Conseil Scientifique de l'IN2P3

Physique hadronique à JLab

8 Janvier 2018

R. Dupré, D. Marchand, C. Muñoz-Camacho, S. Niccolai, E. Voutier

Résumé

Enjeux scientifiques. La participation de l'IN2P3 à la physique de Jefferson Lab (JLab) est focalisé sur l'étude de la structure du nucléon avec les distributions de partons généralisées (GPD). Ces distributions permettent d'obtenir une image "tomographique" en trois dimensions du nucléon et de mesurer la fraction du spin du proton provenant du moment angulaire des quarks. Les groupes français et en particulier de l'IN2P3 ont été à l'origine de la grande majorité des données expérimentales publiées dans le domaine des GPD ces dernières années. Ceux ci ont récemment permis l'extraction, pour la première fois, de la tomographie du proton, avec, là encore, une participation clé des physiciens de l'IN2P3.

Projet. La principale activité dans le cadre de ce projet est la mesure de réactions qui permettent l'extraction des GPD. La plus importante est la réaction de diffusion Compton profondément virtuelle (DVCS) qui donne l'accès le plus direct aux GPD. Nous menons plusieurs types d'expériences au JLab dans le but de mesurer le DVCS sur le proton et le neutron, ainsi que sur diverses configurations de polarisation de ces cibles. D'autres canaux seront explorés : la diffusion Compton de type temps et la production exclusive de mésons en particulier. Ces mesures permettent de confirmer l'universalité des GPD et d'avoir accès aux GPD des gluons, respectivement. Plusieurs autres activités liées sont menées à l'IN2P3 : un projet de R&D accélérateur sur la production de positrons polarisés, qui permettraient d'obtenir de nouvelles observables avec le processus DVCS ; une activité de phénoménologie sur l'extraction des GPD à partir des données DVCS ; l'extension de l'étude du nucléon aux effets nucléaires en termes de quarks et des gluons ; et enfin la recherche du photon lourd (HPS), une expérience de physique au-delà du modèle standard, en lien avec la recherche de secteurs sombres.

Genèse et calendrier. L'IN2P3 est impliqué dans la physique de JLab depuis ses débuts, il y a plus d'une vingtaine d'années. Le nombre de physiciens impliqués a néanmoins largement diminué dans les années 2000, et les différents groupes impliqués ont été complètement regroupés à l'IPN d'Orsay depuis environ trois ans. L'an dernier, l'IPNO a réuni son conseil scientifique pour évaluer les programmes de physique hadronique. Le conseil a déclaré à propos de l'activité JLab : "La thématique autour de JLab doit figurer parmi les plus hautes priorités scientifiques de l'IPNO". Le programme à 12 GeV de JLab vient prendre toute son ampleur avec le démarrage, en fin 2017, des expériences de CLAS12. Dans un futur plus lointain, JLab et plus largement la communauté de physique hadronique au niveau internationale travaillent sur la construction d'un collisionneur electron-ion (EIC).

État de l'art. JLab est un laboratoire unique au monde pour sa couverture en énergie et pour l'intensité qui y est accessible. La qualité du faisceau d'électron de JLab est un facteur crucial pour un certain nombre d'expériences pour lesquelles les détecteurs sont placés très près du faisceau comme les expériences HPS ou de DVCS. Les expériences de GPD dont nous sommes porte-paroles tiennent une place clef dans le programme développé pour l'upgrade à 12 GeV de la machine donnant à l'IN2P3 une visibilité importante.

Ressources et moyens. Il n'y a à présent plus qu'un seul groupe comprenant 3.7 ETP chercheurs, et ce chiffre est en baisse sur les deux dernières années. Cette baisse entraîne un besoin important de nouvelles forces sur le projet pour exploiter le plein potentiel du programme à 12 GeV dans lequel l'IN2P3 devrait naturellement tenir une place importante. Le groupe a été particulièrement actif ces dernières années pour trouver des financements hors IN2P3 et a ainsi obtenu un financement ANR JCJC, un SESAME de la région Île-de-France et des financements des États-Unis pour EIC. Le total de ces financements externes se monte à plus de 500 k€ ces quatre dernières années.

Réalisations techniques. Ces dernières années nous avons construit le calorimètre électromagnétique de l'expérience HPS, installé en 2014, et le détecteur de neutron de CLAS12 (CND), installé et mis en route en fin 2017. Sur ces deux projets, c'est l'IN2P3 qui a tenu le rôle principal et coordonné ces constructions. Deux autres projets sont en cours : le calorimètre NPS pour le Hall C, dont le développement est financé par l'IN2P3, et une R&D détecteur autour du projet d'un trajectographe pour noyaux légers (ALERT).

Table des matières

1 Motivation scientifique **1**

2 Historique et résultats obtenus **2**
2.1 Hall A . . . 3
2.2 CLAS (Hall B) . . . 4
2.3 Phénoménologie des GPD/extraction des GPD . . . 5
2.4 Projet PEPPo (Polarized electrons for polarized positrons) . . . 6
2.5 Autres Publications Principales . . . 6
2.6 Thèses . . . 8

3 Plan à court et moyen terme **9**
3.1 Central Neutron Detector (CND) dans le Hall B (CLAS12) . . . 9
3.2 Neutral Particle Spectrometer (NPS) dans le Hall C . . . 11
3.3 "A Low Energy Recoil Tracker" (ALERT) pour CLAS12 . . . 12

4 Expérience HPS **13**

5 Futur à moyen et long terme : le collisionneur électron-ion (EIC) **14**
5.1 Phénoménologie et simulations pour EIC . . . 15
5.2 R&D en calorimétrie pour EIC . . . 15

6 Implication scientifique et technique du laboratoire **17**

7 Budgets et sources de financement **17**

1 Motivation scientifique

La compréhension de la structure des hadrons en termes de quarks et de gluons (leur distribution spatiale, leur contribution à l'impulsion et au spin du nucléon, etc.) est un des plus importants défis de la recherche actuelle en physique hadronique, à l'intersection de la physique nucléaire et de la physique des particules. Le formalisme des Distributions de Partons Généralisées (GPD) procure une description universelle de la structure partonique du nucléon. Dans certains régimes cinématiques, les GPDs se ramènent soit aux distributions de partons ordinaires – mesurées en diffusion de leptons profondément inélastique ($eN \to eX$) et décrivant la distribution d'impulsion longitudinale des quarks dans le nucléon – soit aux facteurs de forme mesurés en diffusion élastique ($eN \to eN$) et décrivant la distribution spatiale des courants dans le nucléon.

Les GPDs représentent les corrélations entre partons dans différents états quantiques. Elles peuvent s'interpréter comme des distributions, dans le plan transverse, des partons portant une certaine impulsion longitudinale. La détermination des GPDs peut aussi éclaircir ce qu'on a communément appelé la "crise du spin", c'est-à-dire les mesures indiquant que les quarks ne portent que de 20 à 30% du spin du nucléon : les GPDs permettent d'estimer le moment orbital des quarks, qui est un ingrédient fondamental pour la résolution de ce problème.

La richesse d'informations contenue dans les GPDs se traduit dans leur complexité : pour chaque saveur de quark (u, d, s), il y a 4 GPDs, H, $\tilde{H}$, E, $\tilde{E}$, chacune dépendant de trois variables cinématiques indépendantes. Expérimentalement, on peut accéder aux GPDs par la diffusion d'électrons sur le proton ou le neutron, dans des réactions exclusives (où tout l'état final de la réaction est identifié) "dures", c'est-à-dire où la masse du photon virtuel échangé (Q^2) est bien plus grande que la masse du nucléon-cible. Le processus le plus simple est la diffusion Compton profondément virtuelle (en anglais "Deeply virtual Compton scattering", DVCS) : $eN \to eN\gamma$. À grand Q^2 l'amplitude du processus DVCS factorise en un partie dure, que l'on peut calculer en QCD perturbative, et une partie molle que l'on paramétrise par les GPDs. La Figure 1 (gauche) montre le diagramme à l'ordre dominant en $1/Q$ (twist-2), qui correspond à la diffusion sur un quark unique du nucléon. Les GPDs dépendent du transfert d'impulsion au nucléon $t = (p - p')^2$, le demi-transfert d'impulsion longitudinale au quark $\xi \simeq x_B/(2 - x_B)$, ainsi que de son impulsion longitudinale moyenne x, qui n'est pas accessible expérimentalement dans le DVCS. Les GPDs apparaissent dans l'amplitude du processus DVCS sous des intégrales, appelées facteurs de forme Compton (CFF), pour chaque saveur f des quarks. Par exemple, pour la GPD H, le CFF $\mathcal{H}(\xi, t)$ est défini ainsi :

$$\mathcal{H}(\xi,t) = \sum_f \frac{e_f^2}{e^2} \left\{ i\pi \left[H_f(\xi,\xi,t) - H_f(-\xi,\xi,t) \right] + \mathcal{P} \int_{-1}^{+1} dx \left[\frac{1}{\xi - x} - \frac{1}{\xi + x} \right] H_f(x,\xi,t) \right\}.$$

La partie imaginaire des CFFs donne ainsi accès aux GPDs à $x = \pm\xi$ alors que la partie réelle des CFFs sonde les intégrales en x des GPDs. Des mesures de plusieurs observables (sections efficaces non-polarisées, asymétries de spin-faisceau et spin-cible, etc.) du DVCS sont nécessaires pour pouvoir contraindre les CFFs. Ces observables sont aussi accessibles dans l'électro-production dure de mésons.

Les sections efficaces pour ces types de réactions étant très petites (de l'ordre du pb), il est nécessaire de disposer d'un faisceau d'électrons de haute intensité pour pouvoir échantillonner la dépendance cinématique complexe des GPDs. L'accélérateur d'électrons polarisés de haute intensité (CEBAF) du Jefferson Laboratory aux USA (JLab, Newport News, Virginia) est parfaitement adapté aux mesures des réactions d'électro-production exclusive (DVCS et électro-production de mésons) qui permettent d'accéder aux GPDs. De même, le détecteur à grande acceptance CLAS (dans le Hall B du JLab) fut particulièrement approprié pour l'étude des réactions exclusives à plusieurs particules dans l'état final, et a permis d'étudier simultanément un vaste espace de phase. Les spectromètres à haute résolution du Hall A, de leurs cotés, ont

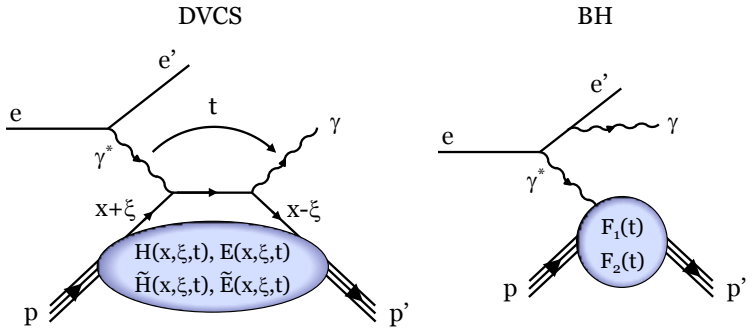

FIGURE 1 – Gauche : diagramme du mécanisme dominant du DVCS, avec diffusion de l'électron incident sur un des quarks du nucléon. Le quark rayonne un photon réel avant de "rentrer" dans le nucléon. Le processus est factorisé en une partie perturbative ($\gamma^* q \to \gamma q$, haute du diagramme), et une partie décrivant la structure du nucléon (le "blob" bleue) par moyen de 4 GPDs, chacune dépendante de 3 variables cinématiques. Le DVCS interfère avec la réaction Bethe Heitler (BH, droite), où le photon final est émis soit par l'électron incident soit par l'électron diffusé.

permis de mesurer avec haute précision et résolution les petites sections efficaces des processus d'électroproduction exclusive, dans une région choisie de l'espace de phase.

Notre groupe a été leader du programme expérimental de mesures de DVCS et production exclusive de mésons à 6 GeV de JLab ainsi que sur les travaux de phénoménologie menant à l'extraction des GPDs. Ce programme continue avec l'"upgrade" à 12 GeV de JLab, qui nous permet d'atteindre des régions cinématiques encore plus adaptées pour ces études de la structure du nucléon.

2 Historique et résultats obtenus

Les physiciens de l'IPN Orsay sont depuis plus d'une quinzaine d'années les moteurs du programme expérimental de mesures de GPD à Jefferson Lab. Toutes les expériences de DVCS et d'électro-production exclusive de mésons qui se sont déroulées à JLab à 6 GeV ont eu un membre de notre équipe parmi les porte-paroles et ont vu un fort engagement de notre part dans les phases de prise de données et d'analyse. Cela, uni à l'expertise en phénoménologie des GPD de notre équipe, s'est traduit en un remarquable progrès dans la compréhension de la dynamique des partons dans le nucléon.

En particulier, grâce aux résultats du Hall A et de CLAS sur le DVCS du proton avec faisceau polarisé et cible non polarisée, nous avons compris que les quarks de valence (plus rapides) se concentrent au coeur du proton, tandis que les quarks de la mer (plus lents) sont éparpillés vers ses "bords". La mesure de trois types d'asymétries DVCS aux mêmes points cinématiques (avec l'expérience CLAS sur cible de protons polarisée longitudinalement) a permis l'extraction directe des parties imaginaires de deux CFFs (H et $\tilde{H}$). La dépendance cinématique de ces CFFs nous indique que la charge axiale est plus concentrée dans le centre du nucléon que la charge électrique.

Dans la suite nous donnons plus de détails sur les résultats marquants obtenus dans les dernières années impliquant au moins un membre de l'équipe IPNO parmi les auteurs principaux (à cela il faut ajouter ~ 60 articles, depuis 2012, publiés avec les Collaborations CLAS et Hall A).

2.1 Hall A

Le Hall A de Jefferson Lab est dédié aux expériences de précision à haute luminosité. Le programme développé par notre groupe dans ce Hall a pour but d'étudier en détail le mécanisme de réaction des processus DVCS et DVMP (*Deeply Virtual Meson Production*). En particulier, on s'intéresse à quantifier le domaine d'applicabilité du formalisme des GPD, et à mesurer les contributions d'ordre supérieur à tenir en compte dans l'interprétation des résultats. Ainsi, la première expérience dédiée au DVCS (E00-110) qui a pris ses données en 2004, avec des résultats publiés en 2006 [1], 2007 [2], 2011 [3] et 2015 [4] (publication longue), a mesuré la section efficace DVCS et l'électro-production de π^0 en fonction du transfert d'impulsion Q^2.

Concernant la réaction DVCS le résultat le plus important a été la confirmation du mécanisme "twist-2" (Fig. 1, gauche) [1], toutefois avec des contributions non-négligeables d'ordre supérieur [4]. Des mesures sur le neutron ont également été faites [2]. Une grande déviation de la section efficace par rapport au processus BH a été mesurée, ce qui a ouvert la voie à l'exploitation de la section efficace DVCS non-polarisée pour mesurer la partie réelle du terme d'interférence BH-DVCS (ainsi que la contribution du DVCS^2), ce que jusque-là semblait être uniquement accessible via les asymétries de charge, bien plus difficiles à mesurer de façon précise. Quant au canal $ep \to ep\pi^0$ les premières mesures de la section efficaces à grand Q^2 ont montré un fort désaccord et des valeurs bien plus grandes que toutes les prédictions basées sur la QCD perturbative.

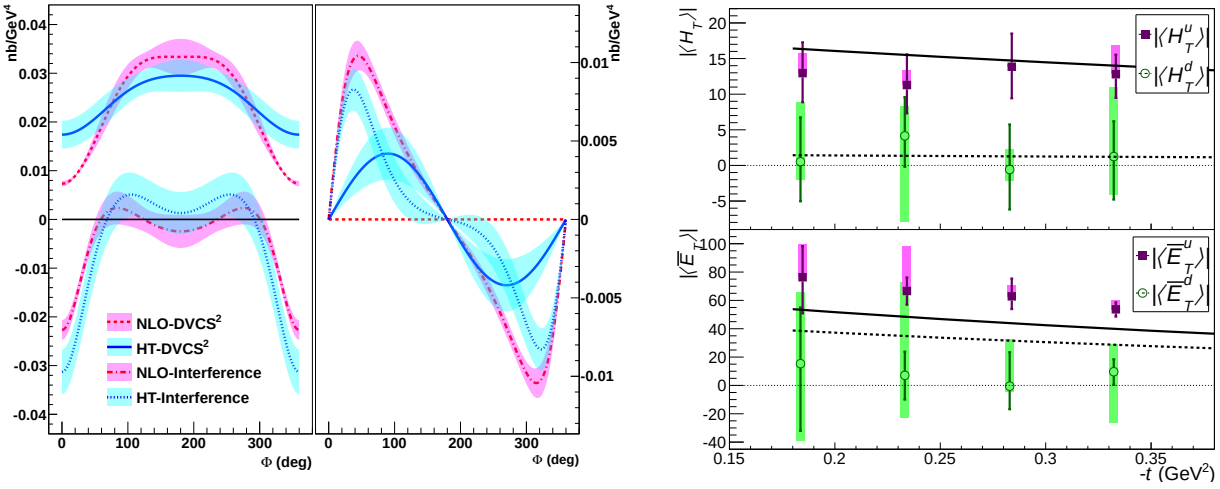

FIGURE 2 – Gauche : séparation du terme d'interférence BH-DVCS et la contribution du DVCS^2 dans la section efficace non-polarisée (panneau de gauche) et dans la différence des sections efficaces polarisées (panneau de droite), dans le cas des contributions de twist supérieur (HT) ou d'ordre supérieur en α_s (NLO). Droite : Séparation en saveurs des contributions des GPD de transversité à l'électro-production de π^0 dans le cadre de la factorisation avec les degrés de liberté transverses k_T des quarks.

Une deuxième campagne de mesures a eu lieu en 2010, ce qui a permis de mieux étudier les phénomènes observés dans les premières prises de données. Dans le cas du DVCS, la dépendance de la section efficace avec l'énergie du faisceau incident a été exploitée pour séparer la contribution DVCS^2 de la partie réelle du terme d'interférence avec le BH [5]. Cette mesure supplémentaire a par ailleurs confirmé la nécessite de corrections d'ordre supérieur (NLO ou "higher twist") pour décrire de façon précise la dépendance angulaire des sections efficaces mesurées (Fig. 2, gauche). Dans le cas de l'électro-production de π^0, les prises de données à différentes énergies de faisceau ont été utilisées pour réaliser la première séparation longitudinale et transverse de la section efficace, à la fois sur le proton [6] et sur le neutron [7]. La section efficace transverse a été trouvée complètement dominante, en contradiction avec la limite perturbative à grand Q^2.

Une factorisation de l'amplitude transverse est néanmoins possible [8, 9] si on tient compte des impulsions transverses $k_\perp$ des quarks, ce qui rendrait ce processus sensible aux GPD de transversité du nucléon. En combinant les résultats π^0 sur le proton et le neutron, une première séparation en saveur des quarks des GPD de transversité a été réalisée (Fig. 2, droite).

Après l'upgrade de JLab à 12 GeV, la première prise de données a eu lieu dans le Hall A pour étendre ce programme de mesures de précision aux nouvelles cinématiques désormais accessibles. Une prise de données qui s'est étalée de 2014 à 2016 a permis de collecter des données en fonction de Q^2, mais maintenant à plusieurs valeurs de la variable de Bjorken x_B : 0.36, 0.4 et 0.6, ce qui permettra en particulier d'étudier les GPD dans le domaine de grand x_B, jusqu'à présent inaccessible expérimentalement. Ces données sont actuellement en cours d'analyse, et font l'objet d'une thèse dans le groupe.

2.2 CLAS (Hall B)

Le Hall-B de JLab, où se trouvait le spectromètre de large acceptance CLAS (CLAS12 aujourd'hui), a concentré de nombreuses activités liées aux GPD. Le détecteur CLAS est en fait particulièrement adapté à la mesure des réactions exclusives à plusieurs particules dans l'état final, et il permet d'étudier simultanément un vaste espace de phase, ce qui est très important pour contraindre la complexe dépendance cinématique des GPD. Nous avons conduit de nombreuses expériences de GPD avec CLAS. L'IPNO a ainsi participé à la construction du calorimètre électromagnétique ("Inner Calorimeter", IC) couvrant les petits angles. Le IC a été fondamental pour le programme de mesures du DVCS avec CLAS et a contribué aux nombreuses analyses de données listées ci-dessous.

Sept thèses de doctorat soutenues par des étudiants de l'IPNO dans les dernières dix années ont porté sur des analyses de données de CLAS (DVCS et production exclusive de mésons) (voir Section 2.6).

Deux expériences avec cible de protons non-polarisée et faisceau d'électrons de 6 GeV polarisé ont permis des progrès importants sur les GPD :

- Nous avons mesuré les sections efficaces non polarisées et polarisées du DVCS [10] (Fig. 3, gauche) sur le plus vaste domaine cinématique jamais exploré dans la région des quarks de valence. Ces résultats ont été utilisés pour extraire la dépendance cinématique des parties réelle et imaginaire du facteur de forme Compton de la GPD H (Fig. 3, droite). Cette dépendance cinématique, à son tour, renseigne sur la concentration spatiale des partons en fonction de leur fraction d'impulsion, comme sera décrit plus en détail dans la section 2.3.
- L'extraction des sections efficaces $ep \to ep\pi^0$ (deux articles [11, 12]) a démontré pour la première fois la sensibilité de cette réaction aux GPD de transversité (Section 2.1).

Ces données nous ont ainsi permis de mesurer les sections efficaces pour l'électro-production exclusive du ρ^+. Une note d'analyse est en cours de revue par la collaboration, et une publication suivra.

Ensuite, une expérience de DVCS avec cibles de protons et deutons polarisés longitudinalement et faisceau polarisé nous a permis de mesurer des asymétries de cible, de faisceau et des doubles asymétries de cible-faisceau pour le DVCS [13, 14]. La mesure simultanée aux mêmes cinématiques de trois observables nous a permis d'extraire les parties imaginaires des CFFs H et $\tilde{H}$. Les résultats de ce travail sont présentés dans la Fig. 4. La différence de pente en t des deux CFFs renseigne sur les différentes concentrations spatiales des charges électrique et axiale dans le proton.

Le groupe a aussi contribué à l'analyse d'une expérience de DVCS sur cible de ^{4}He pour mesurer à la fois le canal incohérent ($e^4He \to ep\gamma X$), dans le but de comprendre la modification de la structure des nucléons dans le milieu nucléaire, et le canal cohérent ($e^4He \to e^4He\gamma$), pour étudier directement la structure partonique du noyau. Les résultats de cette expérience, illustrés dans la Fig. 5, sont particulièrement prometteurs et montrent que l'asymétrie de spin faisceau du DVCS sur cible nucléaire est significativement

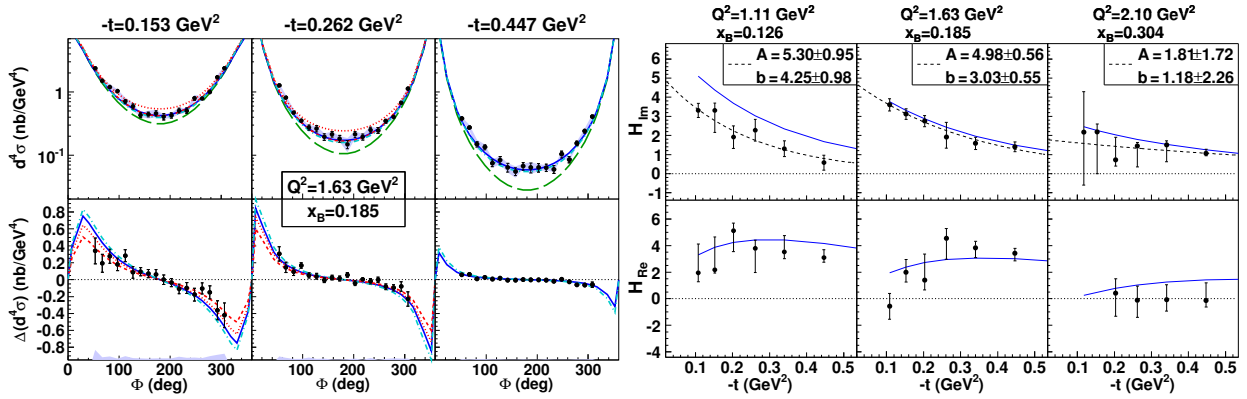

FIGURE 3 – Gauche : sections efficaces non-polarisées (en haut) et différences des sections efficaces (faisceau polarisé) pour la réaction $ep \to e'p'\gamma$ en fonction de ϕ (l'angle entre les plans hadronique et leptonique), pour une cinématique particulière parmi les 21 "bins" en (Q^2, x_B) mesurés, et pour 3 valeurs sélectionnés de t, le transfert d'impulsion entre les protons initial et final. Droite : extraction des CFFs pour H_{Im} (en haut) et H_{Re} (en bas), pour 3 "bins" en (Q^2, x_B), en fonction de t.

plus grande ($> 50\%$) que sur cible de protons, conformément aux attentes. Un article vient d'être publié dans PRL [15].

Enfin, l'analyse de données prises en 2001 (cible de proton, faisceau à 6 GeV) a permis d'étudier l'électro-production exclusive du π^+ [16] et l'extraction des sections efficaces de l'électro-production des mésons f_0 et f_2, jamais mesurés auparavant. Une note d'analyse est en revue dans la collaboration et un article est en cours de rédaction.

2.3 Phénoménologie des GPD/extraction des GPD

Le groupe est historiquement impliqué dans la phénoménologie des GPD, en particulier sur le développement de modèles de GPD et sur les fits des observables DVCS pour extraire les GPD (voir [17] pour une revue du sujet). L'activité scientifique récente sur le sujet a permis d'explorer plus en détail les possibilités d'accéder aux GPD à travers de nouveaux processus au delà du DVCS. En particulier, les articles [18, 19, 20] mettent en évidence l'intérêt de mesurer le processus de diffusion Compton de type temps (Time-like Compton scattering, TCS) $\gamma p \to p l^+ l^-$ et la possibilité d'interpréter les données de production exclusive de mésons en terme de GPD.

Enfin plus récemment, plusieurs travaux [21, 22, 23] ont permis des progrès importants sur les fits simultanés des différentes observables du DVCS, dans le but d'extraire les CFFs. Le résultat principal de ces travaux, présenté dans la Fig. 6, est l'extraction d'une "tomographie" du proton basée sur les données mondiales de DVCS. La distribution des partons dans le plan transverse (variable $p_\perp$) en fonction de la fraction d'impulsion x est obtenue par transformée de Fourier de la GPD H sur le transfert d'impulsion t, dans la limite $\xi = 0$.

Le résultat de Fig. 6 représente une importante étape dans le domaine, en produisant pour la première fois ce résultat longuement promis par la communauté travaillant sur les GPD.

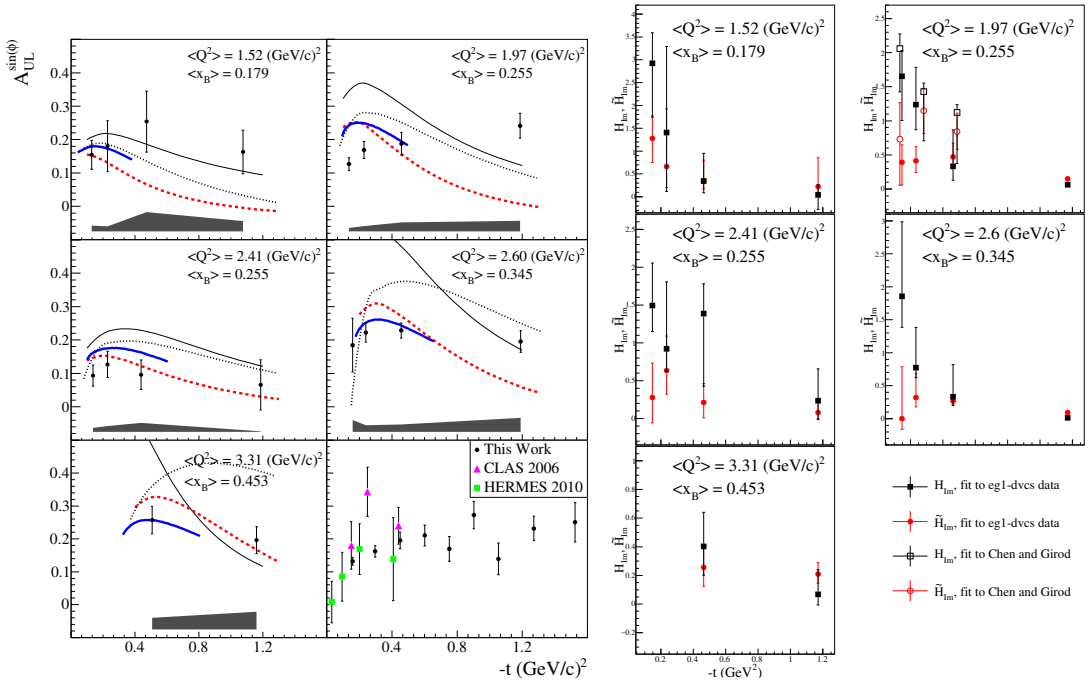

FIGURE 4 – Dépendance en t, pour 5 intervalles cinématiques en Q^2 et x_B, des asymétries de cible polarisée pour le DVCS (gauche) et des facteurs de forme Compton (droite) liés aux GPD H (noir) et $\tilde{H}$ (rouge), extraits de ces mêmes données [14]. La différence des pentes en t des deux CFFs indique que la charge axiale (liée à $\tilde{H}$) est plus concentrée au centre du proton que la charge électrique (liée à H).

2.4 Projet PEPPo (Polarized electrons for polarized positrons)

Aux énergies de CEBAF, il n'existe pas de différence fondamentale entre l'information physique susceptible d'être obtenue en diffusion d'électrons ou de positrons. Néanmoins, à chaque fois qu'un canal de réaction est le résultat de la conjugaison de plusieurs processus, la comparaison entre faisceaux de leptons de charges opposées permet d'isoler l'interférence entre ces processus. Ce comportement se manifeste tout aussi bien dans la détermination des GPD que dans celle des facteurs de forme électromagnétiques du nucléon, où les mécanismes d'échange de 2γ seraient susceptibles de réconcilier les désaccords expérimentaux. Jusqu'à PEPPo, la production de faisceaux polarisés de positrons, en particulier dans l'environnement de CEBAF, restait une difficulté de premier plan. L'expérience PEPPo [24] réalisée à l'injecteur de CEBAF a démontré que la polarisation d'un faisceau d'électrons se communique avec une grande efficacité aux positrons issus de la matérialisation des photons produits par le freinage du faisceau dans une cible de tungstène (Fig. 7). Cette technique est accessible dès le seuil de production de paires e^+e^- et ouvre une accès quasi-universel aux faisceaux polarisés de positrons pour des applications allant de la physique de la matière condensée à la physique des hautes énergies. Dans le contexte de JLab, la technique PEPPo permettrait un taux de production de 10^{-3} e^+/e^- avec une polarisation minimale de 50%.

2.5 Autres Publications Principales

Le groupe a été fortement impliqué dans la production d'un numéro spécial de EPJ A sur la structure 3D du nucléon. Nos contributions ont touché tous les aspects des GPD, avec une revue des données DVCS

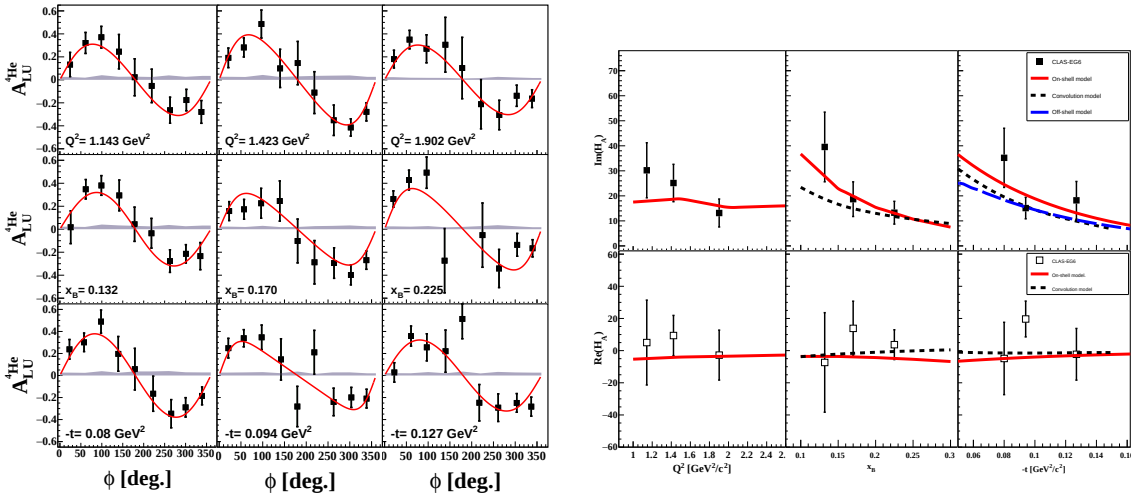

FIGURE 5 – Gauche : asymétries de spin faisceau dans le processus de DVCS cohérent sur cible d'^{4}He ($e^4He \rightarrow e^4He\gamma$) en fonction de l'angle azimutal ϕ. Les résultats sont présentés dans trois découpages différents en Q^2 (en haut), x_B (au milieu) et $-t$ (en bas). Droite : parties imaginaire (en haut) et réelle (en bas) de la GPD nucléaire H_A, extraites des asymétries de gauche, en fonction de Q^2 (à droite), x_B (au milieu) et $-t$ (à gauche). Les courbes sont des modèles théoriques.

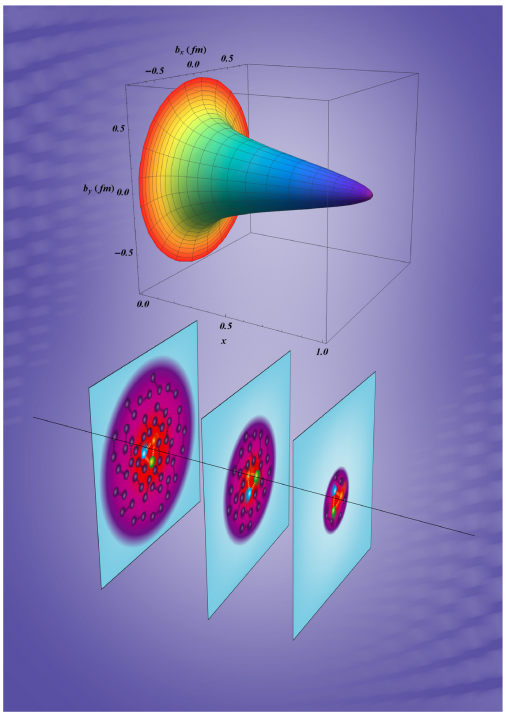

FIGURE 6 – "Tomographie" du proton extraite des données d'HERMES et JLab (Hall A et B) : les quarks de valence (impulsion plus haute) se concentrent au centre du proton, tandis que les quarks de la mer (impulsion plus faible) s'éparpillent vers ses bords.

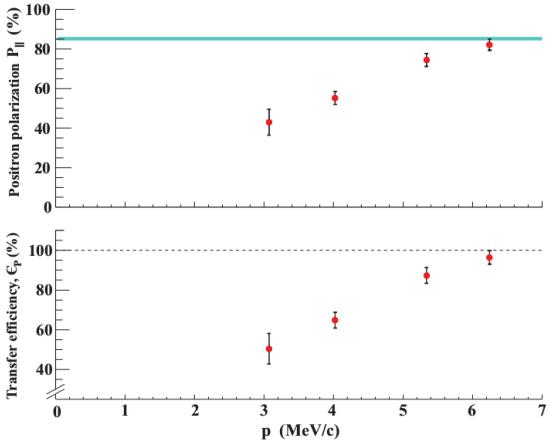

FIGURE 7 – Résultats de l'expérience PEPPo [24] montrant la polarisation longitudinale des positrons (haut) et l'efficacité du transfert de polarisation du faisceau d'électrons (bas). La ligne turquoise indique la polarisation initiale des électrons.

[25], une revue sur la production exclusive de mésons [26] et une revue sur la structure 3D appliquée aux cibles nucléaires ($A > 1$) [27].

2.6 Thèses

Thèses soutenues à l'IPNO dans les 10 dernières années sur la thématique "JLab" :

- Sections efficaces DVCS sur le proton avec CLAS, H. S. Jo (2007)
- Asymétries pour le "ΔDVCS" avec CLAS, B. Moreno (2009)
- Sections efficaces pour l'électroproduction de ρ^+ avec CLAS, A. Fradi (2009)
- Sections efficaces DVCS sur le proton avec CLAS, deuxième prise de données, B. Guegan (2012), en co-tutelle avec Rensselaer Polytechnic Institute (RPI), New York, USA
- Sections efficaces DVCS sur le proton avec CLAS, deuxième prise de données, N. Saylor (2013), en co-tutelle avec RPI, New York, USA
- Sections efficaces DVCS dans le Hall A, A. Marti (2014)
- Sections efficaces DVCS sur le neutron dans le Hall A, C. Desnault (2015)
- Sections efficaces pour l'électro-production de f_0 et f_2 avec CLAS, B. Garillon (2015)
- Asymétries pour le DVCS sur l'^{4}He avec CLAS, M. Hattawy (2015)
- Recherche du photon lourd avec HPS à JLab, A. Simonyan (2017).

Thèses en cours :

- Sections efficaces DVCS dans le Hall A, avec faisceau à 12 GeV, F. Georges, troisième année

- Phénoménologie du double-DVCS, S. Zhao, deuxième année
- Électro-production de protons sur cible nucléaires, M. Ehrhart, première année en co-tutelle avec Argonne National Laboratory, Illinois, USA
- Diffusion Compton “Time-like” sur le proton avec données de CLAS12, P. Chatagnon, première année
- Diffusion Compton profondément virtuelle dans le Hall C, H.S. Ko, première année en co-tutelle avec Seoul National University

3 Plan à court et moyen terme

Les prises de données avec un faisceau d’électrons à 6 GeV se sont terminées en 2012 à JLab. Des travaux sur l’accélérateur CEBAF ont suivi afin d’augmenter l’énergie du faisceau jusqu’à 12 GeV, et le "nouvel" accélérateur a repris son activité en 2014. L’expérience E12-06-114 ("Measurements of the electron-helicity dependent cross-sections of deeply virtual Compton scattering with CEBAF at 12-GeV") a été proposée en 2006 au "Program Advisory Committee" (PAC) de Jefferson Lab, et a été acceptée avec la priorité scientifique maximale. Ceci a été la première expérience à avoir lieu après la montée en énergie du faisceau de Jefferson Lab à 12 GeV. L’expérience a utilisé l’équipement standard du Hall A à Jefferson Lab, que l’IN2P3 a contribué à construire, ainsi qu’un nouveau calorimètre électromagnétique financé également par l’IN2P3. L’expérience E12-06-114 a pour but d’étudier avec précision le domaine d’applicabilité du formalisme des GPD au processus DVCS. Pour cela, il se propose de mesurer la section efficace de cette réaction en fonction de la valeur du transfert d’impulsion Q^2, avec les autres variables cinématiques fixées (sujet de thèse en cours).

La prise de données de CLAS12, le nouveau détecteur du Hall B qui a remplacé CLAS, a démarré en décembre 2017, avec l’expérience de DVCS sur le proton. Un étudiant de notre groupe analysera ces données pour en extraire une première mesure du “Timelike Compton Scattering”, une réaction qui donne un moyen, alternatif au DVCS, d’extraire les GPD. L’expérience (E12-11-003 - "DVCS on the neutron at 11 GeV with CLAS12"), définie "high impact" par le PAC de JLab, pour laquelle le détecteur central de neutron (CND) a été construit (Section 3.1), est prévue pour l’année 2019. Une autre proposition d’expérience, dont nous sommes porte-paroles principaux, qui utilisera le CND, avec en plus une cible de deuton polarisée longitudinalement, est prévue autour de 2020.

La liste complète des expériences pour JLab 12 GeV dans lesquelles notre équipe est impliquée est fournie dans la Table 1. Les projets techniques de l’IPNO, associés à ce programme expérimental, sont décrits dans les sections suivantes.

3.1 Central Neutron Detector (CND) dans le Hall B (CLAS12)

L’énergie plus élevée (12 GeV) des électrons incidents de CEBAF après l’"upgrade" impose des modifications pour les détecteurs. En particulier, le nouveau détecteur CLAS12 du Hall B est décomposé en deux parties : un spectromètre à l’avant, avec des caractéristiques similaires à la version originale de CLAS, mais avec une résolution en énergie améliorée et une couverture angulaire en θ pour la détection des particules chargées et neutres entre 5° et 40° ; et un détecteur central (CD), positionné autour de la cible, pour la détection des particules chargées et neutres entre 40° et 135°.

Dans le cadre de l’étude des GPD, nous avons décidé d’ajouter un détecteur de neutrons au CD, pour pouvoir étudier le DVCS sur le neutron. Le DVCS sur le neutron (nDVCS) est la réaction la plus sensible à la GPD E. Celle-ci, avec la GPD H, que l’on mesure dans le DVCS sur le proton, peut nous donner accès, via une règle de somme, au moment orbital des quarks. Il est très important, pour effectuer une

Numéro	**Hall**	**Titre**	**Date prise de données**
E12-06-114	Hall A	Measurements of electron-helicity dependent cross sections of deeply virtual Compton scattering with CEBAF at 12 GeV	2014-2016
E12-12-001	Hall B	Timelike Compton scattering and J/psi photoproduction on the proton in e^+e^- pair production with CLAS12 at 11 GeV	2018
E12-12-007	Hall B	Exclusive ϕ meson electroproduction with CLAS12	2018
E12-11-003	Hall B	Deeply virtual Compton scattering on the neutron with CLAS12 at 11 GeV	2019
E12-06-109A	Hall B	Deeply virtual Compton scattering on the neutron with a longitudinally polarized deuteron target	2020
E12-13-010	Hall C	Exclusive deeply virtual Compton scattering and neutral pion cross-section measurements in Hall C	2020
E12-06-117	Hall B	Quark propagation and hadron formation	2019-2022
E12-17-012	Hall B	Partonic Structure of light nuclei	2021
E12-17-012A	Hall B	Tagged EMC measurements on light nuclei	2021
E12-17-012B	Hall B	Spectator-tagged DVCS on light nuclei	2021

TABLE 1 – Liste des expériences à venir dont un membre de l'équipe est l'un des porte-paroles.

mesure du DVCS sur le neutron à l'aide d'une cible de deutérium, de pouvoir détecter le neutron de recul, en plus de l'électron diffusé et du photon émis. Le détecteur de neutrons doit permettre la détermination de l'angle et de l'impulsion des neutrons, et ainsi permettre de les distinguer des photons. Les difficultés techniques vis-à-vis de ce projet sont dues au faible espace à disposition et à la présence d'un fort champ magnétique environnant (5 T). Après avoir testé différentes géométries et matériaux, la solution optimale est apparue être un "tonneau", coaxial avec le faisceau d'électrons, de barreaux de scintillateurs plastiques. La solution choisie pour la lecture de la lumière a été d'utiliser seulement le côté arrière du barreau, avec un photomultiplicateur "classique" placé au-delà de la région à haut champ magnétique et connecté au barreau par un long guide de lumière ; la lumière émise par la partie avant du scintillateur est transmise dans le barreau adjacent - et lue à son côté arrière - par un guide de lumière à "U-turn". Dans les années 2010-2012 ce "concept" a été perfectionné à travers de nombreuses mesures avec des prototypes, qui nous ont permis de déterminer les composantes optimales pour le détecteur (scintillateurs, PMTs, enrobage, blindage magnétique, etc.).

La proposition d'expérience pour le nDVCS avec CLAS12 et le CND a été présentée au PAC de JLab en janvier 2011 et a été acceptée avec la note maximale. L'expérience a été aussi définie "high impact" par le PAC, et sera ainsi parmi les expériences prioritaires de CLAS12 (actuellement elle est prévue pour l'année 2019). Le financement du détecteur, environ 300k€, a été fourni par l'IN2P3. Après 2 années d'études de R&D à Orsay, le "design" optimal du CND a été déterminé et, fin 2013, l'équipe détecteurs de l'IPNO a commencé la construction, qui s'est terminée en février 2015. Après avoir été testé, bloc par bloc, à l'IPNO sous rayons cosmiques, le CND a été livré à Jefferson Lab en fin mai 2015. L'installation dans CLAS12 a eu lieu à la fin septembre 2017 (Fig. 8), et le détecteur a démarré sa prise de données en décembre 2017. Un

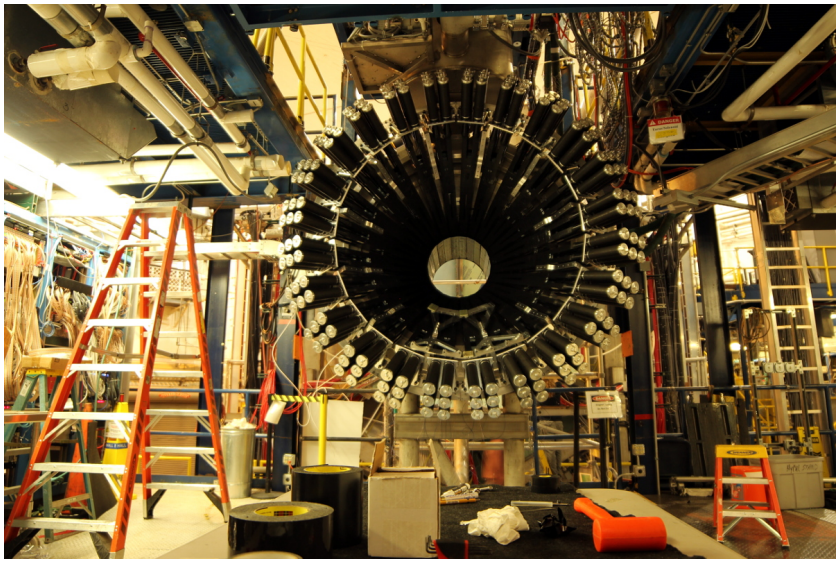

FIGURE 8 – Le Central Neutron Detector, installé au JLab.

article NIM vient d'être soumis.

3.2 Neutral Particle Spectrometer (NPS) dans le Hall C

L'expérience E12-13-010 dans le Hall C, dont l'IPN Orsay est porte-parole, a été approuvée par le *Program Advisory Committee (PAC)* de JLab en 2013 avec la plus haute priorité et prendra ses données autour de 2020. Elle a pour but de faire une séparation dite Rosenbluth de la section efficace longitudinale et transverse de production des π^0 et du DVCS par des mesures à plusieurs énergies de faisceau. Dans le cas des π^0, c'est la section efficace longitudinale qui donne un accès direct aux GPD. Pour le DVCS ($ep \rightarrow e'p'\gamma$), nous pourrons séparer la contribution due purement au DVCS de son interférence avec le processus Bethe-Heitler, où le photon (γ) est émis par l'électron (e, e') au lieu du proton.

L'expérience nécessite la construction d'un nouvel équipement, NPS (Neutral Particle Spectrometer), consistant en un calorimètre en tungstate de plomb (PWO) et un aimant "balai". Le principal défi du calorimètre est sa tenue au fort taux de radiation attendu. Un système pour régénérer les cristaux s'avère nécessaire. La température du calorimètre doit également être régulée et un système de monitorage de gain doit être implémenté.

NPS consistera en un assemblage de 1116 cristaux scintillants dans un cadre régulé en température avec un aimant balai compact de 0.3 Tm. Il sera placé en vue directe de la cible et à très petit angle par rapport au faisceau. Des forts taux de comptage sont attendus, notamment provenant de particules de basse énergie. De l'électronique à échantillonnage rapide sera utilisée. Cependant, et malgré l'aimant balai, la dose de radiation attendue dans les cristaux à plus petit angle dépassera plusieurs krad/h, selon les simulations. Aucun détecteur n'a jamais été soumis à de tels taux de radiation et luminosités ($> 1{\cdot}10^{38}$ Hz/cm^2), ce qui représentera une véritable avancée d'au moins un ordre de grandeur par rapport aux calorimètres actuels. Ce cahier des charges ambitieux est requis pour accéder aux petites sections efficaces des processus à étudier, en particulier lorsque le moment transféré Q^2 augmente.

Pour relever le défi technologique de maintenir une calorimétrie de haute résolution ($< 0.5\%$ en énergie), nécessaire aux séparations de Rosenbluth, à des luminosités et taux de radiation extrêmement grands, nous

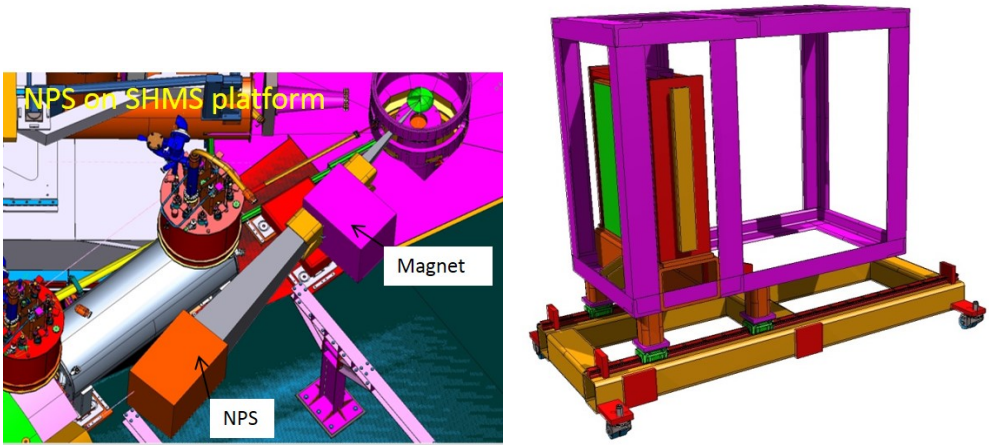

FIGURE 9 – Gauche : configuration expérimentale avec l'aimant balai après la cible et le calorimètre NPS sur la plateforme du spectromètre HMS du Hall C. Droite : Vue du calorimètre et son support.

allons équiper le calorimètre de NPS des deux dispositifs suivants, dont le développement est pris en charge par l'IPN Orsay :

1. Système de monitorage du gain

   Les dégâts dûs aux radiations sont le facteur limitant le courant du faisceau et donc la luminosité expérimentale. Dans le but de contrôler la stabilité de NPS et la dégradation des cristaux en fonction de la dose accumulée, nous développons un système de monitorage qui injectera périodiquement de la lumière dans les modules pendant la prise de données ou pendant des périodes de calibration dédiées. Le système de calibration doit lui-même être résistant aux radiations et capable de contrôler le gain de la chaîne aux précisions requises par une séparation de Rosenbluth. Le système mesurera les variations de transmittance optique des cristaux au cours de l'expérience et fournira une calibration continue et *in situ* de chaque voie individuellement.

2. Système de régénération des cristaux

   Pour récupérer les propriétés optiques des cristaux, un système de régénération à base de lumière bleue est en cours d'étude. Avec les longueurs d'onde entre 400-600 nm et une intensité de l'ordre de 1-2 mW/cm^2, cette méthode devrait améliorer significativement la transparence optique des cristaux exposés aux radiations. Cependant, cette technique est invasive et peut affecter les photomultiplicateurs utilisés pour mesurer la lumière scintillante, selon des tests récents. Par conséquence, un système d'éclairage infrarouge sera développé comme alternative. L'intensité de lumière qui peut être injectée sans endommager les photomultiplicateurs et/ou sans interférer avec la prise de données sera étudiée. Les performances de ce système de régénération seront évaluées par rapport aux dégâts en radiation attendus.

3.3 "A Low Energy Recoil Tracker" (ALERT) pour CLAS12

Depuis quelques années nous menons un effort, en collaboration avec un groupe international de physiciens, dans le but de construire un nouveau détecteur de fragments nucléaires pour CLAS12 ("A Low Energy Recoil Tracker", ALERT). L'objectif est d'étendre le programme des GPD nucléaires (voir section 2.2) avec plusieurs autres études de la structure hadronique des noyaux, qui seront possibles grâce à un tel détecteur.

Un programme complet, composé de trois propositions d'expériences utilisant ce détecteur, a été approuvé par le dernier PAC de JLab [28, 29, 30]. Nous avons contribué sur tous ces sujets de physique ainsi qu'à l'effort de R&D, qui a pour objectif de construire un détecteur offrant une excellente résolution et une bonne identification des différents isotopes légers, du proton à l'hélium-4.

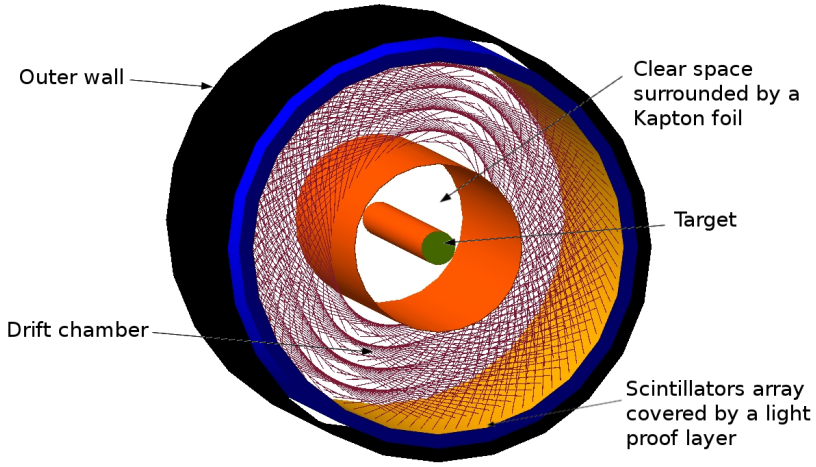

FIGURE 10 – Design préliminaire du détecteur ALERT.

ALERT consiste en une chambre à dérive cylindrique placée au plus près d'une cible gazeuse (typiquement quelques atm d'hélium) et des scintillateurs finement segmentés autour de cette chambre, comme illustré dans la Fig. 10. Un financement de 50 k€ a été obtenu auprès du LABEX P2IO pour financer la R&D du projet consistant en diverses études sur les chambres à dérive, en particulier l'usage de fils à petite distance les uns des autres et la possibilité d'utiliser des fils de carbone pour réduire les interactions des noyaux détectés avec les fils mêmes. Ces travaux ont déjà mené à la publication d'un article dans NIM A [31].

4 Expérience HPS

Au-delà de l'étude des GPDs, depuis 5 ans notre équipe est aussi impliqué dans l'expérience Heavy Photon Search (HPS, située dans le Hall-B de JLab). HPS vise à découvrir un nouveau boson de jauge ("A'") ayant une masse entre 20 et 1000 MeV et un faible couplage avec la matière "standard". Un tel boson pourrait être un moyen d'expliquer la matière noire. Le détecteur de HPS est composé par un "silicon vertex tracker" et un calorimètre électromagnétique. Notre équipe s'est chargé de la plupart du design et de la construction du calorimètre, ainsi que d'une partie de l'électronique de celui-ci [32, 33].

Nous avons pris des données en 2015 à 1.1 GeV et en 2016 à 2.3 GeV durant quelques jours dans le but de tester les détecteurs. Ces données sont de ce point de vue très positives et on démontré le parfait fonctionnement des détecteurs avec des résolutions en temps et énergie aux niveaux attendus. Une thèse vient de se terminer à l'IPNO (A. Simonyan, soutenue fin décembre 2017) sur l'analyse de ces données, qui devrait donner lieu à publication dans les prochains mois. Le résultat préliminaire est montré en rose dans la Fig. 11.

Sur la même figure, on peut voir la couverture de l'espace de phase qui devrait être atteinte dans les années à venir avec plus de temps de faisceau. De plus, fort de l'expérience des prises de données de 2015 et

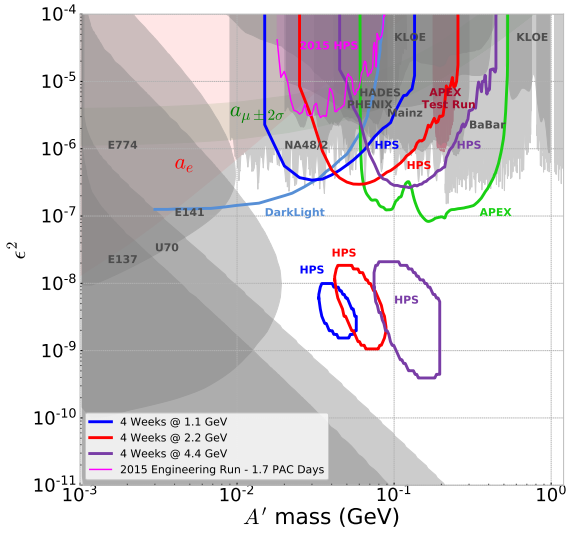

FIGURE 11 – Espace de phase couvert par la courte prise de données de 2015 (courbe rose) et par les projets de futures prises de données en fonction de $\epsilon^2 = (\alpha_{A'}/\alpha_{EM})^2$ et de la masse du A'.

2016, la collaboration a prévu de mettre en place quelques améliorations sur le détecteur existant. L'IPNO prend part dans ce cadre à l'addition d'un hodoscope qui sera placé entre les détecteurs en silicium et le calorimètre que nous avons construit. Pour ce projet, les services techniques de l'IPNO s'occupent du design et de la construction de pièces mécaniques.

5 Futur à moyen et long terme : le collisionneur électron-ion (EIC)

Le calcul du spectre des hadrons en QCD sur réseau établit que 99% de la masse de ces particules, et donc de la matière conventionnelle, est engendré par les échanges de gluons entre quarks. Ces échanges sont affectés par les interactions entre gluons eux-mêmes. Comprendre comment s'organisent les gluons au sein des hadrons ouvre ainsi une fenêtre remarquable sur la dynamique de l'interaction forte. Comme vu précédemment, le cadre théorique des GPDs, ainsi que des distributions de partons dépendantes de l'impulsion transverse (TMD), permettent l'étude en trois dimensions de la structure du nucléon. Les expériences menées à Jefferson Lab, DESY-HERMES et CERN-COMPASS sondent directement la structure en quarks des hadrons, et livrent des informations de plus en plus précises sur les répartitions des charges électrique et axiale. En revanche la répartition des gluons demeure mal connue car les sondes électromagnétiques habituelles – contrairement aux collisions hadroniques – n'interagissent pas directement avec ceux-ci. En particulier, la distribution en impulsion des gluons dans le nucléon, essentielle pour prévoir la production au LHC de particules lourdes au-delà du modèle standard, n'a jamais été directement mesurée.

Il a été prouvé par les mesures à DESY-HERA que la matière hadronique contient un très grand nombre de gluons à petite fraction d'impulsion x. Il est clair qu'une telle croissance de la densité de gluons dans les hadrons avec une valeur de x décroissante, i.e. à hautes énergies, ne peut pas continuer indéfiniment : ceci violerait alors l'unitarité de la théorie. Il a été ainsi découvert que pour des valeurs de x suffisamment

petite, une nouvelle dynamique émergeait et atténuait l'avalanche des gluons, restaurant ainsi l'unitarité. Ce nouveau phénomène est appelé saturation, une propriété de la matière hadronique totalement inédite.

Le collisionneur Electron-Ion (EIC) proposé aux États-Unis permettra d'étudier en profondeur les porteurs de l'interaction forte : les gluons. Avec une grande luminosité, des faisceaux polarisés et une grande variété d'ions et d'énergies différentes, il sera une machine unique au monde. En 2015 le *Nuclear Science Advisory Committee (NSAC)* dans son *Long Range Plan* a recommandé l'EIC comme la première priorité pour une nouvelle machine aux USA. Un comité de l'Académie Nationale de Sciences (NAS) est en train d'évaluer les opportunités scientifiques ouvertes par un EIC, et devrait rendre un rapport avec ses conclusions dans la première moitié de 2018. En même temps, un large ensemble de physiciens (700 membres de 150 instituts dans 28 pays et 6 continents) s'est déjà organisé autour d'un *Users Group*. C'est donc un moment crucial pour structurer notre implication future et assurer un impact maximal de notre communauté dans ce grand projet de physique hadronique international. Dans ce but notre groupe a d'ores et déjà démarré plusieurs activités autour de cette machine : d'une part nous avons participé au développement de la motivation physique du EIC à travers des simulations, et d'autre part nous avons démarré un programme de R&D en calorimétrie.

5.1 Phénoménologie et simulations pour EIC

Nous avons participé au développement de certains aspects du programme scientifique de l'EIC, en particulier en lien avec les cibles nucléaires [34, 35]. Ce travail s'est principalement concentré sur la création de simulations Monte-Carlo de production de hadrons sur des cibles à grand A. L'objectif de ces travaux était d'établir la précision des futures mesures au EIC, et comprendre si elles seront comparables aux mesures faites au LHC en collision Pb-Pb.

À haute énergie, le principal processus affectant la production de hadrons est la perte d'énergie du quark dans le matériel nucléaire. Les calculs théoriques pour ce processus donnent des résultats souvent incompatibles selon les méthodes et les approximations utilisées. De plus, dans le cas des collisions Pb-Pb la cinématique du parton initial est totalement inconnue. Un test au EIC permettrait de résoudre ce problème, la direction de l'électron diffusé donnant une indication directe sur la direction du quark s'hadronisant. Cette mesure est particulièrement intéressante car lors de son passage dans le matériel nucléaire le quark interagit principalement avec les gluons de basse énergie. On peut ainsi relier cette mesure directement à la saturation des gluons dans les noyaux.

La principale difficulté de ce type de mesures en interaction e-A à haute énergie est la faible atténuation observée, menant à des signaux réduits difficiles à mesurer précisément. Nous participons ainsi à un programme de phénoménologie mené par JLab : *Geometry Tagging for Heavy Ions at JLEIC*. L'objectif de ce projet est d'établir des méthodes permettant d'évaluer la centralité de l'interaction d'une manière similaire à ce qui est fait pour les collisions d'ions relativistes.

5.2 R&D en calorimétrie pour EIC

Nous avons commencé une R&D autour des besoins de calorimétrie au futur EIC. Une R&D innovante dans les secteurs critiques de détection tels que la calorimétrie permettra in-fine de se positionner de manière forte dans la collaboration internationale EIC. Financé pour l'instant uniquement par BNL/DoE, ce projet a débuté en 2015 avec le but de définir les besoins et la technologie nécessaires pour une calorimétrie de haute résolution au EIC. En effet, une bonne résolution est critique dans les deux bouchons du futur détecteur (Fig. 12 en montre un possible "design"), à la fois pour l'identification des particules (PID) et pour la mesure de leur impulsion.

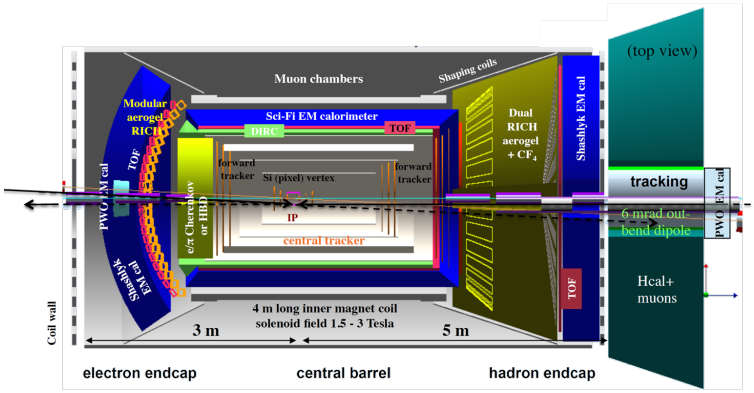

FIGURE 12 – Conception du détecteur pour la version du EIC à Jefferson Lab. La calorimétrie à très petit angle serait assurée par des cristaux de PWO en cours d'étude dans notre groupe.

Les performances requises du calorimètre à petit angle sont : une résolution angulaire mieux que 1 deg., une résolution en énergie d'environ $\sigma(E)/E \simeq 1.5\%/\sqrt{E} + 0.5\%$ avec une résolution en temps < 2 ns et une résistance aux radiations jusqu'à 1 deg. par rapport à la ligne de faisceau. Une solution basée sur le tungstate de plomb (PWO) est optimale du fait de son petit rayon de Molière, sa grande densité, sa réponse rapide, et sa tenue aux radiations. Le but de notre projet, en synergie avec les développements en cours pour NPS, est d'identifier les besoins pour construire un calorimètre en PWO pour EIC en investiguant les limites de qualité des cristaux et les différents systèmes de lecture, ainsi que les implications dans les performances du détecteur à travers des prototypes, tests et simulations. Dans l'avenir, l'optimisation de la géométrie et les méthodes de réfrigération seront également étudiés.

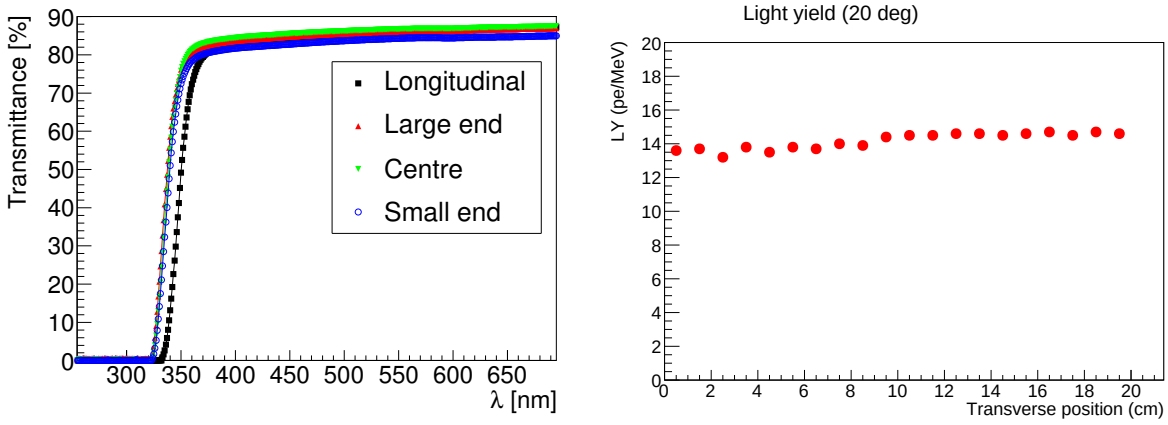

FIGURE 13 – Gauche : transmission optique le long de l'axe longitudinal du cristal, et à 3 positions transverses. Droite : rendement optique mesuré avec une source de ^{137}Cs à différentes positions transverses dans le cristal.

L'activité concernant le PWO dans les 3 dernières années s'est focalisée dans la mise en place de l'infrastructure nécessaire pour réaliser des mesures optiques. Nous pouvons maintenant mesurer la transmission optique longitudinale et transverse dans les cristaux avec des spectromètres à absorption, ainsi que le rendement optique (*light yield*) à température ambiante. La Fig. 13 montre quelques résultats récents de ces

mesures. Nous avons également étudié la résistance aux radiations des cristaux grâce à un irradiateur panoramique basé sur une source de ^{60}Co de 3000 Cu d'activité et disponible au Laboratoire de Chimie Physique sur le campus d'Orsay. Cette installation permet d'irradier à des taux allant de 6 à 5000 Gy/h, pouvant ainsi délivrer des doses intégrées très grandes dans une courte période de temps.

6 Implication scientifique et technique du laboratoire

La Table 2 liste les chercheurs permanents, post-doctorants et doctorants de l'IPN Orsay qui sont, à ce jour, impliqués dans la physique de JLab, ainsi que le pourcentage de leur temps de travail consacré a ce projet.

Nom	**Grade**	**Pourcentage**
P. Chatagnon	Doctorant	100
R. Dupré	Chargé de Recherche	95
M. Ehrhart	Doctorant	100
M. Guidal	Directeur de Recherche	5
F. Georges	Doctorant	100
H.S. Ko	Doctorant	100
C. Muñoz-Camacho	Chargé de Recherche	95
S. Niccolai	Directrice de Recherche	95
D. Marchand	Chargée de Recherche	30
E. Voutier	Directeur de Recherche	50
R. Wang	Post-doctorant	100
S. Zhao	Doctorant	100

TABLE 2 – Liste des chercheurs de l'IPN Orsay impliqués à ce jour (janvier 2018) dans JLab, avec pourcentages consacrés.

7 Budgets et sources de financement

La Table 3 montre les montants reçus et les sources de financement pour l'équipe JLab de l'IPN Orsay, dans les dernières 3-4 années.

Références

[1] C. Muñoz Camacho et al. Scaling tests of the cross-section for deeply virtual Compton scattering. *Phys. Rev. Lett.*, 97 :262002, 2006, nucl-ex/0607029.

Année	**Montant**	**Source**	**Détails**
2018	87 k€	IN2P3	Projet NPS
2018	63 k€	IN2P3	Missions JLab
2018	23 k$	Financement DoE/BNL	Equipement R&D EIC
2017	53 k€	IN2P3	Projet NPS
2017	50 k€	IN2P3	Missions JLab
2017	15 k$	Financement DoE/BNL	Equipement R&D EIC
2016	70 k€	IN2P3	Missions + equipement JLab
2016	41 k€	LabEx P2IO	Projet ALERT
2016-2019	9-10 k€/an	PICS (CNRS-USA)	Missions et échanges avec JLab
2016	9 k$	Financement DoE/BNL	Equipement R&D EIC
2015	50 k€	IN2P3	Missions JLab
2015	30 k$	Financement DoE/BNL	Equipement R&D EIC
2013-2017	206 k€	ANR	HPS (post-doc, missions)
2013	200 k€	SESAME	HPS - equipement
2012-2015	300 k€	IN2P3	CND - equipement

TABLE 3 – Budgets et sources de financement pour le projet “JLab” dans les dernières années.

[2] M. Mazouz et al. Deeply virtual Compton scattering off the neutron. *Phys. Rev. Lett.*, 99 :242501, 2007, 0709.0450.

[3] E. Fuchey, A. Camsonne, C. Munoz Camacho, M. Mazouz, G. Gavalian, et al. Exclusive Neutral Pion Electroproduction in the Deeply Virtual Regime. *Phys. Rev.*, C83 :025201, 2011, 1003.2938.

[4] M. Defurne et al. E00-110 experiment at Jefferson Lab Hall A : Deeply virtual Compton scattering off the proton at 6 GeV. *Phys. Rev.*, C92(5) :055202, 2015, 1504.05453.

[5] M. Defurne et al. A Glimpse of Gluons through Deeply Virtual Compton Scattering on the Proton. *Nature Communications*, 8 :1408, 2017, 1703.09442.

[6] M. Defurne et al. Rosenbluth separation of the π^0 electroproduction cross section. *Phys. Rev. Lett.*, 117(26) :262001, 2016, 1608.01003.

[7] M. Mazouz et al. Rosenbluth separation of the π^0 Electroproduction Cross Section off the Neutron. *Phys. Rev. Lett.*, 118(22) :222002, 2017, 1702.00835.

[8] S. Ahmad, G. R. Goldstein, and S. Liuti. Nucleon Tensor Charge from Exclusive π^0 Electroproduction. *Phys. Rev.*, D79 :054014, 2009, 0805.3568.

[9] S.V. Goloskokov and P. Kroll. Transversity in hard exclusive electroproduction of pseudoscalar mesons. *Eur. Phys. J.*, A47 :112, 2011, 1106.4897.

[10] H. S. Jo et al. Cross sections for the exclusive photon electroproduction on the proton and Generalized Parton Distributions. *Phys. Rev. Lett.*, 115(21) :212003, 2015, 1504.02009.

[11] I. Bedlinskiy et al. Measurement of Exclusive π^0 Electroproduction Structure Functions and their Relationship to Transversity GPDs. *Phys. Rev. Lett.*, 109 :112001, 2012, 1206.6355.

[12] I. Bedlinskiy et al. Exclusive π^0 electroproduction at $W > 2$ GeV with CLAS. *Phys. Rev.*, C90(2) :025205, 2014, 1405.0988. [Addendum : Phys. Rev.C90,no.3,039901(2014)].

[13] E. Seder et al. Longitudinal target-spin asymmetries for deeply virtual Compton scattering. *Phys. Rev. Lett.*, 114(3) :032001, 2015, 1410.6615. [Addendum : Phys. Rev. Lett.114,no.8,089901(2015)].

[14] S. Pisano et al. Single and double spin asymmetries for deeply virtual Compton scattering measured with CLAS and a longitudinally polarized proton target. *Phys. Rev.*, D91(5) :052014, 2015, 1501.07052.

[15] M. Hattawy et al. First Exclusive Measurement of Deeply Virtual Compton Scattering off ^{4}He : Toward the 3D Tomography of Nuclei. *Phys. Rev. Lett.*, 119(20) :202004, 2017, 1707.03361.

[16] K. Park, M. Guidal, et al. Deep exclusive π^+ electroproduction off the proton at CLAS. *Eur. Phys. J.*, A49 :16, 2013, 1206.2326.

[17] M. Guidal, H. Moutarde, and M. Vanderhaeghen. Generalized Parton Distributions in the valence region from Deeply Virtual Compton Scattering. *Rept. Prog. Phys.*, 76 :066202, 2013, 1303.6600.

[18] M. Boër and M. Guidal. Timelike Compton Scattering off the Proton : beam and/or target spin asymmetries. In *Proceedings, 20th International Conference on Particles and Nuclei (PANIC 14) : Hamburg, Germany, August 24-29, 2014*, pages 112–115, 2014, 1412.2036.

[19] M. Guidal and V. Kubarovsky. Deeply pseudoscalar meson electroproduction with CLAS and Generalized Parton Distributions. In *Proceedings, 20th International Conference on Particles and Nuclei (PANIC 14) : Hamburg, Germany, August 24-29, 2014*, pages 125–128, 2014, 1412.4315.

[20] M. Boër, M. Guidal, and M. Vanderhaeghen. Timelike Compton scattering off the proton and generalized parton distributions. *Eur. Phys. J.*, A51 :103, 2015, 1501.00270.

[21] M. Boër and M. Guidal. Generalized Parton Distributions and Deeply Virtual Compton Scattering. *J. Phys.*, G42(3) :034023, 2015, 1412.4651.

[22] R. Dupré, M. Guidal, S. Niccolai, and M. Vanderhaeghen. Analysis of Deeply Virtual Compton Scattering Data at Jefferson Lab and Proton Tomography. 2017, 1704.07330.

[23] R. Dupre, M. Guidal, and M. Vanderhaeghen. Tomographic image of the proton. *Phys. Rev.*, D95(1) :011501, 2017, 1606.07821.

[24] D. Abbott et al. Production of Highly Polarized Positrons Using Polarized Electrons at MeV Energies. *Phys. Rev. Lett.*, 116(21) :214801, 2016, 1606.08877.

[25] N. d'Hose, S. Niccolai, and A. Rostomyan. Experimental overview of Deeply Virtual Compton Scattering. *Eur. Phys. J.*, A52(6) :151, 2016.

[26] L. Favart, M. Guidal, T. Horn, and P. Kroll. Deeply Virtual Meson Production on the nucleon. *Eur. Phys. J.*, A52(6) :158, 2016, 1511.04535.

[27] R. Dupré and S. Scopetta. 3D Structure and Nuclear Targets. *Eur. Phys. J.*, A52(6) :159, 2016, 1510.00794.

[28] Whitney Armstrong et al. Partonic Structure of Light Nuclei. 2017, 1708.00888.

[29] Whitney R. Armstrong et al. Spectator-Tagged Deeply Virtual Compton Scattering on Light Nuclei. 2017, 1708.00835.

[30] Whitney Armstrong et al. Tagged EMC Measurements on Light Nuclei. 2017, 1708.00891.

[31] G. Charles et al. Carbon wire chamber at sub-atmospheric pressure. *Nucl. Instrum. Meth.*, A855 :154–158, 2017.

[32] M. Battaglieri et al. The Heavy Photon Search Test Detector. *Nucl. Instrum. Meth.*, A777 :91–101, 2015, 1406.6115.

[33] I. Balossino et al. The HPS electromagnetic calorimeter. *Nucl. Instrum. Meth.*, A854 :89–99, 2017, 1610.04319.

[34] D. Boer et al. Gluons and the quark sea at high energies : Distributions, polarization, tomography. 2011, 1108.1713.

[35] A. Accardi et al. Electron Ion Collider : The Next QCD Frontier. *Eur. Phys. J.*, A52(9) :268, 2016, 1212.1701.