

# Polarisation des quarks et des gluons dans le nucléon à COMPASS

Vincent Andrieux

CEA-Saclay Irfu/SPhN

2 Juillet 2013



## 1 Introduction

- Motivations
- Diffusion profondément inélastique

## 2 Technique expérimentale

- Spectromètre COMPASS
- Double asymétrie de spin
- Cible polarisée

## 3 Résultats

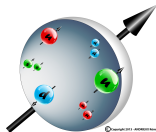
- Erreurs systématiques
- Asymétrie & fonction de structure en spin

## 4 Futur

- Analyse
- Travail expérimental

## 5 Conclusions

# D'où vient le spin du nucléon ?

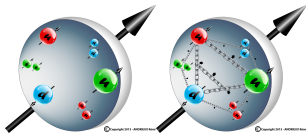


## Différentes contributions

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} (\underbrace{\Delta u + \Delta d + \Delta s}_{\text{Spin des quarks}})$$

Spin des quarks  
 $\Delta \Sigma \sim 0.33$

# D'où vient le spin du nucléon ?



## Différentes contributions

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} (\Delta u + \Delta d + \Delta s) + \Delta G$$

Spin des quarks

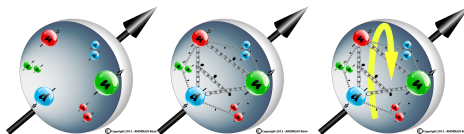
$$\Delta \Sigma \sim 0.33$$

Spin des gluons

$$|\Delta G| < 0.3$$



# D'où vient le spin du nucléon ?



## Différentes contributions

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} (\Delta u + \Delta d + \Delta s) + \Delta G + L_g + L_q$$

Spin des quarks  
 $\Delta \Sigma \sim 0.33$

Spin des gluons  
 $|\Delta G| < 0.3$

Moments orbitaux  
 $L_{q+g} = ??$

- Sensibilité à la distribution de partons  $\rightarrow$  processus DIS
- Sensibilité à la polarisation  $\rightarrow$  faisceau et cible polarisés

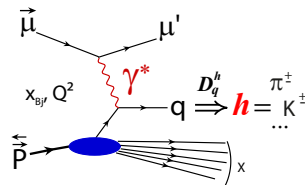
# Diffusion profondément inélastique polarisée

## Définitions

$Q^2$	virtualité du photon
$x_{Bj}$	fraction d'impulsion du quark

$D_q^h$  : Fonction de fragmentation du quark  $q$  en hadron  $h$

$q = u, d, s \Rightarrow D_q^h \Rightarrow h = \pi^\pm, K^\pm$



## Section efficace DIS

$$\frac{d^2 \sigma}{dx_{Bj} dQ^2} = \underbrace{c_1 F_1(x_{Bj}, Q^2) + c_2 F_2(x_{Bj}, Q^2)}_{\text{fonctions de structure non-polarisées}} + \underbrace{c_3^{s,S} g_1(x_{Bj}, Q^2) + c_4^{s,S} g_2(x_{Bj}, Q^2)}_{\text{fonctions de structure polarisées}}$$

## Modèle des partons QCD 1er ordre

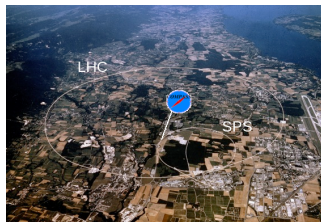
$$F_1(x_{Bj}, Q^2) = \frac{1}{2} \sum_q e_q^2 q(x_{Bj})$$

$$F_2(x_{Bj}, Q^2) = x_{Bj} \sum_q e_q^2 q(x_{Bj})$$

$$g_1(x_{Bj}, Q^2) = \frac{1}{2} \sum_q e_q^2 \Delta q(x_{Bj})$$

$$g_2(x_{Bj}, Q^2) = 0$$

# Spectromètre COMPASS

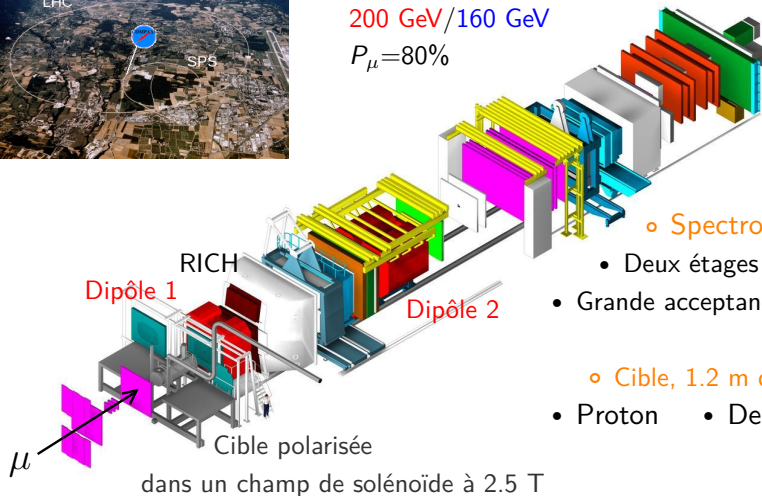


◦ Faisceau polarisé de  $\mu^+$  du SPS

$1 \cdot 10^8 / 2 \cdot 10^8 \mu$  par déversement de  $\sim 10$  s

200 GeV / 160 GeV

$P_\mu = 80\%$



◦ Spectromètre :

- Deux étages sur 60 m
- Grande acceptance 180 mrad

◦ Cible, 1.2 m de long :

- Proton
- Deuton

dans un champ de solénoïde à 2.5 T

# Extraction de $g_1$ à partir de la double asymétrie de spin

## Faisceau et cible polarisés longitudinalement

### Asymétrie photon virtuel-nucléon

$$A_1 \simeq \frac{1}{D} \frac{d\sigma^{\leftrightarrow} - d\sigma^{\rightarrow\rightarrow}}{d\sigma^{\leftrightarrow} + d\sigma^{\rightarrow\rightarrow}}$$

D : facteur de dépolarisation  
Transfert de polarisation du  
faisceau au photon virtuel

### Fonction de structure du spin

$$A_1 \simeq \frac{g_1}{F_1}$$

$F_1$  : fonction de structure  
non-polarisée  
Très bien connue

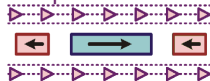
$$\Rightarrow g_1 \simeq F_1 \cdot A_1$$

# Cible polarisée

$$\frac{d\sigma^{\rightarrow\rightarrow} - d\sigma^{\rightarrow\leftarrow}}{d\sigma^{\rightarrow\rightarrow} + d\sigma^{\rightarrow\leftarrow}} = \frac{1}{|P_B P_T| f} \left( \frac{N^{\rightarrow\rightarrow} - N^{\rightarrow\leftarrow}}{N^{\rightarrow\rightarrow} + N^{\rightarrow\leftarrow}} \right)$$

Mesure simultanée des deux états de spin dans une cible à cellules avec polarisations opposées

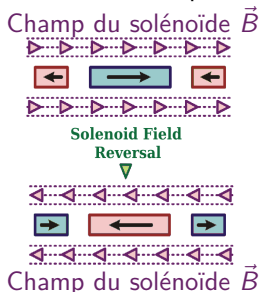
Champ du solénoïde  $\vec{B}$



# Cible polarisée

$$\frac{d\sigma^{\rightarrow\rightarrow} - d\sigma^{\rightarrow\leftarrow}}{d\sigma^{\rightarrow\rightarrow} + d\sigma^{\rightarrow\leftarrow}} = \frac{1}{|P_B P_T| f} \left( \frac{N^{\rightarrow\rightarrow} - N^{\rightarrow\leftarrow}}{N^{\rightarrow\rightarrow} + N^{\rightarrow\leftarrow}} \right)$$

Mesure simultanée des deux états de spin dans une cible à cellules avec polarisations opposées

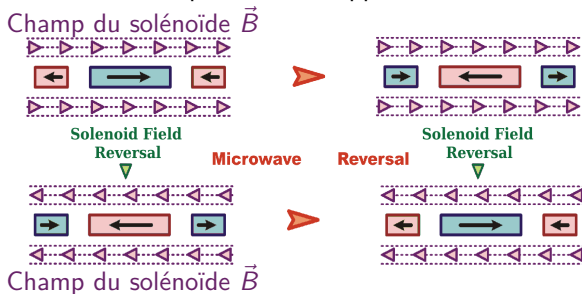


Rotation du champ du solénoïde  $\Rightarrow$  suppression des différences d'acceptance

# Cible polarisée

$$\frac{d\sigma^{\rightarrow\rightarrow} - d\sigma^{\rightarrow\leftarrow}}{d\sigma^{\rightarrow\rightarrow} + d\sigma^{\rightarrow\leftarrow}} = \frac{1}{|P_B P_T| f} \left( \frac{N^{\rightarrow\rightarrow} - N^{\rightarrow\leftarrow}}{N^{\rightarrow\rightarrow} + N^{\rightarrow\leftarrow}} \right)$$

Mesure simultanée des deux états de spin dans une cible à cellules avec polarisations opposées



Rotation du champ du solénoïde  $\Rightarrow$  suppression des différences d'acceptance

Changement des fréquences micro-onde  $\Rightarrow$  suppression de la corrélation champ/acceptance

# Sources d'erreurs systématiques

Deux sortes de contributions :  $\left\{ \begin{array}{l} - \text{ Multiplicatives} \\ - \text{ Additives} \end{array} \right.$

$$A_1^{1\gamma} = \frac{1}{fDP_B P_T} A^{raw} - \left( A_1^{RC} + A_2 + A_{fausses} \right)$$

Variables  Multiplicatives  $\Delta A_1^{mult}$	Polarisation du faisceau	$dP_F / P_F$	5%
	Polarisation de la cible	$dP_C / P_C$	5%
	Facteur de dépolarisation	$dD / D$	2 – 3 %
	Facteur de dilution	$df / f$	2 %
	Total		$\Delta A_1^{mult} \simeq 0.08 A_1$
Variables	Asymétrie transverse	$\Delta A_2$	$10^{-3} - 10^{-2}$
Additives  $\Delta A_1^{add}$	Corrections radiatives	$\Delta A_1^{RC}$	$0.1 \cdot \text{Max}( A_{1, incl}^{RC} ,  A_{1, hadr}^{RC} ) = 10^{-5} - 10^{-3}$
	Fausse asymétries	$\Delta A_{fausses}$	$< 0.3 : 0.8 \cdot \Delta A_1^{stat}$ (Dominant)



# Estimation d'asymétries non-physiques

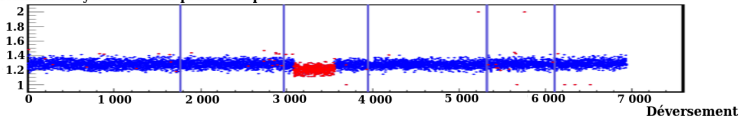
- Mauvaise combinaison d'états de spin :  
Asymétrie de l'appareillage ✓
- Droite-gauche & Haut-bas :  
Anisotropie d'efficacité ✓
- Amont-aval & centrale-centrale :  
Inhomogénéité de la polarisation et effet d'acceptance ✓
- Jour-nuit :  
Dilatation de l'appareillage et bruit électronique ✓
- Tranche de la cible :  
Remplissage de la cible ✓
- Variation dans le temps (5 mois) :  
Echantillonnage et vérification de dispersion statistique ✗

**Erreurs systématiques de 0.007 à 0.09 = fraction de l'erreur statistique**

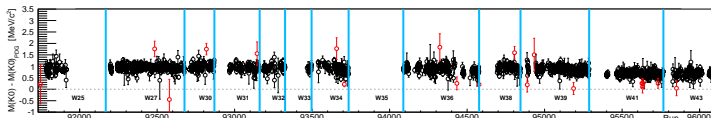
# Réduction de l'impact de l'appareillage

- Stabilité déversement/déversement du faisceau :  $\sim 120\,000$  déversements
  - 416 plans de détection (efficacité)
  - $\sim 50$  distributions de variables de reconstructions

Nombre moyen de vertex primaires par événements

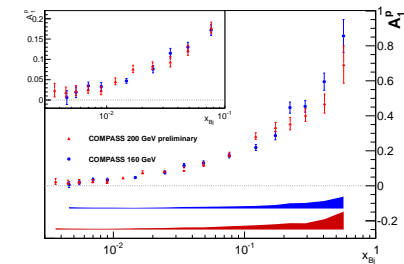


- Stabilité *run/run* :  $\sim 4000$  runs
  - Mesure de la masse du  $K_s$
  - Mesure de  $\chi_{BJ}$  des événements élastiques ( $\mu e \rightarrow \mu e$ )

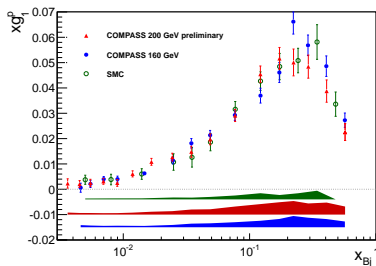


⇒ Rejet des instabilités locales & Regroupement des périodes stables

# Résultat $A_1$ & $g_1$ proton à 200 GeV



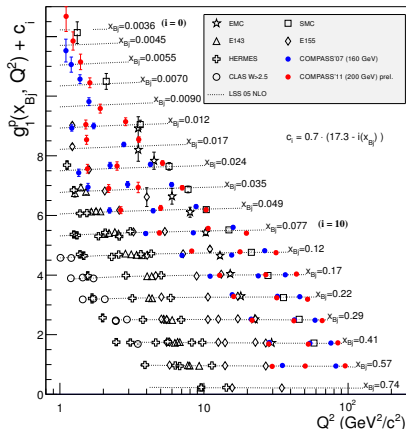
- ▲ COMPASS 200 GeV
- COMPASS 160 GeV
- SMC 190 GeV



- Erreurs statistiques (2007 et 2011) 2-3 fois plus faibles que SMC (1994 et 1996)
- Plus faible valeur de  $x_{Bj}$  atteinte
- A chaque  $x_{Bj}$  un plus grand  $Q^2$

# Mesure indirecte de $\Delta G$

Données mondiales  $g_1^p(x, Q^2)$   
en fonction de  $Q^2$  pour chaque  
valeur de  $x_{Bj}$



● COMPASS 200 GeV

● COMPASS 160 GeV

● Domaine étendu en  $(x, Q^2)$

● Grande précision

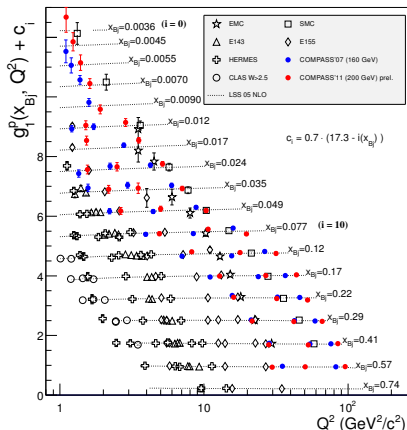
Nouvelles données pour l'analyse  
globale des données mondiales

Equations DGLAP :

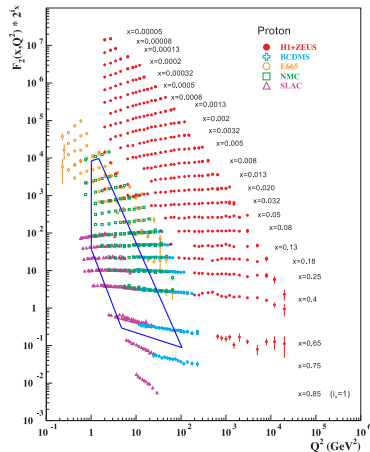
$$\frac{\partial g_1^p}{\partial \ln(Q^2)} \Rightarrow \Delta G$$

# Mesure indirecte de $\Delta G$

Données mondiales  $g_1^p(x, Q^2)$   
en fonction de  $Q^2$  pour chaque  
valeur de  $x_{Bj}$



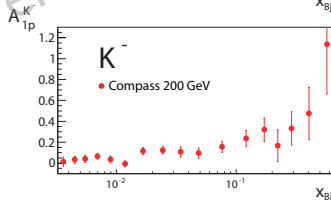
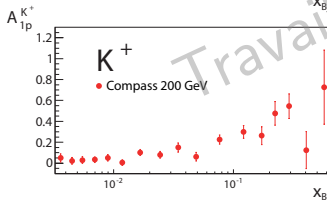
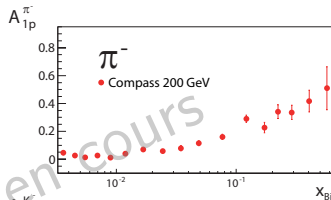
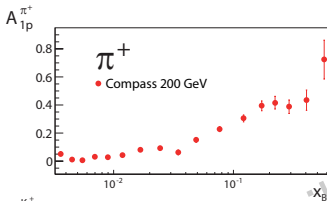
Fonction de structure  
non-polarisée :  $F_2^p(x, Q^2)$



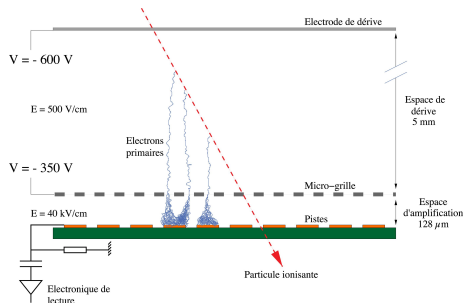
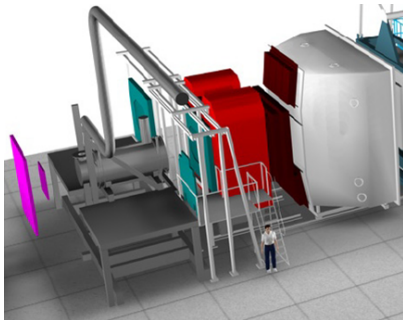
# Polarisation des quarks par saveur : $\Delta u$ , $\Delta d$ , $\Delta s$

Asymétrie semi-inclusive :  $\mu P \rightarrow \mu h X$

$$A_1^h = \frac{\sum_q e_q^2 \Delta q(x) D_q^h}{\sum_q e_q^2 q(x) D_q^h}, \text{ le hadron étiquette la saveur du quark.}$$



# Caractérisation des détecteurs Micromegas

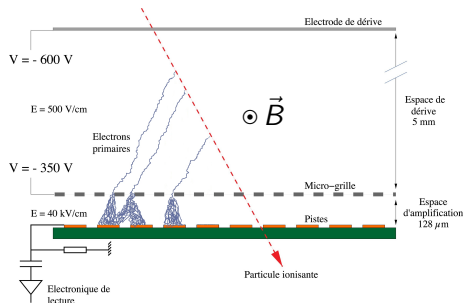
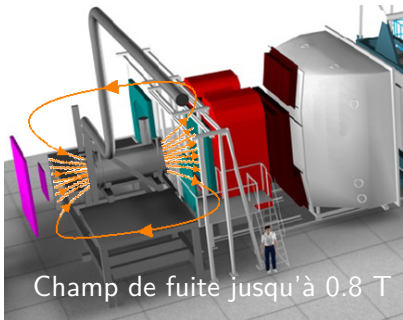


## Caractéristiques :

La région la plus difficile du trajectographe

- Très haute intensité
- En sandwich entre le solénoïde et le premier dipôle

# Caractérisation des détecteurs Micromegas



## Travail expérimental complémentaire à l'analyse

- Efficacités et résolutions des Micromegas
- Correction de l'angle de Lorentz
- Caractérisation de prototypes Micromegas Pixellisés pour le futur de COMPASS (banc cosmique)



# Conclusions

## Résultats

- Mesure de  $g_1^p$  à 200 GeV (**Publication en cours de rédaction**) :
- Grande précision aux petits  $x_{Bj}$  avec de plus grands  $Q^2$  sur un domain étendu
  - Nouvelles contraintes pour les analyses QCD globales

## Perspectives

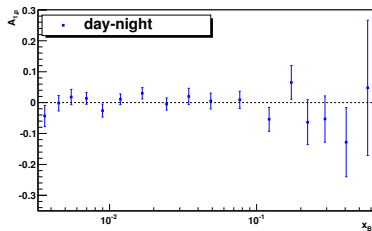
- Mesure indirecte de  $\Delta G$  via les fit globales de  $g_1$
- Extraction de  $A_{1,p}^{\pi^+}$ ,  $A_{1,p}^{\pi^-}$ ,  $A_{1,p}^{K^+}$  et  $A_{1,p}^{K^-}$
- Extraction de  $\Delta u$ ,  $\Delta d$ ,  $\Delta s$

## Détecteur : Caratérisation des Micromegas

- Données faisceau & Tests cosmiques
- Mesure et correction de l'angle de Lorentz

# Diapositives additionnelles

# Erreurs systématiques

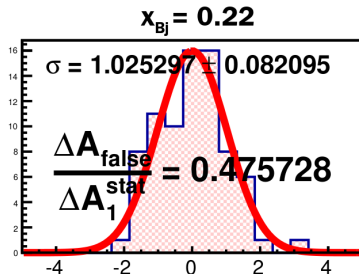


Exemple de dispersion de l'asymétrie sur l'année pour  $x_{Bj} = 0.22$   
 Elargissement de la distribution  
 → utilisé dans les erreurs systématiques

Hypothèse d'asymétrie Jour-Nuit nulle :

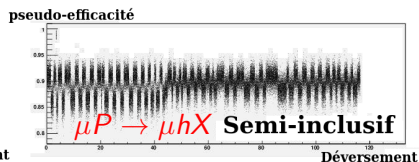
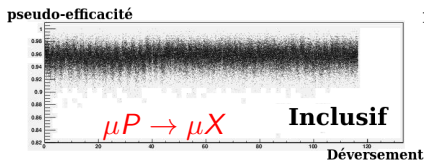
$$\chi^2/ndf = 10.9/16$$

Pas d'effet visible aux erreurs statistiques prêts



# Effet du solénoïde sur les données SIDIS : $\mu P \rightarrow \mu h X$

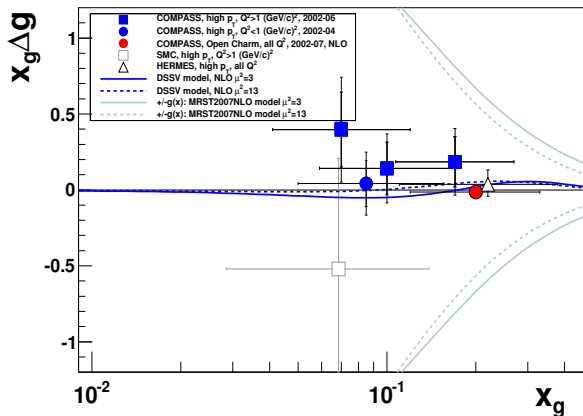
Oscillations de la distributions d'efficacité des détecteurs  
Micromegas avec les renversements de la polarisation dans le canal  
 $\mu P \rightarrow \mu h X$



Les hadrons peu énergétiques de l'état final sont fortement sensibles aux champs de fuite du solénoïde

# $\Delta G$ : Mesure directe de la polarisation des gluons

## Données mondiales



PLB 718 (2013) 922  
High  $p_T$

PRD subm. 2013  
Open charm

- 5 mesures de COMPASS
- $\Delta G \sim 0$  dans la région mesurée

## COMPASS-II : Programmes majeurs

- Drell-Yan polarisé (spin transverse et TMDs)
- Diffusion Compton virtuelle (GPDs)

## La diffusion Compton virtuelle $\mu p \rightarrow \mu p \gamma$

Mesure des distributions de partons généralisées

⇒ Tomographie du proton :

- Position transverse
- Impulsion longitudinale

⇒ Accès au moment orbital



- Détecteur du proton de recul (2012)
- Micromegas résistifs pixelisés (en cours)

Prises de données :

- run pilote 2012
- 2 années en 2016-17