

E12-06-114: Diffusion Compton Profondément Virtuelle au Jefferson Lab, Hall A

Vendredi 1^{er} Décembre

Frédéric Georges

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

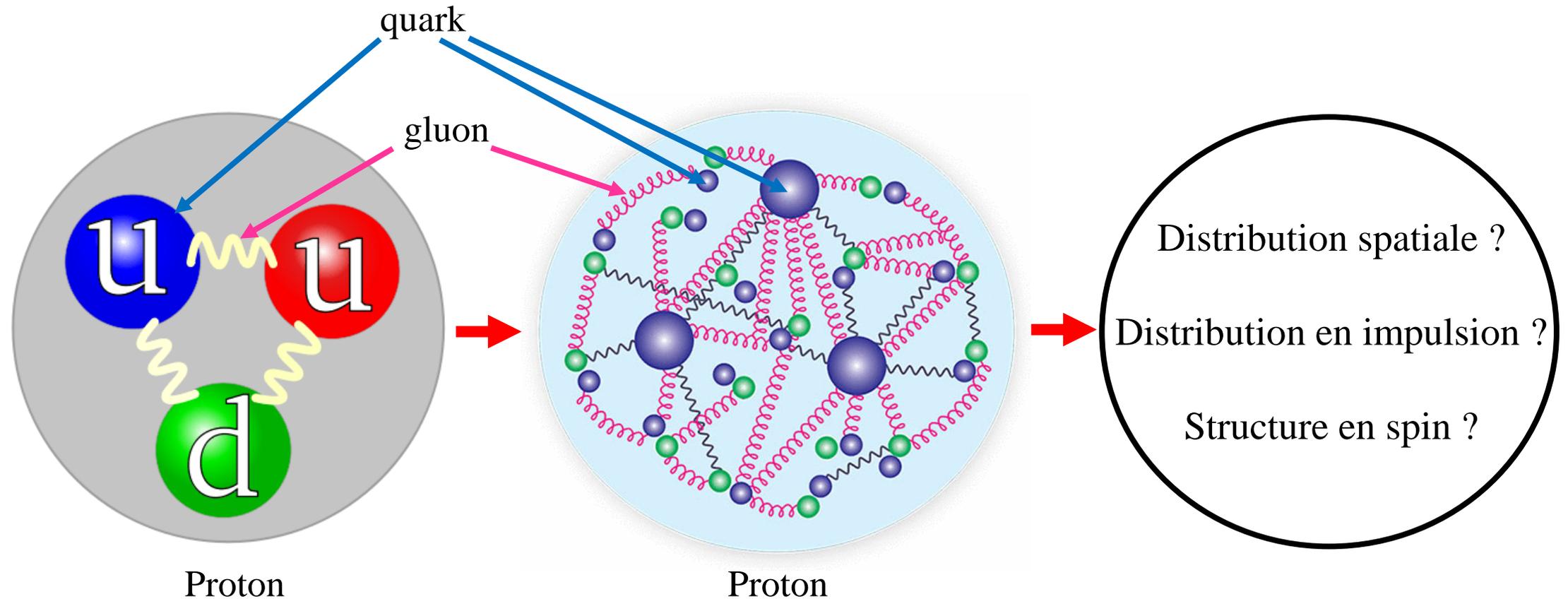
CNRS-IN2P3 Université Paris-Sud, 91406 Orsay, France



Plan

- Introduction – Motivations physiques
- DVCS à Jlab, Hall A – Objectifs
- Configuration expérimental
- Aperçus de l'analyse de données en cours (liste non exhaustive)
 - Calibration optique du spectromètre
 - Calibration π^0 du calorimètre
- Résumé et perspectives

Structure interne du proton



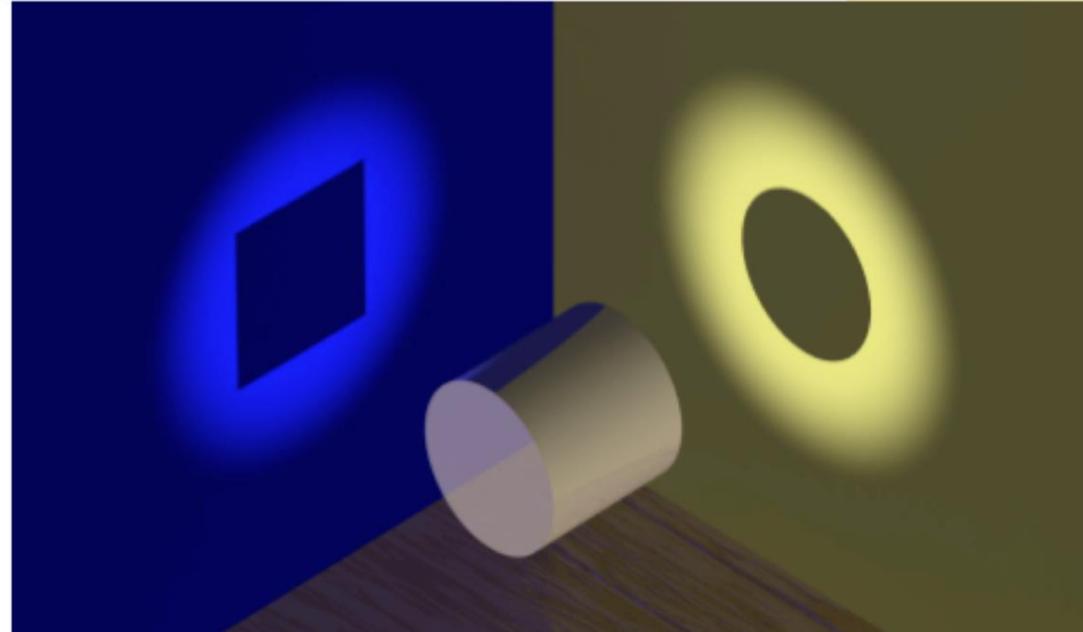
Les expériences de diffusion d'électrons sur protons permettent de sonder la structure interne du proton

Distributions Généralisées de Partons (GPDs)

DIS Parton Distribution Functions

Elastic Form Factors

No information on the spatial location of the constituents

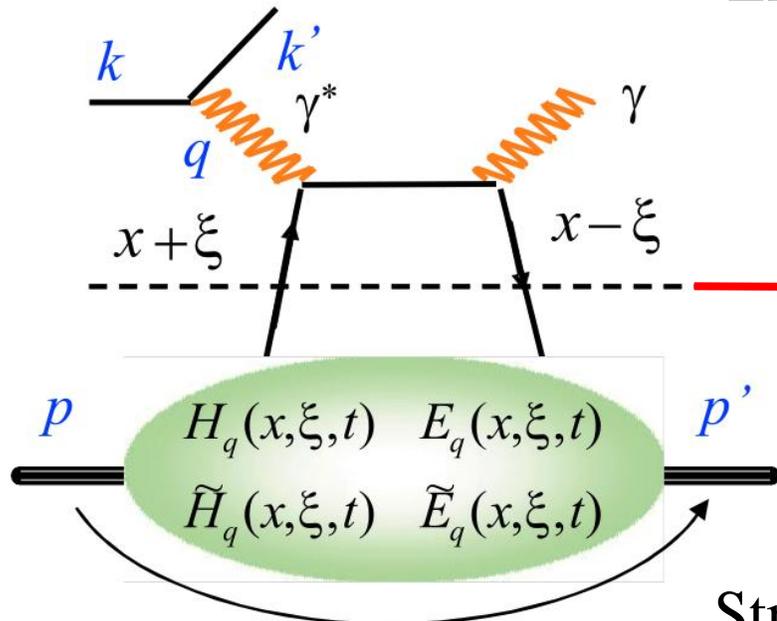


No information about the underlying dynamics of the system

- Diffusion élastique ($ep \rightarrow e'p'$) → Facteurs de Forme → Distribution spatiale
- Diffusion inélastique ($ep \rightarrow e'X$) → Fonctions de Distribution de Partons → Distribution en impulsion
- DVCS ($ep \rightarrow e'p'\gamma$) → GPDs → Corrélations position-impulsion & Structure en spin

Diffusion Compton Profondément Virtuelle (DVCS)

Limite de Bjorken :
$$\left. \begin{array}{l} Q^2 = -q^2 \rightarrow \infty \\ \nu \rightarrow \infty \end{array} \right\} x_B = \frac{Q^2}{2M\nu} \text{ fixed}$$



Partie dure
(calculable, QED)

Factorisation

DVCS : $ep \rightarrow e'p'\gamma$

Partie molle

Paramétrée par les GPDs

Structure interne du proton paramétrée par 4 GPDs de quarks :

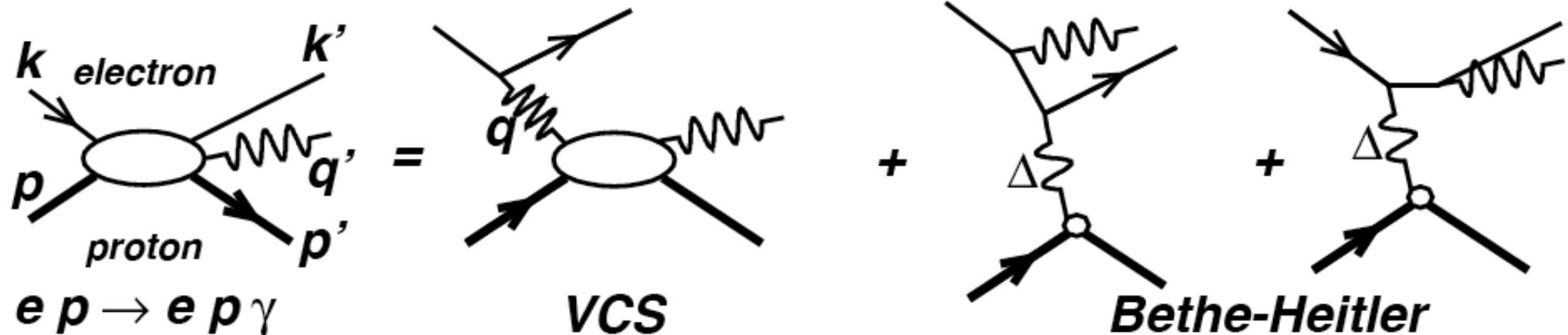
$H, E, \tilde{H}, \tilde{E}$

$t = (p' - p)^2$

$\xi \approx \frac{x_B}{2 - x_B}$

Section efficace DVCS \rightarrow GPDs \rightarrow Description de la structure interne du proton.

DVCS et Bethe-Heitler



At leading twist:

$$d^5 \vec{\sigma} - d^5 \overleftarrow{\sigma} = \Im (T^{BH} \cdot T^{DVCS})$$

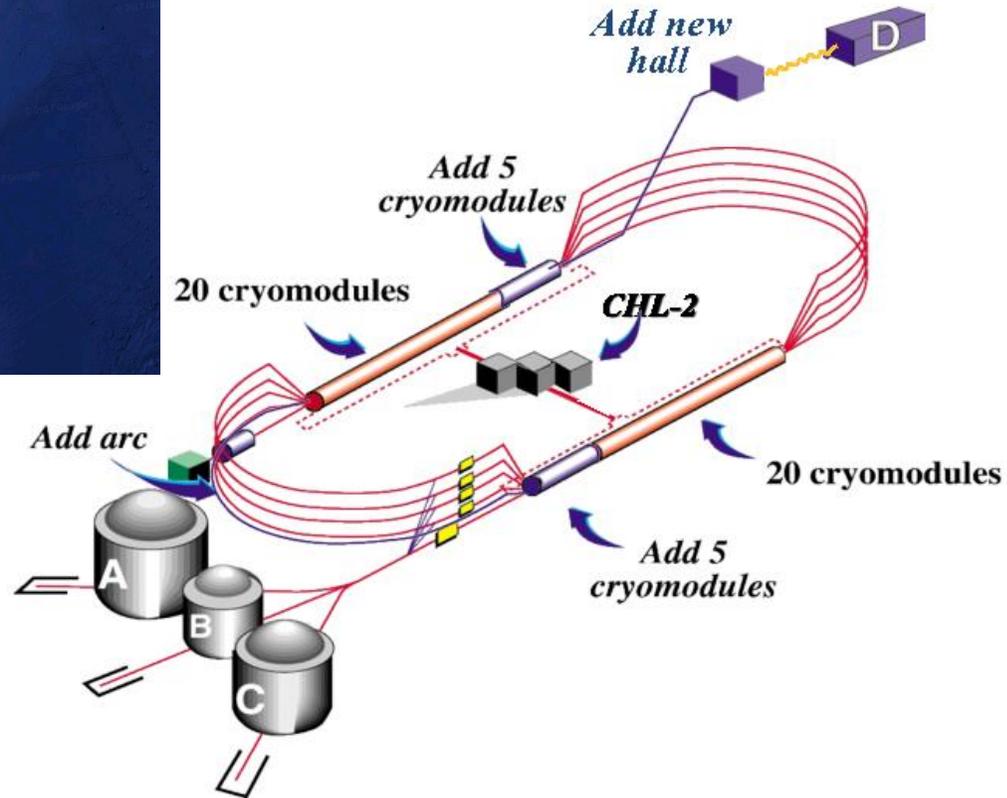
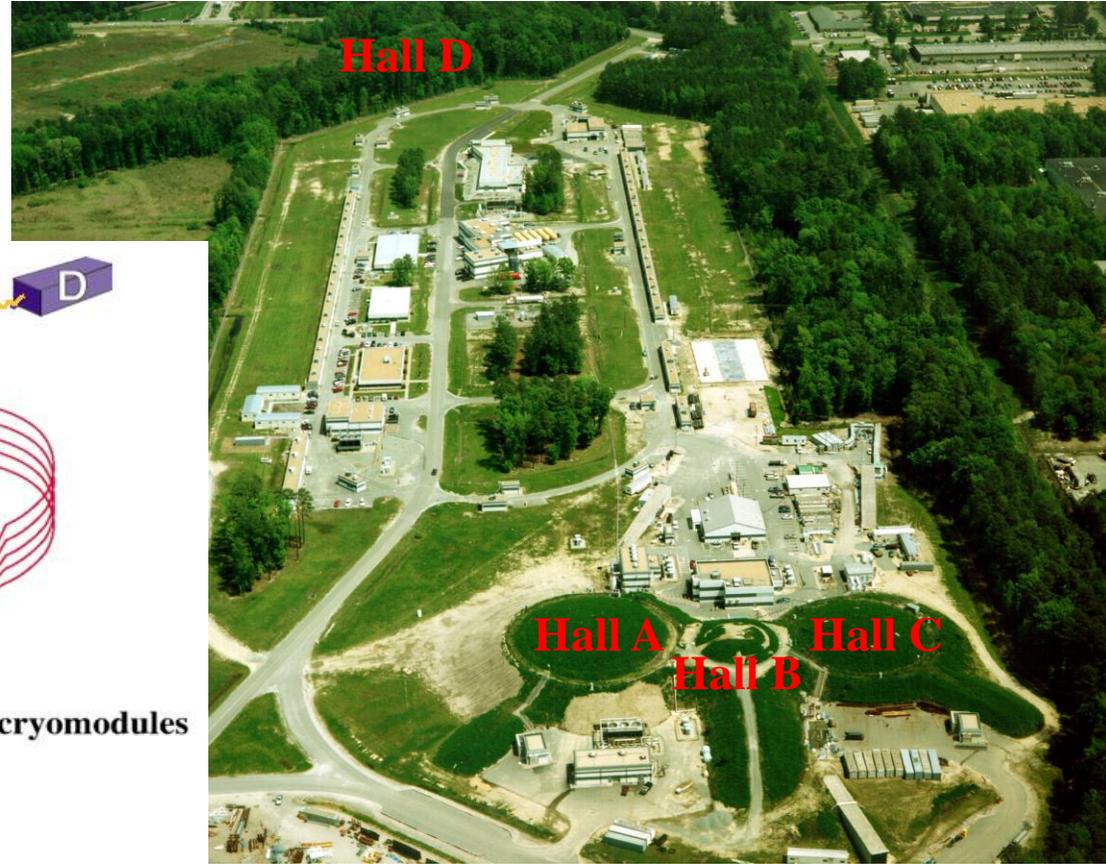
$$d^5 \vec{\sigma} + d^5 \overleftarrow{\sigma} = |BH|^2 + \Re (T^{BH} \cdot T^{DVCS}) + |DVCS|^2$$

\downarrow
 Connu à 1%

Jefferson Lab

- Jlab : Accélérateur d'électrons de 12 GeV + 4 Halls expérimentaux (A, B, C, D)

Newport News,
Virginie, Etats-Unis.

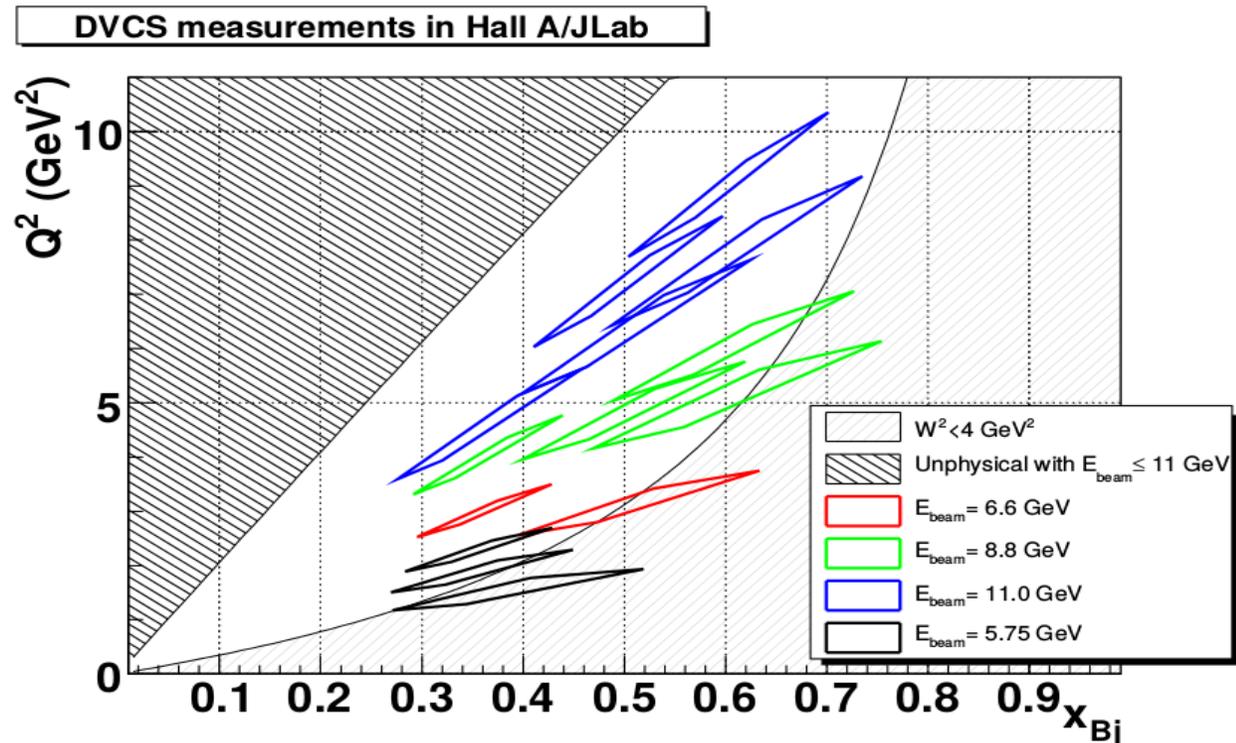


DVCS à Jefferson Lab, Hall A – Objectifs

- Acquisition des données entre l'automne 2014 et l'automne 2016

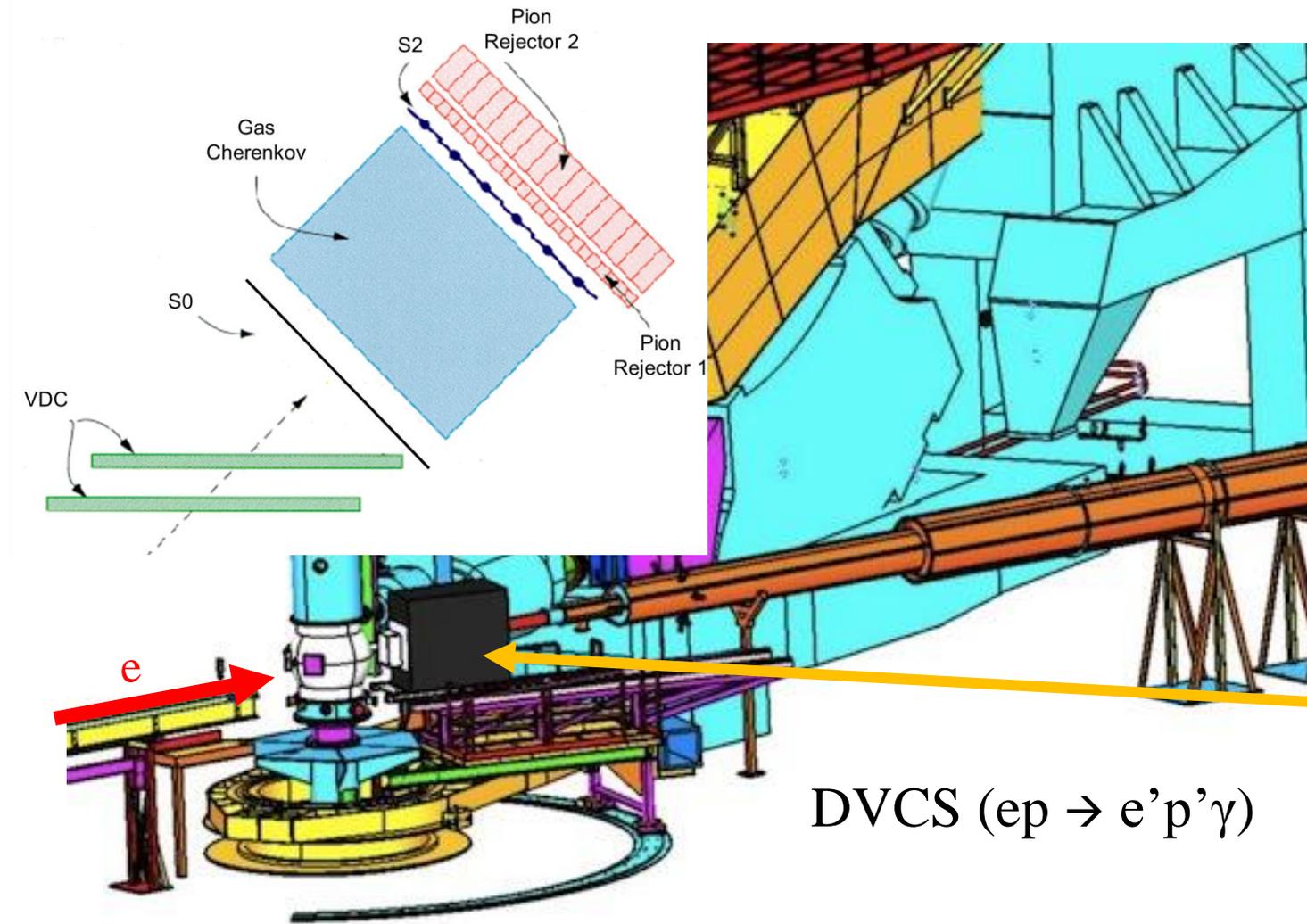
kinematic	Q^2 (GeV ²)	x_B
kin36_1	3.2	0.36
kin36_2	3.6	0.36
kin36_3	4.5	0.36
kin48_1	2.7	0.48
kin48_2	4.4	0.48
kin48_3	5.3	0.48
kin48_4	6.9	0.48
kin60_1	5.5	0.60
kin60_2	6.1	0.60
kin60_3	8.4	0.60
kin60_4	9.0	0.60

- Objectifs de l'expérience E12-06-114 :
 - Étude de la dépendance en Q^2 : larges scans en Q^2 à x_B fixés (Plus grands bras de levier en Q^2 & pour plusieurs valeurs de x_B)
 - Séparation des parties réelle et imaginaire de l'amplitude DVCS

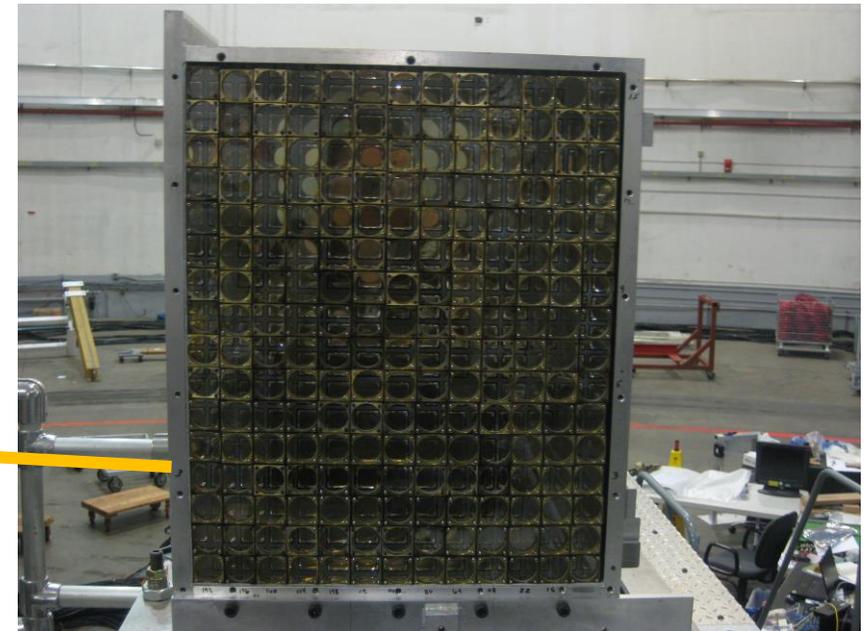


100 jours de faisceau (88 + 12 calibration)

DVCS à Jefferson Lab, Hall A – Appareillage



- Faisceau d'électrons : e
- Cible d'hydrogène liquide : p
- Spectromètre : détecte e'
- Calorimètre : détecte γ
- Proton de recul p' non détecté

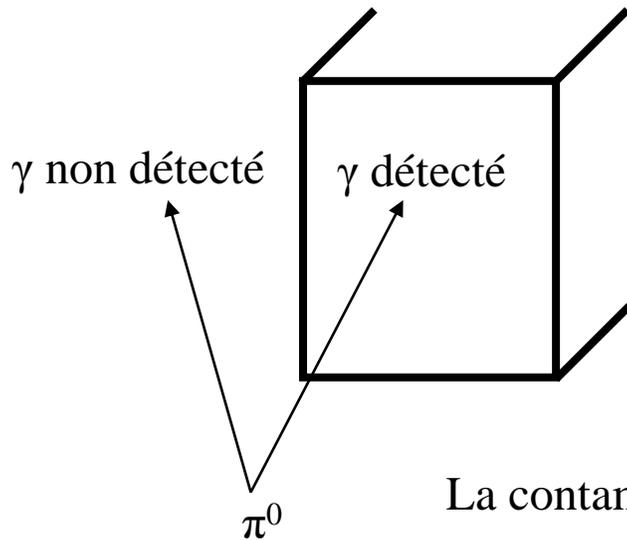


Masse manquante et exclusivité

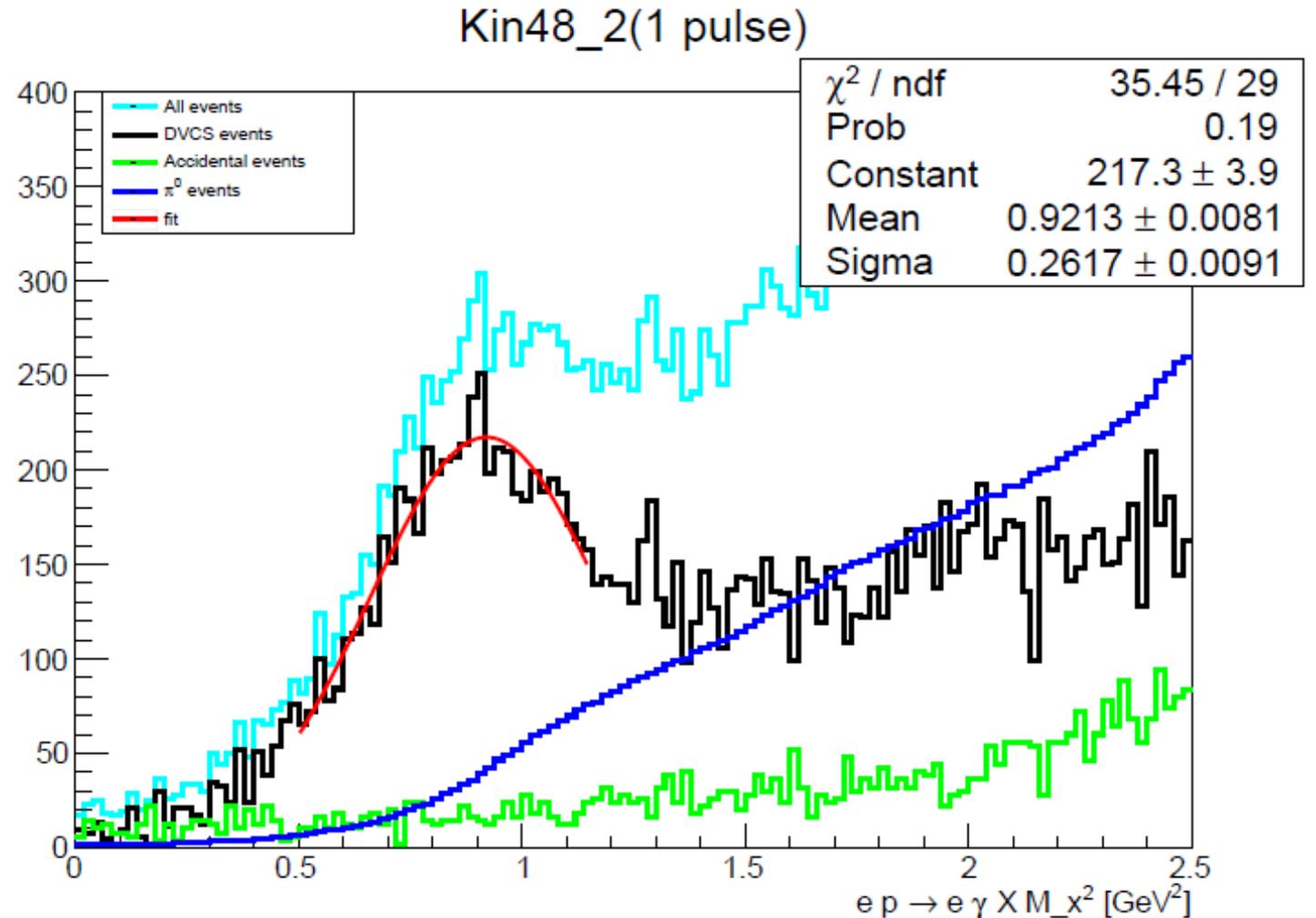
Masse manquante : $ep \rightarrow e'X\gamma$

$$M_X^2 = (e + p - e' - \gamma)^2$$

L'exclusivité du processus DVCS est assurée par une coupure sur la masse manquante

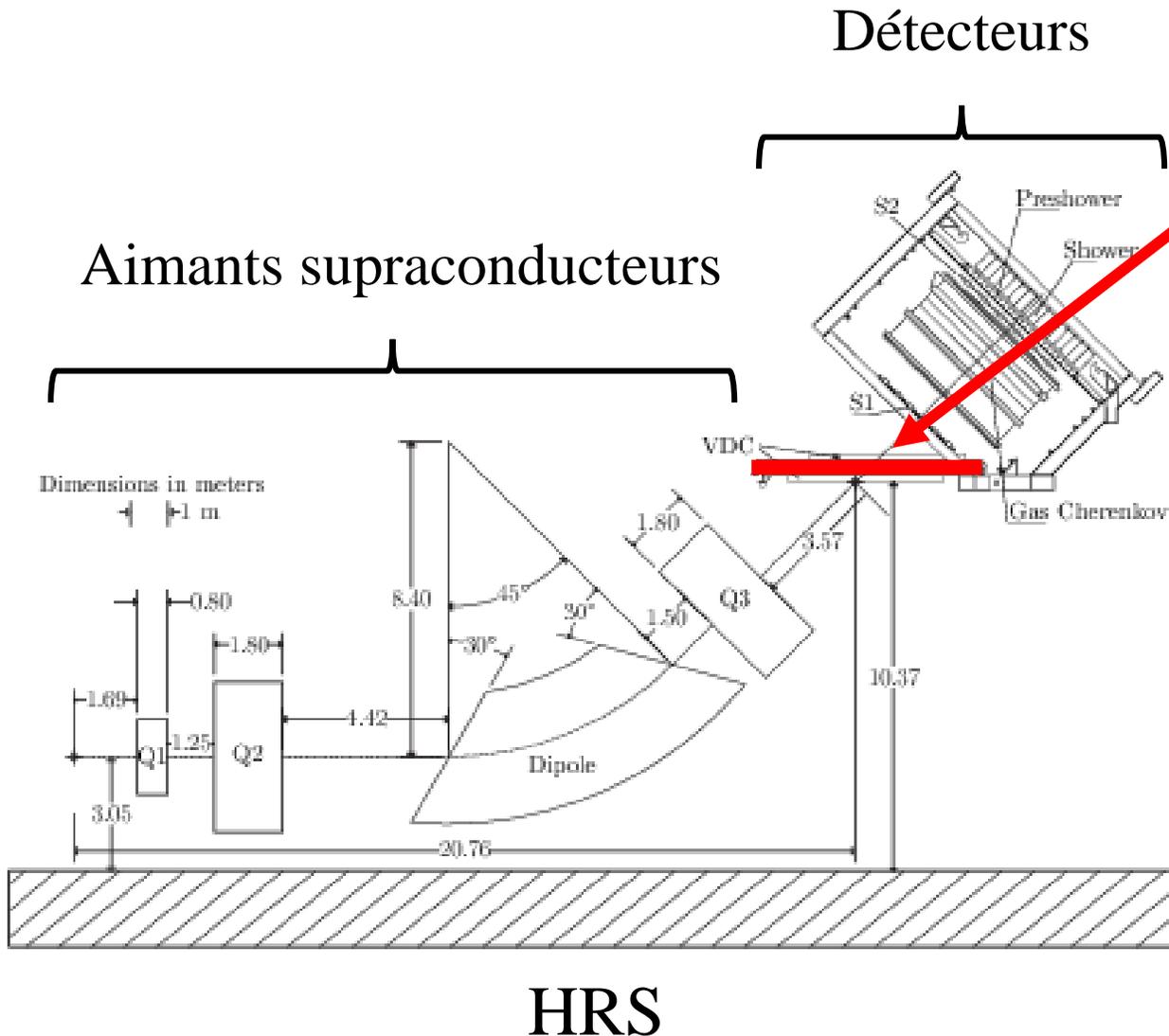


La contamination π^0 'ressemble' à un γ DVCS



Calibration optique du Spectromètre à Haute Résolution (HRS)

Le plan focal du spectromètre



Plan focal : “photographie” de l’évènement ayant eu lieu dans la cible

Électron détecté au plan focal, **mesure** :

- Position (x_{fp}, y_{fp})
- Direction $(dx_{fp}/dz_{fp}, dy_{fp}/dz_{fp}) = (\theta_{fp}, \phi_{fp})$

Au niveau de la cible, **reconstruction** :

- Vertex (= position) y_{tg}
- Angles de diffusion de l’électron (θ_{tg}, ϕ_{tg})
- Impulsion de l’électron δ_{tg}

4 variables dans le repère du plan focal



4 variables dans le repère de la cible

La matrice optique

Approximation au 1^{er} ordre :

$$\begin{bmatrix} \delta \\ \theta \\ y \\ \phi \end{bmatrix}_{tg} = \begin{bmatrix} \langle \delta | x \rangle & \langle \delta | \theta \rangle & 0 & 0 \\ \langle \theta | x \rangle & \langle \theta | \theta \rangle & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \langle y | y \rangle & \langle y | \phi \rangle \\ 0 & 0 & \langle \phi | y \rangle & \langle \phi | \phi \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \theta \\ y \\ \phi \end{bmatrix}_{fp}$$

Expression polynomiale à l'ordre 4 :

$$y_{tg} = \sum_{j,k,l} \sum_{i=1}^m C_i^{Y_{jkl}} x_{fp}^i \theta_{fp}^j y_{fp}^k \phi_{fp}^l$$

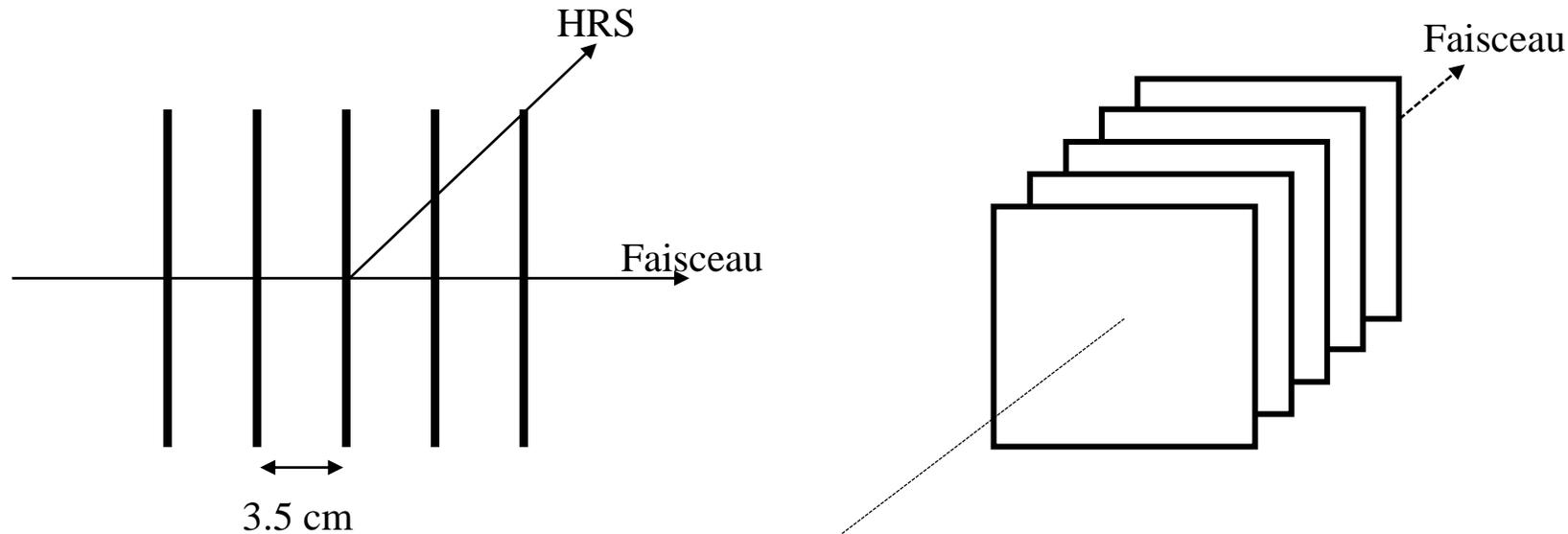
$$i + j + k + l \leq 4$$

$C_i^{Y_{jkl}}$ Coefficients de la matrice optique

- Calibration requise si modification du réglage des aimants.
- Printemps 2016 : dysfonctionnement d'un aimant.

Étape 1 : calibration de la reconstruction du vertex

- Utilisation d'une cible composée de 5 feuilles de carbones (1mm d'épaisseur)
- Vertex attendu y_{tg}^0 , corrélé à des zones précises du plan focal
- Calcul des nouveaux coefficients optiques $C_i^{Y_{jkl}}$ par minimisation de la fonction d'aberration $\Delta(y)$

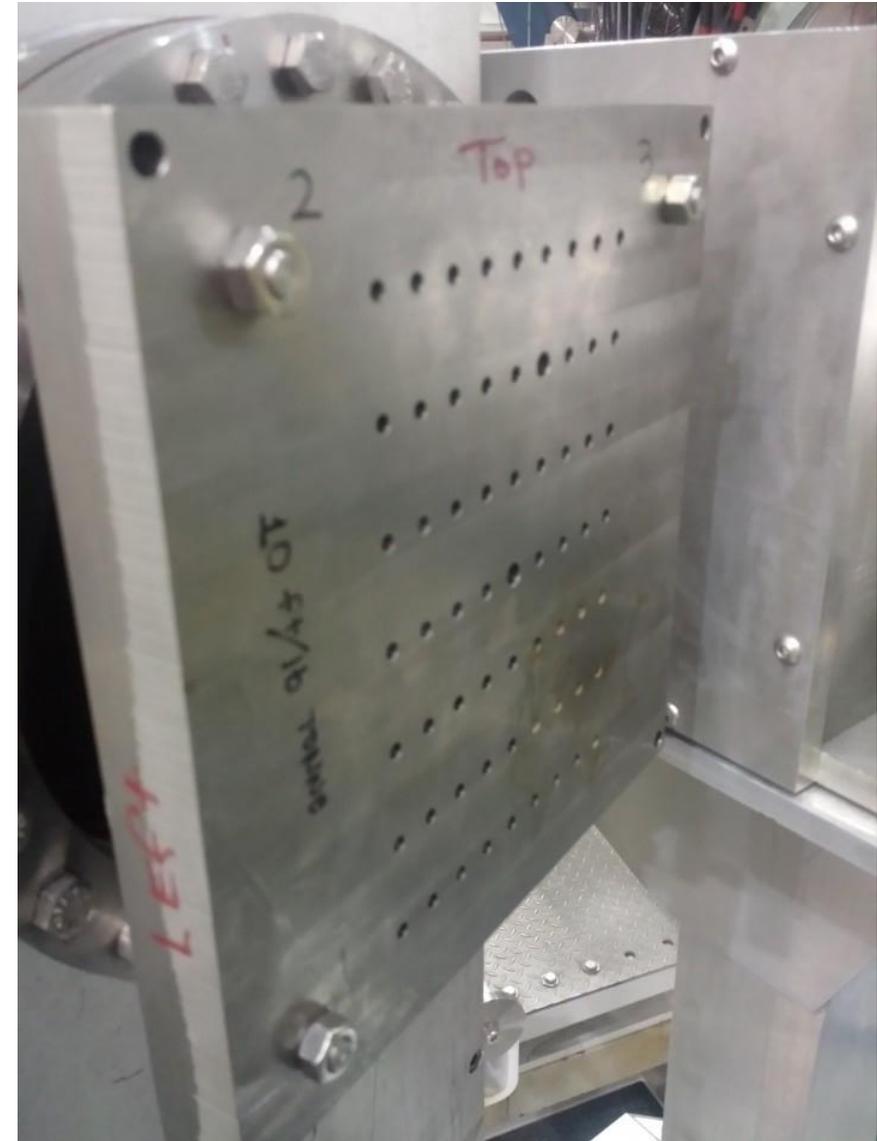


$$\Delta(y) = \sum_s \left[\frac{\sum_{j,k,l} Y_{jkl} \theta_{fp}^j y_{fp}^k \phi_{fp}^l - y_{tg}^0}{\sigma_y^s} \right]^2$$

$$Y_{jkl} = \sum_{i=1}^m C_i^{Y_{jkl}} x_{fp}^i$$

Étape 2 : calibration de la reconstruction des angles

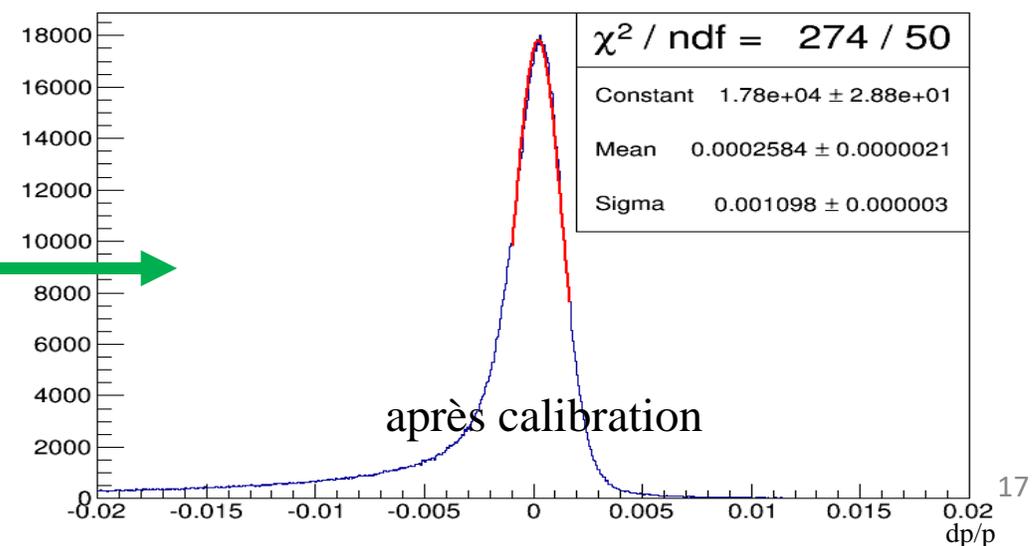
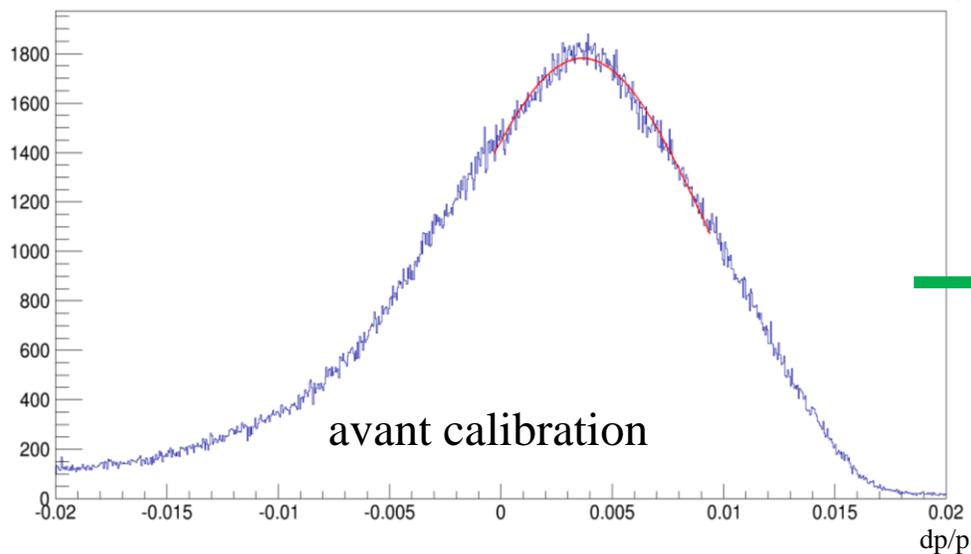
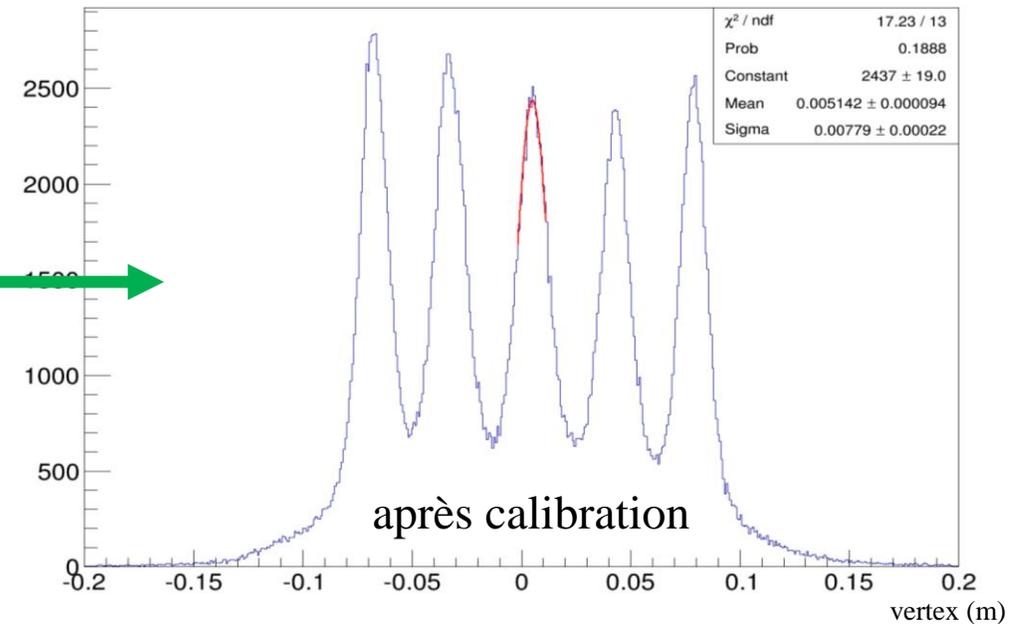
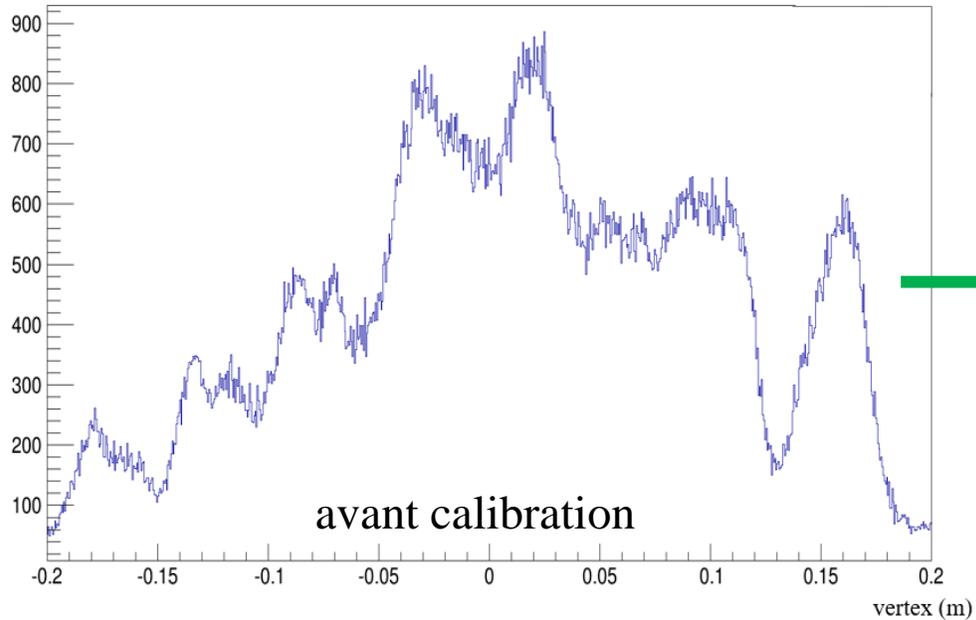
- Epaisse plaque de métal percée de multiples trous insérée devant l'entrée du spectromètre (Sieve)
 - Trous = valeur attendue pour les angles de diffusion θ_{tg} et ϕ_{tg} , corrélées à des zones précises du plan focal
 - Calcul de nouveaux coefficients optiques par minimisation des fonctions d'aberration $\Delta(\theta)$ et $\Delta(\phi)$



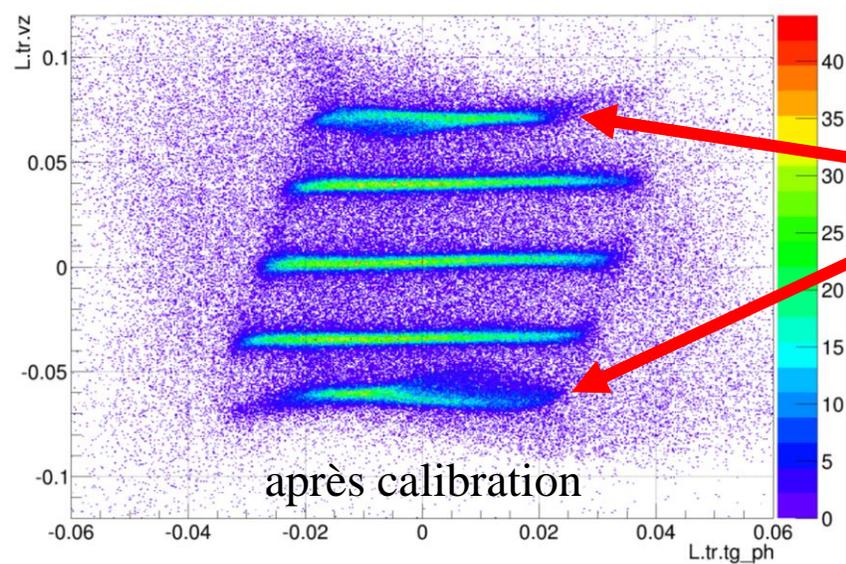
Étape 3 : calibration de la reconstruction de l'impulsion

- Utilisation d'une cible d'hydrogène liquide, diffusion élastique $ep \rightarrow e'p'$
 - Système contraint : angle de diffusion connu = impulsion connue
 - “Delta Scan”
 - Angle du spectromètre fixé
 - 5 runs en variant l'impulsion centrale du spectromètre (impulsion centrale, $\pm 2\%$, $\pm 4\%$)
 - Corrélation impulsion-angle de diffusion élastique \rightarrow chaque valeur d'impulsion est corrélée à une zone spécifique du plan focal
- \rightarrow Valeurs attendue pour l'impulsion δ_{tg} , corrélées à des zones précises du plan focal
- \rightarrow Calcul de nouveaux coefficients optiques par minimisation de la fonction d'aberration $\Delta(\delta)$

Premiers résultats de la calibration optique

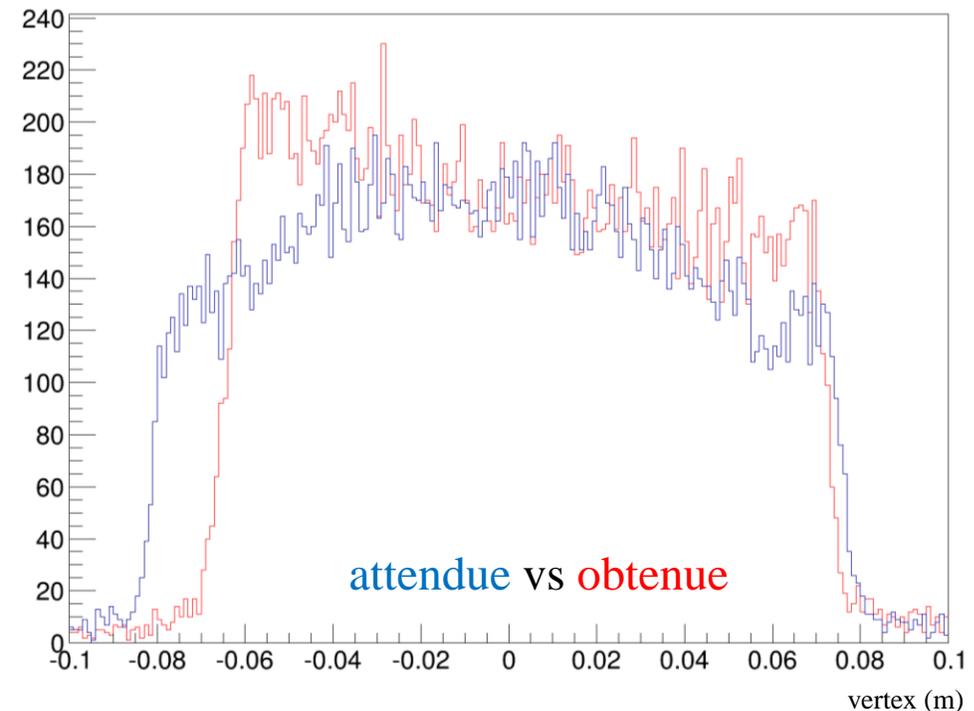


Correction optique imparfaite

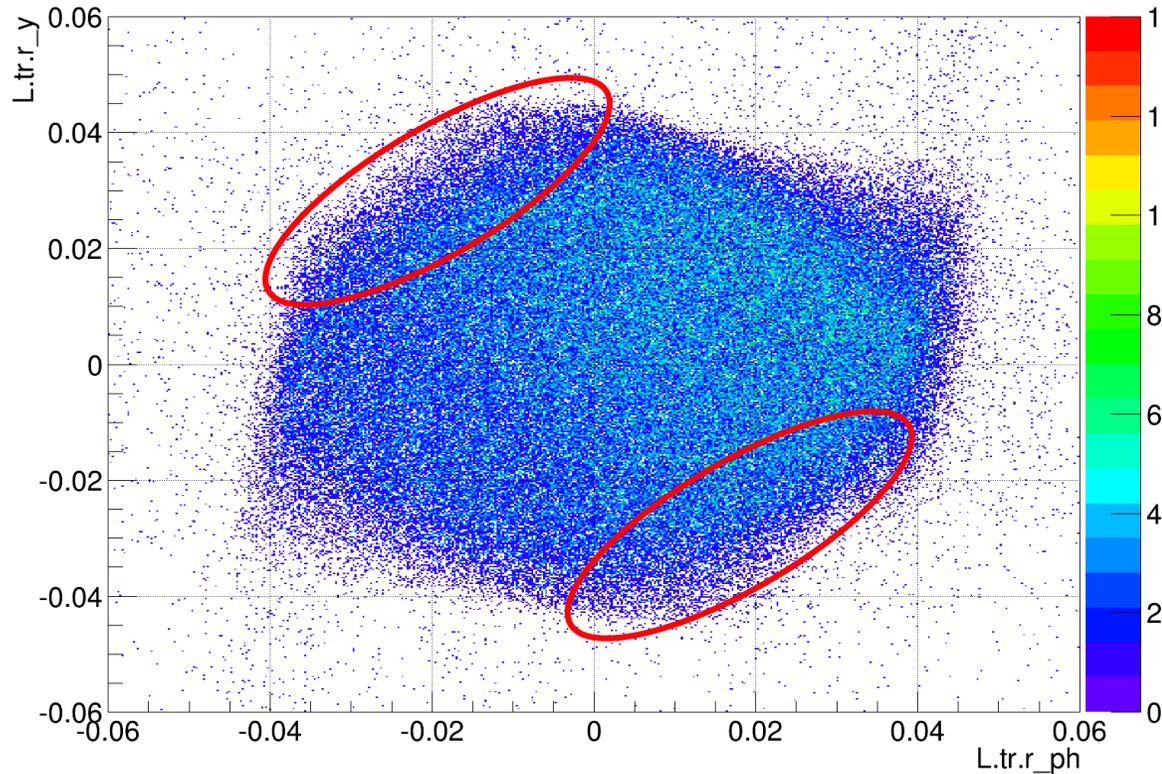


- Problème résiduel avec la reconstruction du vertex sur les bords de la cible.

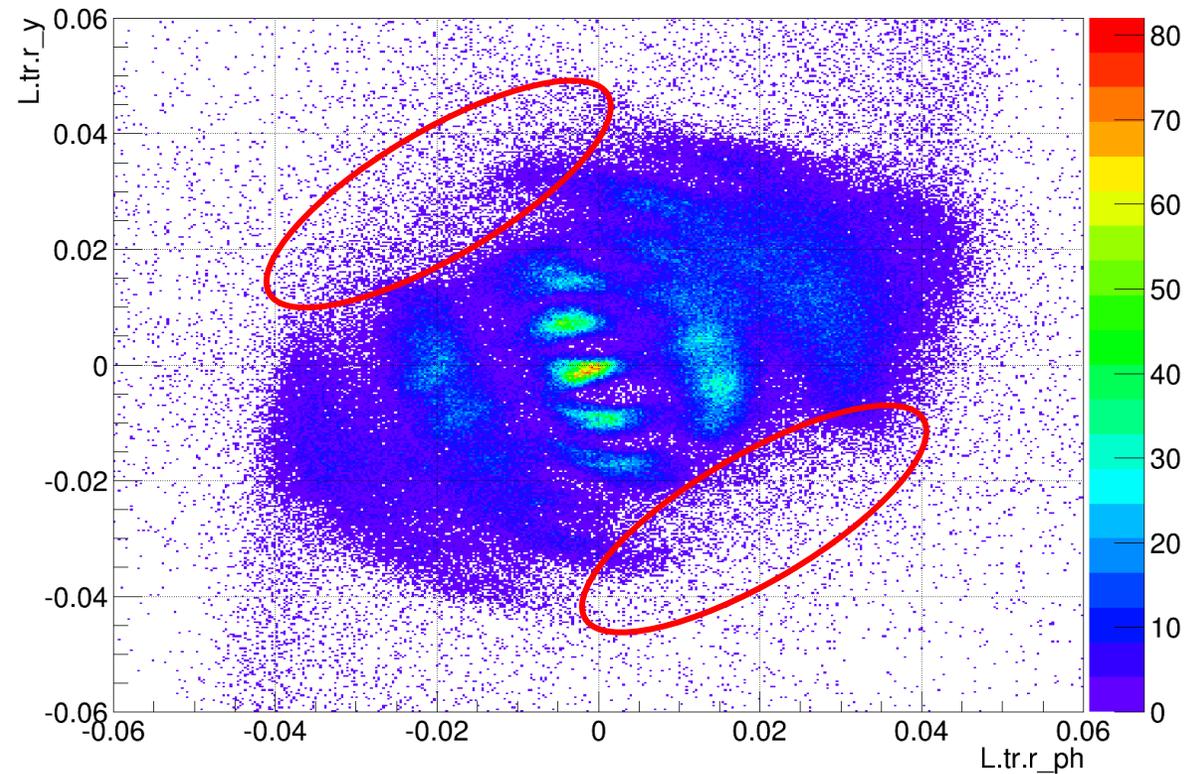
- Longueur reconstruite de la cible trop courte ($\sim 13-14\text{cm}$ au lieu de 15 cm).
- Déformation de la distribution du vertex (écrasement sur les bords).



Calibration optique – illumination du plan focal



Run de production – angle du HRS : 37,1 deg



Run de calibration – angle du HRS : 16,6 deg

- Runs de calibration optique pris à petit angle → des régions du plan focal n'ont pas été illuminées
 - Mauvaise calibration des régions non illuminées
 - Mauvaise reconstruction du vertex sur les bords de la cible lorsque le spectromètre est à grand angle

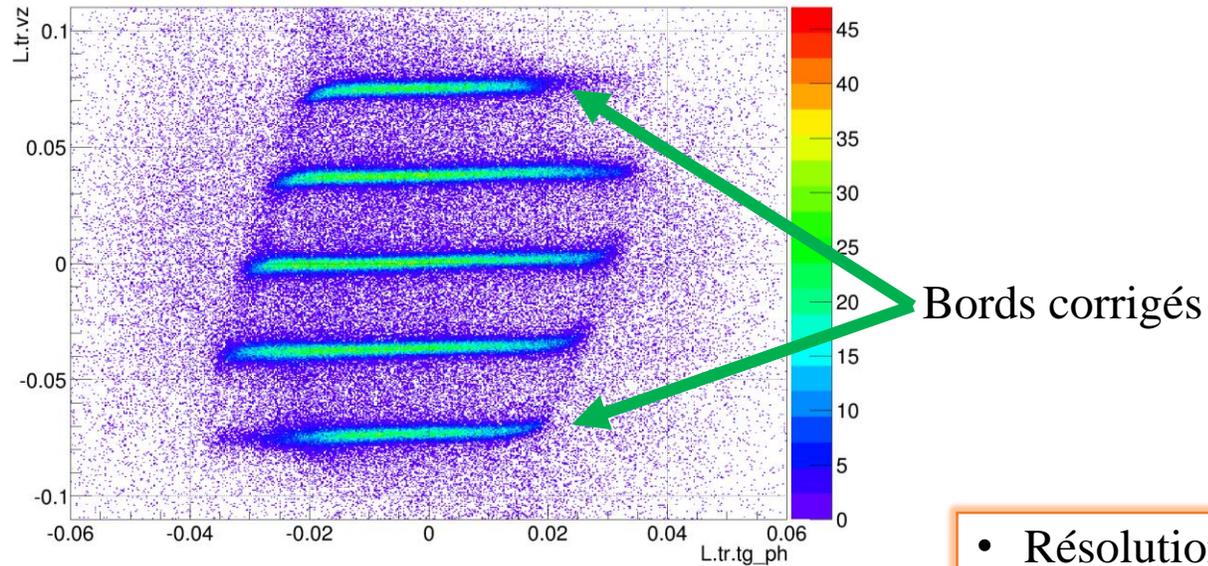
Retour sur la matrice optique

Expression polynomial d'ordre ~~X~~2 :

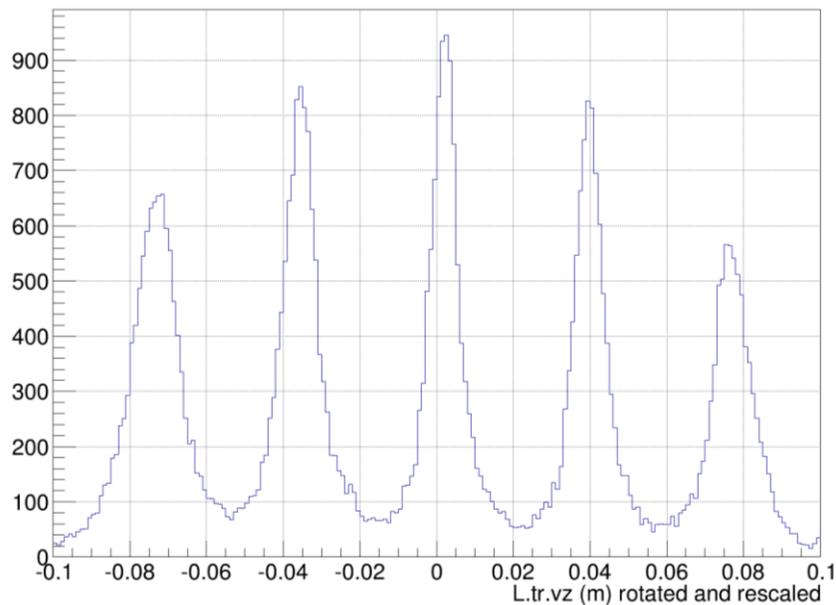
$$y_{tg} = \sum_{j,k,l} \sum_{i=1}^m C_i^{Y_{jkl}} x_{fp}^i \theta_{fp}^j y_{fp}^k \phi_{fp}^l \quad \text{Avec } i + j + k + l \leq \del{X}2$$

- Polynôme d'ordre élevé : très bon fit des zones calibrées, mais rapide déviation pour les zones non calibrées
 - Polynôme d'ordre inférieur : Moins bon fit des zones calibrés, mais déviation plus faible pour les zones non calibrées.
- Gain : meilleur reconstruction du vertex sur les bords de la cible
- Prix à payer : dégradation de la résolution sur le vertex (simulation : facteur ~2)

Calibration optique – résultats finaux



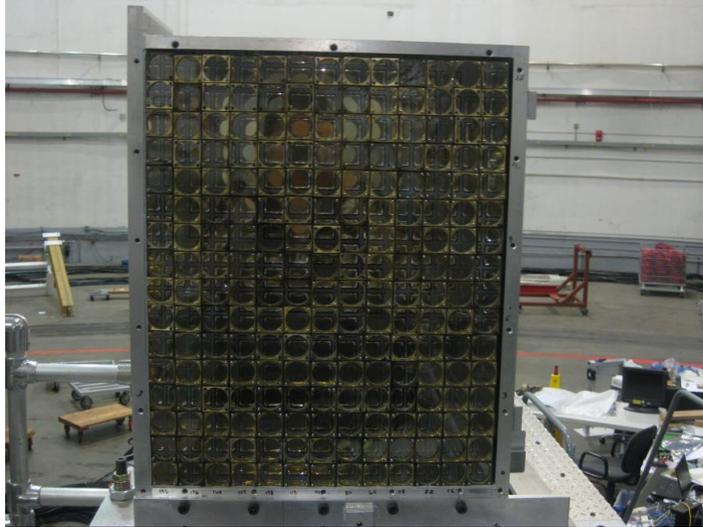
- Résolution sur le vertex : $\sigma = 3.5$ mm, avec le spectromètre à 15.18 deg
- Résolution relative en impulsion : $\sigma_{dp/p} = 10^{-3}$



Reconstruction du vertex complètement corrigé
Perte de résolution < facteur 2

Calibration π^0 du calorimètre

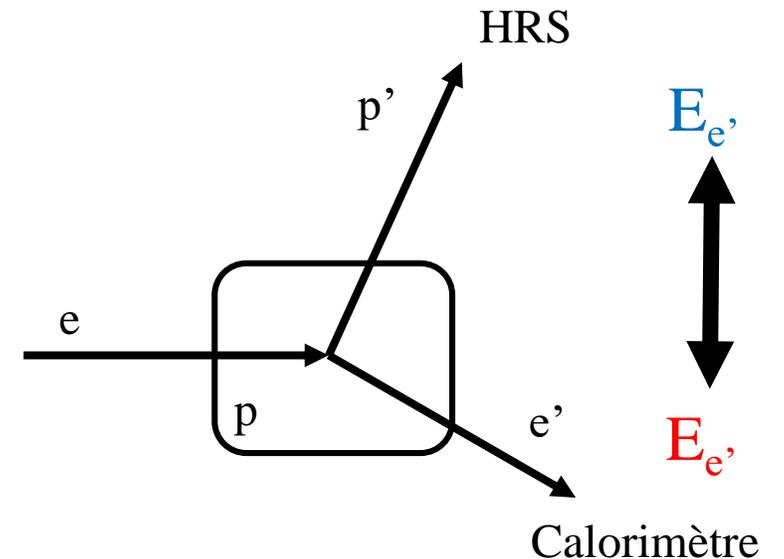
Calibration élastique du calorimètre



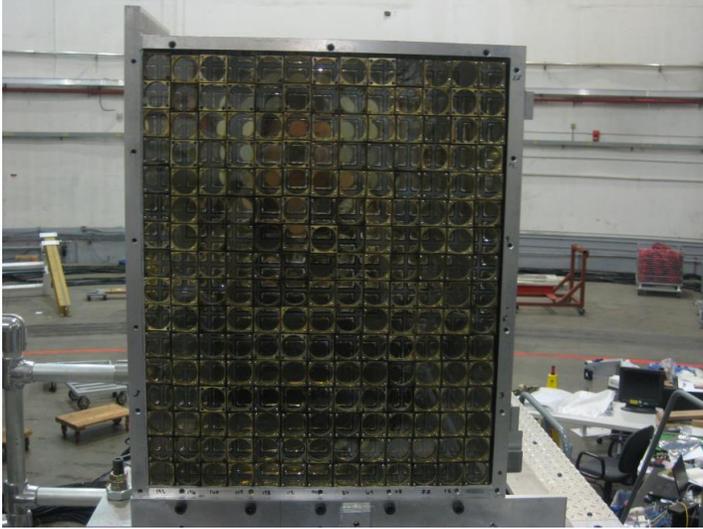
- 208 cristaux de PbF_2 + Photomultiplicateurs
- Mesure l'énergie déposée par les photons dans chaque cristal

Calibration élastique du calorimètre :

- Diffusion élastique : $ep \rightarrow e'p'$
- p' dans le spectromètre \rightarrow énergie de l'électron $E_{e'}$
- e' dans le calorimètre \rightarrow énergie de l'électron E_e
- Ajuste le gain de chaque bloc pour que $E_{e'} = E_e$
- Résolution en énergie : 3.6% à 4.2 GeV



Calibration π^0 du calorimètre



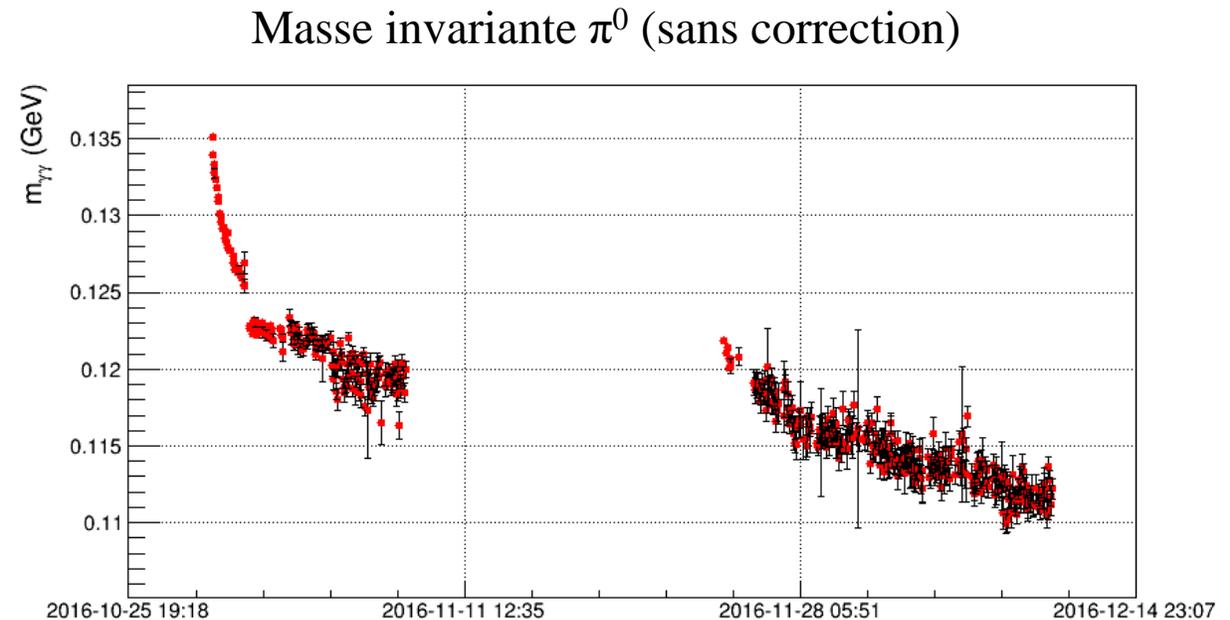
- Dégâts dus aux radiations : les cristaux de PbF_2 s'assombrissent
 - Diminution du gain
 - Besoin de calculer des coefficients de correction
 - Calibration π^0 , basée sur la reconstruction de la masse des π^0

- $\pi^0 \rightarrow \gamma_1 + \gamma_2$
- $m^2_{\pi} = 2E_{\gamma_1}E_{\gamma_2}(1 - \cos\theta_{\gamma_1\gamma_2})$

Calibration π^0 du calorimètre

Pourquoi ne pas faire d'avantages de calibrations élastiques ?

- Calibration élastique :
 - Longue (~ 1 jour).
 - Nécessite une modification du dispositif expérimental.
 - Pas de données DVCS pendant cette calibration.
- La calibration π^0 utilisent des π^0 détectés pendant l'acquisition des données DVCS.
 - Peut-être effectuée régulièrement, et après la prise des données.
 - Pas de perte de temps de faisceau.



Calibration π^0 du calorimètre

- Coefficients de correction \rightarrow optimise valeur moyenne & résolution de la masse invariante π^0 .

- Minimisation :

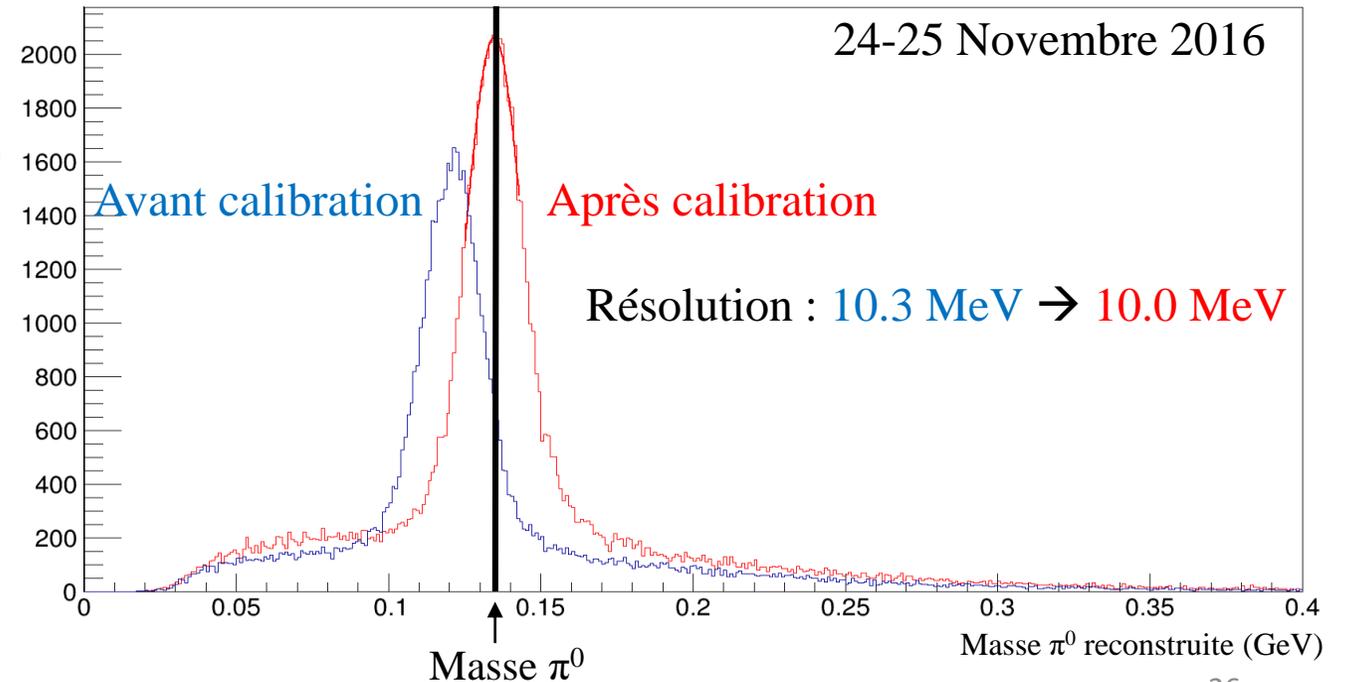
$$F = \sum_{i=1}^N (m_i^2 - m_{\pi^0}^2)^2 + \lambda \sum_{i=1}^N (m_i^2 - m_{\pi^0}^2)$$

Photon 1 Photon 2

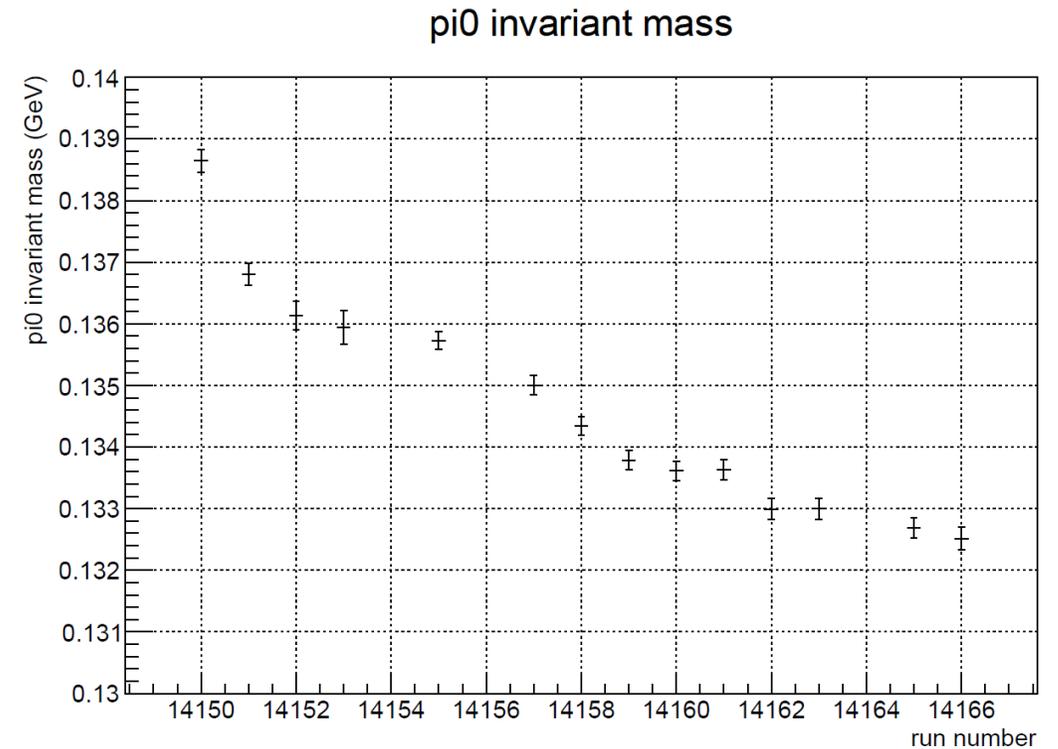
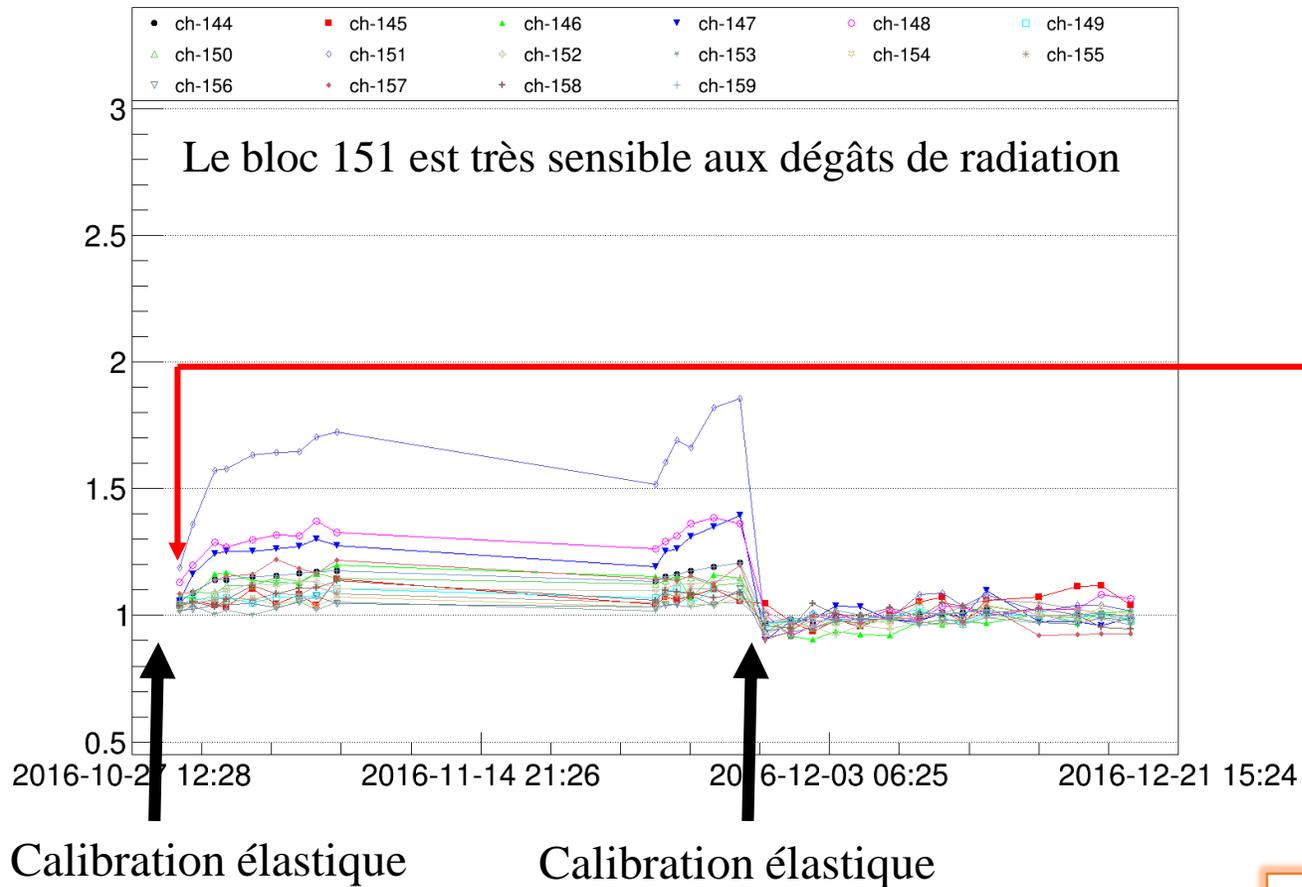
$$m_i^2 = 2 \left(\sum_{i=0}^{N_1} \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Coefficients de correction}}}{c_i} E_i \right) \left(\sum_{j=0}^{N_2} \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Coefficients de correction}}}{c_j} E_j \right) (1 - \cos \theta_{12})$$

$$\left. \frac{\partial F}{\partial C_k} \right|_{\forall k \in [0;208]} = 0$$

Système linéaire : 208
équations à 208 variables



Calibration π^0 du calorimètre

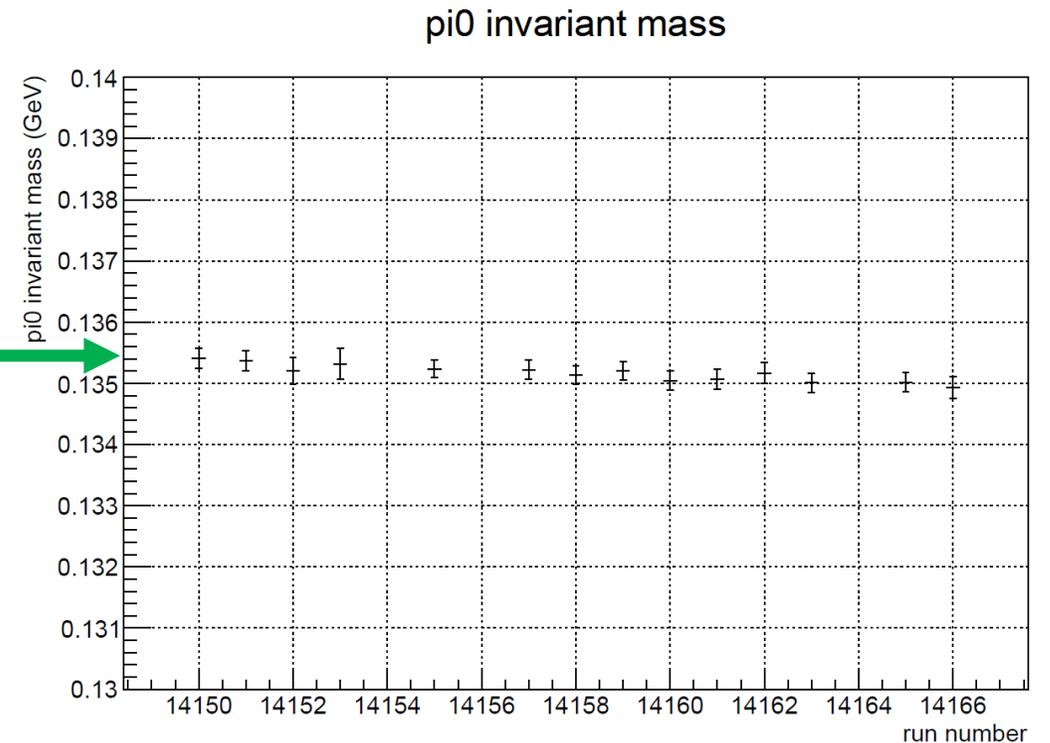
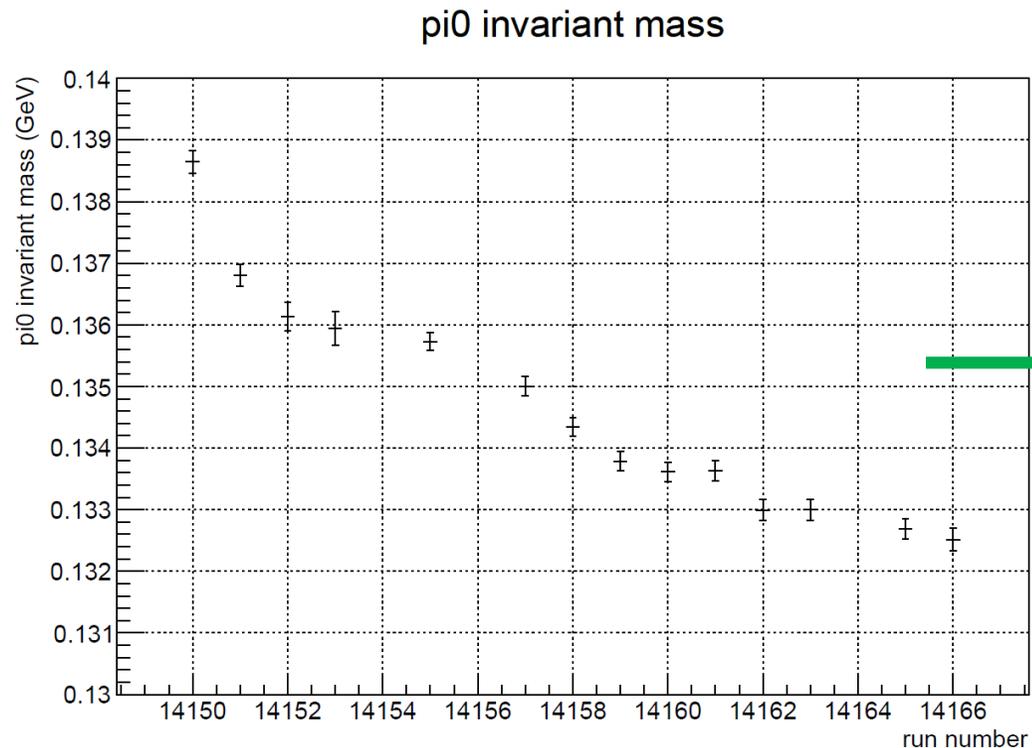


- Perte de gain : $\sim 30\%$ à la fin de l'expérience

- Perte de gain du calorimètre parfois trop rapide pour être complètement corrigée par la calibration π^0

Calibration π^0 du calorimètre

- Approximation : perte de gain similaire pour tous les blocs
 - Variation de la masse invariante π^0 proportionnelle à la variation des coefficients de calibration
 - Correction empirique des coefficients de calibration π^0 run par run



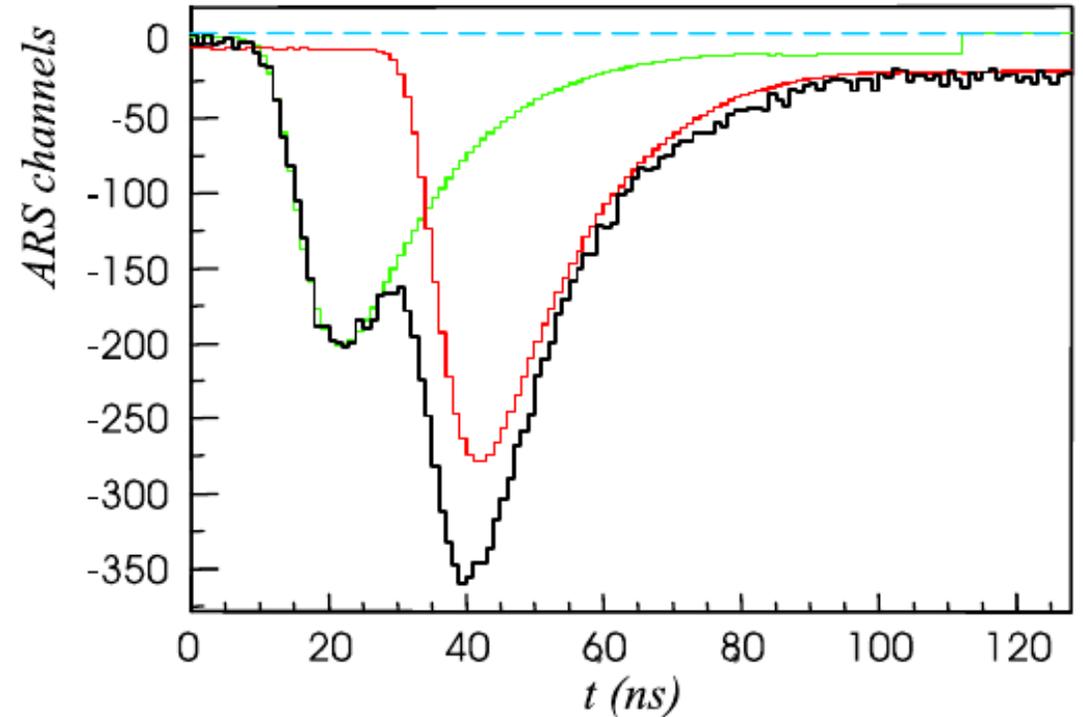
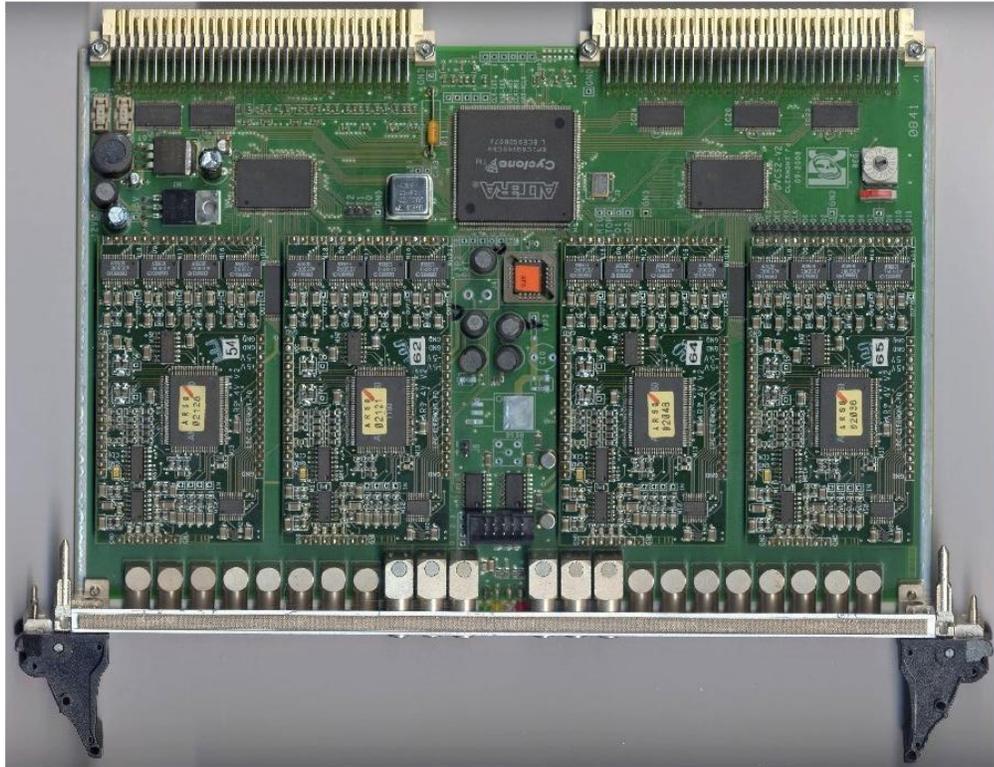
Résumé et perspectives

- Fin de l'acquisition des données à l'automne 2016 avec une statistique satisfaisante.
- Analyse des données en cours
 - Calibrations terminées
 - Nombreuses corrections/études préliminaires (non présentées) terminées
 - Prochaines étapes : soustraction de la contamination π^0 (en cours), calcul de l'acceptance du spectromètre (simulation Monte-Carlo), extraction des sections efficaces DVCS, évaluer les incertitudes systématiques.
 - **Sections efficaces DVCS préliminaires ~mai 2018**



Backup

DAQ du calorimètre



- Jlab : Luminosité très importante → Challenge : **Pile-up**.
- **Analog Ring Sampler** : Numériseurs électroniques à 1GHz, échantillons de 128 ns.
→ Permet une identification précise des photons DVCS et la **séparation des pile-up**.
→ Challenge : Création d'une très grande quantité de données, **besoin d'un trigger 'intelligent'**.

Trigger

- **Niveau 1 – Trigger sur l'électron dans le Spectromètre :**
 - Coïncidence : Scintillateur + détecteur Cherenkov gazeux
- Si niveau 1 déclenché → **Niveau 2 – Coïncidence avec le Calorimeter :**
 - 'Gel' des cartes ARS du calorimètre
 - Recherche d'un évènement dans le calorimètre
 - Seuil en énergie
- Si niveau 2 déclenché → évènement enregistré (**encodage des ARS lent → dead time**)
- Si niveau 2 NON déclenché → évènement NON enregistré (**pas d'encodage des ARS → rapide**)
- Puis, 'dégel' des cartes ARS et reprise de l'acquisition

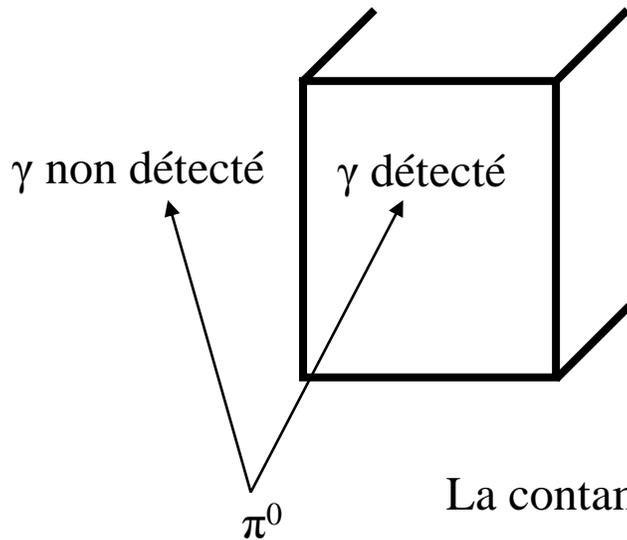
Soustraction de la contamination π^0

(travail en cours)

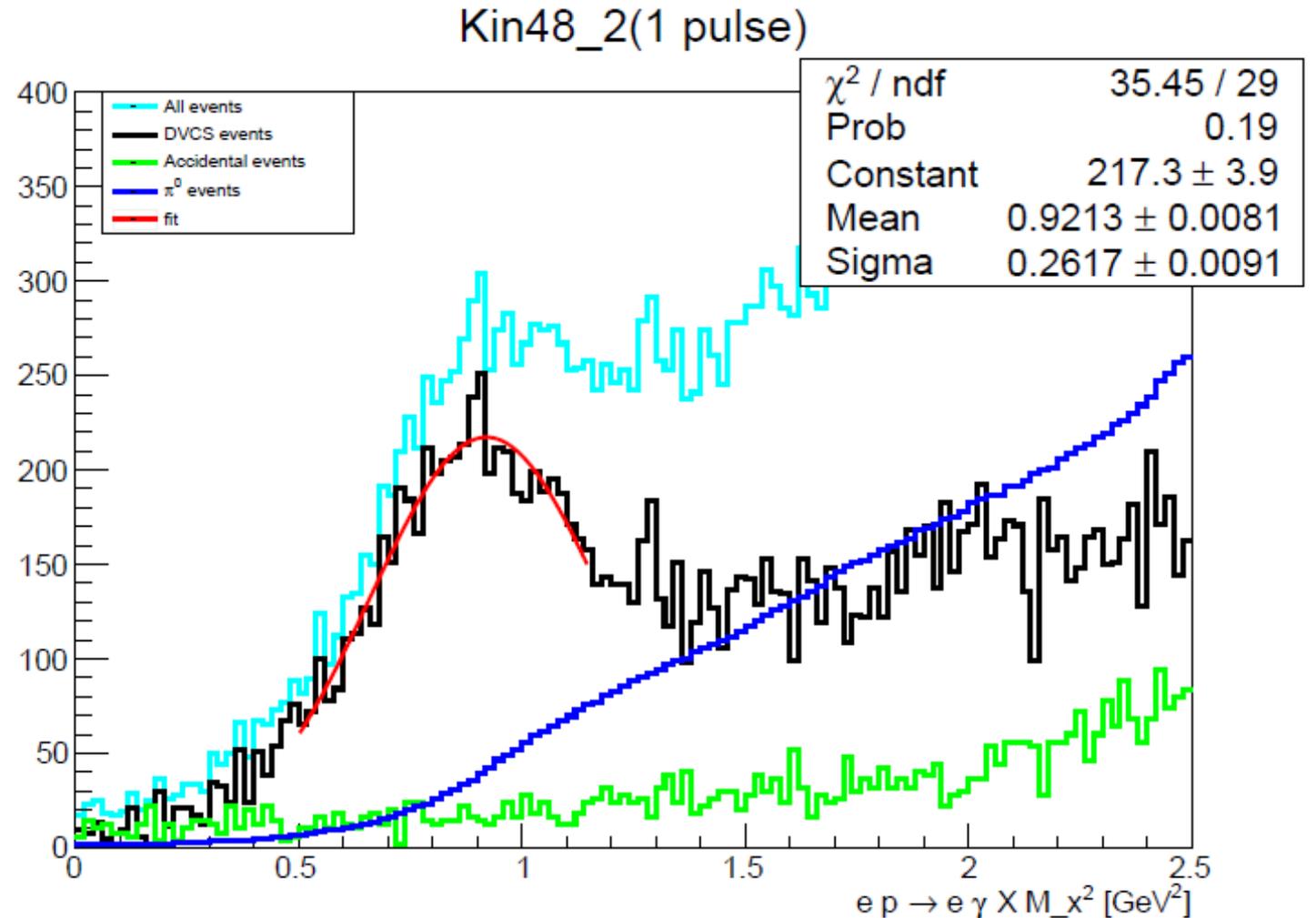
Rappel

Masse manquante : $ep \rightarrow e'\gamma X$

$$M_X^2 = (e + p - e' - \gamma)^2$$



La contamination π^0 'ressemble' à un γ DVCS

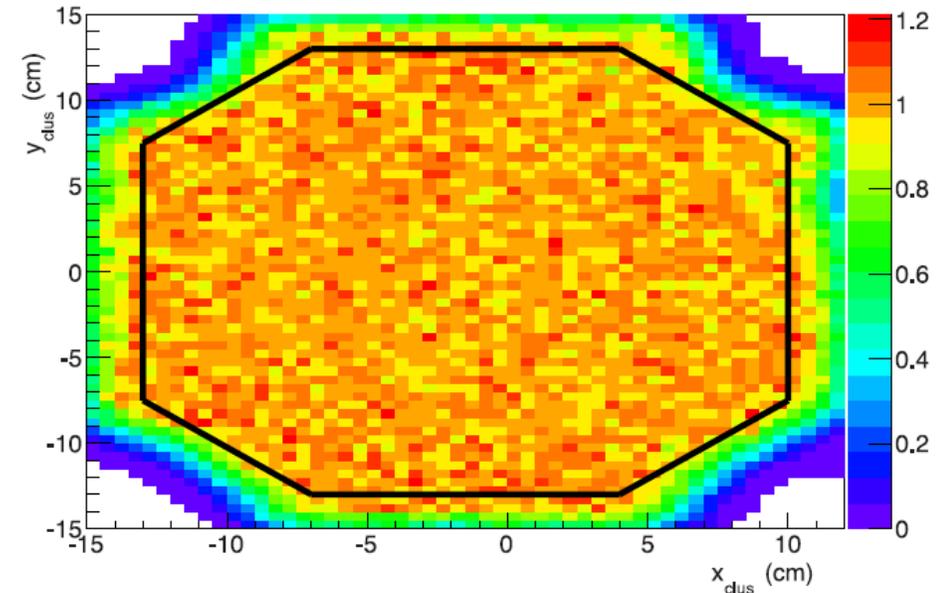
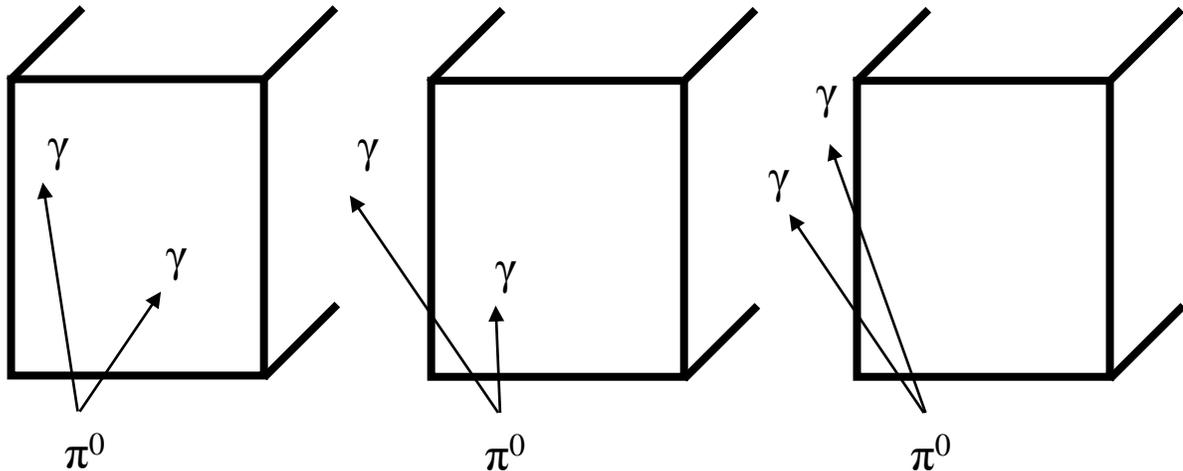


Soustraction de la contamination π^0

Principe :

- Identification des évènements $e p \rightarrow e' p \pi^0$
- Pour chaque π^0 détecté : simulation de 5000 désintégrations $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ (direction et énergie des γ aléatoires)
- Evaluation de la proportion d'évènements simulés où un seul γ est détecté

→ Contamination π^0



- D'après des travaux précédents, cette méthode possède une faible efficacité dans les coins du calorimètre.

→ Coupures géométriques (à déterminer) nécessaires pour assurer une soustraction π^0 efficace.