiqué.

Le dispositif FAIR (Facility for Antiproton and heavy Ion Research) est actuellement en construction sur le site de la machine existante GSI (Gesellschaft fuer SchwerIonenforschung), à Darmstadt, en Allemagne. De par la variété du type et de l'énergie de ses faisceaux, FAIR couvrira un très large spectre d'expériences organisées en quatre piliers : APPA (Atomic, Plasma Physics and Applications), NUSTAR(NUclear STructure, Astrophysics and Reactions), CBM et PANDA . Le pilier CBM regroupe les expériences HADES, avec un détecteur déjà en fonctionnement sur la machine existante et CBM qui utilisera un nouveau dispositif.

Comme on peut le voir clairement sur la fig.1, FAIR est une extension de l'installation actuelle. Le synchrotron SIS18 de GSI servira d'injecteur pour un nouveau synchrotron SIS100 pour délivrer des faisceaux primaires (protons : 10^{11}/s Emax=29 GeV, Ni : 10^9/s 2-15 GeV/nucléon, Au : 10^9/s 2-11 GeV/nucléon). PANDA utilisera

un faisceau secondaire refroidi d'antiprotons produits dans la gamme d'impulsions de 1.5 à 15 GeV/c ($\sqrt{s}$ de 2.2 à 5.5 GeV) grâce à l'anneau de stockage HESR avec une luminosité d'environ 10^{31} cm^{-2}.s^{-1}. Cet ensemble est actuellement en construction et constituera la phase-1 de FAIR avec des faisceaux prévus en 2024 pour la mise en service des détecteurs et 2025 pour les expériences. Au-delà de 2025, une phase-2 est programmée pour finaliser le projet, mais elle nécessitera des fonds supplémentaires. Elle comportera en particulier un deuxième synchrotron, SIS300, pouvant accélérer des ions lourds jusqu'à 35-40 GeV/nucléon et un anneau de préstockage RESR, qui permettra d'augmenter la luminosité des réactions antiproton-proton d'environ un facteur 20, soit environ 2. 10^{32} cm$^{-2}.s^{-1}$. Après une interruption liée à la construction de FAIR, les faisceaux de SIS18 vont être à nouveau disponibles au deuxième semestre 2018 et pourront être utilisés, en particulier pour l'expérience HADES, au moins jusqu'en 2021 inclus, voire au-delà, à raison de 3-4 mois/an. Lorsque les faisceaux de SIS100 seront disponibles, HADES sera transporté dans une cave expérimentale qui abritera aussi le dispositif CBM.

Depuis 2016, le "FAIR council" a lancé l'opération "FAIR Phase-0" qui consiste à préparer, sur le plan scientifique et technique, les expériences prévues à FAIR auprès d'accélérateurs en activité. L'expérience HADES qui elle-même va se poursuivre sur FAIR, joue un rôle privilégié dans cette opération, compte-tenu des synergies que présente le programme scientifique d'HADES à la fois avec celui de CBM et avec celui de PANDA. De plus, l'amélioration récente d'HADES bénéficie de technologies développées pour ces deux projets qui pourront ainsi être testées avant le démarrage des expériences sur FAIR.

2 HADES

2.1 HADES : Enjeux scientifiques

Le dispositif HADES a été conçu pour étudier la matière hadronique dense ($\rho/\rho_0 \sim 2-3$) à températures modérées (T<80 MeV) où des manifestations de la QCD telles que la restauration de la symétrie chirale ou les transitions de phase sont prédites. Mais les enjeux scientifiques se sont diversifiés au cours des années et comprennent aujourd'hui un programme important d'études des propriétés des hadrons dans le vide, et en particulier des résonances baryoniques.

Une sonde privilégiée pour les études de matière nucléaire est la production de dileptons (di-électrons dans le cas d'HADES) qui permet d'obtenir une information non distordue sur la phase dense et chaude et bien adaptée pour étudier les modifications des propriétés dans la matière nucléaire des mésons vecteurs (ρ, ω, ϕ) prédites par la théorie. Les mesures d'HADES confirment l'interprétation de la production de dileptons basée sur un élargissement de la distribution en masse (connu sous le nom de ¨ρ melting") [1, 2] dû, notamment à l'excitation d'états cohérents résonances baryoniques-trou. Cette description par des approches hadroniques est donc pertinente, des énergies de GSI aux énergies ultra-relativistes et conserve un lien avec la QCD par l'intermédiaire des règles de somme qui contraignent les fonctions spectrales. D'autres observables, comme la production de particules étranges (kaons,ϕ), doublement étranges (Ξ), les études de flot, de fluctuations,... permettent aussi de caractériser cette matière dense et chaude. La statistique des mesures actuelles doit cependant être améliorée pour faire des analyses multi-différentielles très contraignantes, ce qui motive des expériences à plus haute énergie.

Les études en ions lourds sont complétées par des études de matière nucléaire froide en réactions proton-noyau ou pion-noyau. Même si les effets attendus sont plus faibles, ces réactions sont très utiles pour tester la description des effets de milieu et, en particulier, mesurer des effets d'absorption de mésons sensibles aux potentiels d'interaction. La capacité d'HADES à mesurer des paires e^+e^- de faibles impulsions a été cruciale pour mettre en évidence une distorsion de la fonction spectrale du ρ et une absorption très forte du ω [3] dans les collisions les plus centrales. Des mesures à une énergie un peu plus haute pourraient bénéficier de sections efficaces de production du ρ et du ω plus importantes et rendraient possible l'étude du ϕ et d'autres particules étranges.

Les mesures en réactions élémentaires fournissent les sections efficaces différentielles de référence pour les études de matière nucléaire et permettent de mieux comprendre les mécanismes de réaction et en particulier, le rôle des résonances baryoniques, qui est crucial aux énergies de GSI. La production de paires e^+e^- donne accès à la décroissance Dalitz des résonances baryoniques ($R \rightarrow Ne^+e^-$). Ces processus sont des transitions électromagnétiques dans un domaine cinématique inexploré et particulièrement bien adapté pour tester le rôle

des mésons vecteurs comme médiateurs de l'interaction électromagnétique dans les couplages du photon virtuel aux hadrons prédit par les modèles de Dominance Vectorielle.

Comme cela a été montré dans une expérience-test récente, l'utilisation du faisceau de pions de GSI permet des mesures plus directes des couplages électromagnétiques pour les résonances baryoniques larges. De plus, les canaux hadroniques donnent de nouvelles informations sur la spectroscopie des hadrons utilisées dans les analyses en ondes partielles.

Les premières mesures de décroissances Dalitz des résonances baryoniques non étranges (dans la voie $R \rightarrow Ne^+e^-$) ouvrent la voie à une extension du programme pour l'étude des décroissances Dalitz des hypérons (de type Y$\rightarrow \Lambda e^+e^-$) qui pourrait être réalisé en réactions pp ou p-noyau sur SIS18 puis sur SIS100. L'enjeu est très important car les propriétés électromagnétiques des hypérons, y compris leur décroissances radiatives encore très mal connues.

Enfin, HADES étant un dispositif expérimental très complet, il permet de contribuer dans des domaines très variés, comme par exemple la recherche de matière noire ou les corrélations nucléoniques à courte portée.

2.2 Description du projet HADES (FAIR Phase 0 et FAIR Phase 1)

Le projet comporte plusieurs étapes qui s'échelonneront dans le temps en fonction des futures prises de données :

2.2.1 Projet à court terme sur SIS18 (FAIR Phase 0) : 2018-2019

Deux propositions ont été soumises au comité d'expériences de GSI, chargé de sélectionner des expériences pour 2018 et 2019 et qui s'est réuni au mois de septembre. La première a été acceptée dans son intégralité et est programmée au redémarrage de SIS18 en août 2018. Il s'agit de mesurer la réaction Ag+Ag à 1.65 GeV/nucléon pour des études de matière nucléaire à une énergie un peu plus élevée que précédemment permettant la mesure précise d'un ensemble d'observables (production de di-électrons, de particules étranges (kaons,ϕ), doublement étranges (Ξ), corrélations, flot, fluctuations, ...). De plus, la cinématique de cette réaction permet d'accéder à des masses invariantes e^+e^- au-delà de 1 GeV/c^2 et d'étudier les effets de mélange ρ (J$^P = 1^-$, M= 775 MeV/c^2) et a$_1$ (J$^P = 1^+$, M= 1260 MeV/c^2) qui doivent accompagner la restauration de la symétrie chirale.

La seconde proposition consiste à étendre les mesures déjà effectuées en faisceaux de pions sur des cibles de carbone et polyéthylène dans la région de la résonance N(1520) ($\sqrt{s} \sim 1.49$ GeV) par de nouvelles données dans la région $\sqrt{s}$=1.74 GeV ou "troisième région de résonances". La même stratégie qu'en 2014 sera adoptée : une longue mesure de la réaction π^-p$\rightarrow$ n e^+e^-et un balayage en énergie pour acquérir des données dans les canaux de production de mésons pour les analyses en ondes partielles. Les conditions devraient être bien meilleures : temps de comptage plus long, flux de pions quatre fois plus élevés suite aux études-machine, en particulier au niveau de l'extraction, efficacité du RICH améliorée par un nouveau détecteur de photons et présence du calorimètre électromagnétique, suite à l'amélioration en cours de HADES... Ainsi les couplages des résonances baryoniques dans le canal de deux pions et un nucléon (pour le ρ), mais aussi ηN, ωN , KΛ,... pourront être déterminés. Pour les canaux électromagnétiques, une précision bien meilleure est attendue, notamment pour les distributions angulaires. Les données sur la cible de carbone, nécessaires pour la soustraction (CH2-C), seront exploitées pour des études de matière froide (absorption du ω, mesure de section efficaces, calibration de modèles,...). Commme cette expérience nécessite l'intensité maximale qui n'est pas garantie au redémarrage de la machine, elle n'a pas été programmée en priorité, mais 40 shifts (8h de faisceau) sur les 89 demandés ont été classés A$^-$ (programmés en fonction du faisceau disponible). Après resoumission au prochain comité en 2018, la collaboration espére pouvoir réaliser la totalité de cette expérience en 2019 ou 2020.

2.2.2 Projet à moyen terme sur SIS18 (FAIR Phase 0) : 2020-2023

Au-delà de 2019, l'équipe HADES souhaite exploiter l'augmentation du taux d'acquisition (jusqu'à 200kHz) et le nouveau détecteur couvrant les petits angles (cf sec.2.6), qui seront alors disponibles pour réaliser des expériences en réactions pp sur les propriétés des résonances baryoniques étranges. En particulier, une mesure très novatrice des facteurs de forme de transition électromagétique sera possible en mesurant les décroissances radiatives et Dalitz, de type $\Lambda(1405) \rightarrow \Lambda\gamma$(ou Λ e^+e^-). Nos résultats complèteront des mesures à grands q^2

publiées récemment par CLEO [4] ou en cours d'analyse à BES. Il sera intéressant de comparer les propriétés électromagnétiques de résonances de même spin et parité, mais avec un contenu en étrangeté différent, comme $\Lambda(1520)$ et $D_{13}(1520)$, qui a été étudié en réaction πN. Une des questions est de savoir si l'hypothèse VDM fonctionne aussi dans le secteur baryonique étrange.

Le hypéron peut être reconstruit en utilisant la masse invariante Λe^+e^-, car ces états sont assez étroits (ex. 36 MeV pour $\Sigma(1385)$, 15 MeV pour $\Lambda(1520)$). Des simulations très détaillées ont été effectuées pour le cas $\Lambda(1520) \rightarrow \Lambda\ e^+e^-$ en réactions pp et prouvent la faisabilité de la mesure, avec environ 550 événements de type Λe^+e^-par jour. Ces études intéressent la collaboration PANDA et en particulier les groupes de Cracovie et Jülich (ce dernier ayant rejoint récemment la collaboration HADES). Il s'agit à la fois de préparer des mesures similaires avec PANDA en réactions $\bar{p}$p et de tester la technologie des tube-paille développés pour PANDA.

La mesure de la production de la résonance doublement étrange Ξ^- en réactions pp proche du seuil de production attire aussi beaucoup d'intérêt, pour comprendre l'origine de sa production très abondante en réactions d'ions lourds, loin sous le seuil de production NN [5].

L'équipe de l'IPNO s'investira principalement dans les études des baryons étranges, mais un programme de mesures en réaction p+Ag à 4.5 GeV est aussi bien établi, avec des études très détaillées de matière froide (fonction spectrale du ρ, absorption du ω et du ϕ,...) avec de l'ordre de 76 événements $\omega \rightarrow e^+e^-$ et 8 $\phi \rightarrow e^+e^-$par jour. Cette expérience permettra aussi de produire des hypérons et d'étudier les corrélations hypéron nucléon, avec un impact important pour l'équation d'état de la matière nucléaire et ses conséquences pour la structure des objects astrophysiques (notamment les étoiles à neutrons). Il est aussi prévu d'étudier les corélations nucléoniques de courte portée, configurations de paires de nucléons dans un noyau ayant une impulsion relative bien plus grande que le mouvement de Fermi, en analysant les événements de type 2p+n, correspondant au choc d'un proton sur une paire pn au repos dans le noyau d'Ag et avec une très grande impulsion relative. Un détecteur de neutrons sera installé aux angle arrière pour détecter le neutron de recul. On attend une statistique dix fois plus grande que dans l'expérience récente (e,e'pn) à Jlab. Cette mesure sera aussi importante pour préparer le programme de mesures de corélations nucléoniques de courte portée dans les noyaux radioactifs à FAIR (pilier NUSTAR). L'ensemble du programme expérimental prévu sur SI18 (FAIR Phase 0) est exposé dans le document [6].

2.2.3 Projet à long terme : HADES sur SIS100 (FAIR Phase 1)

Les études de matière nucléaire seront poursuivies sur SIS100 jusqu'à des énergies d'environ 4 à 6 GeV/nucléon avec HADES. Ces expériences seront complémentaires de CBM qui est optimisé pour des énergies plus élevées. En particulier, la gamme d'énergies couverte par HADES sera idéale pour étudier les effets de mélange ρ-a_1 dans la production de paires e^+e^- , qui doivent accompagner la restauration de la symétrie chirale. Mais comme on l'a vu, de nombreuses autres observables (excès et flot de dileptons, production de particules étranges, multi-étranges, fluctuations,...) pourront être mesurées. HADES et CBM participeront donc de façon complémentaire à un programme systématique d'études de la matière nucléaire impliquant plusieurs projets (cf sec.4.1).

Le faisceau de protons sera exploité pour des études de matière nucléaire froide, avec dans la gamme d'énergie de SIS100, des taux de comptage élevés pour la production de particules étranges.

Les réactions proton-proton, nécessaires en tant que référence, seront mesurées par HADES (CBM n'a pas la possibilité d'utiliser une cible LH2). Elles permettront de développer, en parallèle avec PANDA qui utilisera la réaction $\bar{p}$p, le programme de mesures de facteurs de forme de transition électromagnétique des hypérons dans la région temps avec des taux de comptage beaucoup plus élevés qu'à SIS18.

Le faisceau de protons (avec une énergie maximum de 29 GeV) pourrait aussi être exploité pour étudier l'évolution des mécanismes de réaction entre le régime des résonances baryoniques et le régime des processus durs où les degrés de liberté appropriés sont les quarks et les gluons. De nombreux canaux exclusifs peuvent être utilisés pour ce genre d'études. La production de paires e^+e^- dans une grande gamme de masse invariante, permettra de quantifier les contributions relatives de ces différents mécanismes avec la production due aux mésons et baryons et à la production de Drell-Yan (annihilation $\bar{q}q \rightarrow e^+e^-$). Cette possibilité n'a cependant pas encore été explorée et une étude serait nécessaire pour tester les capacités du détecteur pour les particules de grande impulsion.

2.2.4 Résumé du programme expérimental en cours et en projet

Le programme expérimental d'HADES réalisé ou en projet peut se résumer comme suit :

- études de matière nucléaire chaude : C+C à 2 AGeV (2001 avec détecteur partiel), C+C à 1 AGeV (2004), Ar+KCl 1.75 AGeV (2005), Au+Au à 1.25 AGeV (2012), Ag+Ag à 1.65 AGeV en 2018, expériences sur FAIR à partir de 2025.
- études de matière nucléaire froide : p+Nb à 3.5 GeV (2008), π^-+C et π^-+W à 1.7 GeV/c (2014), proposition d'expériences pour π+C à 1.12 GeV/c pour 2019-2020, projet p+Nb à 4.5 GeV (2020 ou après), expériences sur FAIR à partir de 2025.
- études de réactions élémentaires p+p (1.25 GeV) (2006), d+p 1.25 AGeV (2007), p+p 2.2 GeV (2004) et p+p 3.5 GeV (2007), quasi-libre π^-+p en 2014, proposition d'expériences pour π+p à 1.12 GeV/c pour 2019-2020, projet p+p à 4.5 GeV (2020 ou après), futures expériences sur FAIR en p+p.

Le projet proposé viendra donc compléter un programme de mesures bien entamé sur SIS18, les nouvelles mesures, en particulier celles prévues sur SIS100 seront très complémentaires, à la fois de CBM pour les aspects de matière nucléaire et de PANDA pour les études de hypérons.

Il faut aussi noter que ce programme ne nécessite pas de budget élevé, les développements techniques nécessaires étant déjà réalisés ou en cours. La production scientifique annuelle d'HADES est de l'ordre de 5 à 6 publications par an avec une forte contribution de l'IPN à deux d'entre elles en moyenne. Ce rythme devrait se poursuivre dans les années qui viennent. L'équipe essaiera aussi d'encadrer un à deux doctorants par an, comme par le passé.

2.3 Genèse et calendrier du projet HADES (FAIR Phase 0 et FAIR Phase 1)

2.3.1 Historique de l'implication de l'IPNO dans HADES

L'investissement de l'IPNO dans HADES remonte à 1999. L'équipe de permanents était alors constituée de Jean-Claude Jourdain, Michèle Roy-Stephan, Jean-Louis Boyard et Thierry Hennino (qui sont respectivement partis à la retraite en 2002, 2006, 2008 et fin 2014) et de Béatrice Ramstein. Entre temps, Ronald Kunne a rejoint l'équipe HADES en 2017, avec une activité de 40% et Jacques Van de Wiele (émérite))fournit depuis plusieurs années une aide sur le plan phénoménologique.

A partir de 2004, les activités HADES et PANDA ont été menées en parallèle par Thierry Hennino (30% HADES et 70% PANDA jusqu'en 2014) et Béatrice Ramstein (70% HADES et 30% PANDA jusqu'en 2016, 90% HADES depuis 2016) ainsi que par nos post-docs Malgorzata Gumberidze et Ermias Atomssa (environ 20% HADES et 80% PANDA). Cette double activité a été facilitée par la localisation à GSI et par les thématiques voisines choisies dans ces deux projets (structure électromagnétique dans la région temps du nucléon et des résonances baryoniques).

Le projet HADES a été examiné très récemment par le Conseil Scientifique de l'IPN en juillet 2017 et a reçu un avis très favorable [7].

2.3.2 Réalisations et activités en cours à l'IPN

Le projet s'appuie sur de nombreux travaux déjà réalisés par l'équipe de l'IPNO pour la collaboration HADES, principalement dans le domaine des réactions élémentaires. Ainsi, on peut mentionner une contribution cruciale à la publication de la toute première mesure du rapport de branchement de la décroissance Dalitz du Δ dans la réaction pp$\rightarrow$ppe^+e^- à 1.25 GeV [8], avec les simulations pour la préparation de l'expérience (thèse d'Emilie Morinière 2008), l'analyse des canaux hadroniques et les simulations de distributions angulaires des leptons ([9] et thèse de Tingting Liu 2010) et enfin les travaux phénoménologiques pour le développement d'un facteur de forme de transition N-Δ dans la région temps (collaboration avec F. Iachello, université de Yale, T. Pena (IST Lisbonne).

Une contribution importante a aussi été apportée à l'étude des effets d'isospin avec l'analyse de la réaction quasi-libre np mesurée en utilisant un faisceau de deutons (production inclusive de di-électrons [10], réaction np$\rightarrow$npe^+e^- [11] et np$\rightarrow$de^+e^-dans la thèse d'Hubert Kuc (cotutelle Orsay-Cracovie)).

A plus haute énergie (2.2 et 3.5 GeV), les publications ont bénéficié du travail de post doc de Malgorzata

Gumberidze [12], et des collaboration avec GSI et Cracovie [13, 14].

L'équipe s'est aussi intéressée à la production de deux pions, qui permet d'étudier la double excitation de résonances. Ces travaux ont donné lieu à de nombreuses collaborations avec des théoriciens, E.Oset (Valence), M. Bashkanov (Edimbourg), X. Cao (IHEP), A. Jerusalimov (Dubna) qui fournissent des calculs pour la production de deux pions. Les canaux multi-pions permettent aussi de rechercher la présence de résonances dibaryoniques (collaboration avec M. Bashkanov (Edimbourg) et les physiciens de la collaboration WASA) et d'étudier la production de mésons η, ρ, ω et leur couplage aux résonances baryoniques ([15], thèse d'Hubert Kuc 2014, travail post-doctoral de Malgorzata Gumberidze, thèse en cours d'Amel Belounnas). Tous ces mécanismes sont aussi des sources de paires e^+e^-. Ainsi, l'objectif de ces multiples analyses est d'avoir une interprétation cohérente des canaux de production de diélectrons et de mésons que l'on peut étudier, soit par leur décroissance en pions, soit par leur décroissance Dalitz ($\eta \to \gamma e^+e^-$) ou electromagnétique ($\rho/\omega \to e^+e^-$).

Le rôle des physiciens de l'IPN a été crucial aussi pour les expériences en faisceau de pions, avec les simulations des canaux physiques (thèse d'Hubert Kuc), les calculs d'optique de faisceau. L'analyse de données ([16], thèse de Federico Scozzi, cotutelle Darmstadt-Orsay) se fait en collaboration avec GSI et Cracovie. Ces résultats sont prometteurs et ouvrent la voie à des études systématiques de structure électromagnétique dans la région temps. L'équipe a aussi bénéficié d'un solide soutien théorique avec A. Sarantsev (Bonn-Gatchina) qui réalise les analyses en ondes partielles des canaux de production de pions et le modèle du groupe de GSI-Budapest pour la production de paires e^+e^-. Ainsi, une nouvelle détermination des rapports de branchement $N^\star \to N\pi\pi$ va bientôt être publiée, avec leurs composantes, $N^\star \to \rho N$, $N^\star \to \Delta\pi$, qui ont été récemment retirés de la "review of Particle Physics" en 2016, la fiabilité des données et analyses précédentes ayant été remise en cause.

D'autres travaux phénoménologiques sont en cours sur l'interférence entre la résonance N(1520) et le canal $\Delta\Delta$ pour la production de 2 pions (Jacques Van de Wiele et Amel Belounnas) et sur un modèle de facteurs de forme de transition (B. Ramstein et M. Krivoruchenko, ITEP Moscou). Des contacts réguliers ont lieu avec Jean-Christophe David (IRFU/CEA) qui s'intéresse à nos données pour tester ses calculs de cascade intranucléaire.

2.3.3 Réalisations techniques antérieures

Une contribution technique majeure au détecteur HADES a été la construction, achevée en 2006, des grandes chambres à dérive du dernier plan de reconstruction de trajectoires, réalisées avec un budget d'environ 500 kEUR et dont la maintenance a été assurée par l'IPNO jusqu'en 2015. L'IPN a aussi fourni la cible d'hydrogène liquide dont la responsabilité a été transférée à GSI, ainsi que celles des chambres à dérive, les moyens humains (ingénieurs, techniciens et physiciens) n'étant plus suffisants à l'IPNO pour assumer ces deux responsabilités.

L'équipe a beaucoup contribué aux études de résolution sur la reconstruction de trajectoires (thèse d'Emilie Morinière et contribution à [17]) et a réalisé plus récemment les calculs d'optique du faisceau de pions, consistant à optimiser l'acceptance de la ligne et développé une méthode de reconstruction de l'impulsion des pions événement par événement en utilisant les impacts dans des détecteurs Silicium placés dans le faisceau (décrite dans la publication [18]).

2.3.4 Responsabilités et production scientifique

Il faut noter un investissement dans le management de la collaboration (présidence du bureau de la collaboration : Thierry Hennino de 2002 à 2008 , Béatrice Ramstein depuis 2014), ce qui a impliqué récemment un travail important pour l'écriture du nouveau MOU couvrant la période 2017-2022. L'activité dans l'animation de groupes de travail sur les faisceaux de pions et les canaux exclusifs, avec des responsabilités d'analyse et de publications est aussi notable, ainsi que le rôle joué récemment dans l'écriture de la proposition d'expériences en faisceau de pions.

Environ 35 publications de la collaboration HADES, avec une contribution importante à 12 d'entre elles (voir la liste dans [19], 13 proceedings (auteurs IPN), 15 exposés à des conférences et workshops (8 invités), 5 séminaires, 8 exposés /an (GDR, réunions de collaboration,...).

thèses :

- thèse d'Emilie Morinière, mars 2008. "Contribution à l'analyse de réactions de production de dileptons en collision proton-proton avec HADES" (financement école doctorale)

- Tingting Liu, décembre 2010, *Exclusive Measurements with HADES Spectrometer in proton-proton reactions at 1.25 GeV* (financement école doctorale).
- Hubert Kuc décembre 2014, *Di-pion and di-electron production in quasi-free np reactions with HADES*(cotutelle : financement ambassade de France en Pologne+ université Paris Sud +IPN)
- Federico Scozzi (4^{eme} année) *Etude d'etats excités du nucléon avec le détecteur HADES à GSI* (cotutelle : 1/2 financement P2IO, 1/2 financement université de Darmstadt)
- Amel Belounnas (1^{ere} année) *Etude de résonances baryoniques avec le dispositif HADES* (financement école doctorale)

Plusieurs réunions importantes ont aussi été organisées par l'équipe de l'IPN : Pion beam experiments meeting Orsay (2009), deux réunions de collaboration (Seillac 2011 and Paris 2016), une réunion conjointe HADES-WASA meeting à Orsay (April 2013), un workshop ECT* en 2017 sur le thème "Space-like and time-like electromagnetic baryonic transitions", une réunion sur la production de deux pions et de paires e^+e^- en préparation pour 2018 (fonds du Labex P2IO).

2.4 HADES : état de l'art

Une moisson importante de résultats a été récoltée, ce qui donne à HADES une place reconnue dans la communauté de matière hadronique, mais aussi de plus en plus dans la communauté de physique hadronique grâce aux résultats en réactions élémentaires. Une liste récente des publications est fournie dans le document préparé pour le conseil scientifique de l'IPNO de juillet 2017 [19].

Le domaine d'énergie de SIS18 et SIS100 est quasiment inexploré pour les études de matière nucléaire. Les mesures de production de paires e^+e^- ont largement surpassé les anciennes mesures de DLS à Berkeley. HADES explore l'extrémité du diagramme de phase correspondant aux faibles températures et fortes densités et le projet s'intègre dans un programme d'études menées actuellement à plus haute énergie au LHC et à RHIC (cf fig.3). Un programme à plus basse ènergie est prévu prochainement à RHIC. Un projet est aussi en cours à Dubna (BM@N) qui pourra couvrir le même domaine d'énergie que HADES, mais sans mesure de di-électrons.

Les expériences HADES sur SIS100 permettront de couvrir la zone de transition entre les énergies de SIS18 et les plus hautes énergies de SIS100 (au-delà de 4-6 GeV/nucléon) pour lesquelles l'acceptance et les capacités d'acquisition du dispositif CBM sont bien mieux adaptées. D'autre part, HADES pourra étudier spécifiquement la matière froide pour laquelle l'émission se fait à des rapidités proches de celle de la cible. Comme le dispositif CBM ne comportera pas de cible d'hydrogène liquide, le programme en réactions p+p sera aussi une spécificité d'HADES.

Pour les études en réactions élémentaires, l'impact des expériences avec le faisceau de pions de GSI est important à signaler. Malgré le nombre important de données obtenues ces dernières années avec des faisceaux de photons et d'électrons, les progrès en spectroscopie baryonique se heurtent en effet au manque de données de qualité en faisceaux de pions, qui sont indispensables pour contraindre les analyses en ondes partielles. Ce constat est largement partagé par la communauté internationale, qui prépare des projets de faisceaux de pions d'envergure à JParc au Japon (mais uniquement pour les canaux hadroniques), ou à plus long terme auprès de l'EIC aux USA [20]. L'expérience HADES avec le faisceau de pions joue ainsi un rôle pionnier. Les études de décroissance Dalitz ne sont réalisées nulle part ailleurs et couvre un domaine cinématique complémentaire des études de transitions électromagnétiques en réactions d'électroproduction en particulier avec le détecteur CLAS et bientôt CLAS12.

Les études de décroissances Dalitz des hypérons seront commencées sur SIS18, sans concurrence, ce qui leur donnera un impact très notable. A partir de 2025, elles seront réalisées sur SIS100, en parallèle en réaction pp avec HADES et en réaction $\bar{p}p$ avec PANDA. Les études d'hypérons sur PANDA seront sans doute axées en priorité sur la recherche d'etats inobservés en particulier dans le secteur des hypérons charmés, alors qu'HADES sera adapté pour les hypérons légers et l'étude de leurs propriétés électromagnétiques (décroissances radiatives de type $Y \rightarrow \gamma\Lambda$ et Dalitz de type $Y \rightarrow e^+e^-\Lambda$).

2.5 HADES : Ressources et moyens

Ressources humaines actuelles :

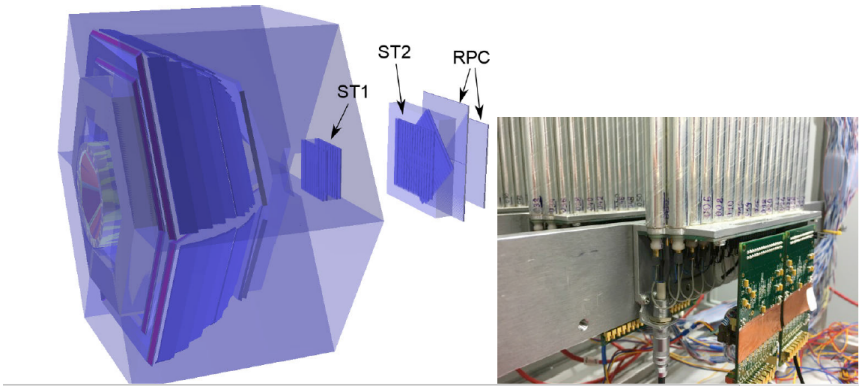

FIGURE 2 – A gauche : dispositif HADES avec le "Forward detector". A droite : détecteurs tubes-paille en test à Cracovie.

Seul l'IPNO est impliqué, avec deux physiciens permanents : Béatrice Ramstein (100%) et Ronald Kunne (40%) et actuellement deux doctorants : Amel Belounnas (2^{eme} année) et Federico Scozzi (cotutelle avec Darmstadt, 4^{eme} année). Une proposition de thèse a été déposée pour la rentrée 2018. En 2018, Christine le Galliard et un autre ingénieur travailleront sur HADES (6 FTE.mois).

Ressources financières :

Le coût total du nouveau détecteur aux angles avant décrit dans la section 2.6 est de 359 kEUR. L'équipe de l'IPNO a proposé une participation de 40 kEUR, dont le principe a été accepté par l'IN2P3, avec un financement sur deux ans. En 2017, 16.5kEUR ont été versés pour participer financièrement à la construction d'un détecteur de tubes-paille à Cracovie et le complément pour terminer cette opération et fabriquer les cadres et les supports mécaniques à l'IPN en 2018 a été demandé.

Les besoins en frais de mission sont d'environ 5 kEUR par an pour l'équipe et 3 kEUR de contribution sont versés aux "common funds" chaque année (contribution inscrite dans le MOU et indépendante de l'évolution du nombre de physiciens).

L'équipe bénéficie d'accords de collaborations IN2P3 avec GSI et Cracovie et vient d'obtenir un soutien de P2IO pour l'invitation de Piotr Salabura (UJ Cracovie) à Orsay pour 2 mois en 2018 et l'organisation d'un workshop sur la production de deux pions qui aura lieu à l'IPN du 23 au 25 mai 2018. Tout récemment, en nous appuyant sur le succès de notre réunion à Trento, nous avons réuni un consortium autour d'une lettre d'intention sur le sujet "Crossing the boundaries to explore baryon resonances" pour "European Integrating Initiative in Hadron Physics" dans le cadre de H2020 qui n'a pas été retenue, mais nous réfléchissons à la création d'un GDRI sur ce sujet.

2.6 HADES : Réalisations techniques

L'IPNO participe à l'amélioration du dispositif HADES en cours en contribuant à la construction d'un nouveau détecteur à base de tubes-paille destiné à augmenter l'acceptance aux angles-avant (0-6.5°) avec un trou pour le passage du fausceau. L'ensemble du dipsositif est constitué de deux stations de tube-paille, chacune constituée de 4 doubles couches. Elles ont comme surface active respectivement 74 x 80 cm^2 et 120 x 112 cm^2. Elles seront espacées de 160 cm et la première sera située à environ 3.3 m de la cible. Deux modules RPC en aval seront utilisés pour la mesure du temps de vol. Le support du mur de scintillateurs existant qui est utile pour définir le plan de réaction dans les expériences avec des ions lourds sera modifié pour tenir compte de la géométrie du nouveau détecteur.

La première station (ST1) est financée et construite à Jülich, la deuxième (ST2) est à la charge de Cracovie et Orsay. Les services techniques de l'IPNO ne pouvant pas réaliser le montage des tubes-paille, l'opération a lieu à Cracovie et l'IPN0 y contribue financièrement, puis construira les cadres et supports mécaniques en 2018. Les moyens humains à l'IPNO pour la construction sont estimés à 0.5 personne.an en 2018. Le détecteur sera assemblé à GSI en fin d'année 2018.

Cette participation est compatible avec nos moyens humains limités (la maintenance et l'opération du détecteur seront assurées par Cracovie) et cohérente avec notre programme de physique en réactions pp qui bénéficiera

grandement de ce nouveau détecteur. Ce développement technique se fait en partie en synergie avec la collaboration PANDA, dans le cadre du programme FAIR-Phase0 (production scientifique et tests de détecteurs avant le démarrage de FAIR).

Ce détecteur aux petits angles fait partie d'un ensemble d'améliorations du détecteur comprenant un nouveau calorimètre électromagnétique pour améliorer l'identification des électrons et surtout permettre la détection des photons réels (pour la mesure de la décroissance des mésons neutres $\pi^0 \to \gamma\gamma$, $\eta \to \gamma\gamma$,..) un nouveau détecteur de photons pour le RICH ('éveloppé en collaboration avec CBM) et une nouvelle électronique FEE pour les chambres à dérive.

2.7 HADES : Auto-analyse SWOT

L'équipe HADES de l'IPN a acquis une grande expertise dans le domaine des résonances baryoniques. Elle a une place reconnue dans la collaboration, a construit des liens très solides avec d'autres équipes travaillant sur HADES (en particulier Cracovie et GSI), initié des collaborations avec des théoriciens et jeté des ponts avec la communauté d'études des résonances baryoniques en diffusion d'électrons. Ces acquis lui permettront de jouer un rôle moteur dans l'analyse et l'interprétation des donnéees.

La réalisation technique envisagée est bien dimensionnée et ne présente pas de risque particulier, la fabrication des tubes-paille à Cracovie progresse de façon très satisfaisante et l'IPN a les compétences nécessaires pour la construction des cadres et des supports. La faiblesse de l'équipe est lié au nombre réduit de physiciens permanents.

L'activité sur HADES est actuellement l'unique contribution scientifique de l'IN2P3 aux expériences de physique hadronique sur GSI et FAIR. Compte-tenu des synergies avec CBM et PANDA, cette implication peut servir de levier pour structurer une implication dans les autres expériences de physique hadronique.

La menace principale est l'éventuelle absence de renforcement de l'équipe, qui nuirait à l'impact de l'IN2P3 dans les expériences au GSI et dans les projets sur FAIR.

3 PANDA

3.1 Objectifs scientifiques de PANDA

La gamme d'énergies du faisceau d'antiprotons disponibles sur FAIR (0.8-14 GeV) permet d'envisager un nombre très varié de mesures dans le domaine de l'étrangeté et du charme [21]. Le but principal pour lequel le détecteur PANDA a été conçu est la spectroscopie hadronique avec en particulier la recherche de nouvelles formes de matière, comme par exemple les états multiquarks, les boules de glue ou les hybrides. L'atout de PANDA dans ce domaine où de récentes découvertes ont été faites (états X,Y,Z) est la précision et la possibilité de former directement des états non conventionnels avec tous les nombres quantiques accessibles en $\bar{p}$p et pas seulement J^{PC}=1^{--}, comme en annihilation d'électrons. Le programme de PANDA comporte aussi des mesures dans le domaine des mésons charmés (charmonium ou charme ouvert), des baryons charmés, des hypérons, des hypernoyaux. La structure du nucléon en est aussi un axe important que l'équipe de l'IPN d'Orsay a contribué à développer, par des études de faisabilité et en coordonnant pendant plusieurs années le groupe de travail sur les processsus électromagnétiques. Ces mesures ne prendront cependant tout leur intérêt qu'une fois la luminosité maximale obtenue en réactions $\bar{p}p$, ce qui n'adviendra que dans la phase 2 de FAIR. Si une nouvelle implication de l'IN2P3 se réalisait, elle pourrait se cristalliser dans un premier temps autour d'études de canaux hadroniques, en particulier l'études de charmonium et d'hypérons charmés ou non, dont les sections efficaces de production sont suffisantes pour la phase 1 de FAIR. Elle pourrait en effet tirer partie de l'expertise du groupe du LAL/LHCb dans le domaine du charmonium et des synergies avec les études d'hypérons non charmés prévues avec HADES.

3.2 Historique de l'implication de l'IPNO dans PANDA (2004-2017)

Le travail de l'IPNO sur PANDA a concerné, entre 2004 et 2017, une équipe de sept physiciens de l'IPNO : Thierry Hennino (de 2004 à son départ à la retraite fin 2014), Ronald Kunne (à partir de 2005), Béatrice

Ramstein (à partir de 2004), Dominique Marchand (à partir de 2007), Saro Ong (de 2004 à son départ à la retraite en 2014), Egle Tomasi-Gustafsson (détachée de l'IRFU de 2007 à 2014) et Jacques Van de Wiele (à partir de 2004, aujourd'hui émérite). L'implication dans PANDA en 2004 s'est organisée autour d'études de structure du nucléon, thème fédérateur qui correspondait à l'expertise de l'équipe de physiciens venant d'horizons différents (HADES/GSI, G0/JLab, PVA4/Mayence). En particulier, l'étude des facteurs de forme électromagnétiques élastiques dans la région temps dans la réaction $\bar{p}p \to e^+e^-$ avec PANDA était très complémentaire de l'étude des facteurs de forme de transition électromagnétique étudiés avec HADES dans les décroissances Dalitz ($R \to Ne^+e^-$).

l'IPN a apporté une contribution cruciale à la collaboration PANDA en s'investissant dans des études de R&D mécaniques et thermiques pour le calorimètre électromagnétique (11500 cristaux de PbWO4 dans la partie "'tonneau"'). Toute la conception du refroidissement du tonneau, lié à l'utilisation des cristaux de PbWO4 à une température stabilisée de -25°C, a été réalisée à l'IPN, ainsi que la mécanique et l'intégration dans l'ensemble du détecteur. L'IPN a aussi participé à la construction et aux tests de deux prototypes. Se sont notamment investis dans ces activités 8 techniciens et ingénieurs avec en moyenne 1.5 FTE/an de 2004 à 2014.

L'équipe PANDA de l'IPNO a aussi fourni à la collaboration PANDA des études de faisabilité, des travaux phénoménologiques et des développements du code de simulation et d'analyse. Tous ces travaux, la production scientifique associée (avec en particulier 4 thèses) ainsi que les responsabilités prises dans la collaboration PANDA sont décrits plus en détail dans le document préparé pour le conseil scientifique de l'IPNO de juillet 2017 [19].

Malgré le soutien financier obtenu pour ces activités (budget d'environ 20 à 30 kEUR/an en moyenne pendant dix ans), l'attribution de deux post-docs (5 ans+3 ans), l'avis positif du conseil scientifique de l'IN2P3 en 2009, et la reconnaissance de nos activités, les départs à la retraite n'ont pas été remplacés et la direction de l'IPN a finalement arrêté de soutenir le projet en septembre 2014. L'expression d'intérêt de 300 kEUR pour une contribution à la construction du calorimètre électromagnétique a donc été retirée.

L'arrêt des activités sur PANDA a été graduel et un soin tout particulier a été apporté au transfert de compétences pour les activités techniques et d'analyse ainsi qu'à la finalisation et la publication des études de faisabilité. L'équipe de permanents s'est réorientée vers d'autres projets, ProRad et JLab pour Dominique Marchand, HADES pour Béatrice Ramstein, HADES et ProRad pour Ronald Kunne. Jacques Van de Wiele (émérite) fournit des contributions phénoménologiques pour ProRad et HADES.

3.3 Contribution envisagée par le LAL

La contribution envisagée par le LAL au projet PANDA serait de développer un système de slow control pour l'expérience, incluant la production de hardware, du software associé ainsi que son intégration dans l'expérience. Les personnes intéressées (Daniel Charlet, Monique Taurigna, ingńieurs CNRS et Patrick Robbe, chercheur CNRS) ont développé un système similaire pour l'expŕience LHCb, le SPECS [22]. Ils pourraient mettre à jour ce système pour utiliser des technologies plus récentes et en particulier se baser sur des communications de type Ethernet. La technologie envisagée serait idéalement la technologie White Rabbit initiée au CERN [23]. Cette technologie permet de transmettre données de configuration mais aussi de timing, ce qui est probablement surdimensionné par rapport aux besoins de PANDA. Si c'est le cas, une solution moins ambitieuse et moins coûteuse, basée sur l'IPBUS [24] pourrait être proposée. Ce système est déjà étudié par plusieurs laboratoires de l'IN2P3. Suivant le besoin de tenue en radiation pour PANDA, des cartes d'électronique spécifiques seront produites, utilisant les compétences acquises lors de la préparation du SPECS pour LHCb. Des discussions supplémentaires avec la coordination technique de PANDA seront nécessaires pour cerner exactement les besoins de l'expérience. Ce projet est à l'heure actuelle uniquement au stade de discussion informelle. Une estimation rapide des coûts de développement conduit à une somme de 50 kEUR.

4 CBM

4.1 CBM : Enjeux scientifiques

L'expérience CBM (pour *Compressed Baryonic Matter*) est conçue pour étudier les interactions d'ions lourds dans une cible fixe avec des faisceaux d'énergie variant de 10 à 45 GeV par nucléon. L'objectif premier du programme scientifique est d'explorer le diagramme de phase QCD dans une région de forte densité baryonique et de température modérée, encore très mal connue et dont les conditions se rapprochent de celles des étoiles à neutrons et du coeur en effondrement des supernovae. On prédit par exemple dans cette région une transition de premier ordre entre phases hadronique et partonique en-dessous d'une température critique oú des phases exotiques qui empruntent certaines propriétés à la matière hadronique dense et d'autres à la matière de quarks déconfinés.

La densité baryonique et la température de la matière créée dans les collisions d'ions lourds sont fonction des types d'ions en interaction et de l'énergie qui y est mise en jeu. C'est en jouant sur ces deux paramètres que le programme de CBM permettra d'explorer la région du diagramme de phase visée.

Concrètement, l'énergie des faisceaux connaîtra un accroissement par étapes successives. La première d'entre elles, SIS100, produira des faisceaux d'Au d'énergie culminant à 11.4 GeV/nucléon ($\sqrt{s_{NN}} = 4.9$ GeV). Pour des faisceaux de noyaux Z=N, l'énergie pourra atteindre 15A GeV et elle atteindra 30 GeV pour des faisceaux de protons. Le passage à des énergies supérieures (SIS300) interviendra après une mise à niveau de l'installation.

Les premières explorations de la région d'intérêt du diagramme des phases ont été réalisées à Berkeley pour les dileptons puis auprès de l'AGS au BNL, avec des faisceaux d'énergie variées de 2 à 11 GeV/nucléon et des mesures de nombreux canaux hadroniques. L'intérêt s'est ensuite porté vers les hautes températures et l'étude du plasma de quarks et de gluons. La région des hautes densités a donc été très peu étudiée, mais suscite à nouveau l'intérêt de la communauté.

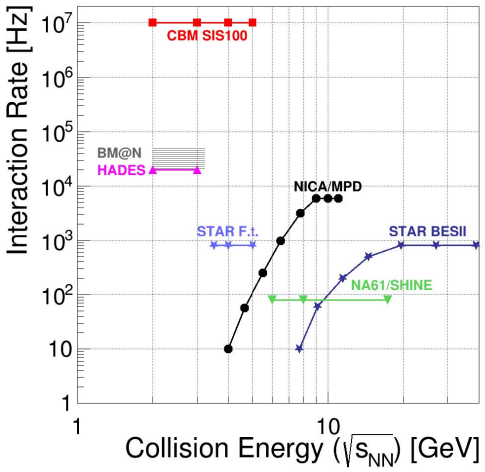

FIGURE 3 – Comparaison entre le taux d'interaction pour chaque énergie de collision du programme d'exploitation de CBM et ceux des autres expériences motivées par la même problématique scientifique.

La collaboration HADES s'inscrit dans cette problématique scientifique en réalisant actuellemnt des mesures dans les canaux de diélectrons et de hadrons à des énergies allant jusqu'à 1.75 GeV/nucléon ; elle poursuivra son programme sur FAIR, comme on l'a vu, avec des énergies pouvant atteindre 3-4 GeV. Par ailleurs, la collaboration NA61/SHINE au CERN mesure la production de hadrons à quelques dizaines de GeV/nucléon. De nouvelles mesures sont programmées au collisionneur RHIC (BNL) très prochainement en diminuant l'énergie jusqu'à 30 GeV/nucléon, voire jusqu'à 7 GeV/nucléon dans le cadre d'un projet sur cible fixe plus lointain. D'autres projets

sont en cours de réalisation à Dubna sur NICA et en cible fixe (BM@N). Ces mesures resteront cependant très limitées en intensité (cf fig.3) pour autoriser des études détaillées. L'expérience CBM a pour objectif de réaliser des études sensiblement plus poussées grâce à un taux d'interaction pouvant atteindre 10 MHz, soit plusieurs ordres de grandeur au-delà de ce qui est réalisable sur collisionneur ou dans les expériences HADES et BM@N. Ces conditions expérimentales sans précédent sont susceptibles de permettre l'observation du rétablissement de la symétrie chirale et d'apporter des éclaircissements sur l'origine de la masse des hadrons.

Le programme de recherche de CBM s'appuie dans une large mesure sur l'étude de la production des particules suivantes :

- particules de courte durée de vie comme les mésons-vecteurs légers (ρ, ω, ϕ) se désintégrant en paires lepton-antilepton
- baryons composés de quarks ou antiquarks étranges, en particulier les états multi-étranges Ξ, Ω
- mésons et baryons composés de quarks ou antiquarks charmés, en particulier les particules J/Ψ, D et Λ_c

Cet objectif gouverne les choix technologiques de l'appareillage expérimental, qui doit être adapté au taux d'interaction allant jusqu'à 10 MHz et à une multiplicité de l'état final pouvant atteindre 600 particules. Ces contraintes constituent un défi pour le détecteur de vertex, auquel contribue le groupe PICSEL de l'IPHC de Strasbourg.

4.2 CBM : Description du projet

4.2.1 Le détecteur de vertex MVD

Le détecteur de vertex (MVD pour Micro Vertex Detector) de l'expérience CBM est un dispositif de haute précision installé à quelques centimètres en aval de la cible expérimentale. Il est constitué de quatre plans (stations) équipés de capteurs pixellisés en technologie CMOS [1] entièrement développés par l'équipe PICSEL de l'IPHC.

Le MVD a pour fonction première de permettre la reconstruction des vertex déplacés, en particulier ceux provenant de la désintégration des particules de courte durée de vie, comme les mésons charmés. Il est aussi essentiel pour éliminer les paires de conversion qui contaminent l'échantillon de paires électron-positon provenant de la désintégration des mésons-vecteurs légers. Ses performances sont également cruciales pour la reconstruction des particules multi-étranges et des hypérons, de même que celle des traces de faible impulsion, parmi lesquelles une part importante de rayons delta.

Le groupe PICSEL est en charge de la conception et de la réalisation du capteur pixellisé MIMOSIS devant équiper les 4 stations. Il s'agit d'un capteur monolithique fabriqué par procédé industriel CMOS de 180 nm de finese de gravure proposé par l'industriel TowerJazz. Le même procédé a été employé pour le capteur ALPIDE développé pour la jouvence du trajectomètre ITS de l'expérience ALICE au LHC (CERN), auquel le groupe PICSEL a également contribué.

La technologie des CPS (pour CMOS Pixel Sensor) présente l'avantage de pouvoir intégrer sur le même substrat la matrice de pixels où sont collectées les charges des impacts des particules chargées traversantes et les micro-circuits réalisant le conditionnement du signal, d'où leur caractère monolithique. Le volume sensible des pixels étant mince (typiquement 20 μm d'épaisseur) et la couche de micro-circuits n'excédant guère une dizaine de microns d'épaisseur, le capteur peut être aminci à une épaisseur utile d'une cinquantaine de microns. Ces aspects différencient notablement les CPS des capteurs à pixels hybrides, beaucoup plus épais et nécessitant une connexion par micro-soudure entre volume sensible et micro-circuits de lecture, coûteuse et sujette à des problèmes de rendement.

Il découle de la minceur de la couche sensible que la charge électrique d'un amas est typiquement de l'ordre de 1000 électrons, ce qui impose de réaliser des systèmes de collection des charges et des micro-circuits de lecture particulièrement peu bruyants. La vitesse de lecture et la tolérance aux rayonnements intenses s'en trouvent affectées.

1. Combined Metal Oxide Semiconductor

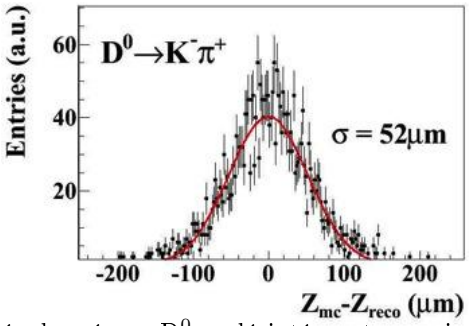

FIGURE 4 – Production simulée de mésons D^0 se désintégrant en paires $K^{\pm}\pi^{\mp}$. Distribution de la différence, le long de l'axe du faisceau, entre les positions des vertex de désintégration générés et reconstruits.

4.2.2 Cahier des charges du capteur MIMOSIS

Le cahier des charges du capteur MIMOSIS est dominé par la nécessité d'une excellente résolution sur la position des vertex secondaires (50 μm, comme le suggère la Fig.4), qui impose une épaisseur de capteur réduite au minimum (50 μm) associée à une résolution spatiale de 5 μm x 5 μm.

Ces performances sont requises dans des conditions de fonctionnement compatibles avec un taux d'interaction très élevé (10 MHz) pouvant générer des états finals de forte multiplicité (jusqu'à 600 particules par collision Au+Au). A cela s'ajoutent de fortes fluctuations de l'intensité du faisceau d'ions pouvant atteindre un ordre de grandeur. Ces conditions imposent un temps de lecture inférieur à 10 μs et une capacité à traiter une densité moyenne d'impacts de $1.5{\cdot}10^5/\mathrm{mm}^2/\mathrm{s}$, avec des pics atteignant régulièrement $7{\cdot}10^5/\mathrm{mm}^2/\mathrm{s}$.

Pour minimiser les effets de la diffusion multiple, le MVD fonctionnera dans le vide, limitant sensiblement la consommation autorisée des CPS. La densité de puissance doit ainsi rester inférieure à 200 à 350 $\mathrm{mW/cm}^2$ selon la station concernée.

Le taux d'interaction et la densité élevée des impacts soumettent les capteurs à de fortes doses de rayonnement. Leur conception doit s'accommoder de doses ionisantes pouvant atteindre 3 MRads et de doses non-ionisantes atteignant $3{\cdot}10^{13}$ $\mathrm{n}_{eq}/\mathrm{cm}^2$.

4.2.3 Description du capteur MIMOSIS

Pour satisfaire le cahier des charges, l'architecture du capteur MIMOSIS est inspirée de celle du capteur ALPIDE d'ALICE, modifiée pour améliorer sa capacité de traitement des signaux de deux ordres de grandeur et sa tolérance aux rayonnements intenses d'un ordre grandeur. La taille des pixels et leurs fonctionnalités intégrées restent voisines de celles d'ALPIDE, qui montre une résolution spatiale de l'ordre de 5 μm x 5 μm.

MIMOSIS est composé d'une surface sensible de 504x1024 pixels regroupés en *régions* de 504x64 pixels fonctionnant en parallèle. Dans chaque *région*, les pixels sont organisés en colonnes de 504 unités, organisées en paires lues à l'aide d'un encodeur prioritaire unique. Les pixels hébergent un micro-circuit de pré-amplification et de mise en forme du signal qui sert également de comparateur et permet ainsi d'identifier les pixels touchés à partir de la charge collectée par chacun d'eux. L'encodage des signaux va essentiellement permettre de transférer l'adresse de chaque pixel touché aux circuits de conditionnement du signal intégrés en périphérie de la surface sensible.

Les *régions* sont subdivisées en 4 *zones* de 16 colonnes, traitées en paralèlle. A l'intérieur de ces *zones* de 504x16 pixels, les pixels touchés sont encodés en série à une fréquence de lecture de 20 MHz, ce qui détermine la résolution temporelle du capteur, égale à 5 μs.

La résolution spatiale ambitionnée contraint sensiblement la taille des pixels, restreignant la quantité, et donc la complexité des micro-circuits implémentés dans chaque pixel. Grâce au procédé CMOS retenu, l'ensemble des circuits nécessaires à la mise en forme et au filtrage du signal in-situ ont néanmoins pu être implémentés sur une surface de pixel de 26.7 μm x 30.2 μm, qui fournit la résolution spatiale voisine de 5 μm requise dans

les deux directions.

4.3 CBM : Genèse et calendrier

4.3.1 Historique

L'implication du groupe PICSEL dans le développement de CPS pour le MVD remonte au printemps 2003. Elle s'appuyait sur la spécialité du groupe, seul à l'époque en mesure de réaliser le capteur CMOS requis car pionnier de la technologie des CPS et disposant des ressources humaines nécessaires tant pour la conception du capteur que pour ses tests. Le groupe PICSEL n'était pas motivé par le programme de physique de l'expérience mais par le contexte technologique du projet, qui permettait au groupe de progresser vers son but ultime, un CPS adapté au détecteur de vertex que nécessiterait le programme scientifique du collisionneur linéaire à électrons ILC.

Il y avait donc synergie entre la collaboration CBM, qui avait besoin d'un capteur de nouvelle génération et le groupe PICSEL, qui recherchait des fonds pour poursuivre le développement de CPS de plus en plus performants. Au fil du temps, ce partenariat s'est révélé très fructueux (5 thèses, de nombreuses publications et présentation à des congrès) et a tenu ses promesses.

Le calendrier du projet FAIR s'étant étiré, des capteurs de plus en plus performants ont été réalisés par le groupe PICSEL, qui ont permis d'ambitionner un cahier des charges du CPS pour le MVD de plus en plus ambitieux. A partir de 2015, l'architecture de capteur développée jusque là a été abandonnée pour une autre, plus rapide, dérivée du capteur ALPIDE réalisé pour l'ITS d'ALICE. Cela d'autant que le groupe PICSEL a apporté une contribution majeure à ce développement. Il en est né le capteur MIMOSIS.

4.3.2 CBM : Calendrier du développement

La conception de MIMOSIS a commencé en 2016. Il ressort des deux premières années de développement que les principaux défis résident, d'une part dans l'élargissement de la bande passante imposée par la densité et la fréquence des impacts et, d'autre part, dans la tolérance aux rayonnements intenses attendue, tout en maintenant la puissance consommée dans des limites acceptables.

Le programme du développement a commencé en 2016 par un prototypage séparé des principaux éléments du capteur, à savoir :

- MIMOSIS-0, un capteur composé d'une *région* (64 colonnes de 504 pixels) et du premier étage de conditionnement du signal intégré
- un capteur explorant différentes variantes de micro-circuits de mise en forme et de discrimination du signal intégrés dans les pixels
- un émetteur/récepteur de signalisation différentielle de basse tension (LVDS driver)
- un circuit de boucle à verrouillage de phase (PLL) générant l'horloge locale distribuée dans le capteur

Ces prototypes ont été fabriqués en 2017 et leurs tests ont commencé en fin d'année.

En parallèle, la conception du premier capteur de taille finale, MIMOSIS-1, a débuté dès 2016. Elle s'est poursuivie en 2017 et devrait aboutir à un lancement de fabrication après l'été 2018. Ce passage rapide à un capteur de taille finale (500,000 pixels répartis sur 15 x 30 mm^2) exploite l'expérience acquise dans la conception du capteur ALPIDE et permet de traquer au plus tôt d'éventuels problèmes de dispersion des signaux de pilotage de la matrice de pixels consécutifs de sa grande taille. Si de telles limitations surgissaient, il faudrait éventuellement revoir l'architecture du capteur en profondeur.

En conséquence, la suite des opérations est constituée de *runs d'ingéniérie* successifs, permettant de fabriquer une fois par an un capteur aux dimensions finales de 17 mm x 31 m. Le réticule de fabrication ayant pour dimensions 25 mm x 31 mm, la bande de 8x31 mm restante est utilisée pour la fabrication de prototypes de taille réduite permettant d'explorer des améliorations potentielles des performances (bruit, consommation, tolérance aux rayonnements, ...) de certaines composantes du capteur MIMOSIS, qui pourront être implémentées dans la version suivante de MIMOSIS. Cette bande hébergera également de petits prototypes de capteurs prévus pour d'autres applications (e.g. CEPC et ILC, domaines connexes).

En pratique le programme du développement de MIMOSIS est essentiellement le suivant :

- 2018 :

  - tests de MIMOSIS-0 et des autres prototypes fabriqués en 2017
  - quatrième trimestre : fabrication de MIMOSIS-1 à lancer
  - conception et fabrication de prototypes explorant des dessins de pixels plus performants en termes de bruit électronique et de rapidité de traitement du signal dans les pixels
  - conception des cartes de tests de MIMOSIS-1 et de la carte de test des prototypes
- 2019
  - tests de MIMOSIS-1 et des autres prototypes fabriqués en 2018
  - second semestre : fabrication de MIMOSIS-2, version améliorée de MIMOSIS-1
  - conception et fabrication de prototypes permettant de poursuivre la recherche de circuits de plus en plus performants
- 2020
  - tests de MIMOSIS-2 et des prototypes fabriqués en 2019
  - second trimestre : fabrication of MIMOSIS-3, le capteur servant pour la pré-production
  - éventuellement fabrication de prototypes permettant de poursuivre la mise au point de circuits de plus en plus performants
  - tests et validation de MIMOSIS-3
- 2021
  - poursuite des tests et validation de MIMOSIS-3
  - production finale du capteur MIMOSIS
  - validation du capteur final

Les tests des capteurs et l'évaluation de leurs performances sont réalisés en partenariat avec l'UNiversité Goethe de Frankfurt, qui est aussi en charge des opérations d'intégration système. L'IPHC pourrait être intéressé á la construction du MVD, qui représentera sans doute l'état de l'art du moment.

4.4 CBM : Etat de l'art

Toutes les options techniques de capteur pixellisé ont été considérées. La précision spatiale requise pour le MVD impose que le capteur soit mince et granulaire, ce qui écarte d'emblée toutes les options de pixel hybride. Parmi les capteurs monolithiques, seuls les CPS entrent en lice. L'alternative des DEPFETs pêche par la lenteur de lecture et l'impossibilité de traiter le taux d'impacts. Quant à la technologie SoI, elle est encore immature et n'apporte pas de valeur ajoutée aux CPS. Ces derniers, en revanche, ont fait leurs preuves dans divers appareillages, tous équipés avec des CPS développés par le groupe PICSEL. Le détecteur de vertex PXL de l'expérience STAR au RHIC/BNL et les résultats de physique dont il est à l'origine, constituent l'exemple par excellence ayant établi la pertinence de la technologie des CPS.

Les performances du capteur MIMOSA-28 (alias Ultimate) ayant équipé le PXL de STAR étaient limitées par les paramètres du procédé CMOS employé. L'évolution de ces procédés industriels a notamment autorisé une plus grande densité de micro-circuits dans les pixels, d'où une plus grande capacité de traitement des signaux. C'est de ce progrès qu'est né le capteur ALPIDE de l'ITS d'ALICE, qui est au moins 20 fois plus rapide que MIMOSA-28 tout en dissipant au moins 4 fois moins de puissance.

D'autres architectures de CPS sont développées par ailleurs, notamment pour les expériences au LHC, dont le cahier des charges privilégie la rapidité de lecture au détriment des autres paramètres, notamment la résolution spatiale. Ils sont loin de répondre au cahier des charges du MVD de CBM.

Finalement, le choix du CPS MIMOSIS est aussi fondé sur des critères de réalisabilité par les partenaires impliqués, le nombre d'équipes de recherche en mesure de réaliser un tel capteur étant très limité. L'alternative aurait consisté à se tourner vers un capteur existant mais aucun ne répondait au cahier des charges de manière satisfaisante.

4.5 CBM : Ressources et moyens

4.5.1 Ressources humaines

Les tâches incombant au groupe PICSEL relèvent de trois catégories : la conception et la réalisation des capteurs, leurs tests et l'évaluation de leurs performances. Les personnels engagés dans la réalisation du capteur

MIMOSIS se répartissent dans ces trois catégories avec les effectifs suivants :

- 9-10 ingénieurs micro-électroniciens réalisant la conception des micro-circuits analogiques, numériques et mixtes du capteur et de ses divers prototypes, ainsi que certains tests de fonctionnement
- 4 ingénieurs électroniciens intervenant dans la testabilité du capteur, ayant à charge de préparer la majorité de ses tests de fonctionnement et d'évaluation de ses performances, et de participer aux tests sur faisceau de particules
- 1 ingénieur électronicien assurant la gestion de tous les logiciels employés en micro-électronique et en électronique
- 2 physiciens intervenant dans le cahier des charges, la programmation du projet, la conception du capteur et l'évaluation des performances des divers prototypes et du capteur final

A cela s'ajoutent des contributions ponctuelles du service de micro-connectique (montage des capteurs sur carte de test, réalisation de circuits imprimés) et de l'atelier de mécanique (découpe et montages decarets électroniques).

La liste ci-dessous fournit les noms des personnels dont l'essentiel des activités concerne le développement du capteur MIMOSIS pour chacune des catégories mentionnées plus haut. Les personnels des services de micro-connectique et de mécanique n'y sont pas mentionnés.

- ingénieurs micro-électroniciens : G. Bertolone, A. Dorokhov, G. Dozière, A. Himmi, Ch. Hu-Guo, F. Morel, H. Pham, I. Valin, Y. Zhao
- ingénieurs électroniciens : G. Claus, M. Goffe, K. Jaaskelainen, M. Specht
- physiciens : A. Besson, M. Winter

En résumé, l'implication des ingénieurs comptera pour environ 10 ETP.an. Celle des physiciens correspond à 0.5 ETP.an, ce qui est insuffisant mais reflète la réduction progressive des moyens humains du groupe PICSEL.

4.5.2 Ressources financières

Les dépenses prévues dans les 3 ou 4 années que durera encore le projet sont dominées par les coûts associés aus fabrications de capteurs. Chaque "run d'ingéniérie" coûtera environ 300 kEUR, presque intégralement pris en charge par l'IKF, la contribution envisgée pour l'IPHC se limitant à 15 kEUR et lui permettant de poursuivre sa R&D générique.

Les cartes électroniques qui restent à fabriquer en 2018 pour tester les prototypes réalisés en 2017 nécessiteront une somme de 15 à 20 kEUR. Si besoin, une refabrication de ces cartes devrait avoir un impact mineur (i.e. 5 kEUR) sur le budget.

Le pilotage, la lecture et le protocole de test de MIMOSIS étant très différents des capteurs précédents développés par le groupe, il est nécessaire d'acheter du matériel compatible avec le standard GBT de CBM et le très haut débit des capteurs (1.6 Gbits/s/cm^2) pour les tests et l'évaluation des performances de MIMOSIS en laboratoire et sur faisceau de particules. Le coût prévu s'élève à 40-60 kEUR.

La maintenance des différents équipements de test devrait s'accommoder d'un budget annuel de 3-4 kEUR en excluant toute panne majeure sur les équipements sortis de leur période de garantie.

Une attention particulière est à réserver à l'évaluation des effets à court, moyen et long termes des fortes doses de rayonnement. Les études afférentes vont nécessiter des irradiations contrôlées en continu avec différents ions, qui coûteront typiquement 5 kEUR par an (location des infrastructures et déplacements inclus).

Les frais de déplacement concernent essentiellement les tests sur faisceau au CERN et à DESY et s'éleveront annuellement à environ 5 kEUR. La plupart des réunions se dérouleront au GSI, à l'Université de Frankfurt, au CERN ou à l'IPHC. Un budget de 5 kEUR est prévu pour ces déplacements. S'y ajoute une réunion annuelle de la collaboration CBM à l'étranger pour laquelle 3 kEUR ont été prévus.

Le budget complet nécessaire au groupe PICSEL pour la réalisation du capteur MIMOSIS est résumé dans la table ci-dessous, s'élevant á une somme totale de 210 à 240 kEUR jusqu'en 2021. Cette évaluation se veut minimale et ne contient, pour cette raison, aucune réserve pour les imprévus.

Année	Fonderie	PCB	Equip. test	Irradiations	Voyages	**Total**
2018	15 kEUR	15-20 kEUR	43–64 kEUR	5 kEUR	13 kEUR	$\sim$ 90–120 kEUR
2019	15 kEUR	5 kEUR	3–4 kEUR	5 kEUR	13 kEUR	$\gtrsim$ 40 kEUR
2020	15 kEUR		3–4 kEUR	5 kEUR	13 kEUR	$\lesssim$ 40 kEUR
2021	15 kEUR		3–4 kEUR	5 kEUR	13 kEUR	$\lesssim$ 40 kEUR

4.6 CBM : Analyse AFOR

La réalisation du capteur MIMOSIS s'appuie sur la complémentarité des expertises du groupe PICSEL et sa longue expérience des CPS, tout en contribuant à la pérennisation des savoir-faire uniques de ce groupe. Le projet agit par ailleurs comme un vecteur d'évolution générale de la technologie des CPS, permettant notamment de mettre au point une nouvelle architecture de pilotage et de lecture qui resservira dans des applications ultérieures comme un état de l'art.

Le projet est ambitieux et met l'IPHC au devant de la scène. Il offre la possibilité d'une contribution du laboratoire à la construction d'un détecteur de vertex innovant de haute technologie, qui deviendra une référence du genre.

Cependant, le capteur MIMOSIS doit répondre à un cahier des charges dont certains paramètres représentent un défi. Les principales incertitudes concernent la capacité de traitement de la densité d'impacts et la tolérance aux rayonnements intenses, dont certains effets n'ont jamais été étudiés dans le cas de petits signaux comme ceux des CPS. Les tests du prototype MIMOSIS-0 seront très importants pour comprendre dans quelle mesure l'architecture développée pour MIMOSIS est adaptée à ces défis. Si les tests prévus en 2018 révélaient des insuffisances, il n'est pas exclu qu'il faille revoir l'architecture du capteur dans son intégralité, ce qui introduirait sans doute un retard de 9 à 12 mois dans le calendrier prévisionnel du développement.

Enfin, si les ressources humaines en ingénieurs semblent adaptées au projet, les effectifs de physiciens pourraient se révéler insuffisants pour le suivi rapproché qu'il requiert. Un post-doctorant ou un doctorant constitueraient l'apport nécessaire pour assurer la conduite du projet dans les temps impartis.

5 Conclusion

La France a investi de l'ordre de 27 MEUR dans la construction de l'accélérateur FAIR. Mais, comme cela a été discuté dans une réunion récente [2] la participation française au programme de physique est très limitée dans les quatre piliers, et en particulier dans les projets de physique et matière hadronique. Cette faible implication de l'IN2P3 est regrettable. En effet, à l'horizon 2025, l'installation FAIR jouera un rôle de premier plan pour les études de physique hadronique et de matière hadronique, grâce à des faisceaux et des capacités de détection et d'acquisition uniques. Malgré des moyens humains et financiers limités, l'IN2P3 a eu ces dernières années une contribution très visible dans HADES, CBM et PANDA, les trois grandes collaborations de physique hadronique de GSI et FAIR qui peut encore lui assurer une participation active au niveau de la production scientifique, si un renforcement est abordé maintenant.

Ainsi, depuis plus de 15 ans, l'IPNO participe activement, sur le plan scientifique et technique, à l'expérience HADES à GSI. Les contributions les plus marquantes ont été la construction du plus grand plan de chambres à dérive, les calculs d'optique du faisceau de pions et plus récemment la contribution au détecteur aux petits angles, l'implication dans le programme d'études des résonances baryoniques en réactions élémentaires, la participation au management de la collaboration. Cette activité va se poursuivre pendant encore quelques années à GSI, puis à plus long terme, sur FAIR.

L'IPHC a une expertise unique dans le domaine des détecteurs CMOS, et fournit une contribution très appréciée depuis une dizaine d'années pour le futur détecteur de vertex de CBM. Il n'y a pas aujourd'hui d'implication directe au niveau de la physique, mais les expériences menées sur HADES préparent le programme scientifique de CBM et la contribution technique suffit pour assurer une très bonne visibilité de l'IN2P3 dans

2. https ://indico.in2p3.fr/event/14285/

la collaboration CBM.

L'implication de l'IPNO dans PANDA de 2004 à 2017 a eu elle aussi un impact notable. Elle regroupait des études de faisabilité et des travaux phénoménologiques dans le domaine de la structure du nucléon ainsi que des études de R&D pour le calorimètre électromagnétique. Suite à l'intérêt récent d'une équipe du LAL, de nouvelles contributions techniques de l'IN2P3 au projet PANDA pourraient être rediscutées prochainement et seraient susceptibles de raviver à moyen terme une contribution au niveau de la physique.

Compte-tenu de la complémentarité entre nos différentes activités dans les collaborations HADES, CBM et PANDA, nous proposons qu'elles soient regroupées, au sein de l'IN2P3, sous un intitulé "physique hadronique à GSI". Le groupe ainsi formé présente une masse critique, sur le plan scientifique et technique, suffisante pour justifier une implication plus importante de l'IN2P3 dans les projets de physique hadronique sur FAIR et rendre possible un renforcement par des chercheurs permanents.

A court terme, l'implication dans HADES est particulièrement cruciale, d'une part pour assurer une production scientifique en exploitant les faisceaux de SIS18 à GSI dans les années qui viennent et d'autre part, pour préparer les expériences sur FAIR, dans le cadre des synergies sur les plans technique et scientifique entre HADES et les projets CBM et PANDA. L'IPN joue un rôle important dans la collaboration HADES et dans ces activités de synergie, et il est donc extrêmement urgent de renforcer cette contribution par l'ouverture immédiate d'un poste CR. Une autre ouverture de poste avant le démarrage des faisceaux de FAIR permettrait de structurer l'implication dans un des projets (CBM ou PANDA) de FAIR, suivant les orientations prises d'ici là. Par ailleurs, il serait très souhaitable d'avoir dès que possible un poste de post-doctorant pour le suivi du projet de capteurs MIMOSIS à l'IPHC. Par ce renforcement, il s'agit, au-delà de la pérennisation d'une thématique scientifique dans laquelle nous sommes reconnus, de valoriser l'investissement conséquent déjà fourni et de garder la possibilité de participer, à l'horizon 2025 aux expériences de physique hadronique sur FAIR.

Références

[1] G. Chanfray, Acta Phys. Polon. **B27**, 3203 (1996), *Pions in the nuclear medium.*

[2] R. Rapp, G. Chanfray, and J. Wambach, Nucl. Phys. **A617**, 472 (1997), *Rho meson propagation and dilepton enhancement in hot hadronic matter.*

[3] G. Agakishiev *et al.*, Phys. Lett. **B715**, 304 (2012), *First measurement of low momentum dielectrons radiated off cold nuclear matter.*

[4] S. Dobbs, A. Tomaradze, T. Xiao, and K. K. Seth, AIP Conf. Proc. **1735**, 080003 (2016), *First measurements of hyperon time-like form factors at large Q^2 and evidence of diquark correlations.*

[5] J. Adamczewski-Musch *et al.*, Deep sub-threshold ϕ production and implications for the K+/K- freeze-out in Au+Au collisions, 2017.

[6] *Proposal for experiments at SIS18 during FAIR Phase-0*, https ://indico.gsi.de/event/6134/material/1/0?contribId=5.

[7] Rapport sur la physique hadronique Ã l'IPNO, Conseil Scientifique de l'IPNO , juillet 2017.

[8] J. Adamczewski-Musch *et al.*, Phys. Rev. **C95**, 065205 (2017), *Δ(1232) Dalitz decay in proton-proton collisions at T=1.25 GeV measured with HADES at GSI.*

[9] G. Agakishiev *et al.*, Eur. Phys. J. **A48**, 74 (2012), *Study of exclusive one-pion and one-eta production using hadron and dielectron channels in pp reactions at kinetic beam energies of 1.25 GeV and 2.2 GeV with HADES.*

[10] G. Agakishiev et al. (the HADES Collaboration), Phys. Lett. **B690**, 118 (2010), *Origin of the low-mass electron pair excess in light nucleus-nucleus collisions.*

[11] J. Adamczewski-Musch *et al.*, Analysis of the exclusive final state npe$^+$e$^-$ in quasi-free np reaction, 2017.

[12] G. Agakishiev *et al.*, Phys. Rev. **C85**, 054005 (2012), *Inclusive dielectron production in proton-proton collisions at 2.2 GeV beam energy.*

[13] G. Agakishiev *et al.*, Eur. Phys. J. **A48**, 64 (2012), *Inclusive dielectron spectra in p+p collisions at 3.5 GeV.*

[14] G. Agakishiev *et al.*, Eur. Phys. J. **A50**, 82 (2014), *Baryon resonance production and dielectron decays in proton-proton collisions at 3.5 GeV.*

[15] G. Agakishiev *et al.*, Phys. Lett. **B750**, 184 (2015), *Study of the quasi-free* $np \to np\pi^+\pi^-$ *reaction with a deuterium beam at 1.25 GeV/nucleon.*

[16] F. Scozzi, EPJ Web Conf. **137**, 05023 (2017), *Resonance production and decay in pion induced collisions with HADES.*

[17] G. Agakichiev *et al.*, Eur. Phys. J. **A41**, 243 (2009), *The High-Acceptance Dielectron Spectrometer HADES.*

[18] J. Adamczewski-Musch *et al.*, A Facility For Pion Induced Nuclear Reaction Studies With HADES, submitted to EPJA, 2015.

[19] document pour le CS de l'IPNO, juillet 2017 : HADES et PANDA à l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay,
`https://indico.in2p3.fr/event/14684/contributions/19369/attachments/15810/19397/HADES_PANDA_CSjuillet2017.pdf`.

[20] W. J. Briscoe *et al.*, (2015), *Physics Opportunities with Meson Beams.*

[21] J. Messchendorp, JPS Conf. Proc. **13**, 010016 (2017), *The PANDA Experiment at FAIR - Subatomic Physics with Antiprotons.*

[22] LHCb collaboration, *SPECS manuel (https ://lhcb-vd.web.cern.ch/lhcb-vd/ecs/specs4.0.doc)* .

[23] J. Serrano, P. Alvarez, M. Cattin, E. Garcia Cota, J. Lewis, P. Moreira, T. Wlostowski et al., *The White Rabbit Project in Proceedings of ICALEPCS TUC004, Kobe, Japan, 2009.*.

[24] C. Ghabrous Larrea, K. Harder, D. Newbold, D. Sankey, A. Rose, A. Thea and T. Williams, *IPbus : a flexible Ethernet-based control system for xTCA hardware, JINST 10 (2015) no.02, C02019* .

Annexe : Production scientifique liée au projet CBM à l'IPHC

La production scientifique liée aux activités HADES et PANDA à l'IPNO est listée dans le document [19]

Publications

- A.Dorokhov, G.Claus, M.Goffe, A.Himmi, K.Jasskelainen, I. Valin, M.Winter et al.,
  Challenges in QCD matter physics - The scientific programme of the Compressed Baryonic Matter experiment at FAIR, Eur. Phys. J. A (2017) 53.

- D.Doering, J.Baudot, M.Deveaux, B.Linnik, M.Goffe, S.Senyukov, S.Strohauer, J.Stroth and M.Winter for the CBM-MVD collaboration,
  Noise performance and ionizing radiation tolerance of CMOS Monolithic Active Pixel Sensors using the 0.18 μ m CMOS process, JINST 9 (20140) C05051

- D. Doering, M. Deveaux, M. Domachowski, I. Froehlich, M. Koziel, C. Muentz, P. Scharrer, J. Stroth
  Pitch dependence of the tolerance of CMOS monolithic active pixel sensors to non-ionizing radiation, NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH A 730 (2013) 111-114

Actes de conférence

- M. Deveaux, D. Doering, B. Linnik, C. Müntz, J. Stroth, E. Spiriti, J. Baudot, G. Bertolone, A. Besson, G. Claus, C. Colledani, A. Dorokhov, G. Dozière, M. Goffe, A. Himmi, Ch. Hu-Guo, Q. Liu, F. Morel, A. Pérez Pérez, H. Pham, I. Valin, M. Winter
  Monolithic active pixel sensors
  PoS(VERTEX2015)045 Actes du congrès "24th International Workshop on Vertex Detectors - Vertex'15", Santa Fe, 1-5 June 2015

Thèses

- Michael Deveaux, Titre : *Radiation hardness studies on Monolithic Active Pixel Sensors*, Directions : *Marc Winter, Herbert Stroebele (IKF)*, Soutenance : mars 2008

- Sébastien Heini, Titre : *Development of a Highly Granular, Swift and radiation Tolerant Monolithic Pixel Sensor*, Directions : *Yann HU (Unistra), Marc Winter*, Soutenance : mars 2010

- Michal Koziel, Titre : *Development of radiation hardened pixel sensors for charged particle detection*, Direction : *Marc Winter*, Soutenance : septembre 2011

- Christina Dritsa, Titre :*Design of the Micro Vertex Detector of the CBM experiment : Development of a detector response model and feasibility studies of open charm measurement*, Directions : *Fouad Rami (IPHC), Joachim Stroth (IKF)*, Soutenance : décembre 2011

- Sélim Sedikki, Titre : *Developpement of a microvertex detector for CBM*, Directions : *Fouad Rami (IPHC), Joachim Stroth (IKF)*, Soutenance : septembre 2012