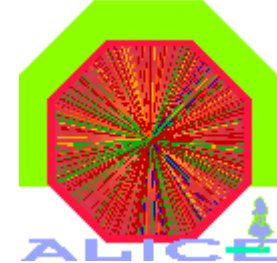


Deuxièmes rencontres QGP-France

Etretat, 17-20 septembre 2007



Physique des quarkonia avec le spectromètre à muons d'ALICE

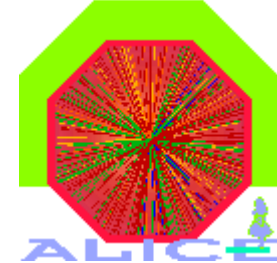


Philippe Rosnet

(ALICE Collaboration)

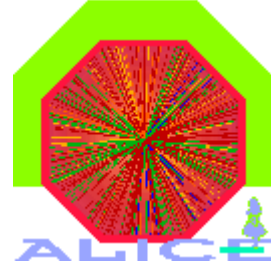
Laboratoire de Physique Corpusculaire
de Clermont-Ferrand (UBP - CNRS/IN2P3), France

Physique des quarkonia avec le spectromètre à muons d'ALICE



- **Introduction au spectromètre à muons d'ALICE**
- **Collisions p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV (fast simulation)**
- **Collisions Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV (fast simulation)**
- **Collisions p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV (full simulation)**

Intérêt des quarkonia



❑ Collisions p-p pour tester QCD :

- étude des PDFs
- modèles de formation des quarkonia

❑ Collisions p-A pour mesurer les effets nucléaires froids

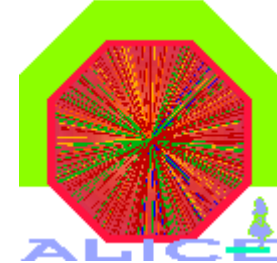
- effets de shadowing (CGC)
- absorption nucléaire normale

❑ Collisions A-A pour étudier les milieux chauds et denses

- suppression anormale par écrantage de couleur
- augmentation par hadronisation statistique

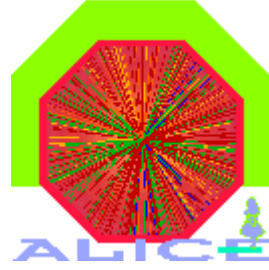
Les quarkonia considérés : J/ψ , ψ' , Υ , Υ' , $\Upsilon'' \rightarrow \mu^+\mu^-$

Physique des quarkonia avec le spectromètre à muons d'ALICE

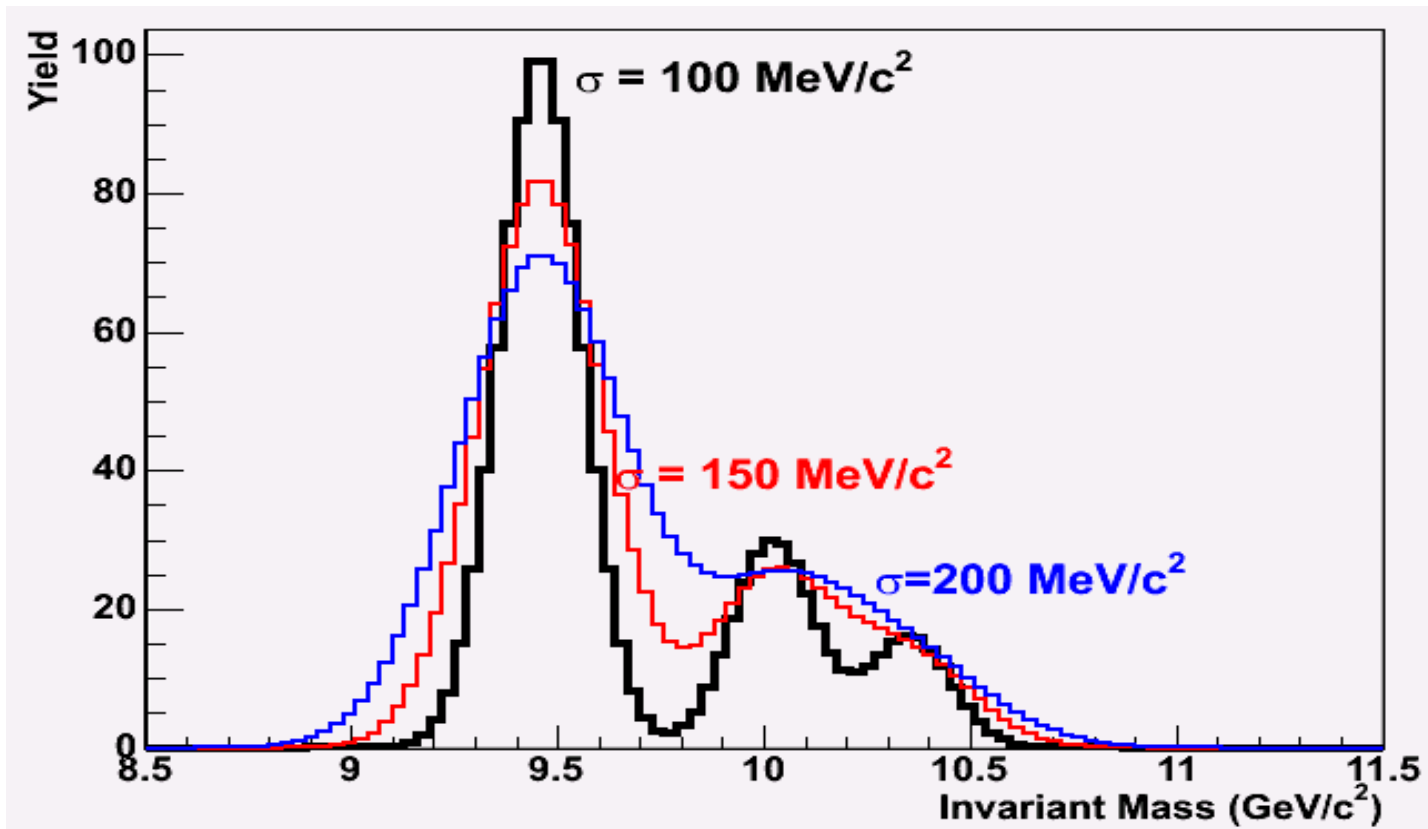


- **Introduction au spectromètre à muons d'ALICE**
- Collisions p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV (fast simulation)
- Collisions Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV (fast simulation)
- Collisions p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV (full simulation)

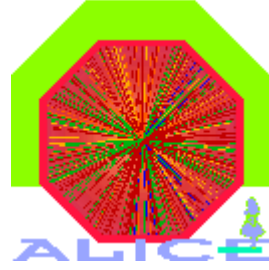
Objectif expérimental



Être capable de séparer les différents états de la famille du Υ

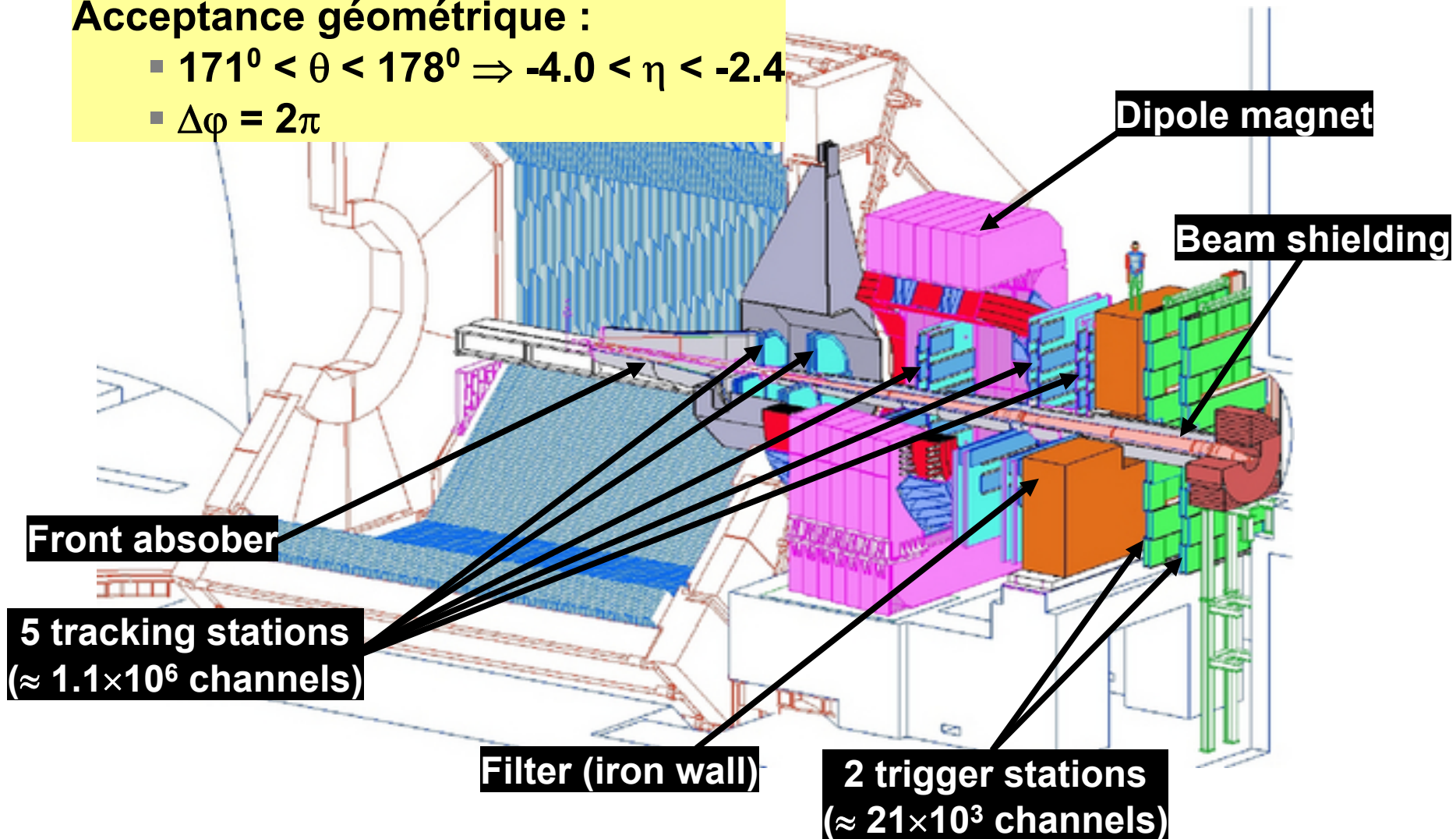


Le spectromètre à muons de l'expérience ALICE

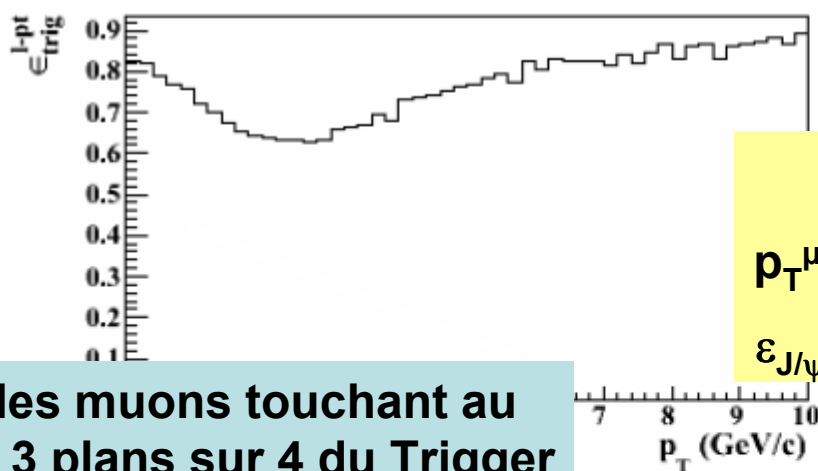
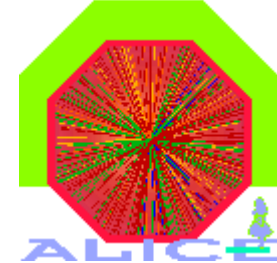


Acceptance géométrique :

- $171^\circ < \theta < 178^\circ \Rightarrow -4.0 < \eta < -2.4$
- $\Delta\phi = 2\pi$



Performances du spectromètre à muons : Trigger

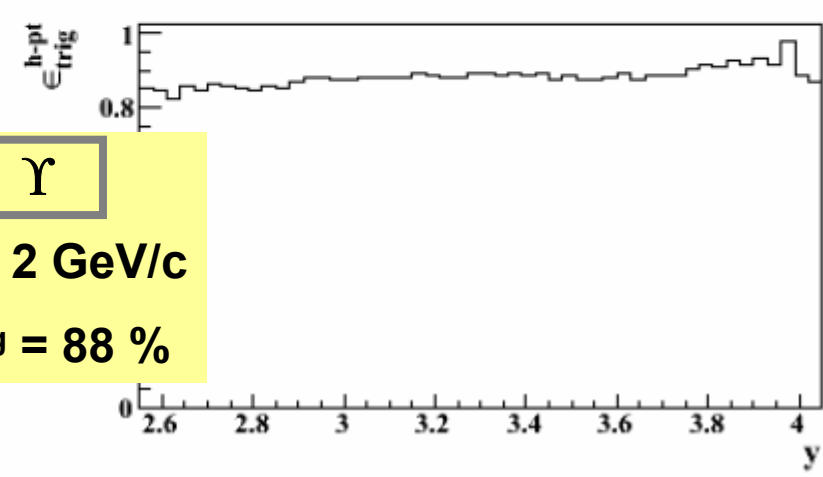
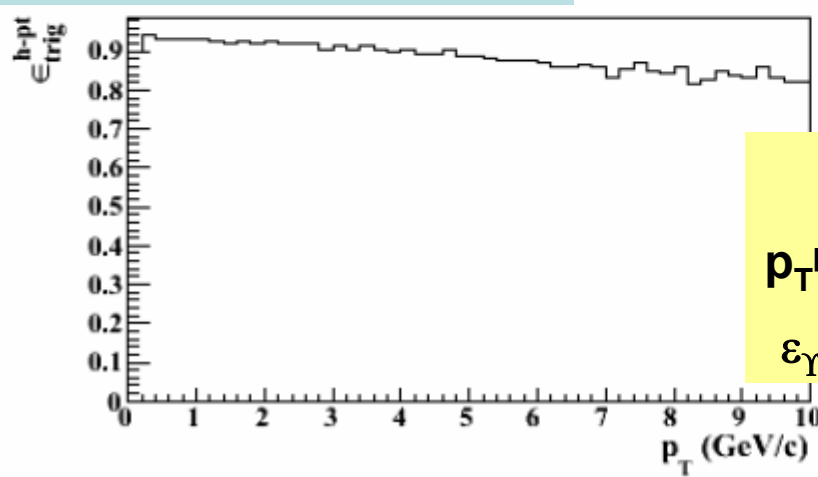
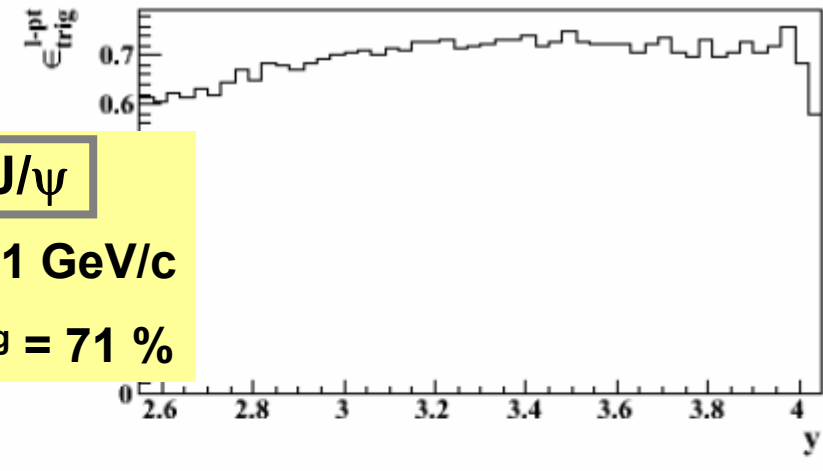


J/ψ

$p_T^\mu > 1$ GeV/c
 $\epsilon_{J/\psi}^{\text{Trig}} = 71\%$

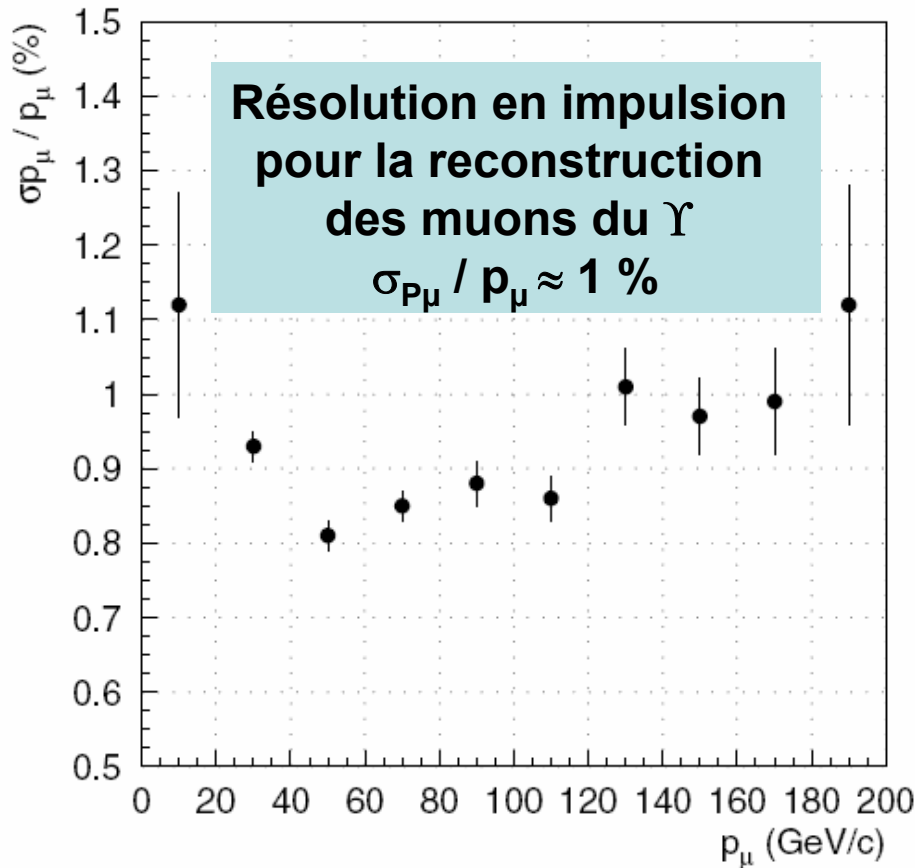
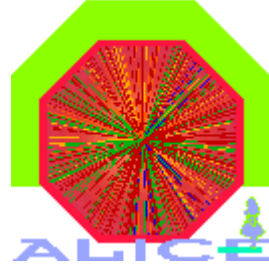
γ

$p_T^\mu > 2$ GeV/c
 $\epsilon_\gamma^{\text{Trig}} = 88\%$

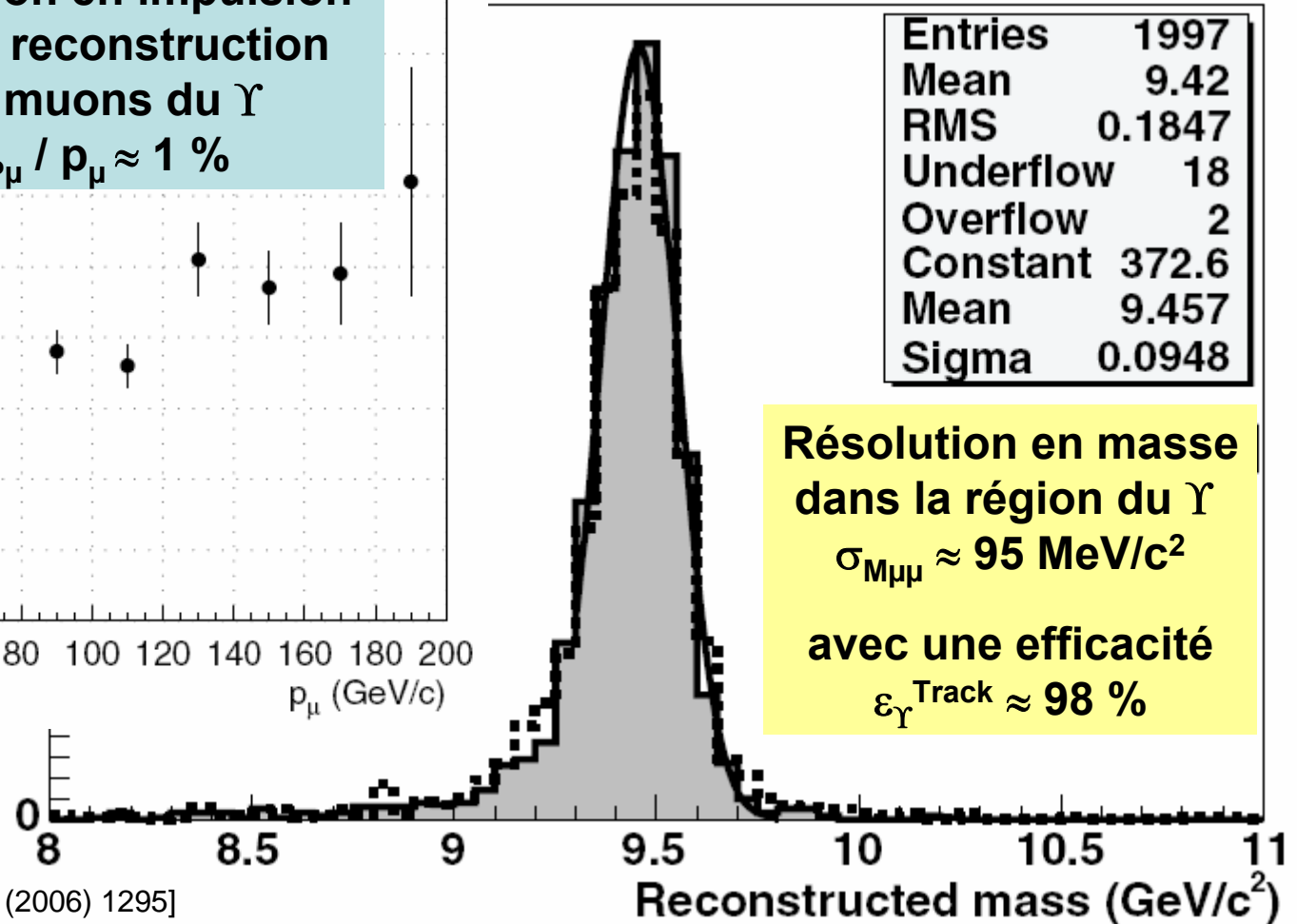


Pour des muons touchant au moins 3 plans sur 4 du Trigger

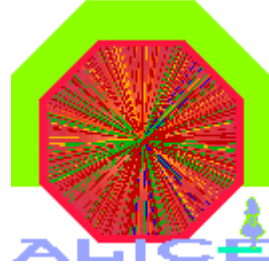
Performances du spectromètre à muons : Tracking



Sans bruit de fond

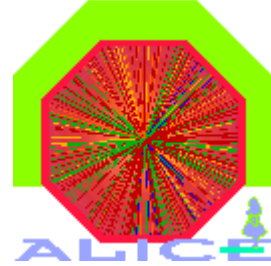


Physique des quarkonia avec le spectromètre à muons d'ALICE



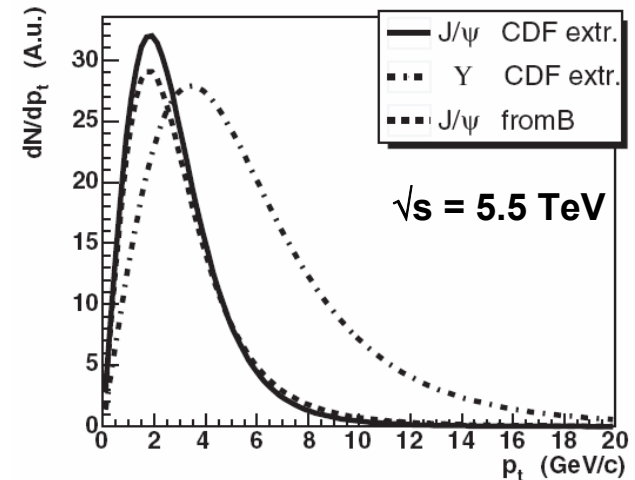
- Introduction au spectromètre à muons d'ALICE
- **Collisions p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV (fast simulation)**
- Collisions Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV (fast simulation)
- Collisions p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV (full simulation)

Simulation des quarkonia en mode p-p



- ❑ **Distributions en impulsion transverse (p_T)** extrapolées des données du Tevatron (mi-rapidité)
- ❑ **Distributions en rapidité (y)** fournies par une paramétrisation du Color Evaporation Model (CEM)

Acceptance à $\sqrt{s} = 14$ TeV ($p_\mu > 4$ GeV/c)	
$\alpha_{J/\psi} = 4.24 \%$	$\alpha_\Upsilon = 4.42 \%$



- ❑ **Section efficaces totales** incluant la contribution des résonances de plus haute masse :

[J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 32 (2006) 1295]

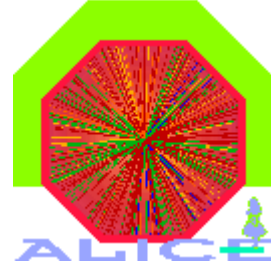
\sqrt{s} en p-p	$B_{\mu\mu} \sigma_{J/\psi}$ (μb)	$B_{\mu\mu} \sigma_{B \rightarrow J/\psi}$ (μb)	$B_{\mu\mu} \sigma_{\psi'}$ (μb)	$B_{\mu\mu} \sigma_{B \rightarrow \psi'}$ (μb)	$B_{\mu\mu} \sigma_\Upsilon$ (μb)	$B_{\mu\mu} \sigma_{\Upsilon'}$ (μb)	$B_{\mu\mu} \sigma_{\Upsilon''}$ (μb)
14 TeV	3.18	0.66	0.057	0.023	0.028	0.0069	0.0041
5.5 TeV	1.83	0.27	0.033	0.0094	0.012	0.0030	0.0018

→ = 14 à 17 % des J/ψ

- ❑ **Charme et beauté** générés avec Pythia pour reproduire pQCD @ NLO à $\sqrt{s} = 14$ TeV :

$\sigma_{cc} = 11.2$ mb	$\sigma_{bb} = 0.51$ mb
-------------------------	-------------------------

Statistique attendue en mode p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV



- Luminosité intégrée par an : $\int \mathcal{L} dt = (3 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}) \times (10^7 \text{ s})$
 $\Rightarrow N_{pp} = 1.8 \times 10^{12}$ evts avec $\sigma_{pp}^{in} = 60 \text{ mb}$ [J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 30 (2004) 1517]
- Ajustement des résonances à l'aide d'une triple gaussienne

$$N_{\Upsilon} = 27 \times 10^3$$

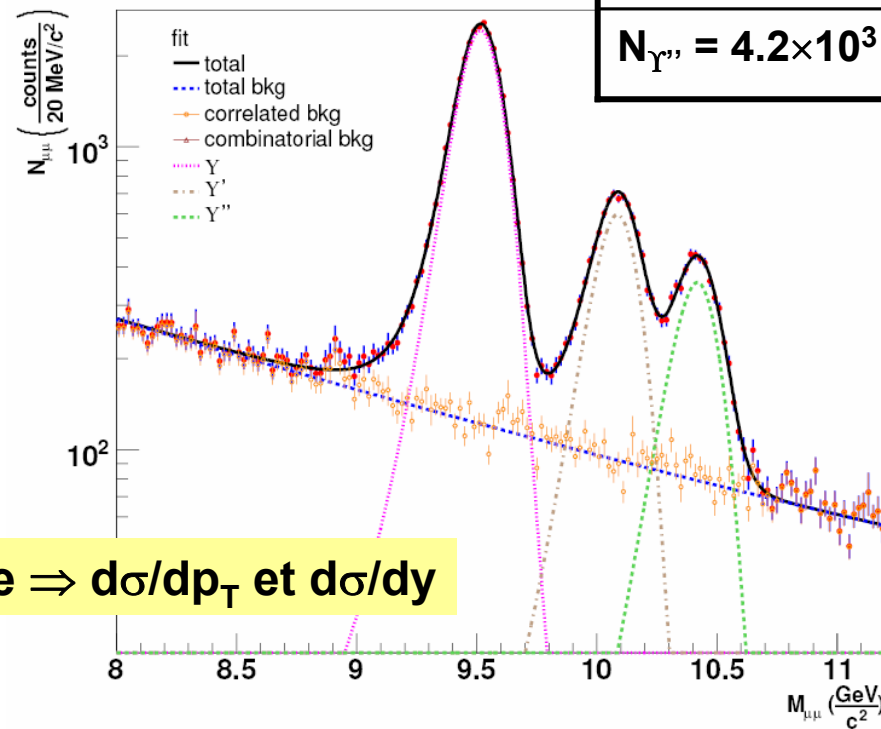
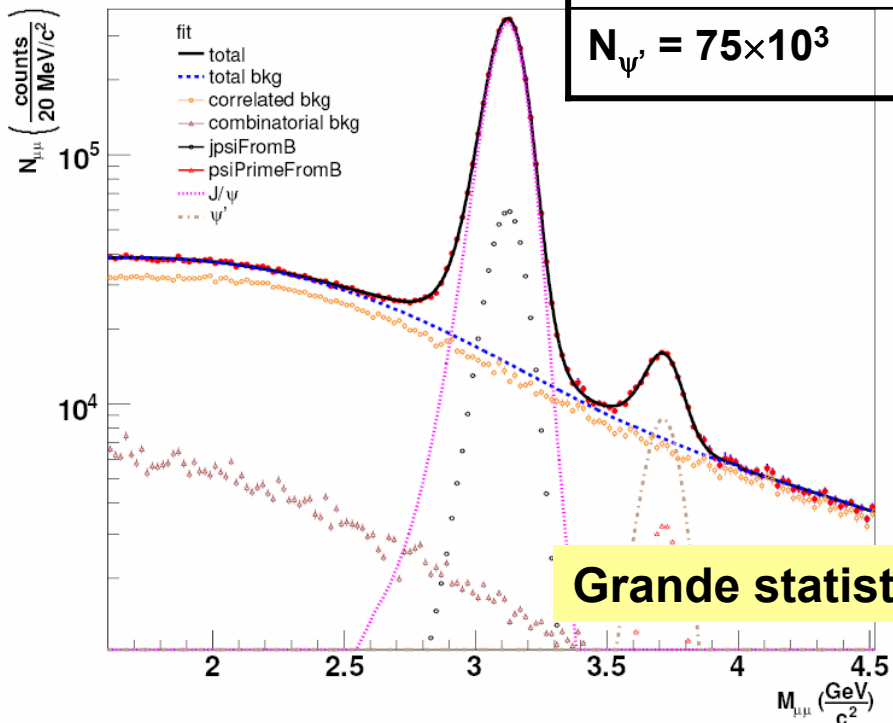
$$N_{\Upsilon'} = 6.8 \times 10^3$$

$$N_{\Upsilon''} = 4.2 \times 10^3$$

[ALICE-INT-2006-029]

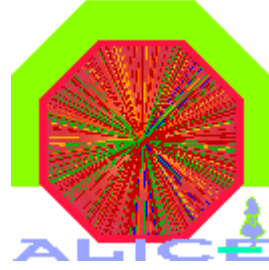
$$N_{J/\psi} = 2800 \times 10^3$$

$$N_{\psi'} = 75 \times 10^3$$



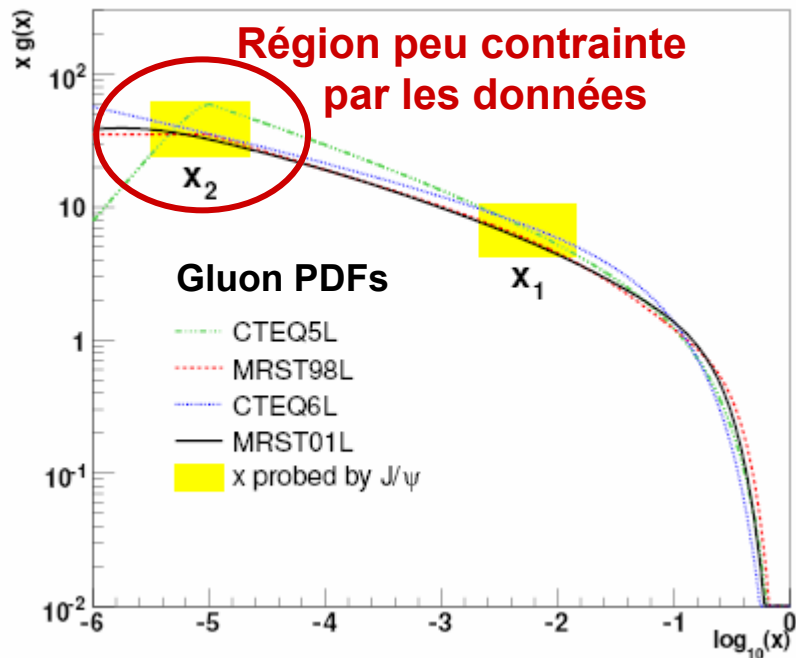
Grande statistique $\Rightarrow d\sigma/dp_T$ et $d\sigma/dy$

Distribution gluonique avec le J/ψ en mode p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV



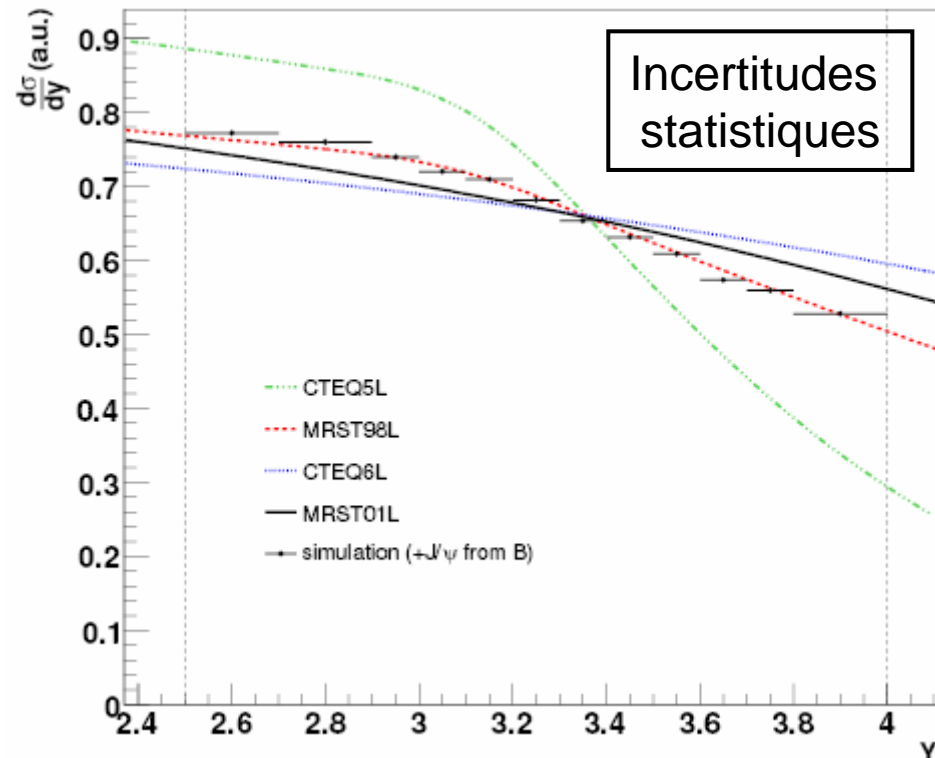
Production des quarks lourds dominée par les processus de fusion de gluons

Intervalle en x accessibles à l'aide du $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$:
 $x = M/\sqrt{s} \times \exp(\pm y)$

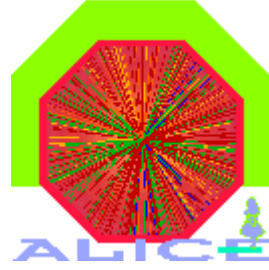


Comparaison entre la distribution en rapidité expérimentale attendue des J/ψ (simulée avec MRST98 LO) et les prédictions phénoménologiques du Color Evaporation Model

[ALICE-INT-2006-029]

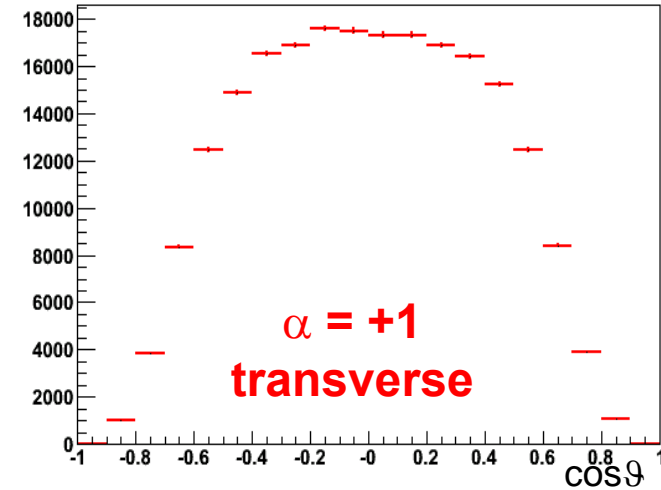
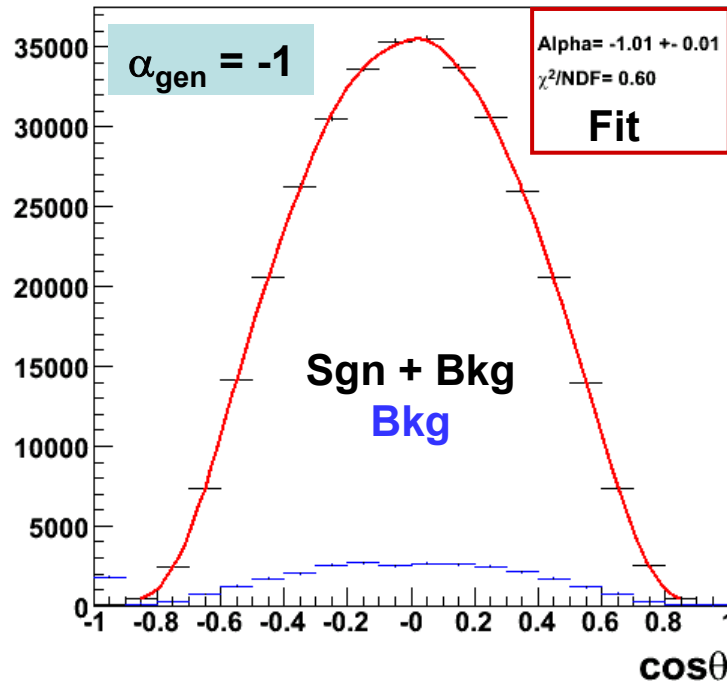
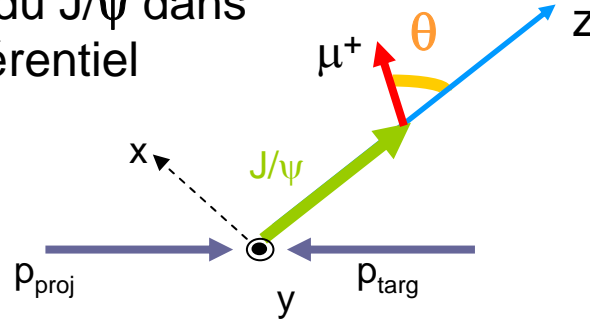


Polarisation du J/ψ en mode p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV

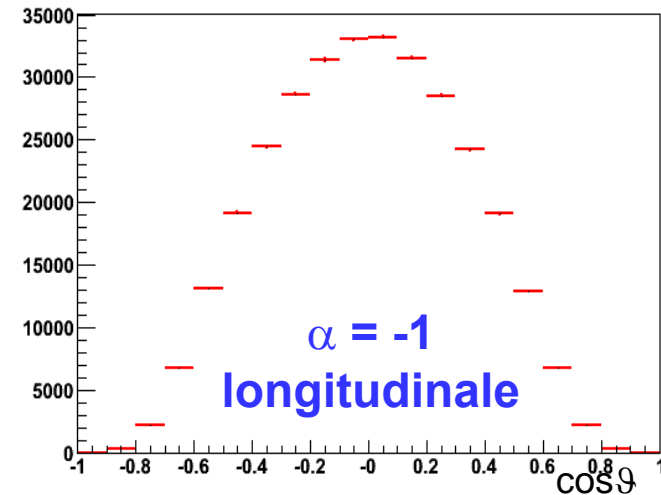


Étude de la polarisation du J/ψ dans le **repère d'hélicité** (référentiel propre du J/ψ) :

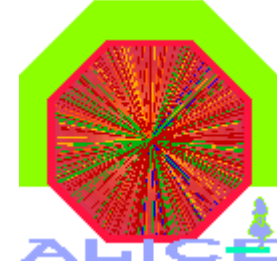
$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = 1 + \alpha \cos^2\theta$$



Reconstruction avec le spectromètre à muons

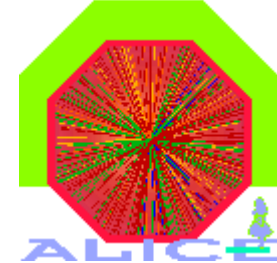


Physique des quarkonia avec le spectromètre à muons d'ALICE



- Introduction au spectromètre à muons d'ALICE
- Collisions p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV (fast simulation)
- **Collisions Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV (fast simulation)**
- Collisions p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV (full simulation)

Simulation des quarkonia en mode Pb-Pb



- ❑ **Sections efficaces totales en ions lourds (A-A)** obtenues à l'aide d'un modèle de Glauber (binary scaling) des sections efficaces p-p :

$$\sigma_{AA} = A^2 \times \sigma_{pp}$$

- ❑ Prise en compte des **effets de shadowing** [Phys. Rev. C 61 (2000) 044904] :

$$C_{sh}(b) = C_{sh}(0) + [1 - C_{sh}(0)] (b / 16 \text{ fm})^4$$

Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5 \text{ TeV}$	J/Ψ	B → J/Ψ	Ψ'	B → Ψ'	Υ	Υ'	Υ''
$C_{sh}(0)$	0.60	0.84	0.60	0.84	0.76	0.76	0.76

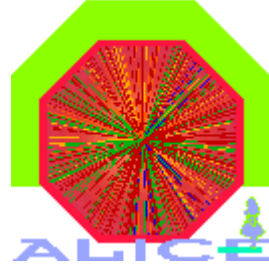
- ❑ **Bruit de fond (π^\pm, K^\pm)** → μ^\pm généré à l'aide d'une paramétrisation de Hijing telle que :

$$|dN_{ch}/d\eta|_{\eta=0} = 8000$$

- ❑ **Étude avec 5 bins en centralité**

	c1	c2	c3	c4	c5
b (fm)	0 - 3	3 - 6	6 - 9	9 - 12	> 12
$\langle N_{part} \rangle$	385	297	177	70	8

Extraction des quarkonia en mode Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV



➤ **Luminosité intégrée par mois :**

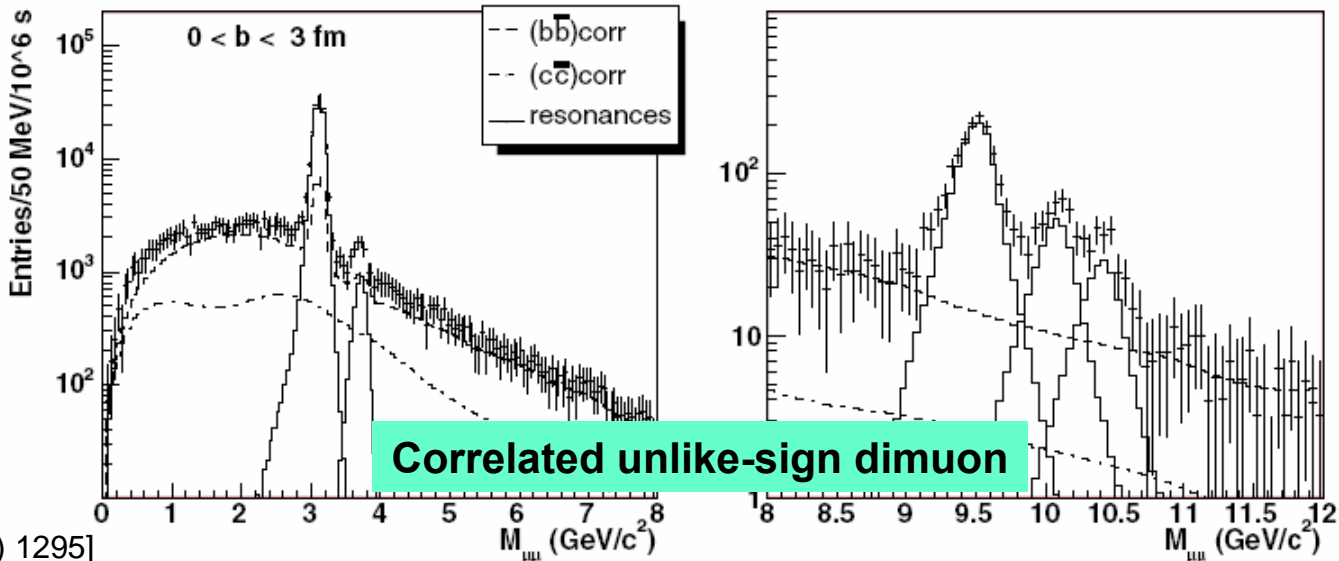
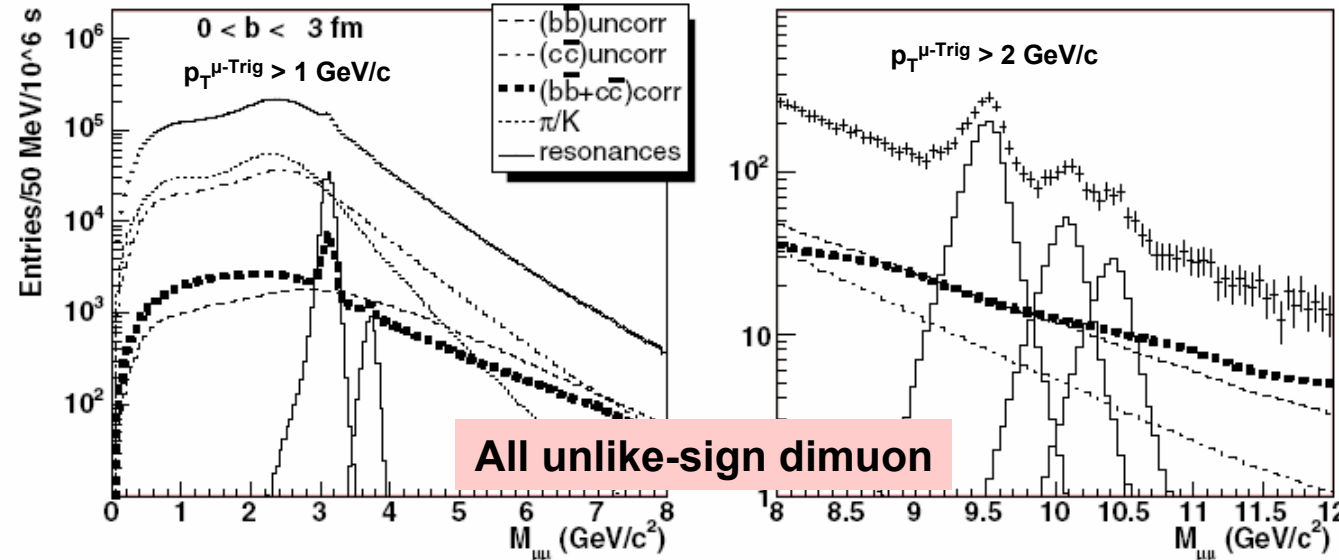
$$\int \mathcal{L} dt = (5 \times 10^{26} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}) \times (10^6 \text{ s})$$

➤ **Hypothèse :**

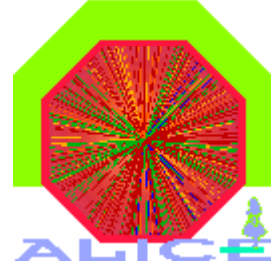
soustraction parfaite des dimuons non-corrélés

➤ **Ajustement :**

- résonance = Landau \oplus Gauss
- continuum = exponentielle



Statistique des quarkonia en mode Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5 \text{ TeV}$



State	Centrality	S [$\times 10^3$]	B [$\times 10^3$]	S/B	S/ $\sqrt{S+B}$
J/ ψ	c1	130 (22)	680	0.20	150
	c2	230 (38)	860	0.27	220
	c3	200 (32)	410	0.48	250
	c4	95 (15)	88	1.08	220
	c5	21.7 (3.2)	6.9	3.13	130
ψ'	c1	3.7 (1.4)	300	0.01	6.7
	c2	6.5 (2.4)	385	0.02	11
	c3	5.5 (2.0)	190	0.03	13
	c4	2.6 (0.9)	42	0.06	12
	c5	0.59 (0.20)	3.4	0.17	9.3
Υ	c1	1.3	0.8	1.7	29
	c2	2.4	1.0	2.3	41
	c3	2.0	0.55	3.6	39
	c4	0.93	0.15	6.1	28
	c5	0.20	0.022	9.1	14
Υ'	c1	0.35	0.54	0.65	12
	c2	0.62	0.67	0.92	17
	c3	0.52	0.38	1.4	17
	c4	0.24	0.11	2.2	13
	c5	0.054	0.016	3.5	6.4
Υ''	c1	0.20	0.42	0.48	8.1
	c2	0.35	0.55	0.64	12
	c3	0.30	0.30	0.99	12
	c4	0.14	0.088	1.6	9.2
	c5	0.030	0.014	2.2	4.6

() : $b \rightarrow (J/\psi, \psi')$ + X

Statistique attendue
sans effets nucléaire,
excepté le shadowing :

$$\square N_{|QQ\rangle} = m_{\text{fit}} \pm 2 \sigma_m$$

($\sigma_m = W_{\text{Landau}} + \sigma_{\text{Gauss}}$)

\square grande statistique

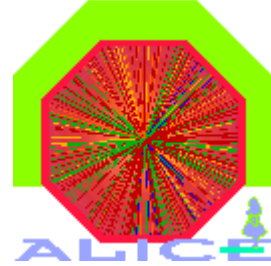
$$\langle N_{J/\psi} \rangle \approx 135 \times 10^3$$

$$\langle N_{\Upsilon} \rangle \approx 1400$$

\square bonne signification

\Rightarrow Étude en p_T par bin
de centralité possible

Dépendance en N_{part} des quarkonia en mode Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV



Suppression-1 [909 : Phys. Rev. D 72 (2005) 114011] : $T_c = 270$ MeV

Suppression-2 [908 : hep-ph/0509088] : $T_c = 190$ MeV

Rapport Quarkonia / Beauté :

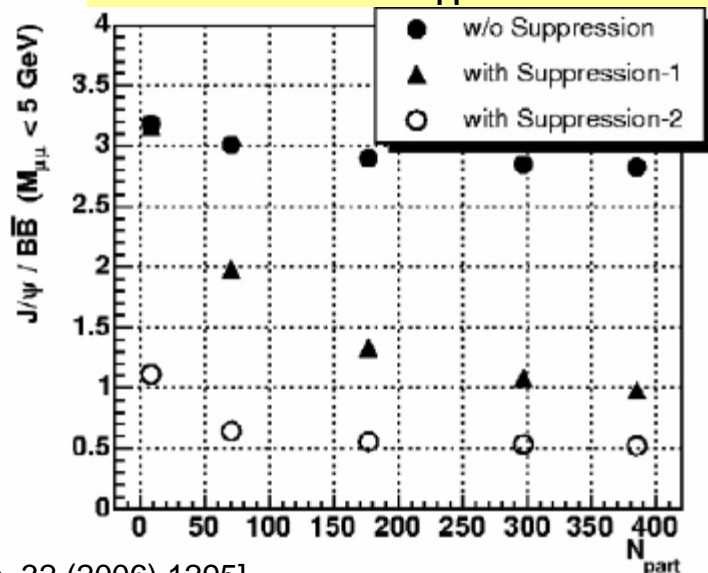
- sans absorption nucléaire normale
- sans perte d'énergie des quarks lourds

Resonance	J/ψ	ψ'	χ _c	Υ	Υ'	Υ''	χ _b	χ' _b
τ _F , fm/c	0.89	1.5	2.0	0.76	1.9	1.9	2.6	2.6
T _D /T _c [909]	1.7	1.1	1.13	4.0	1.4	1.14	1.6	1.16
T _D /T _c [908]	1.21	1	1	2.9	1.06	1	1.07	1

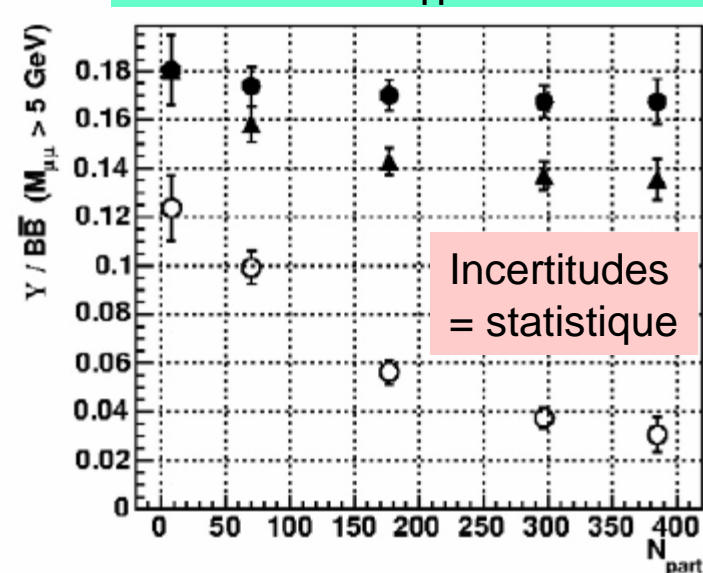


Très sensible au milieu, mais perte d'énergie de la beauté ?

J/ψ / (beauté : $m_{\mu\mu} < 5$ GeV/c²)

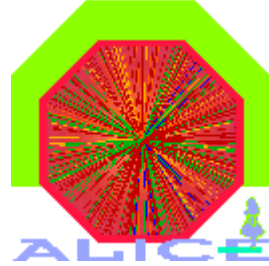


Υ / (beauté : $m_{\mu\mu} > 5$ GeV/c²)



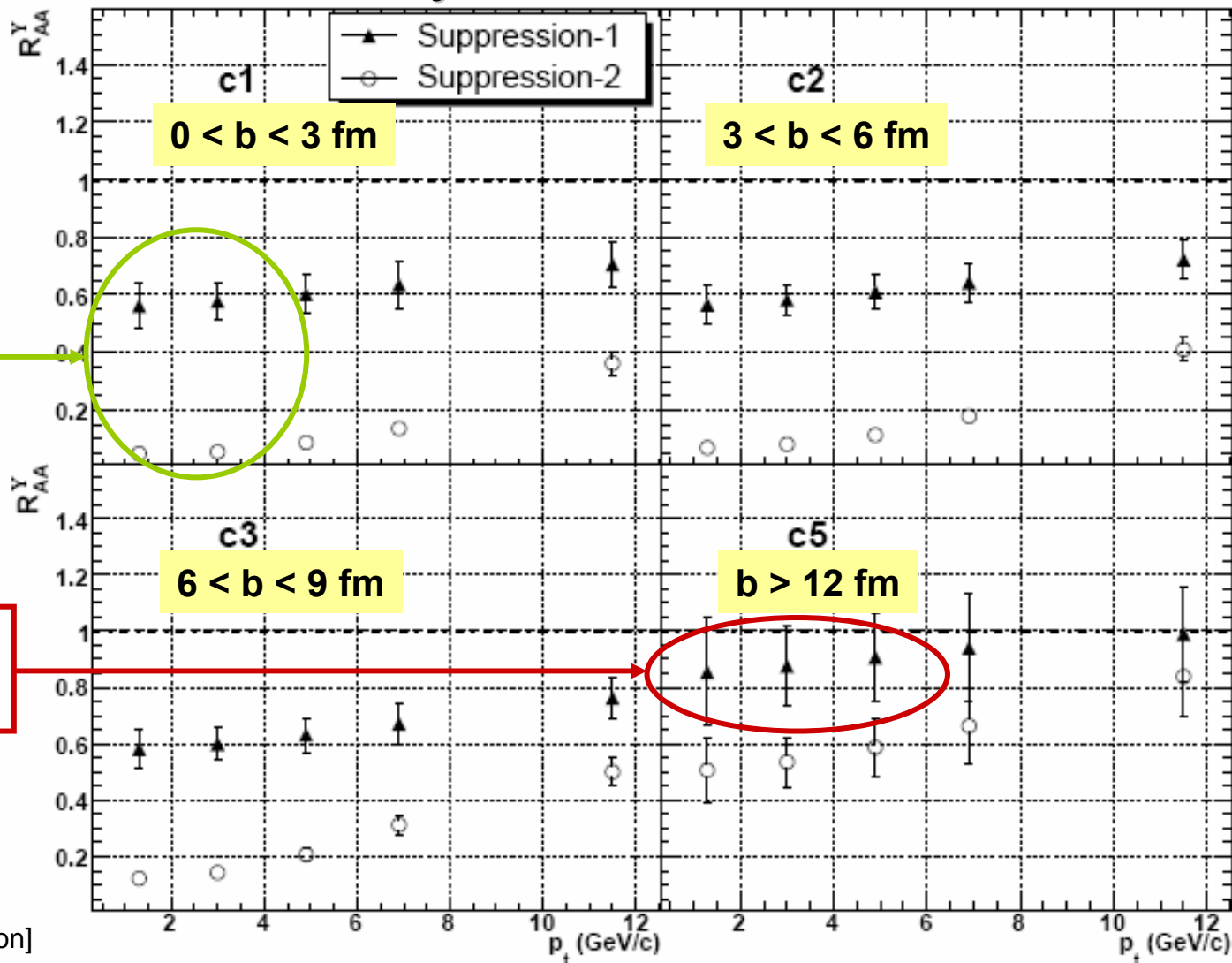
Incertitudes = statistique

$R_{AA}(p_T)$ du Υ en mode Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV



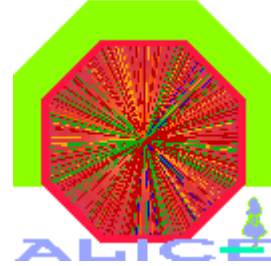
Preliminary : uncertainties under-estimated

Bonne distinction
entre les deux
scénarii avec le Υ
pour les collisions
centrales



Pas de suppression :
effet de shadowing

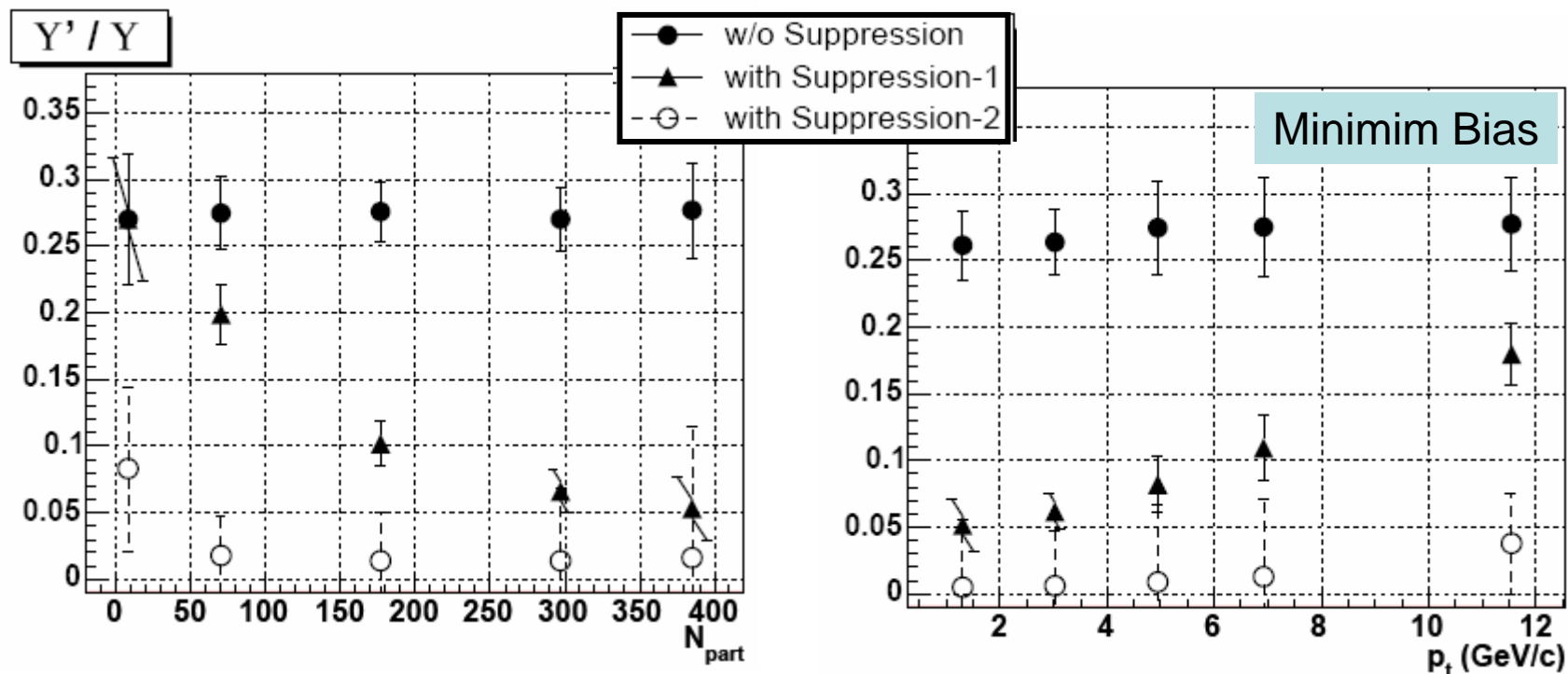
Étude du rapport Υ'/Υ en mode Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV



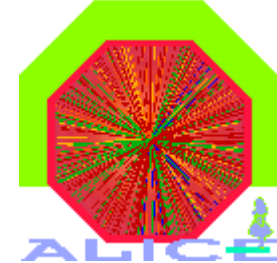
Intérêt : annulation

- d'incertitudes systématiques
- d'effets nucléaires froids

**Rapport Υ'/Υ sensible
au milieu après 1 mois
de données Pb-Pb**



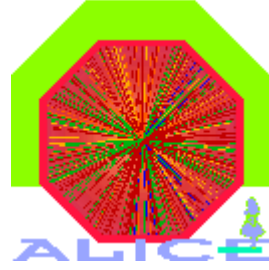
Physique des quarkonia avec le spectromètre à muons d'ALICE



- Introduction au spectromètre à muons d'ALICE
- Collisions p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV (fast simulation)
- Collisions Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV (fast simulation)
- **Collisions p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV (full simulation)**

Physics Data Challenge 2006 :

p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV



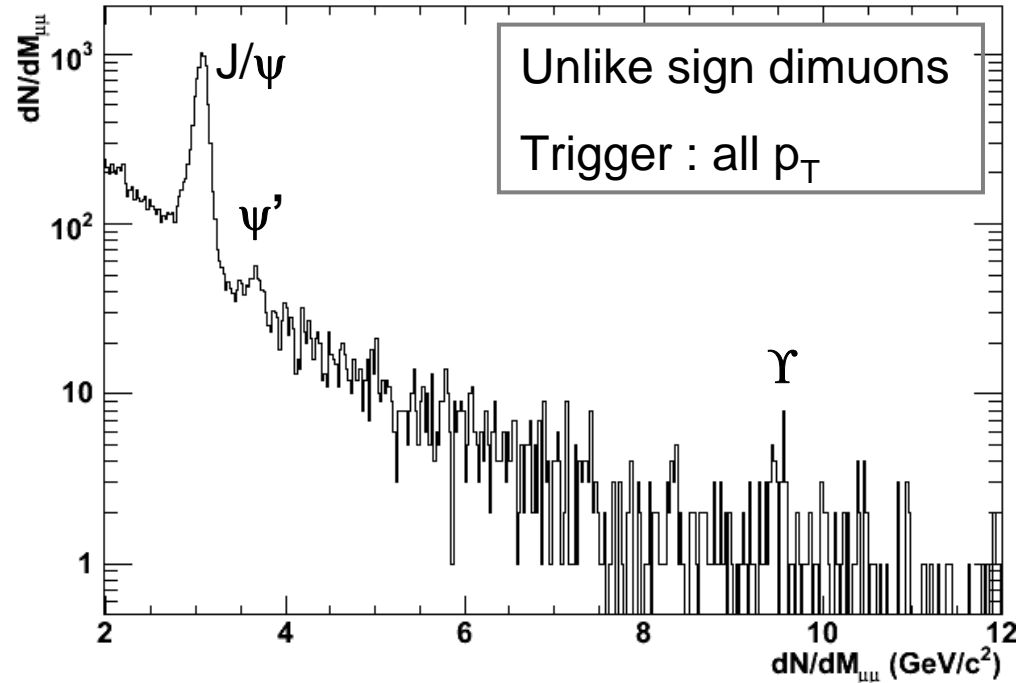
➤ But du PDC06 :

- ❑ tester le **calcul sur la grille**
- ❑ effectuer une production de type **événements réels**
- ❑ développer les **codes d'analyse "finals"**

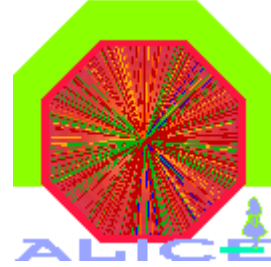
➤ Simulation équivalente
à \approx **1 journée LHC :**

- J/ ψ = Landau \oplus Gauss
- Bkg = exponentielle

$$\Rightarrow N_{J/\psi} \approx 5800$$

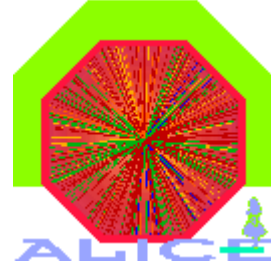


Conclusions et perspectives (i)



- Bonnes performances attendues du **spectromètre à muons** pour l'étude des quarkonia : **séparation des différents états d'une même famille**
- En mode **p-p** à $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$:
 - ❑ très grande statistique : $N_{J/\psi} = 2800 \times 10^3$ et $N_{\Upsilon} = 27 \times 10^3$ **par an**
 - ❑ mesure des sections efficaces différentielles $d\sigma/dp_T$ et $d\sigma/dy$ et de la polarisation du J/ψ
 - ❑ **étude des modèles de formation des quarkonia et des PDFs**
- En mode **Pb-Pb** à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5 \text{ TeV}$:
 - ❑ grande statistique : $N_{J/\psi} = 675 \times 10^3$ et $N_{\Upsilon} = 7 \times 10^3$ **par mois**
 - ❑ mesure possible du facteur R_{AA} et des rapports $\psi'/(J/\psi)$ et Υ'/Υ en fonction de la centralité et du p_T
 - ❑ **études envisagées des différents scénarii de QGP**

Conclusions et perspectives (ii)



➤ Études de physique avec des simulations complètes de collisions p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV : **codes d'analyse des données en développement**

➤ **À développer :**

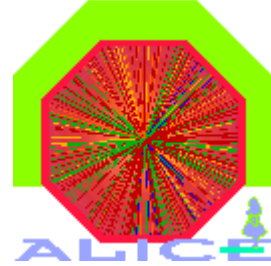
- l'analyse du Υ en mode p-p
- la soustraction du bruit de fond dans les collisions Pb-Pb
- ...

➤ **Mais également :**

- finir d'installer le détecteur,
- et faire le commissioning du détecteur,
- et finir de développer les outils de contrôle (DCS, online, ...),
- et continuer à développer le software d'analyse
- et je n'ai plus de place ...



Performances du spectromètre pour les quarkonia



BKG 1 = 2 × Hijing (Pb-Pb central : $|N_{ch}/dy|_{y=0} = 6000$)

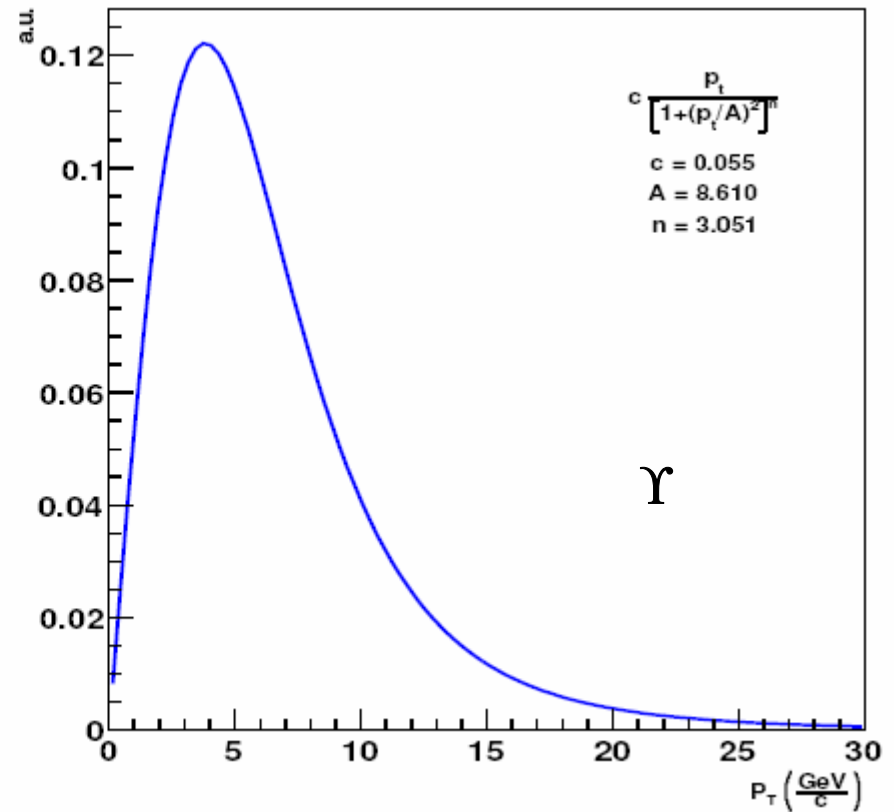
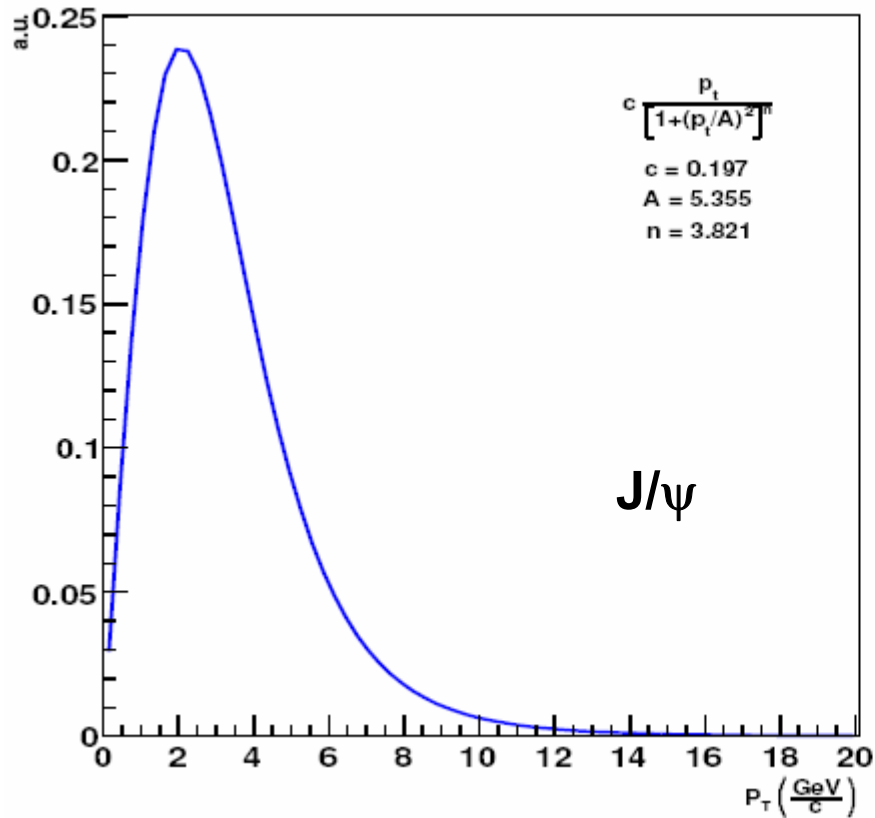
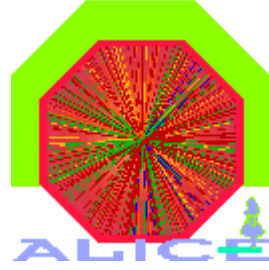
Résolution

		BKG 0	BKG 0.5	BKG 1
Υ	σ (MeV)	97 (99 ± 2)	108 (109 ± 2)	120 (115 ± 2)
J/ψ	σ (MeV)	75 (72 ± 2)	76 (74 ± 2)	77 (70 ± 2)

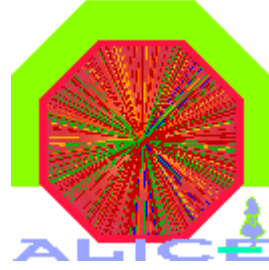
Efficacités

		BKG 0	BKG 0.5	BKG 1
Υ	$\varepsilon_{\text{trig}}$ (%)	92 (92)	91 (91)	92 (91)
	$\varepsilon_{\text{track}}$ (%)	92 (97)	90 (94)	86 (91)
	ε_{all} (%)	85 (89)	82 (86)	79 (83)
J/ψ	$\varepsilon_{\text{trig}}$ (%)	74 (72)	77 (76)	83 (83)
	$\varepsilon_{\text{track}}$ (%)	86 (92)	84 (90)	79 (84)
	ε_{all} (%)	64 (67)	64 (69)	66 (70)

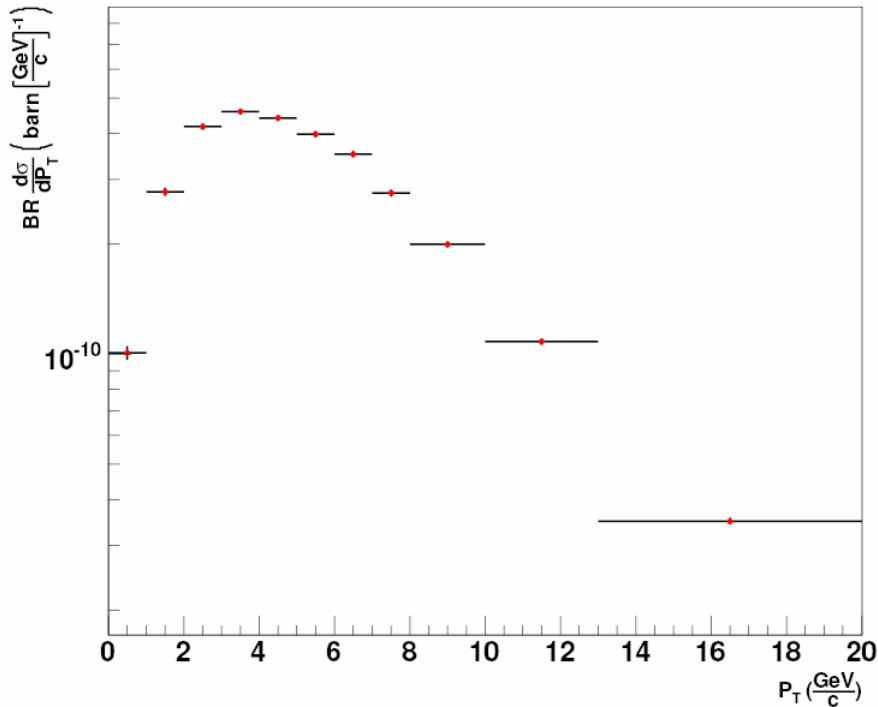
Simulation des quarkonia à $\sqrt{s} = 14$ TeV



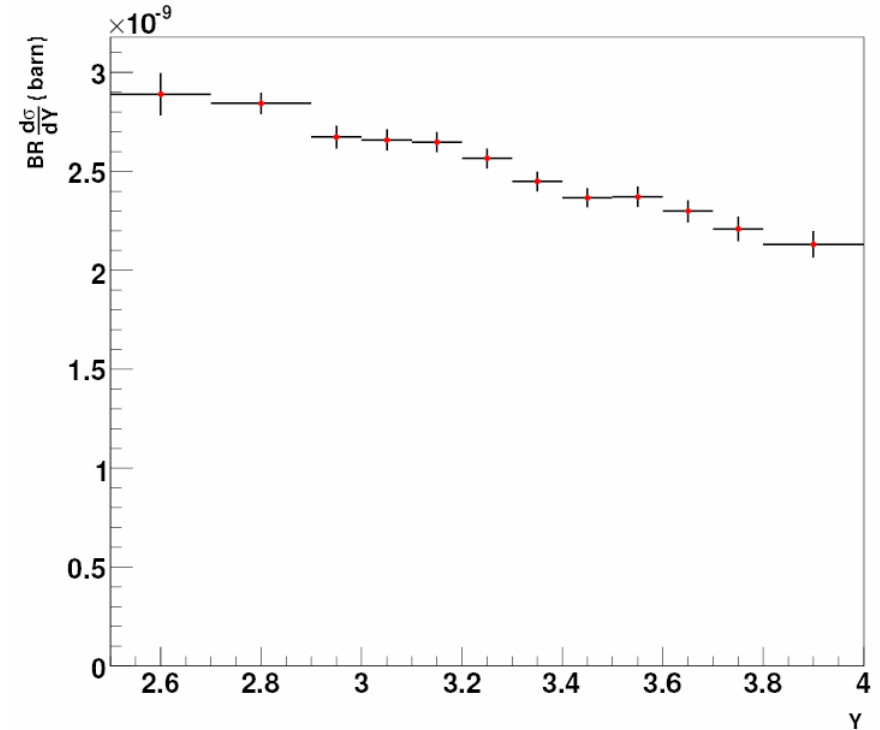
Mesure des spectres du Υ en mode p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV



Distribution en p_T du Υ

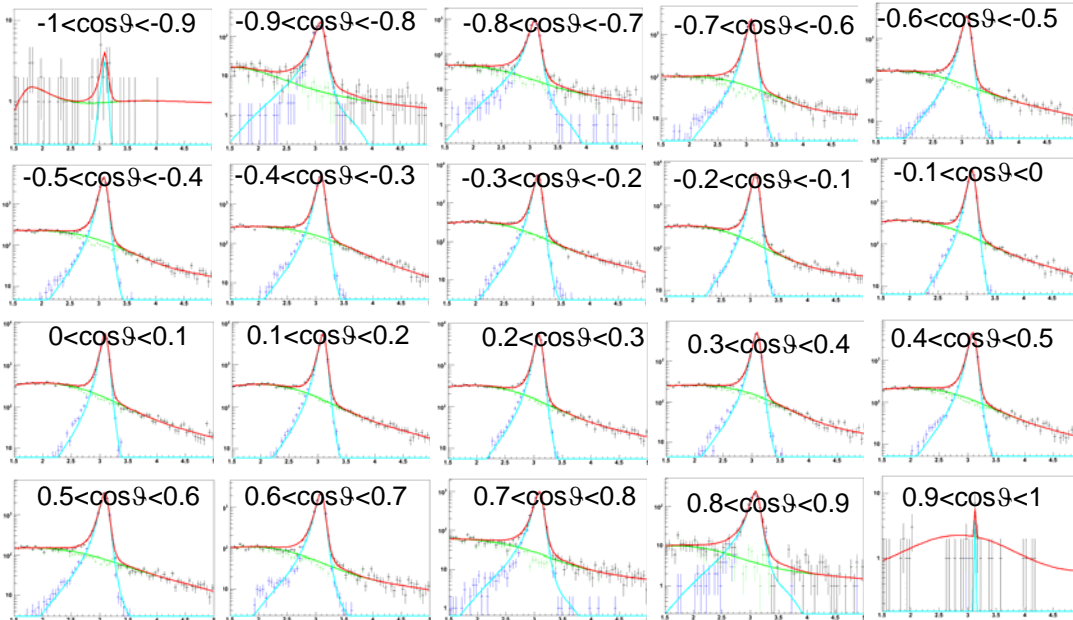
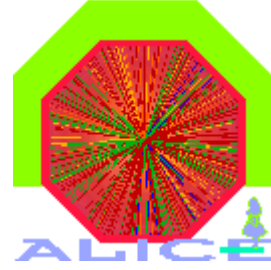


Distribution en rapidité du Υ

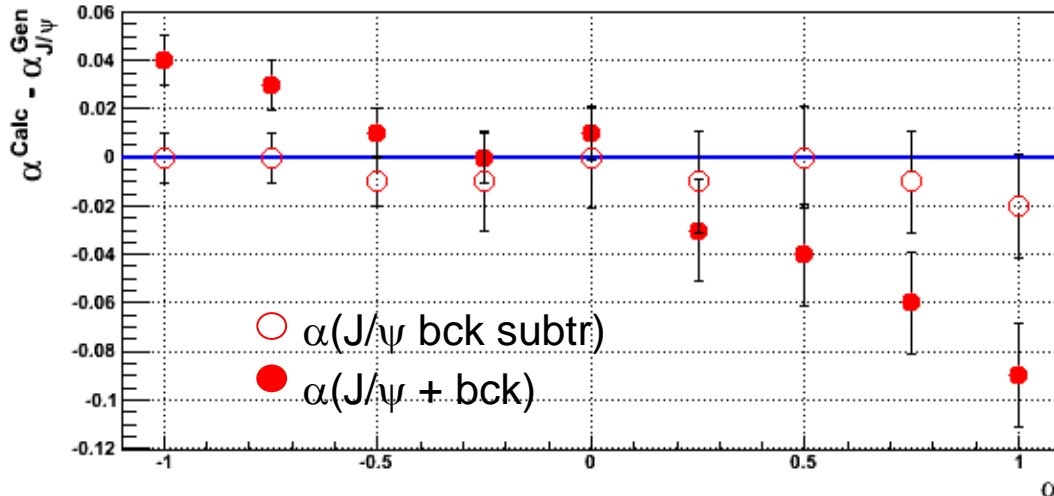
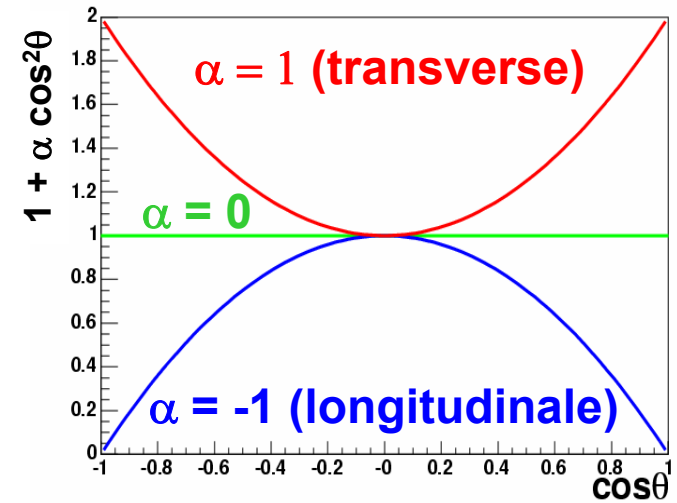


**Uniquement incertitudes statistiques prises en compte
⇒ Mesures pas limitées par la statistique**

Polarisation du J/ψ en mode p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV

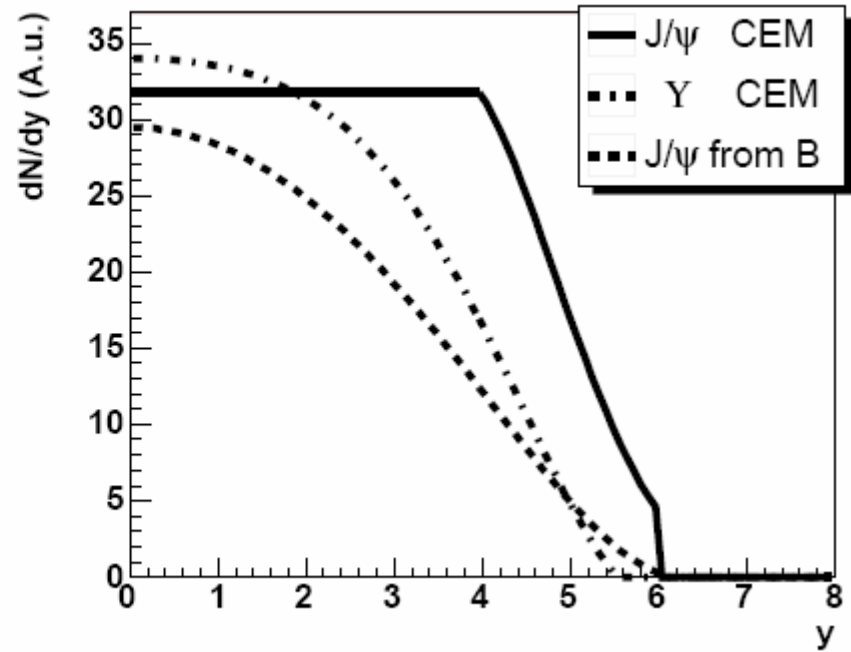
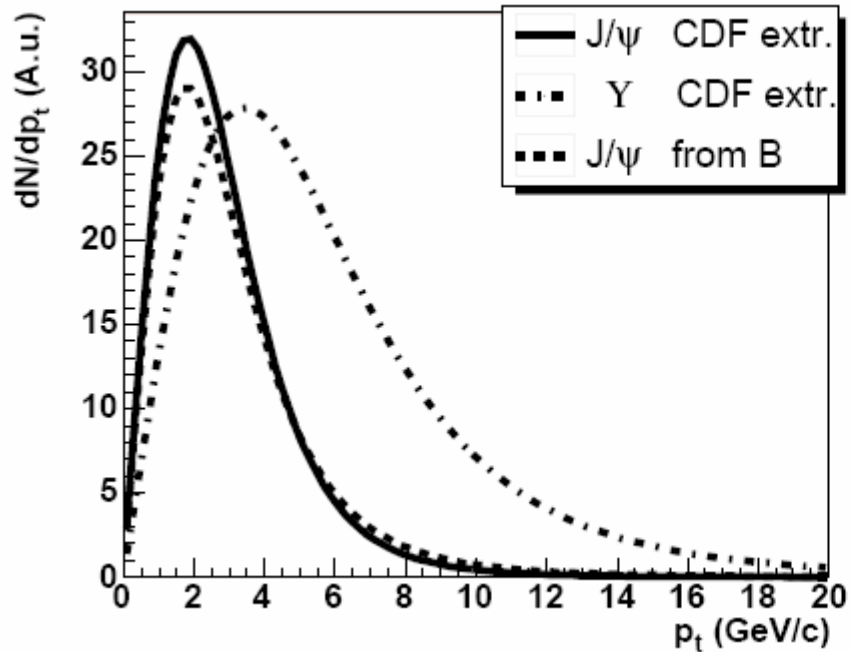
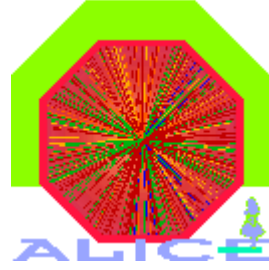


- CEM : pas de polarisation
- NRQCD : polarisation transverse

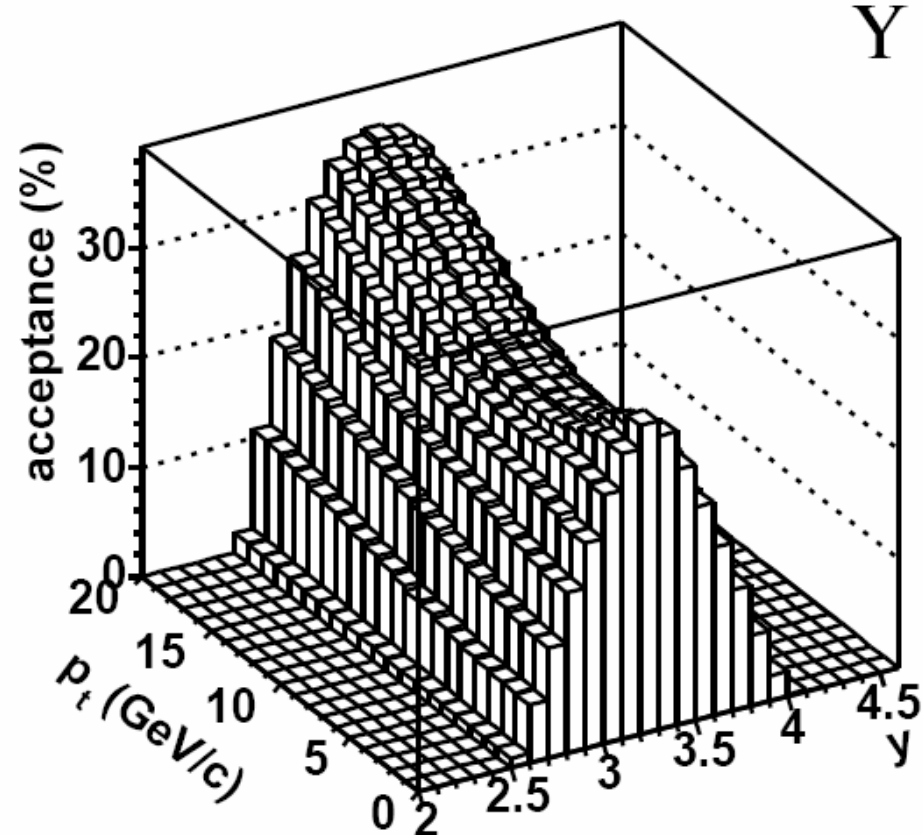
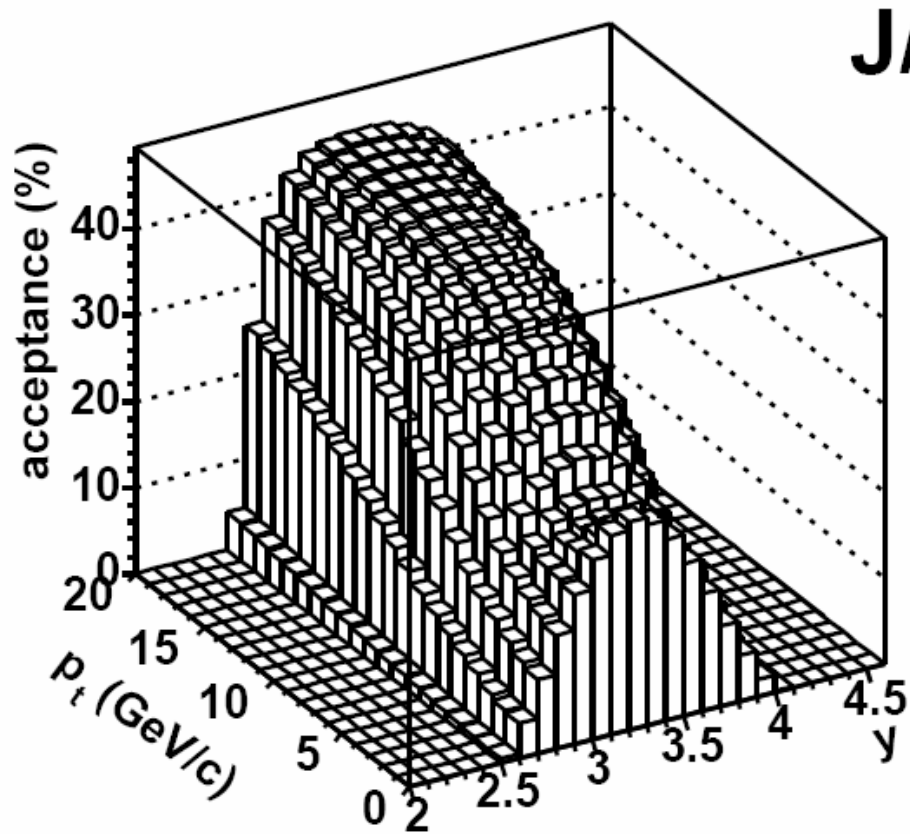
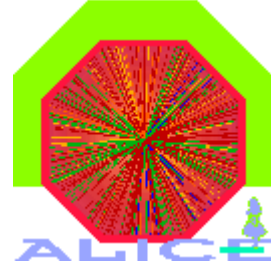


**Statistique suffisante pour
une étude de la polarisation
en fonction du p_T du J/ψ**

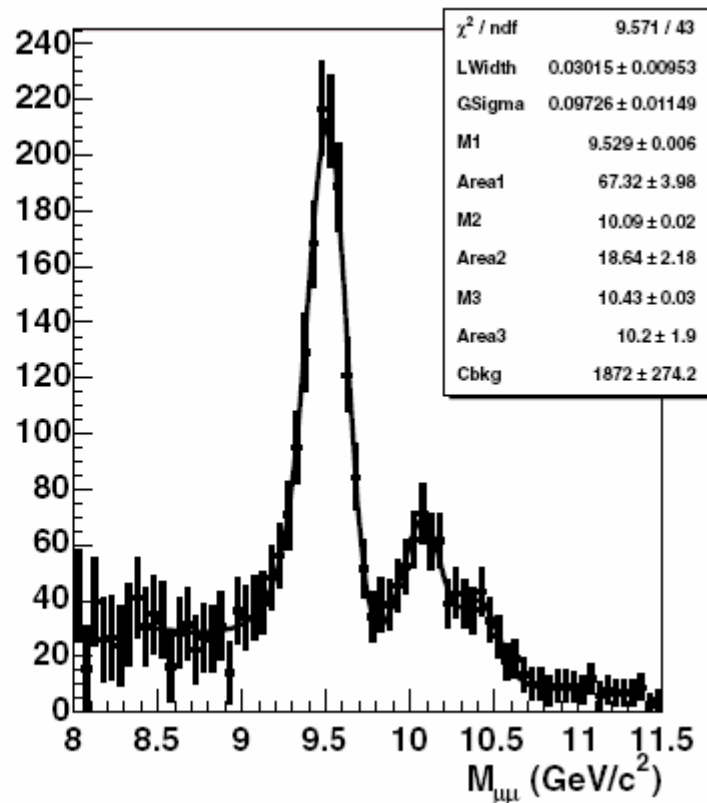
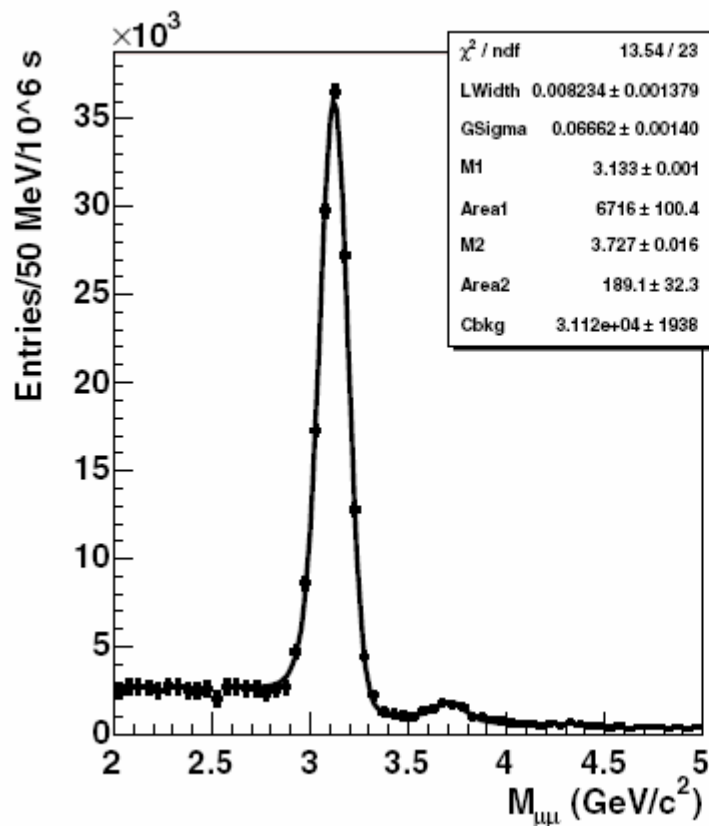
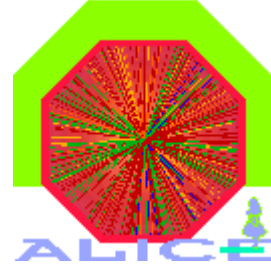
Simulation des quarkonia à $\sqrt{s} = 5.5 \text{ TeV}$



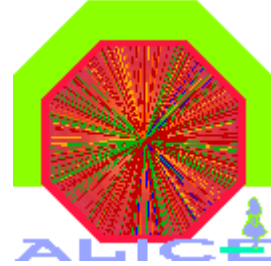
Acceptance des quarkonia en mode Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV



Fit des quarkonia en mode Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5 \text{ TeV}$



Suppression nucléaire des quarkonia en mode Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV

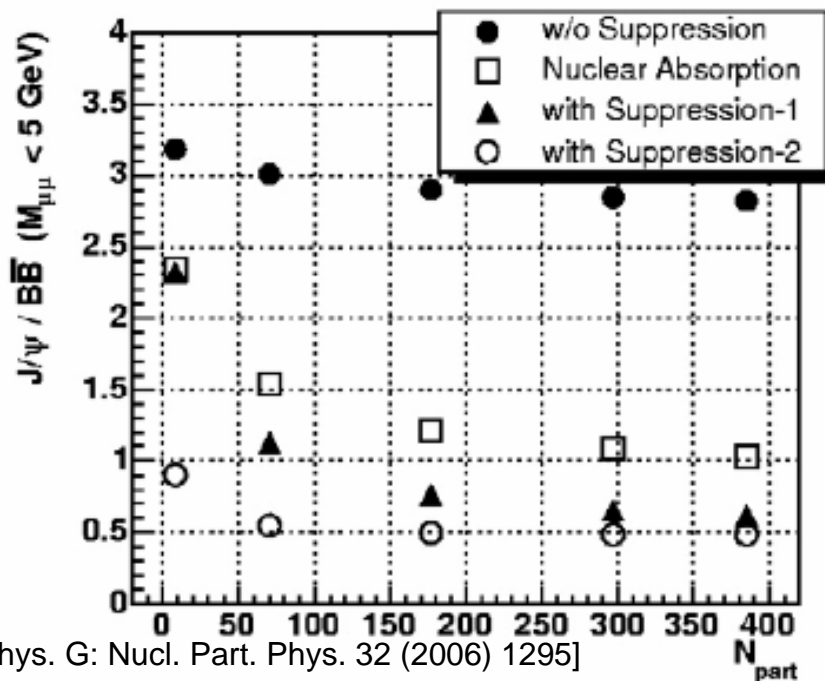


Rapport Quarkonium / Beauté :

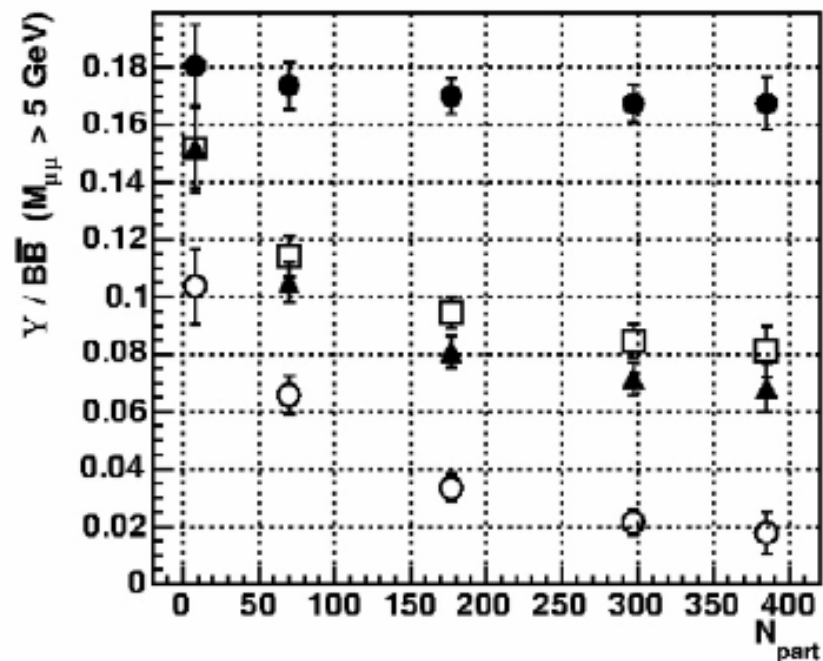
- avec absorption nucléaire normale [hep-ph/0311048]
 - $\sigma_{\text{abs}}^{J/\psi} = 10.3 \pm 1.0$ mb
 - $\sigma_{\text{abs}}^{\Upsilon} = 4.6 \pm 0.9$ mb
- sans perte d'énergie des quarks lourds

Incertitudes
= statistique

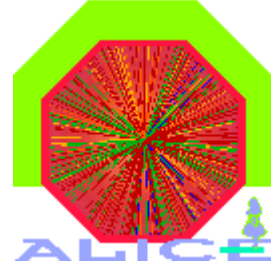
J/ψ / (beauté : $m_{\mu\mu} < 5$ GeV/c²)



Υ / (beauté : $m_{\mu\mu} < 5$ GeV/c²)



$R_{AA}(p_T)$ des quarkonia en mode Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV



Calcul du facteur de modification nucléaire pour un quarkonium $|Q\bar{Q}\rangle$:

Spectre en p_T dans les collisions
Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV

Rapport des spectres en p_T
à $\sqrt{s} = 5.5$ et 14 TeV extra-
polés des données de CDF
avec l'approche CEM

$$R_{AA}^{Q\bar{Q}} = \frac{\frac{dN_{AA}^{Q\bar{Q}}}{dp_T}}{N_{coll} \frac{\sigma_{NN}^{in}(14 \text{ TeV})}{\sigma_{NN}^{in}(5.5 \text{ TeV})} \frac{dN_{pp}^{Q\bar{Q}}}{dp_T} F_{B \rightarrow Q\bar{Q}}^{5.5/14} S_{|Q\bar{Q}}^{5.5/14}(p_T)}$$

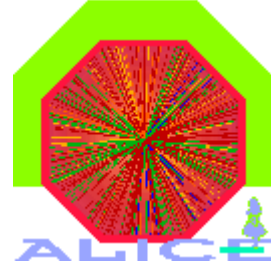
Nombre moyen de
collisions binaires
pour une tranche
en centralité fixe
d'une collision Pb-
Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV

Rapport des sections
efficaces totales in-
élastiques N-N à
 $\sqrt{s} = 14$ et 5.5 TeV

Rapport de la fraction de J/ψ de
B par rapport aux J/ψ directs
à $\sqrt{s} = 5.5$ et 14 TeV

Spectre en p_T dans les collisions p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV

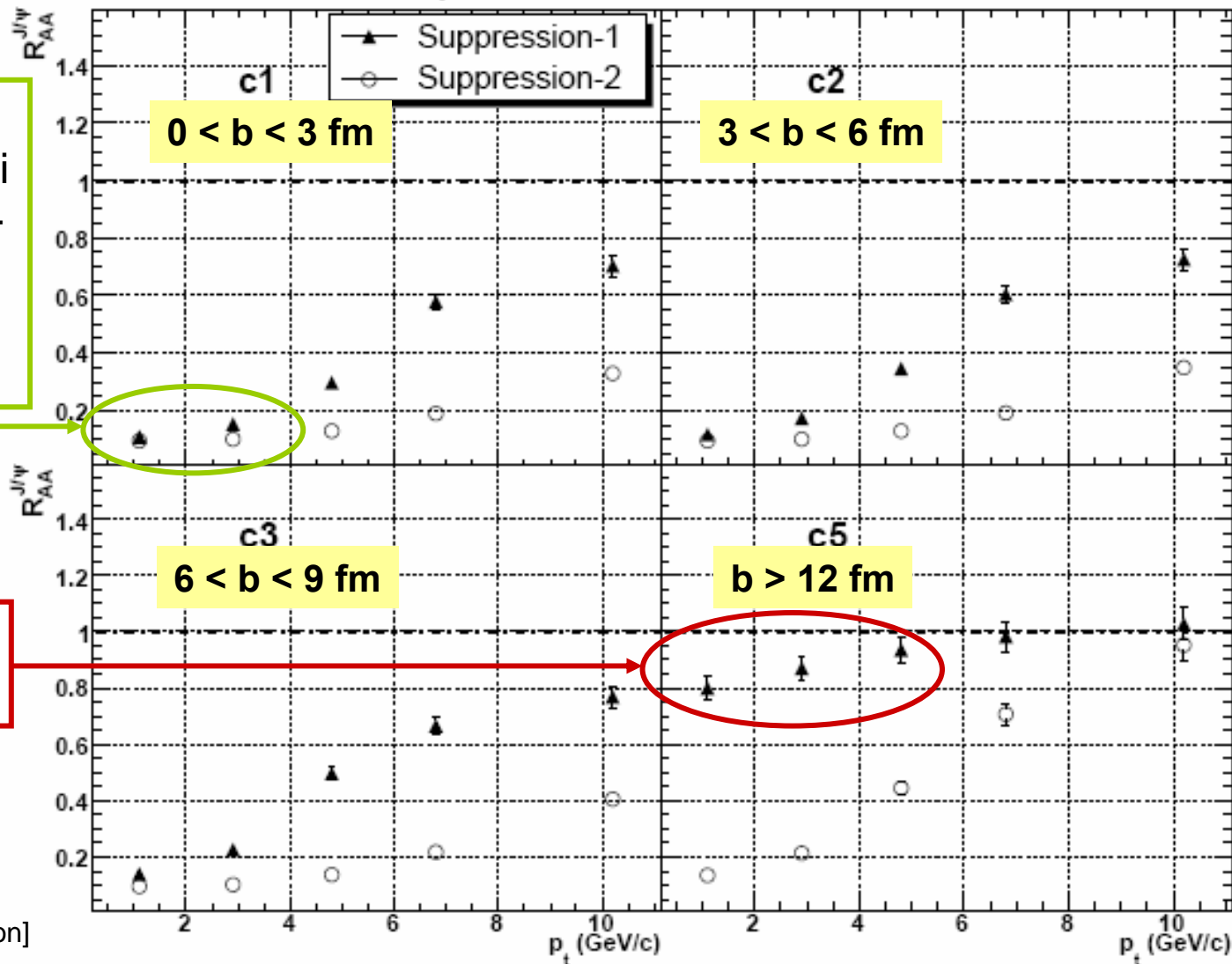
$R_{AA}(p_T)$ du J/ψ en mode Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV



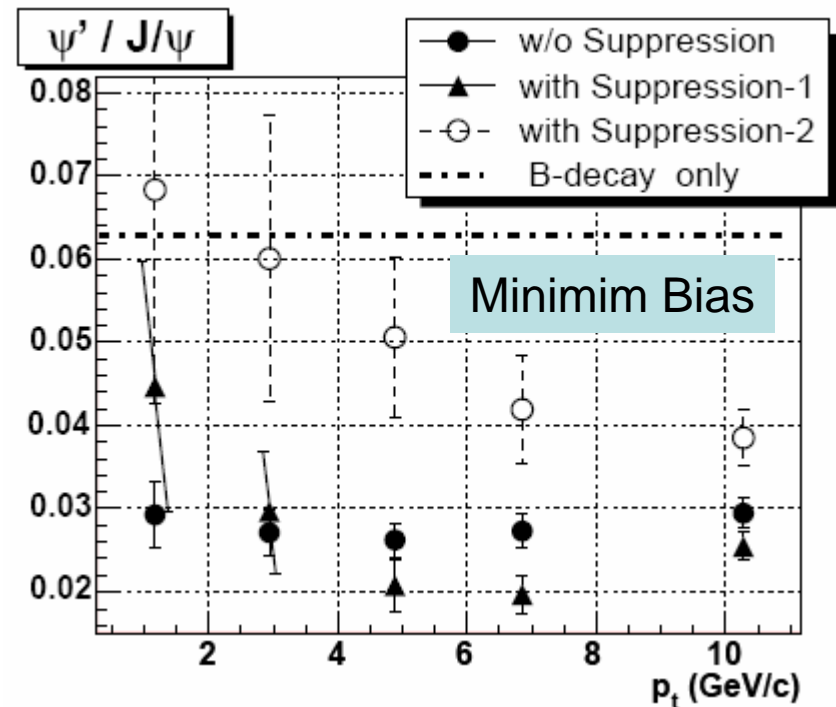
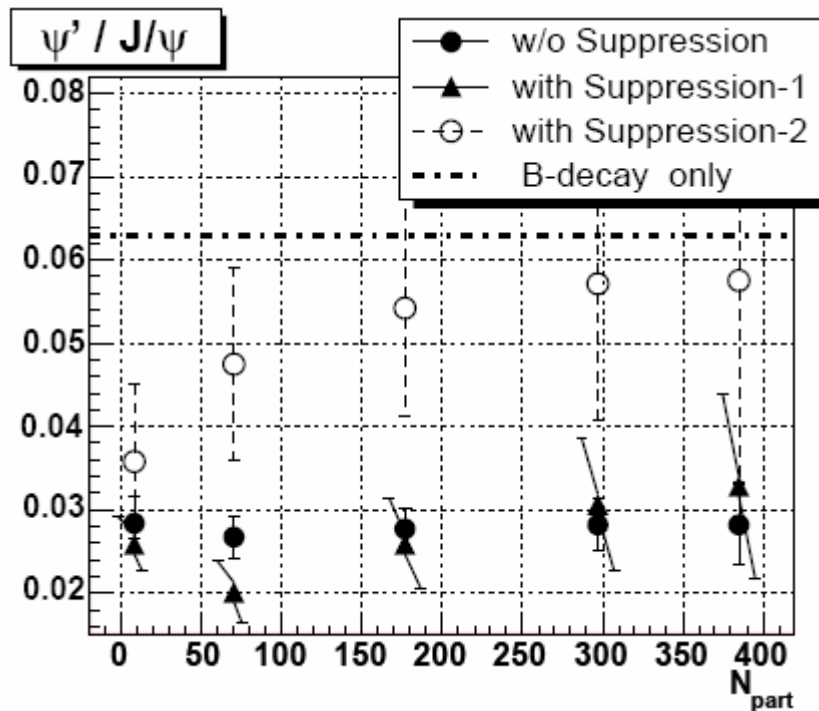
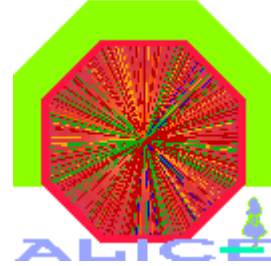
Preliminary : uncertainties under-estimated

Suppression similaire pour les deux scénarii
 $\Rightarrow J/\psi$ directs complètement supprimés :
 reste uniquement les J/ψ de B

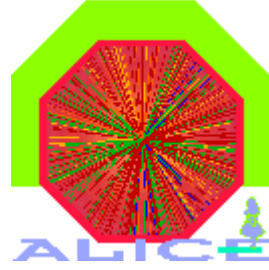
Pas de suppression :
 effet de shadowing



Étude du rapport $\psi'/(J/\psi)$ en mode Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV

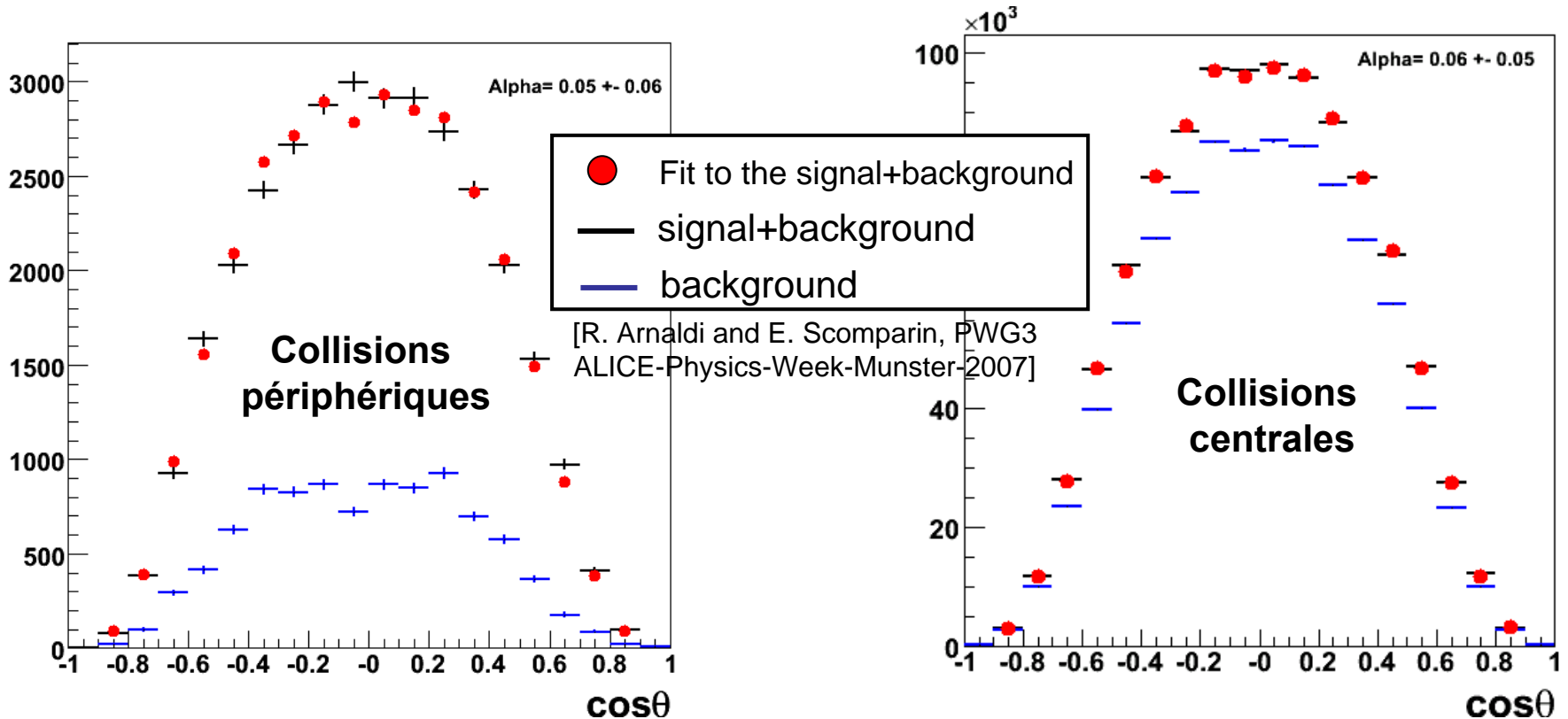


Polarisation du J/ψ en mode Pb-Pb à $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV



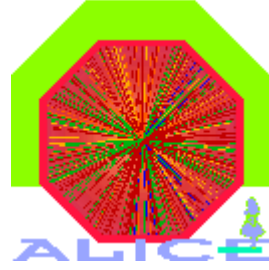
Prédiction [B.L. Ioffe and D.E. Kharzeev: Phys. Rev. C68 (2003) 061902] :

« augmentation de la polarisation du J/ψ dans un QGP »

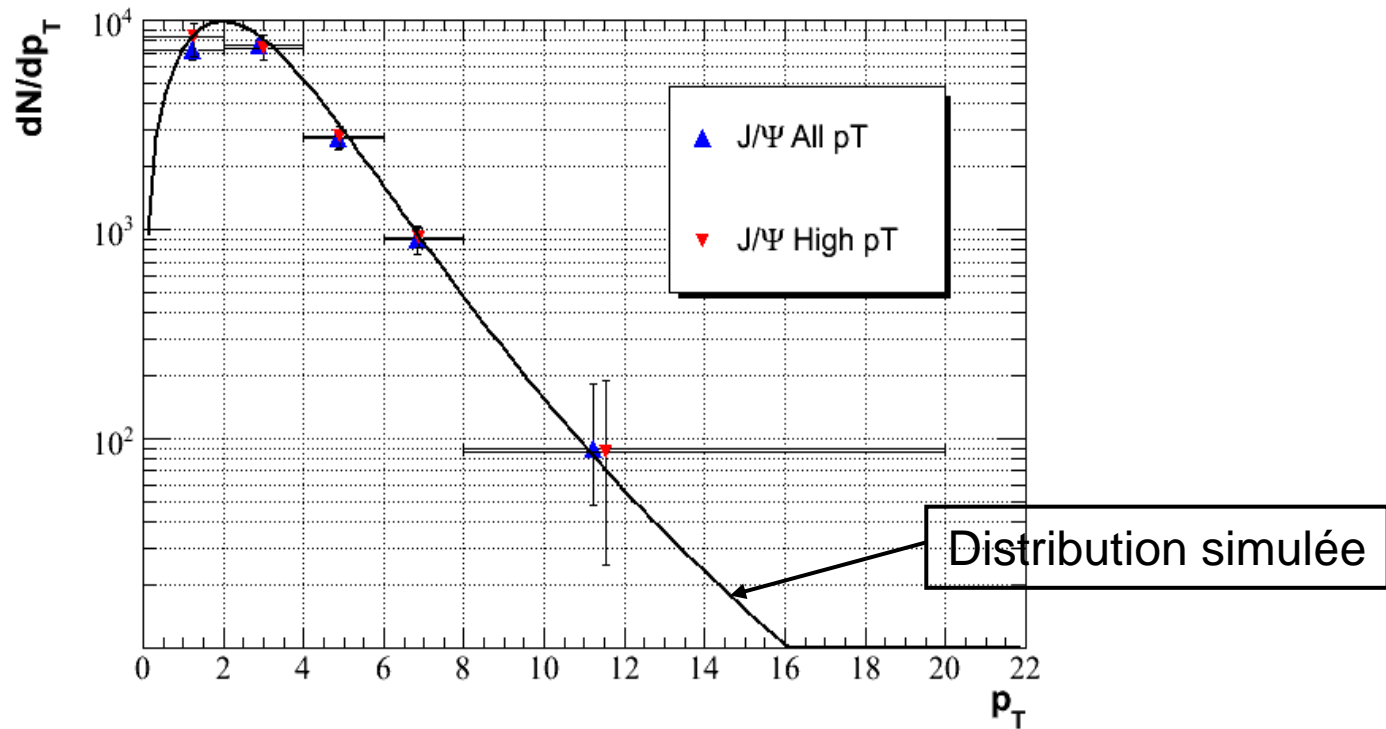


Possibilité d'étudier la polarisation du J/ψ en fonction de la centralité, mais incertitudes systématiques à évaluer

PDC06 : p_T du J/ψ en mode p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV

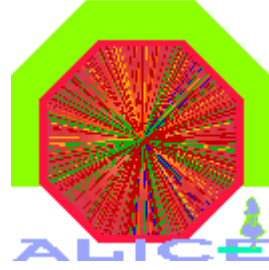


Normalisation 'minimum bias' : $N_{pp} = 2.2 \cdot 10^9$ (≈ 1 LHC-day)

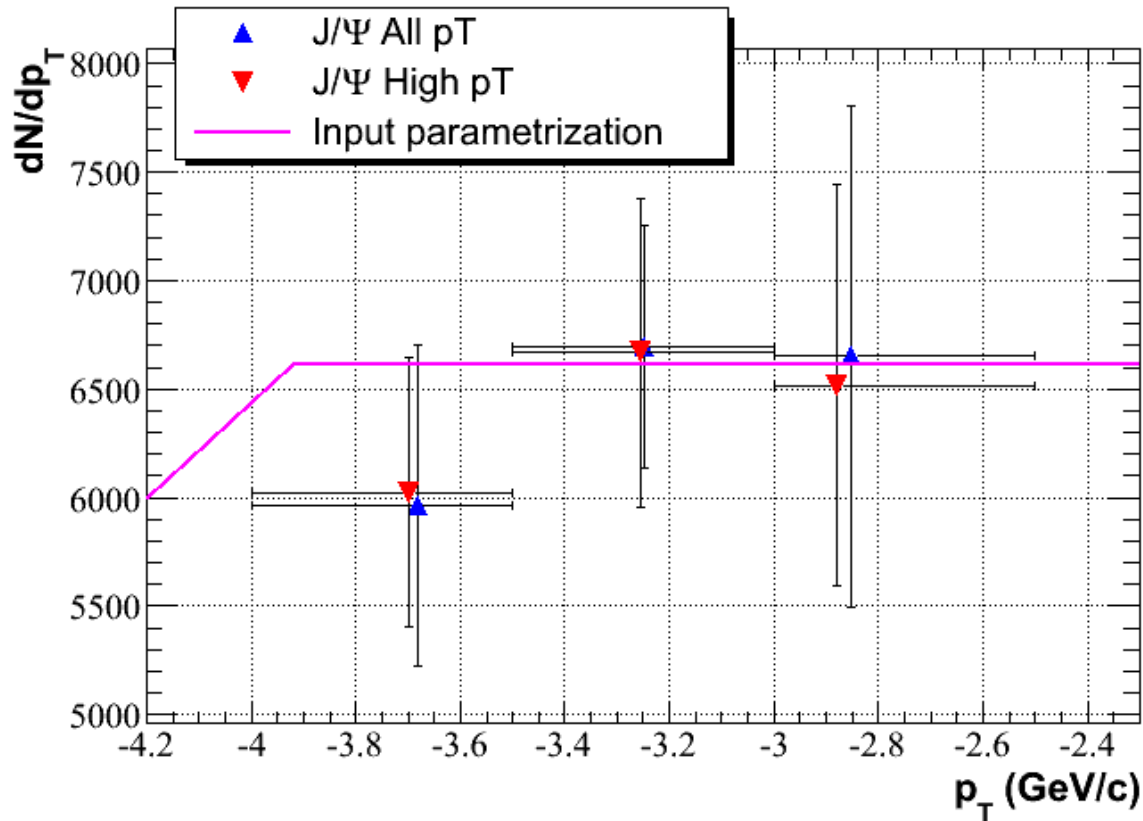


Incertitudes = statistique \oplus fit \oplus systématique (background)

PDC06 : rapidité du J/ ψ en mode p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV

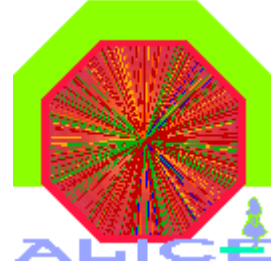


Normalisation 'minimum bias' : $N_{pp} = 2.2 \cdot 10^9$ (≈ 1 LHC-day)

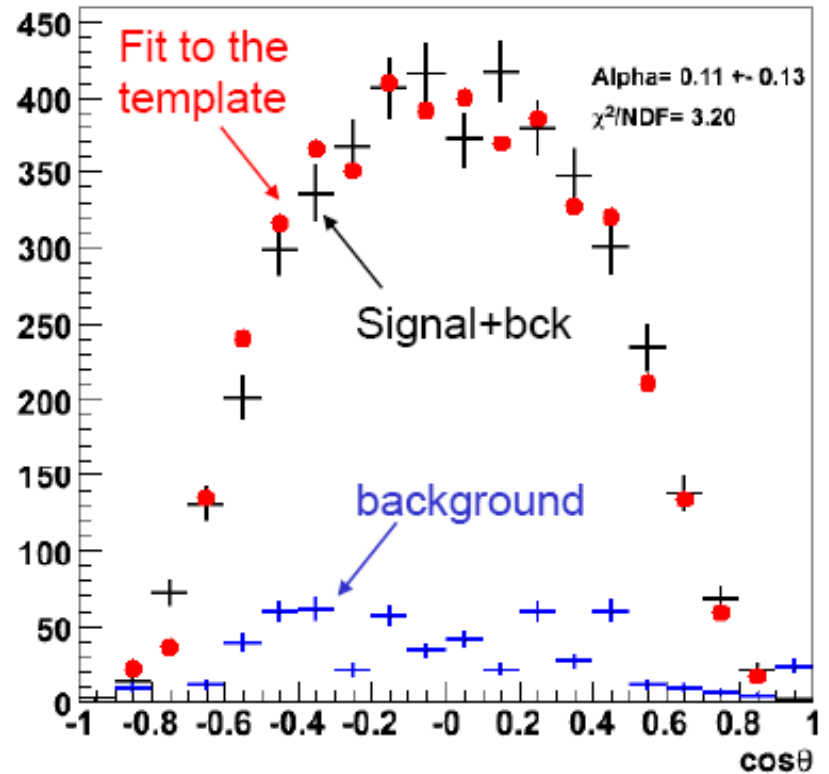
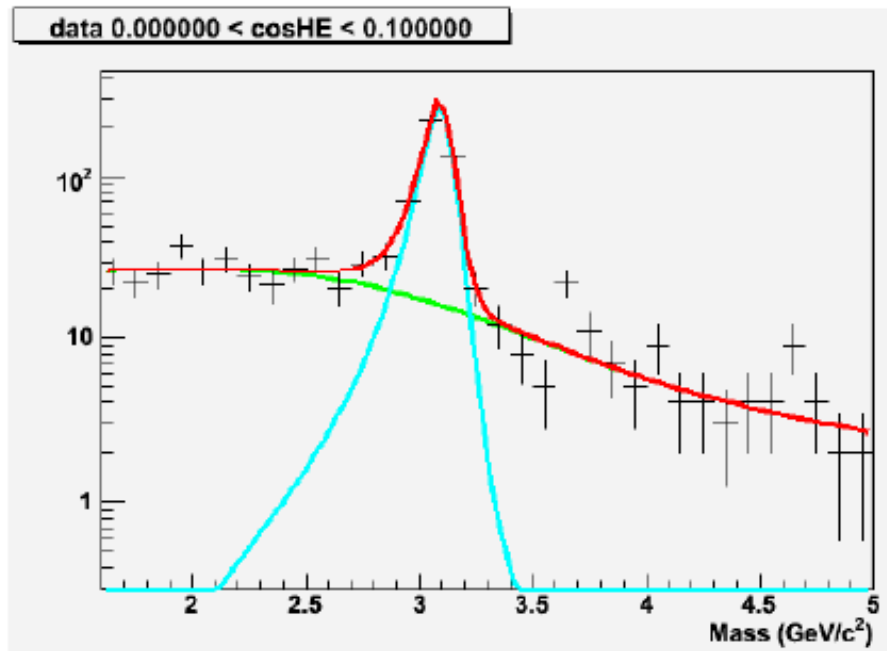


Incertitudes = statistique \oplus fit \oplus systématique (background)

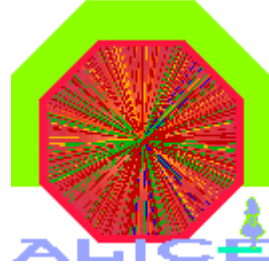
Polarisation du J/ψ avec le PDC06 en mode p-p à $\sqrt{s} = 14$ TeV



Statistique de 7000 J/ψ



Quarkonia et écrantage de couleur dans un QGP 'dynamique'



Conditions de suppression d'un quarkonium :

- temps de formation dans le référentiel du QGP : $t_{\text{form}} < \tau_{\text{QGP}}$
- distance de formation dans le référentiel du QGP : $d_{\text{form}} < r_{\text{QGP}}$
- température de dissociation : $T_D < T_{\text{QGP}}$

Donc pour une paire $b\bar{b}$ produite dans le plan transverse au point $x^\mu = (0, \vec{r}, 0)$, un quarkonium de masse M et de temps propre de formation τ_{form} se forme

au point $x^{\mu'} = (t_{\text{form}}, \vec{r} + \frac{\tau_{\text{form}} \vec{p}_T}{M}, 0)$ avec un quadrimoment $p^{\mu'} = (\sqrt{p_T^2 + M^2}, \vec{p}_T, 0)$,

on doit alors avoir :

$$\circ \sqrt{1 + \frac{p_T^2}{M^2}} \tau_{\text{form}} < \tau_{\text{QGP}}$$

$$\circ \left| \vec{r} + \frac{\tau_{\text{form}} \vec{p}_T}{M} \right| < r_{\text{QGP}}$$