

---

# Étude de la production du $J/\psi$ dans les collisions Au+Au à 200 GeV par paire de nucléons dans l'expérience PHENIX

Vi Nham Tram

28 avril 2006

LLR - École Polytechnique

- **I – Introduction**
  - Le Plasma de Quarks et de Gluons (PQG)
  - Étude du PQG via la mesure des quarkonia
- **II - Principe de la mesure**
  - Détermination de la centralité
  - Mesure du  $J/\psi$  dans PHENIX (détection et reconstruction)
  - Calcul des corrections d'acceptance et d'efficacité
- **III - Résultats expérimentaux et interprétation**
  - Les résultats en p+p et d+Au : effets nucléaires froids
  - Comparaison avec les résultats de NA50
  - Les modèles de suppression et de recombinaison

---

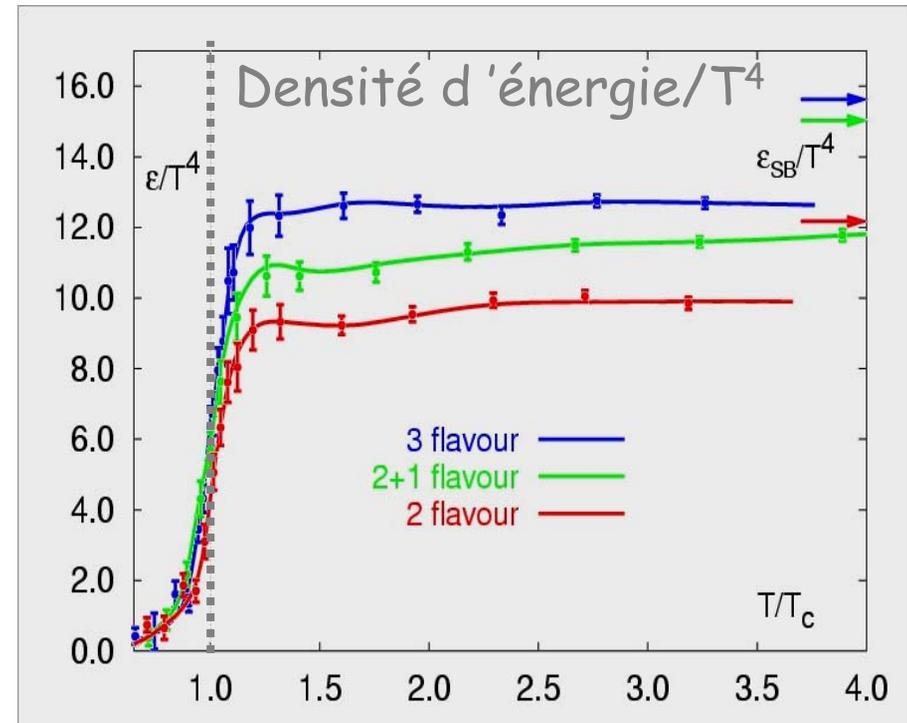
# Partie I

## Introduction

# I- Le Plasma de Quarks et de gluons (PQG)

4

- Historiquement : gaz parfait où quarks et gluons évoluent librement
- État de la matière prédit par les calculs de QCD sur réseaux
- Transition de phase entre gaz hadronique et PQG à  $T_c \sim 160$  MeV



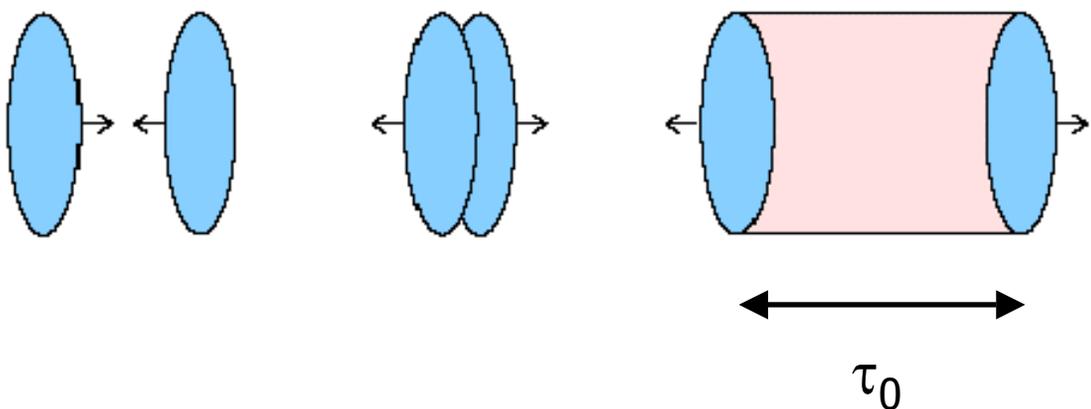
Karsch et al, hep-lat/0106019  
Lect. Notes Phys.583 (2002) 209

# I- Les collisions d'ions lourds relativistes (1)

5

- Haute densité d'énergie :  $\sim 1 \text{ GeV/fm}^3$   
(matière nucléaire normale  $\sim 0,1 \text{ GeV/fm}^3$ )
- Accessible avec des collisions d'ions lourds relativistes

Densité d'énergie : formule de Bjorken

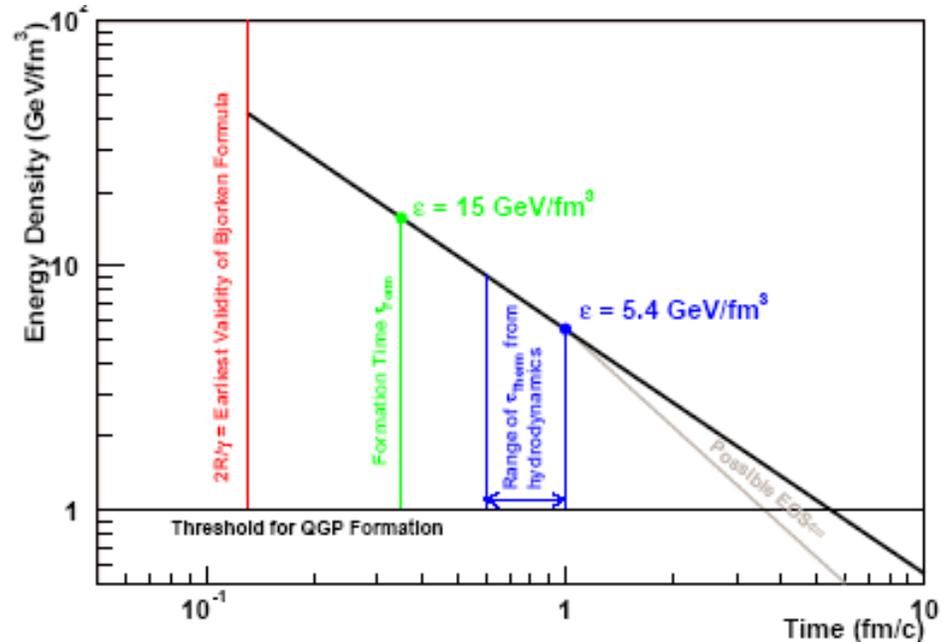

$$\mathcal{E}_{Bj} = \frac{1}{A_{\perp} \tau_0} \left. \frac{dE_t}{dy} \right|_{y=0}$$

# I – Les collisions d'ions lourds relativistes (2)

Machines	Faisceaux	$\sqrt{s}$ (GeV)	$\epsilon_{bj}$ (GeV/fm <sup>3</sup> ) Pour $\tau_0 = 1$ fm/c
BNL AGS (1993)	Au+Au	5	1,5
CERN SPS (1994)	Pb+Pb	17	3,9
<b>BNL RHIC (2001)</b>	<b>Au+Au</b>	<b>200</b>	<b>5,4</b>
CERN LHC (2007)	Pb+Pb	5500	10

RHIC Au+Au 200 GeV

$\tau_{PQG}$  5 à 7 fm/c



# I- Modification de la production des quarkonia

---

7

Effet du PQG sur les quarkonia de saveurs lourdes  
( $J/\Psi$ ,  $\Psi'$ ,  $\chi_c$ , famille des  $Y$ ...)

- Suppression par :
  - Écrantage de couleur (charges de couleur déconfinées modifient le potentiel inter-quark)
  - Interactions des  $J/\Psi$  avec les gluons du milieu déconfiné
- Augmentation par :
  - Recombinaison des quarks dans le milieu déconfiné grâce à la mobilité des quarks + production importante des quarks lourds

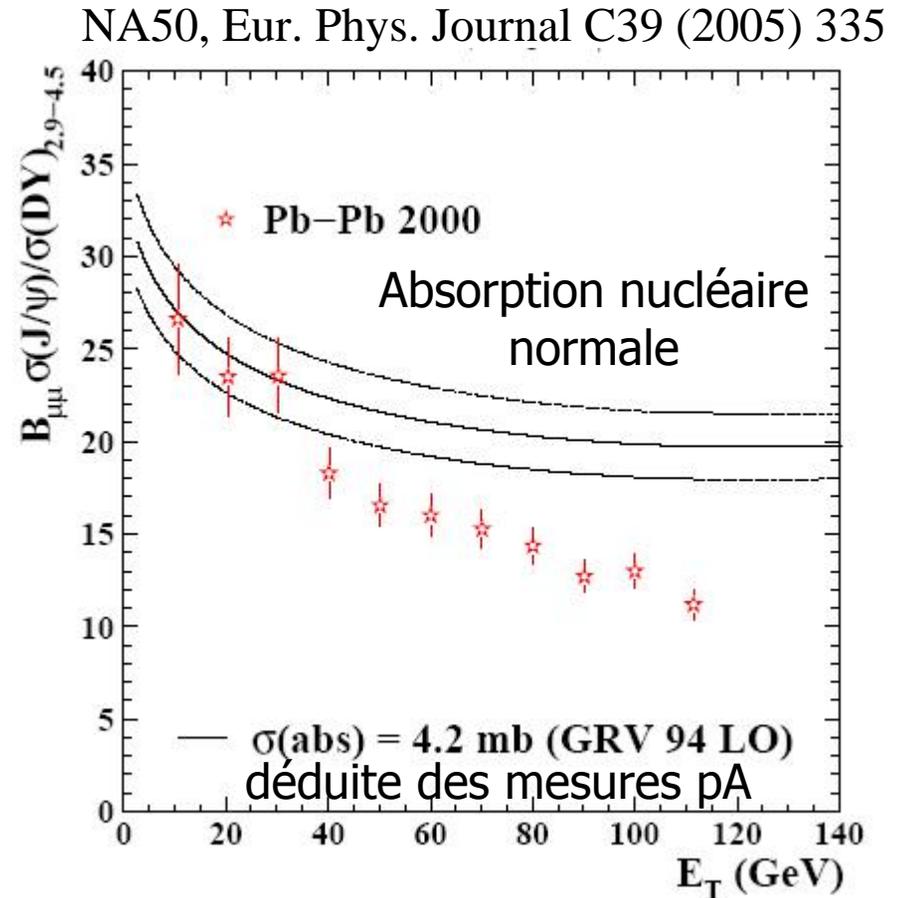
# I- $J/\Psi \rightarrow$ dilepton

---

- Produit très tôt
  - Sonde les premiers instants de la collision
- Temps de vie long  $\sim 10^3$  fm/c  
(temps de la collisions  $\sim 1$  fm/c)
  - Sonde la matière nucléaire traversée (projectiles)
  - Éventuellement sonde la formation du plasma
- Énergie de liaison grande vs hadron  $\rightarrow$  taille petite
  - Peu sensible à la phase hadronique
- Désintégration leptonique (non sensible à l'Int. Forte)
  - Conservation des informations du  $J/\Psi$

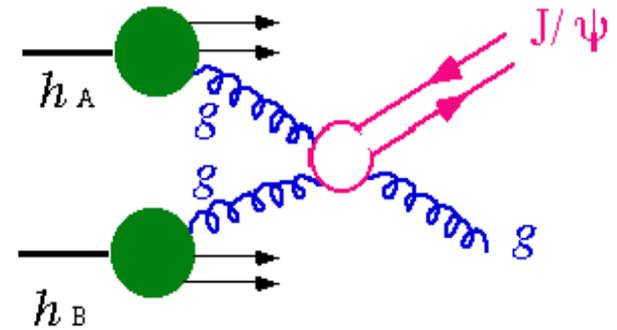
# I- Premières mesures au SPS

- Mesure d'une *suppression anormale* du  $J/\Psi$  par NA50 dans les collisions Pb-Pb à  $\sqrt{s} = 17,3$  GeV
- Néanmoins, bonne description par modèle autre que PQG (co-voyageurs)
- Suppression observée par données préliminaires de NA60 In-In à  $\sqrt{s} = 17,3$  GeV



# I – Hadro-production du $J/\Psi$ au RHIC

- Production du  $J/\Psi$  dominée par la fusion de gluons
- Alimentation par les résonances plus lourdes :  
 $\chi_c$  ( $\sim 30\%$ ) et  $\Psi'$  ( $\sim 10\%$ )



La production de  $J/\Psi$  en proton-proton est notre ligne de référence

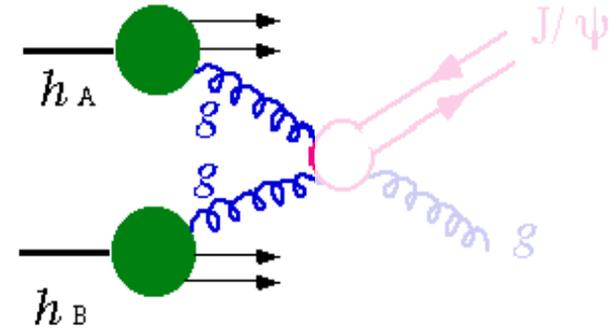
Production AA  $\sim$  pp  $\times$   $N_{\text{coll}}$

\*  $N_{\text{coll}}$  est le nombre de collisions nucléon-nucléon incohérentes

# I- Effets nucléaires froids

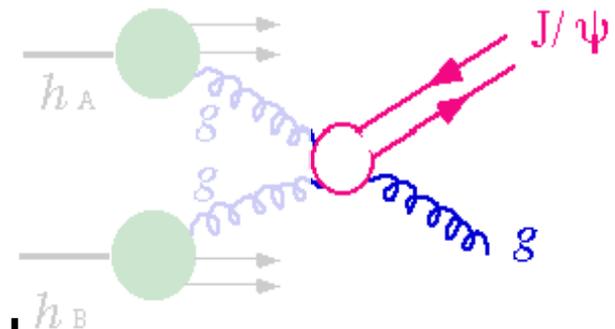
## – État initial :

- Modification des fonctions de distribution de gluons dans les noyaux (anti-shadowing et shadowing),
- Diffusions multiples des partons initiaux (effet Cronin)



## – État final :

- Absorption nucléaire normale  
 $c\bar{c} + N \rightarrow \text{charme ouvert}$



Production AA  $\neq$  pp x  $N_{\text{coll}}$

La production de  $J/\psi$  en pA permet d'étudier ces effets nucléaires froids

---

# Partie II

## Principe de la mesure

# II – Collisionneur RHIC



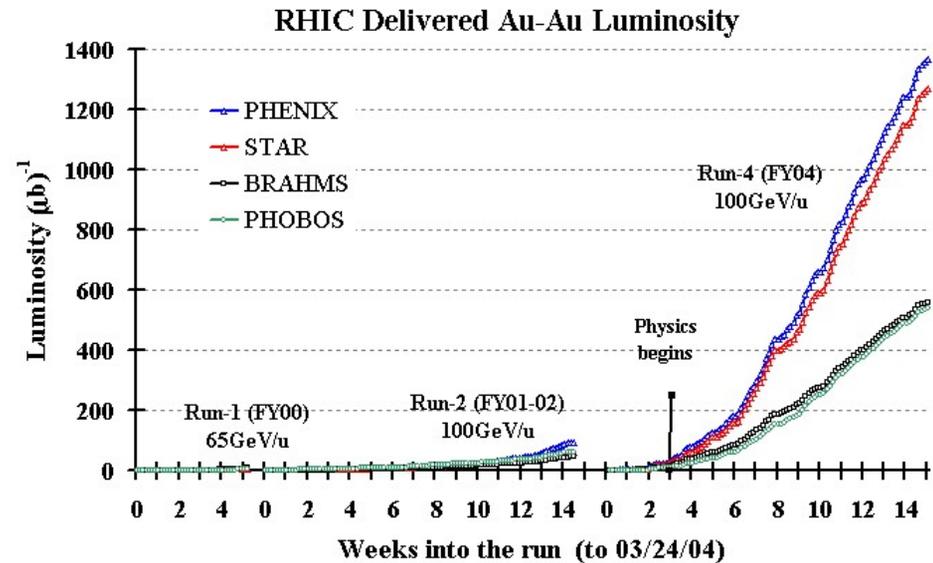
## II- Prise de données de PHENIX au RHIC

Année	Système (ions)@ $\sqrt{s}$	Luminosité Intégrée	J/ $\Psi$ (ee + $\mu\mu$ )
2001	Au + Au @ 130 GeV	1 $\mu\text{b}^{-1}$	
2002	p + p @ 200 GeV	0,15 $\text{pb}^{-1}$	46 + 66
	Au + Au @ 200 GeV	24 $\mu\text{b}^{-1}$	13 (ee)
2003	p + p @ 200 GeV	350 $\text{nb}^{-1}$	100 + 420
	d+Au @200 GeV	2,74 $\text{nb}^{-1}$	300 + 1400
2004	Au + Au @ 200 GeV	240 $\mu\text{b}^{-1}$	$\sim 800 + \sim 5000$
	Au + Au @ 63 GeV	9,1 $\mu\text{b}^{-1}$	13 (ee)
	p + p @ 200 GeV	324 $\text{nb}^{-1}$	
2005	Cu + Cu @ 200 GeV	3,06 $\text{nb}^{-1}$	900 + 10 000
	Cu + Cu @ 63 GeV	190 $\text{mb}^{-1}$	$\sim 200$ ( $\mu\mu$ )
	p + p @ 200 GeV	3,8 $\text{pb}^{-1}$	$\sim 11200$ ( $\mu\mu$ )
2006	p + p @ 200 GeV		

# II - Prise de données or-or à $\sqrt{s} = 200$ GeV du RUN 4

15

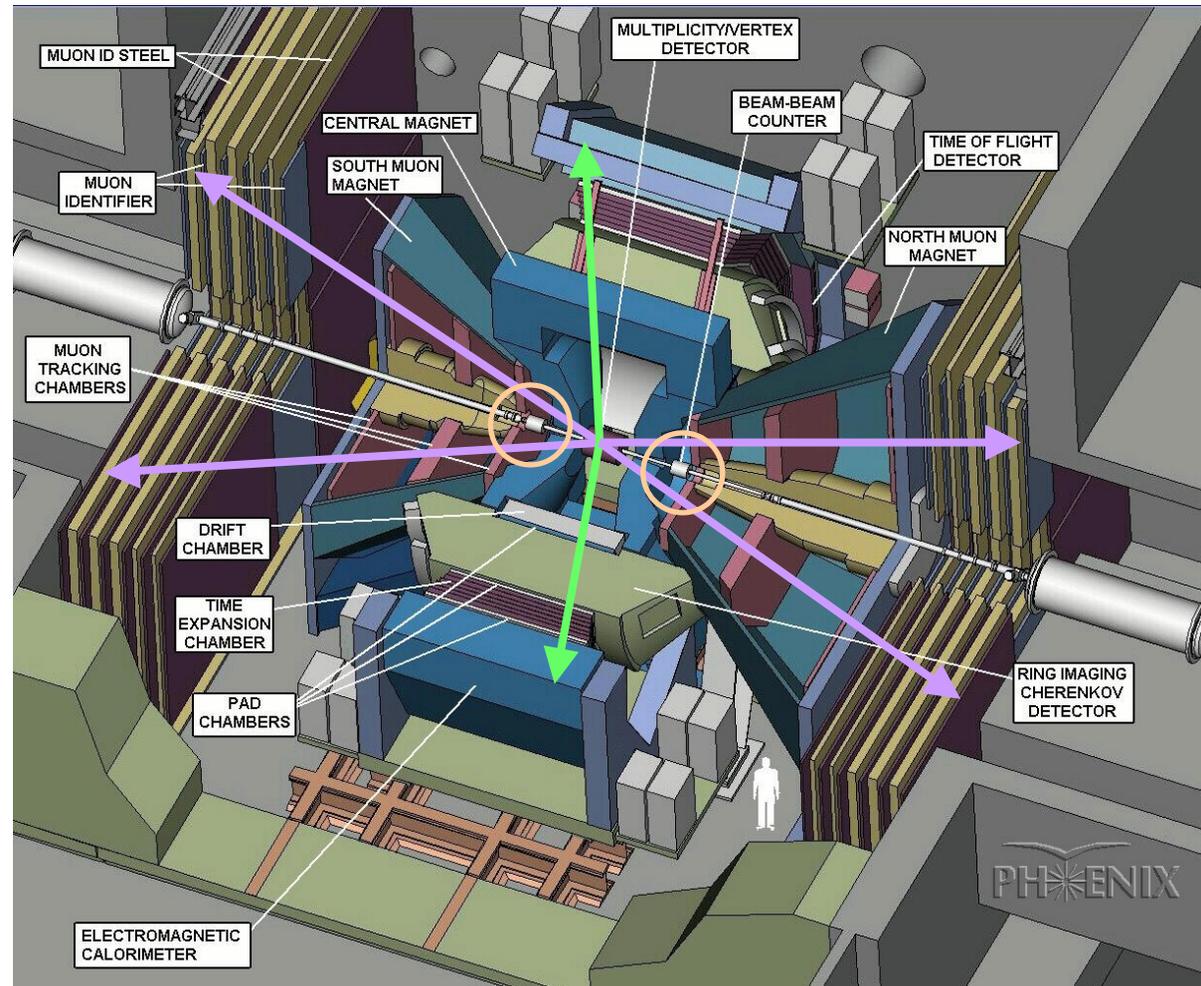
- 12 semaines de prise de données (2004)
- $L = 241 \mu\text{b}^{-1}$  soit  $1,53 \cdot 10^9$  collisions ( $24 \mu\text{b}^{-1}$  au Run 2)
- 270 Téra-octets sur bande



- Système de déclenchement niveau 1 dit *minimum biais* (MB) efficacité = 92 %
- Utilisation d'un système de déclenchement niveau 2 hors-ligne dans l'analyse des  $J/\Psi$

# II - Détection du $J/\Psi$ dans l'expérience PHENIX

16



$$J/\Psi \rightarrow e^+e^-$$

identification avec RICH, EMCal

Mesure de p avec chambres à dérive, pixels pad chambers

- $|y| < 0.35$
- $P_e > 0,2 \text{ GeV}/c$
- $\Delta\Phi = \pi$

$$J/\Psi \rightarrow \mu^+\mu^-$$

identification avec MuID

Mesure de p avec MuTr

- $1,2 < |y| < 2,4$
- $P_\mu > 2 \text{ GeV}/c$
- $\Delta\Phi = 2\pi$

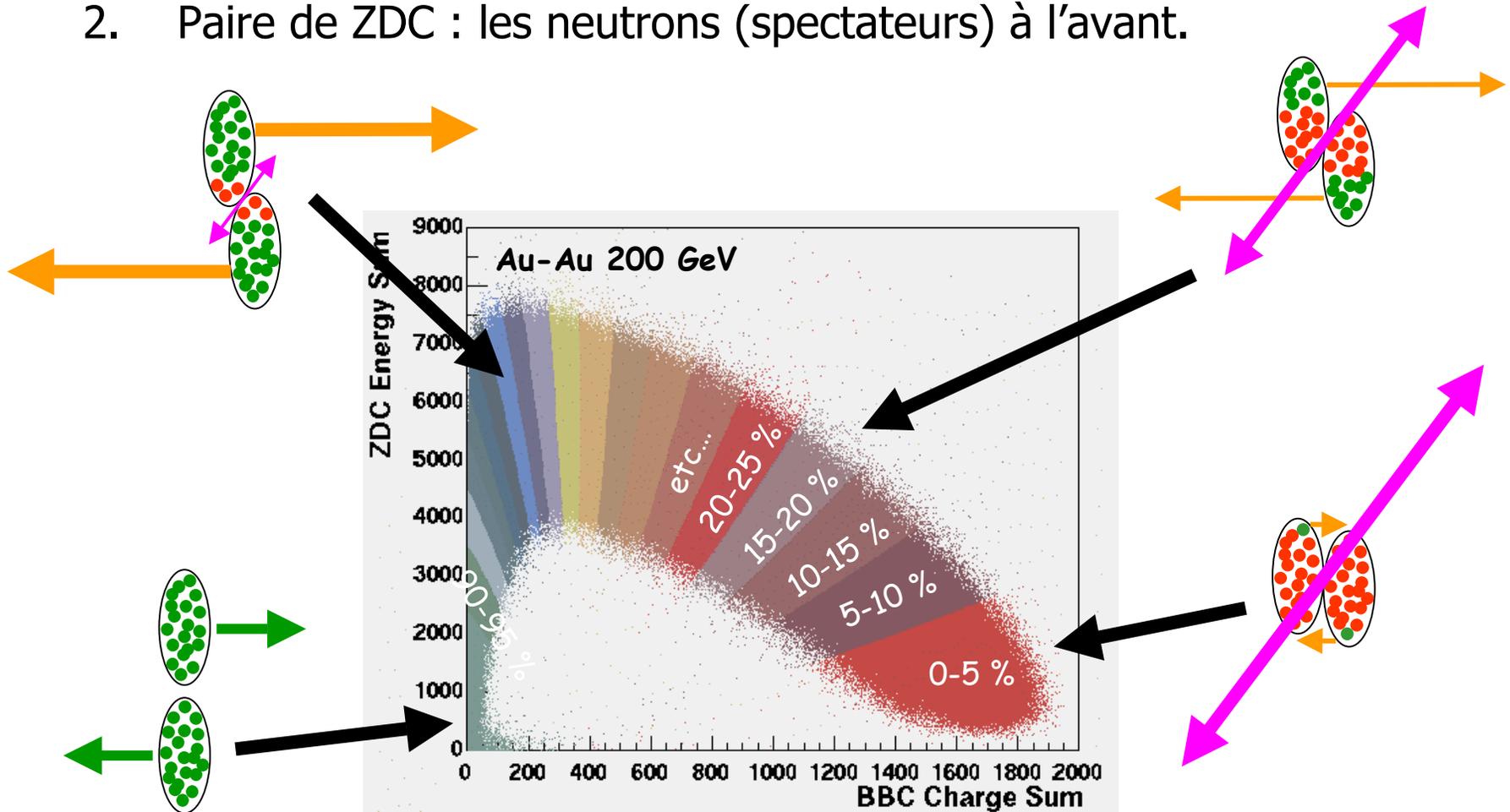
Variables globales

BBC  $3 < |\eta| < 3,9$

# II - Mesure de la centralité (reliée à la densité d'énergie)

Corrélation des mesures expérimentales :

1. Paire de BBC : mesure les particules chargées produites,
2. Paire de ZDC : les neutrons (spectateurs) à l'avant.



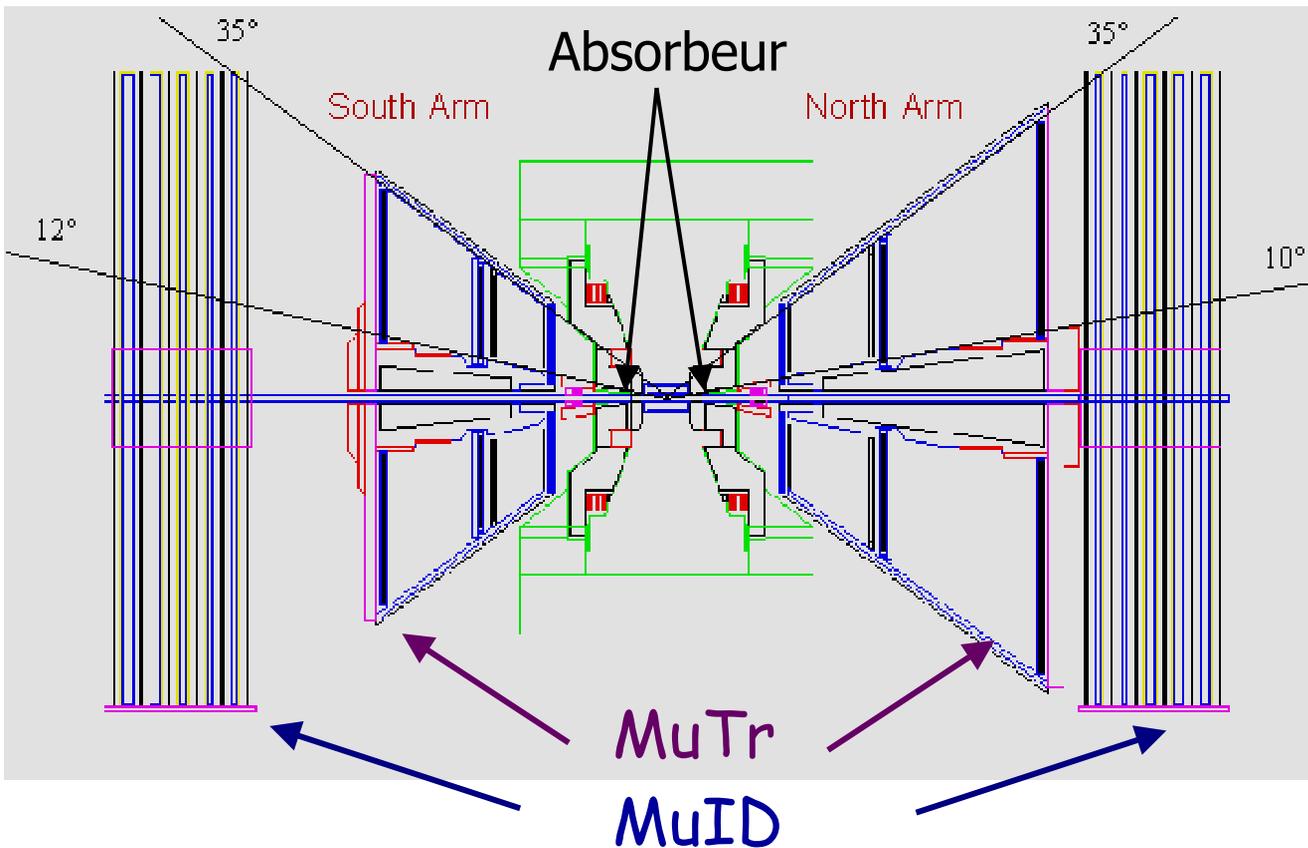
## II - Centralité (2)

---

Modèle de Glauber (géométrie + densité) permet de relier la centralité (en % de section efficace totale)  
↔ paramètre d'impact  $b$ ,  $N_{\text{part}}$  et  $N_{\text{coll}}\dots$

## II - Bras muons : MuID + MuTr

19



Acceptance :

Bras sud :

$$-2,2 < y < -1,2$$

Bras nord :

$$1,2 < y < 2,4$$

$$0 < \varphi < 2 \pi$$

$$|p| > 2 \text{ GeV}/c$$

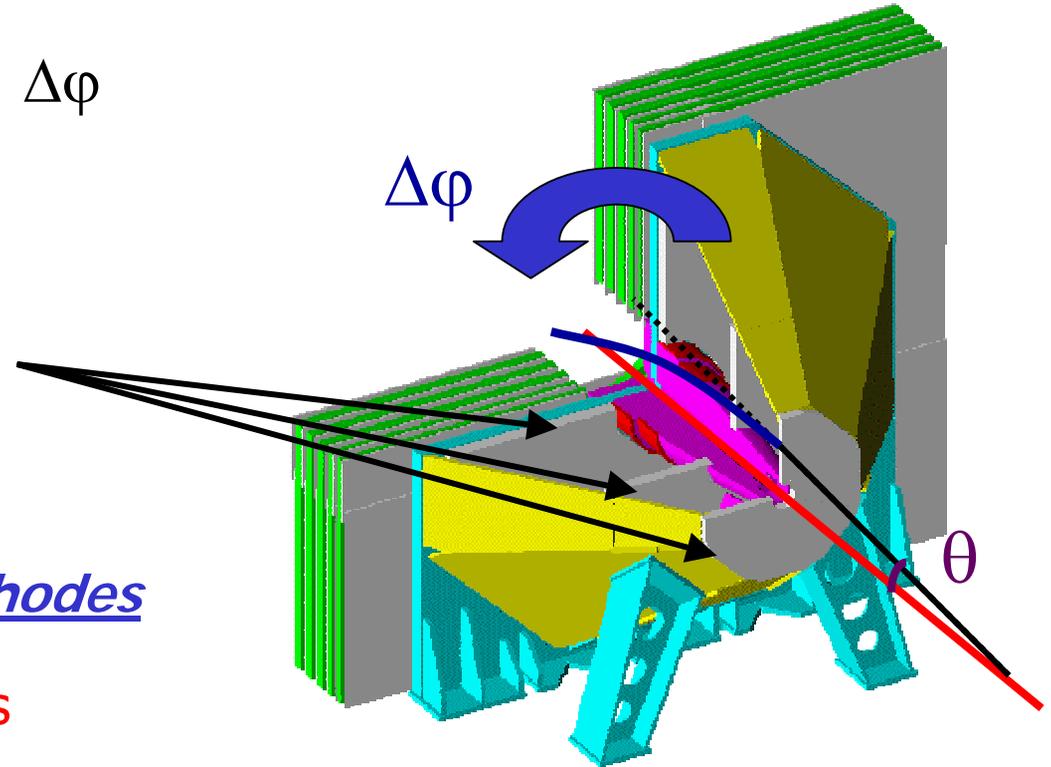
Absorbeur (20 cm de laiton et 60 cm de fer) : réduction des pions, kaons dans les bras muons (facteur de réjection de 100)

# II - Spectromètre à muons

Champ magnétique radial :  $\Delta\varphi$

$\Delta\varphi$  &  $\theta \Rightarrow P$  de la particule

3 stations de mesure



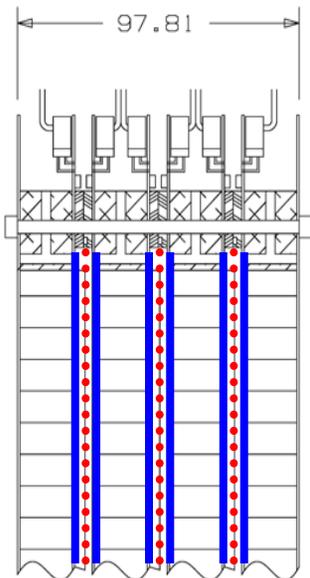
chambre :

- 2 plans de cathodes
- 1 plan d'anodes

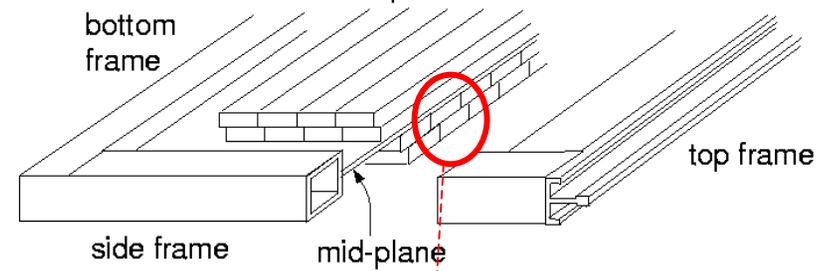
Mélange de gaz : Ar 50%, CO<sub>2</sub> 30% et CF<sub>4</sub> 20%

HT ~ 1800 V

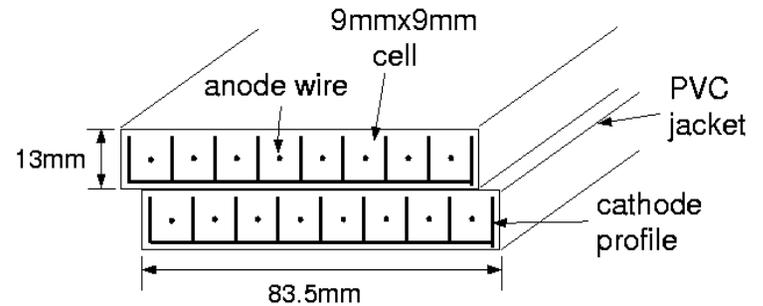
Lecture de (6+6+4) plans de cathodes/bras ~ 22 000 canaux



# II - Identificateur à muons



Cross section of the MuID panel



Cross section of the plastic tube(2-pack)

5 « gaps » par bras constitués de plans de mesures orientés verticalement & horizontalement (pas de  $\sim 9$  cm) et entrelacés avec plans d'absorption

# II - Reconstruction des trajectoires

---

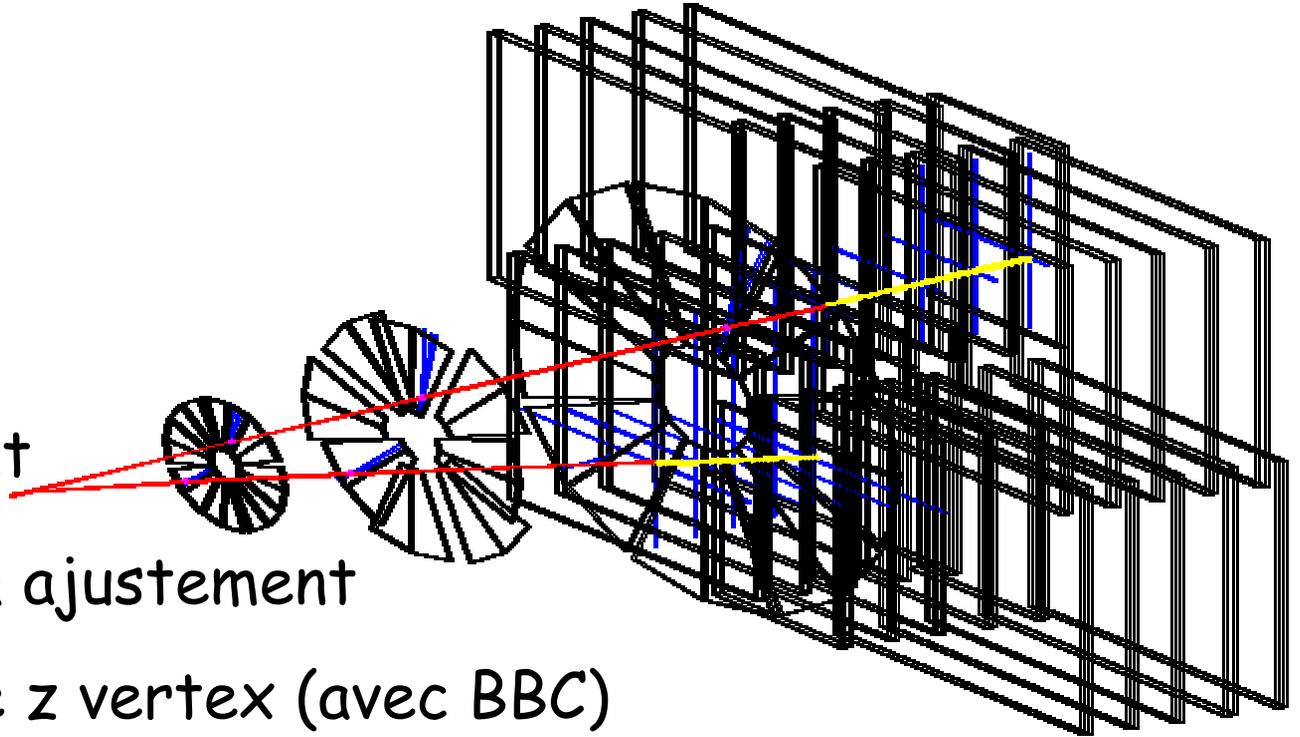
MuID : routes

MuTr : segment

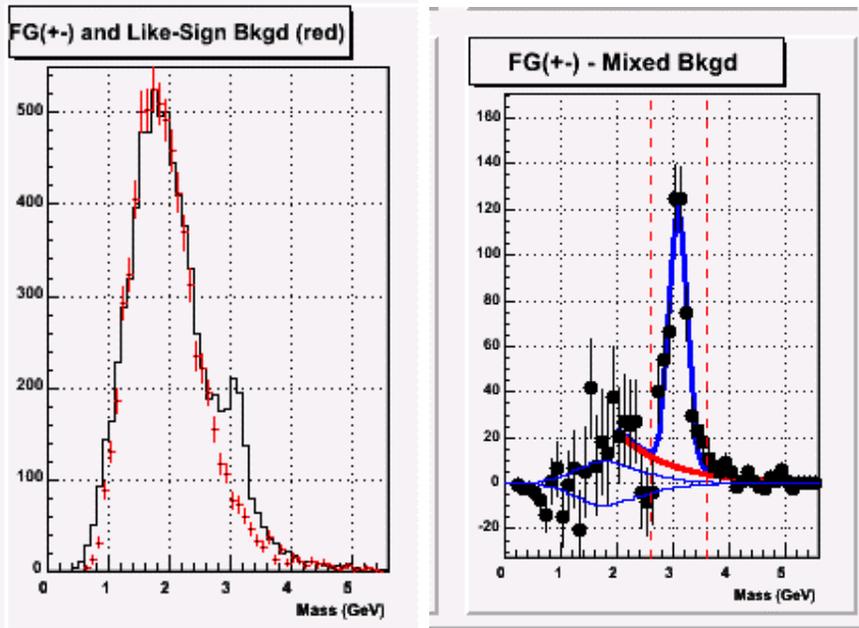
Construction & ajustement

Ajustement de z vertex (avec BBC)

Lissage - ré-association des routes



# II – Extraction du signal du J/Ψ



- Masse invariante  $\mu\mu$

$$M = \sqrt{(E_{\mu 1} + E_{\mu 2})^2 - (\vec{P}_{\mu 1} + \vec{P}_{\mu 2})^2}$$

- Paires de signes opposés
  - Paires de même signe
  - Signal du J/Ψ par soustraction du bruit de fond combinatoire :  
 $\text{Signal} = N_{+-} - \text{bdf}_{\text{combiné}}$
  - Ajustement gaussien (J/Ψ) + exponentiel (bruit de fond résiduel)
  - *Corriger de l'acceptance et des inefficacités*
- Taux de production

## II - Corrections d'acceptance & d'efficacité

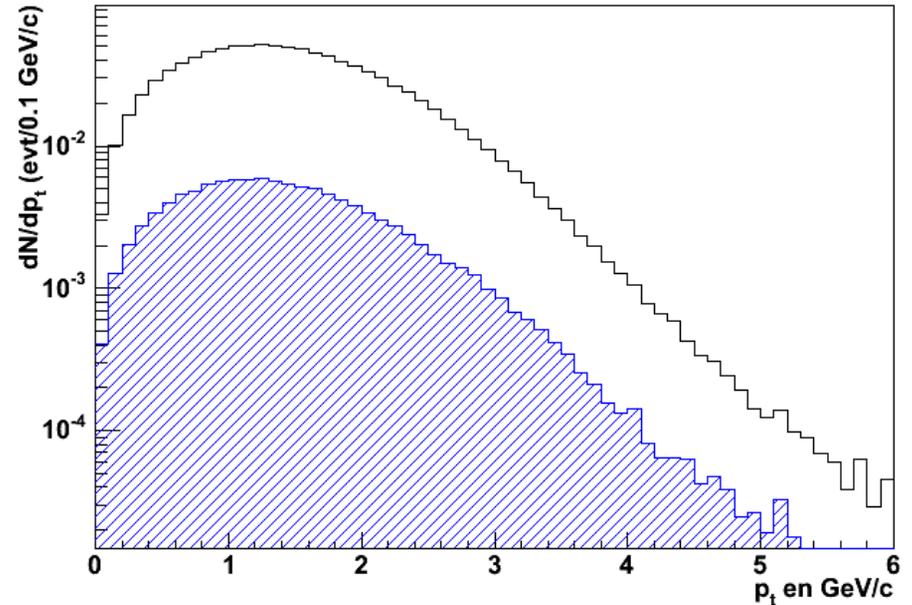
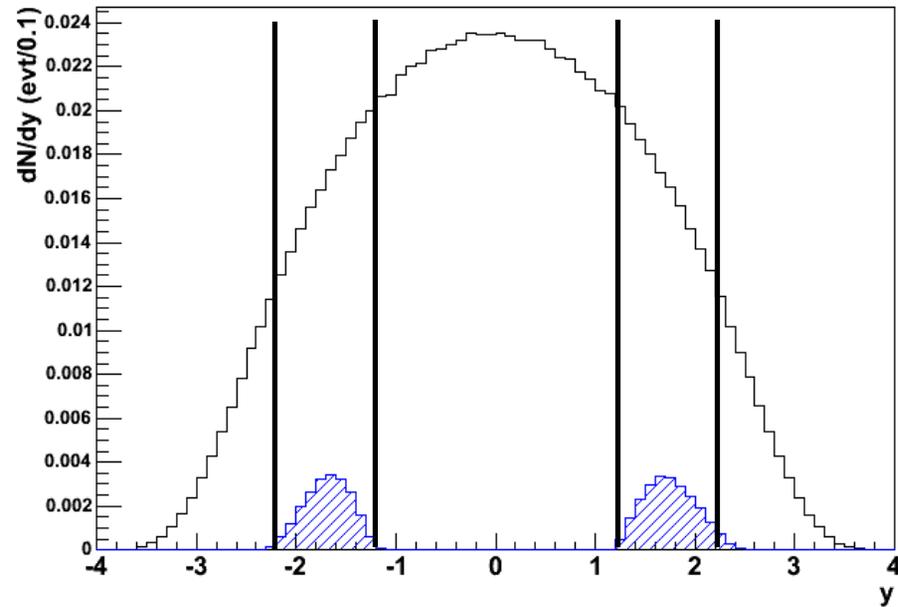
---

24

- Génération de  $J/\Psi$  par PYTHIA sur  $4\pi$  sr
- Mélange avec des événements vrais MB
  - Correspondance en z vertex
  - Réponse réaliste des détecteurs (gain, HT)
- Mesure des efficacités
  - En fonction des variables cinématiques
  - Dépendent de la centralité

acceptance & niveau 2 & reconstruction  
& coupures d'analyse

# II - Terme d'acceptance

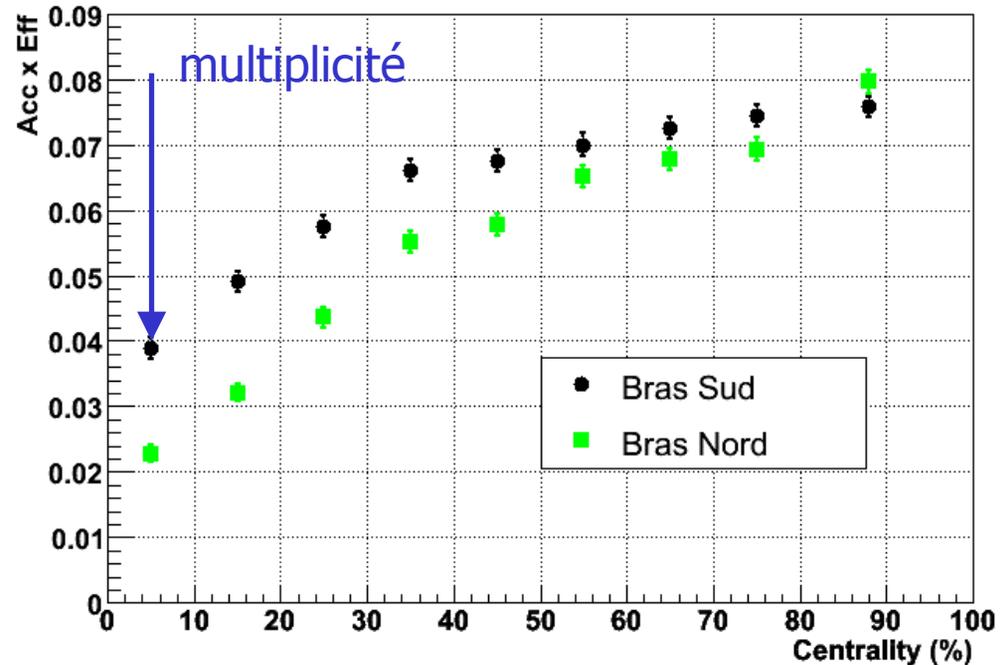


Distribution initiale (PYTHIA)  
Distribution des  $J/\psi$  dans  
l'acceptance

}  $\sim 13\%$  pour chaque bras  
( $1,2 < |y| < 2,2$ )

## II – Corrections finales

- Acceptance,
- Niveau 2,
- Reconstruction
- Coupures d'analyse



Multiplicité différente entre  
les bras sud et nord

---

Partie III  
Résultats expérimentaux  
Interprétation

# III - Quelques variables...

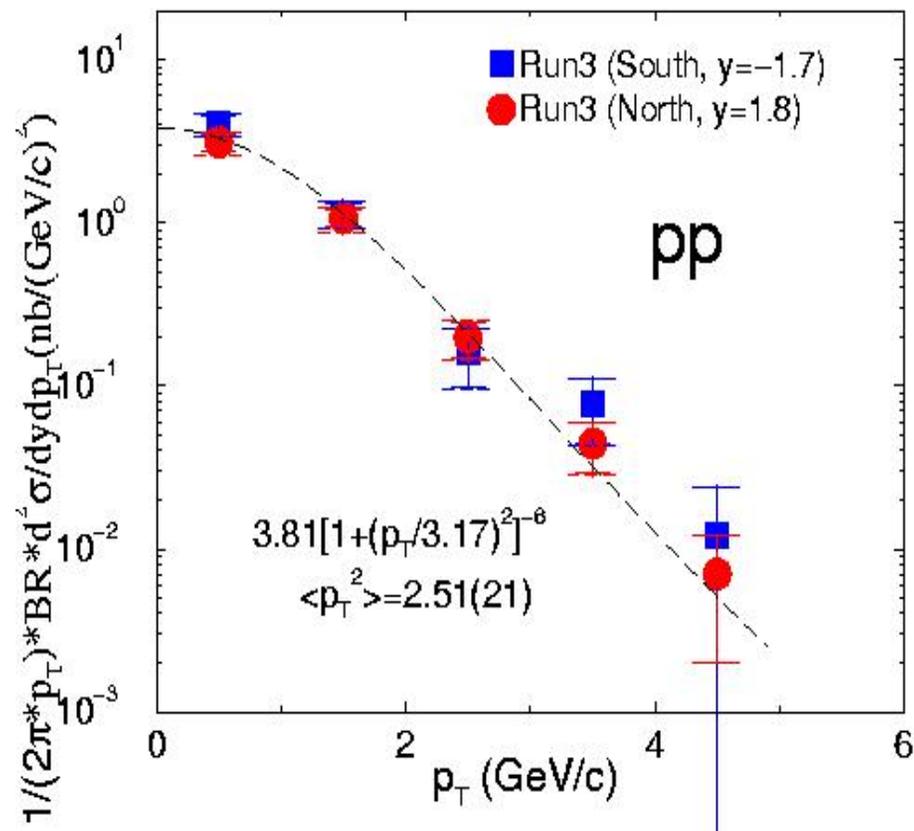
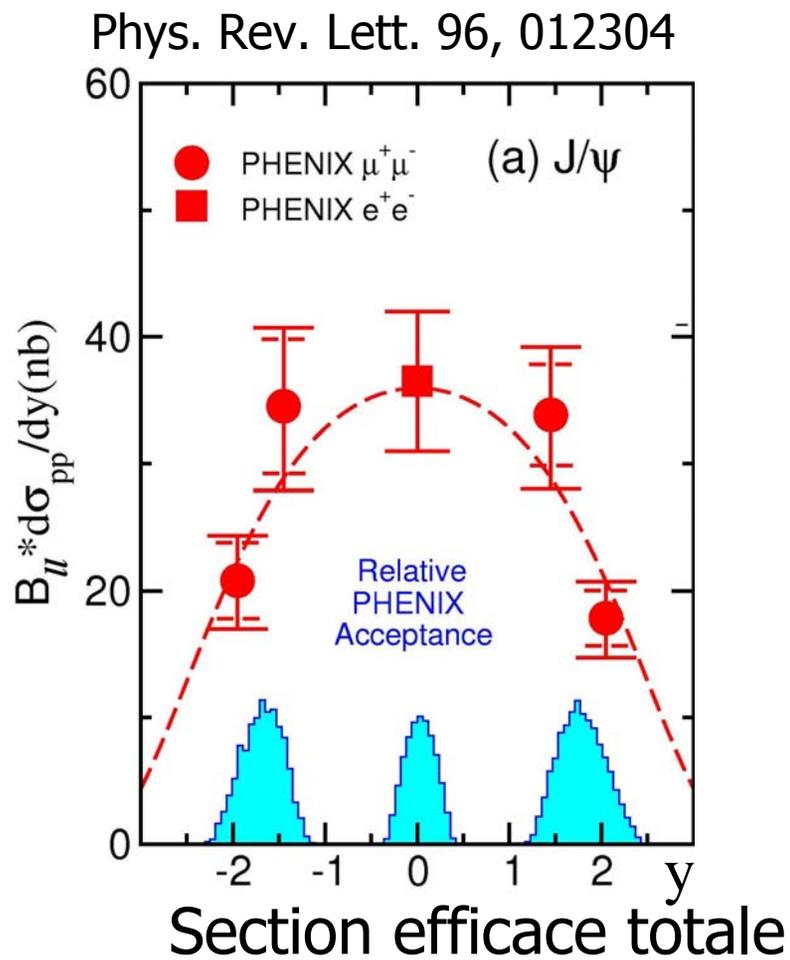
---

- Variables reliées à la centralité :
  1.  $N_{\text{part}}$  : nombre de nucléons participants à la collision
  2.  $N_{\text{coll}}$  : nombre de collisions nucléon-nucléon
  3.  $L$  : longueur de matière nucléaire traversée
  4.  $\varepsilon_{\text{Bj}}$  : densité d'énergie (formule de Bjorken)
- Facteur de modification nucléaire :

$$R_{AA} = \frac{dN^{AA}/dy}{dN^{PP}/dy \times \langle N_{\text{coll}} \rangle}$$

compare la production en AA vs pp x  $\Sigma$  collisions incohérentes

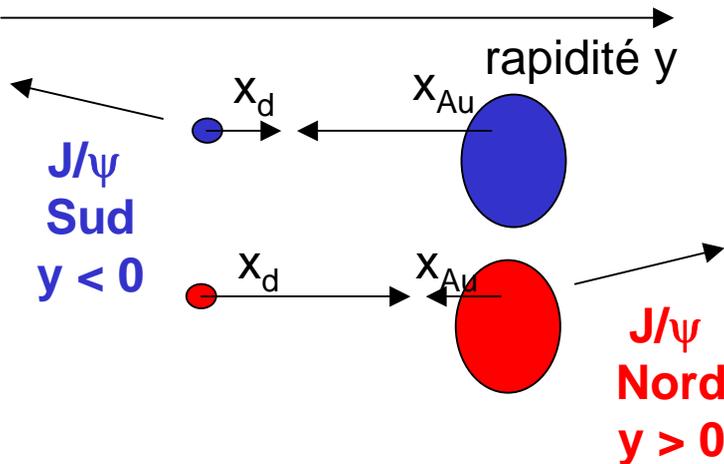
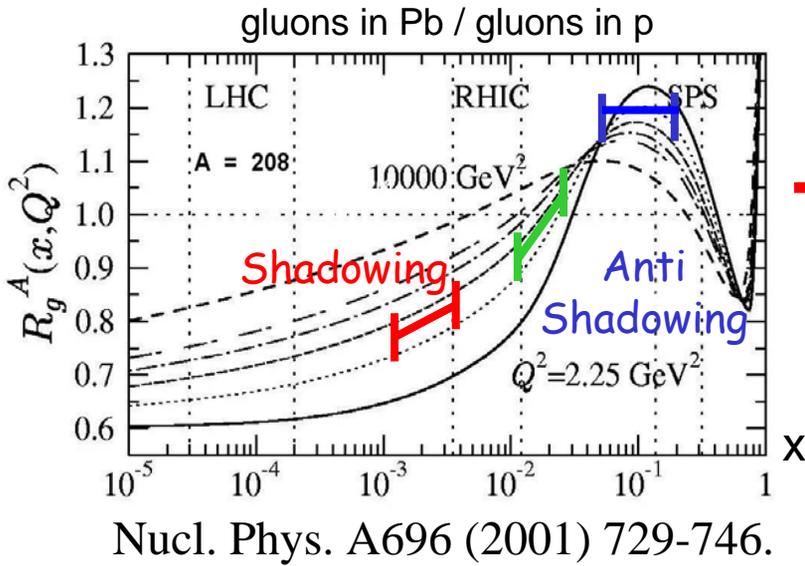
# III – Résultats en p+p



$$\frac{1}{2\pi p_t} \frac{d\sigma}{dp_t} = A[1 + (p_t / B)^2]^{-6}$$

$$B \cdot \sigma = 2,61 \pm 0,20 \pm 0,26 \mu\text{b} \quad \langle p_t^2 \rangle = 2,51 \text{ (GeV/c)}^2$$

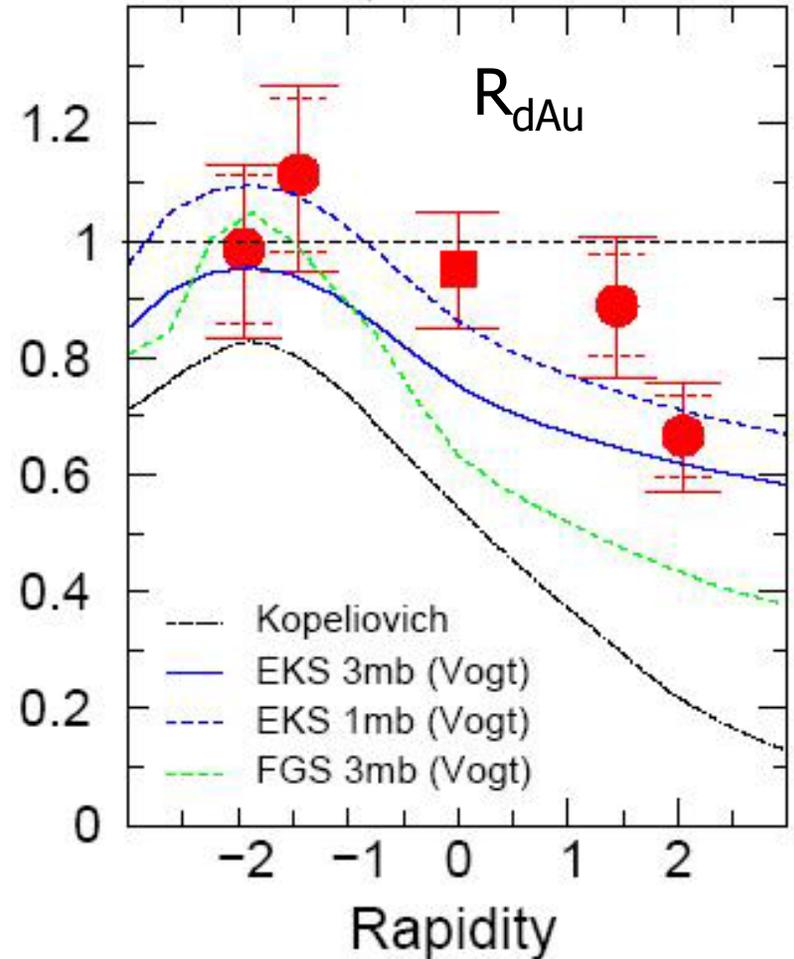
# Résultats en d+Au effets nucléaires froids



$y < -1,2$  : grand  $x_{Au} \sim 0,090$

$y \sim 0$  : intermediaire  $x_{Au} \sim 0,020$

$y > 1,2$  : petit  $x_{Au} \sim 0,003$



# III – Résultats en d+Au (2)

Petite dépendance en centralité

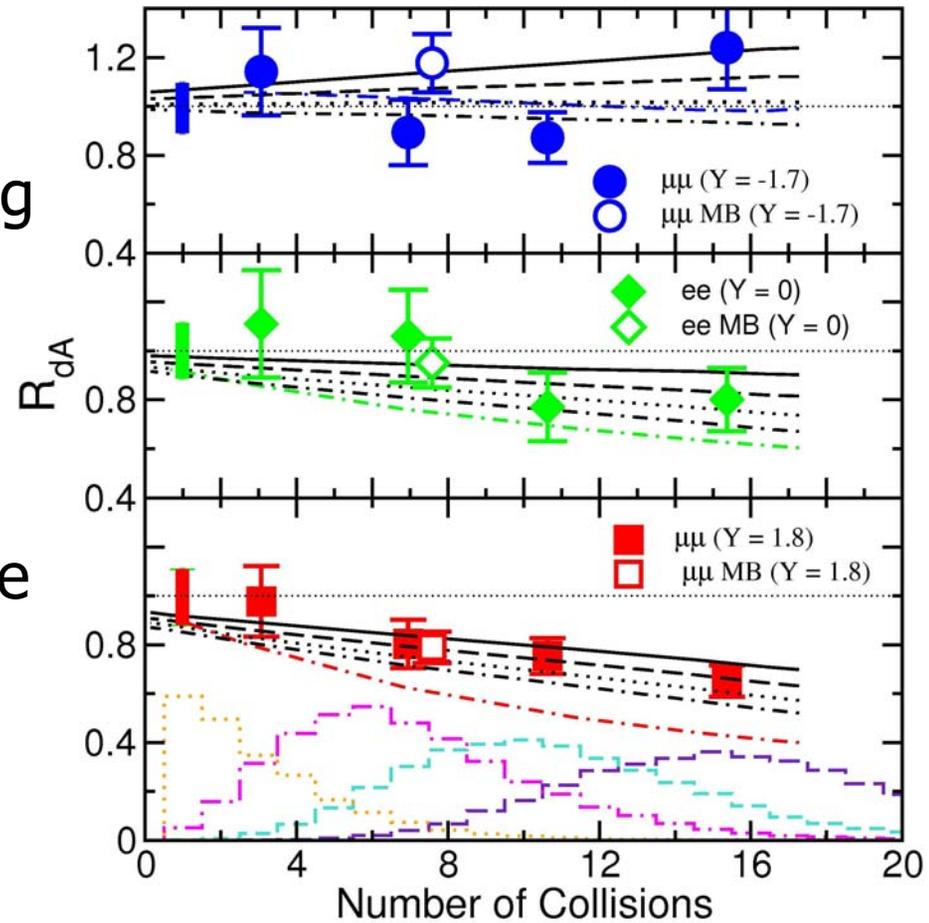
Modèles absorption + shadowing

- shadowing EKS98
- $\sigma^{abs} = 0$  à 3 mb

$\sigma^{abs} = 1$  mb donne une meilleure description

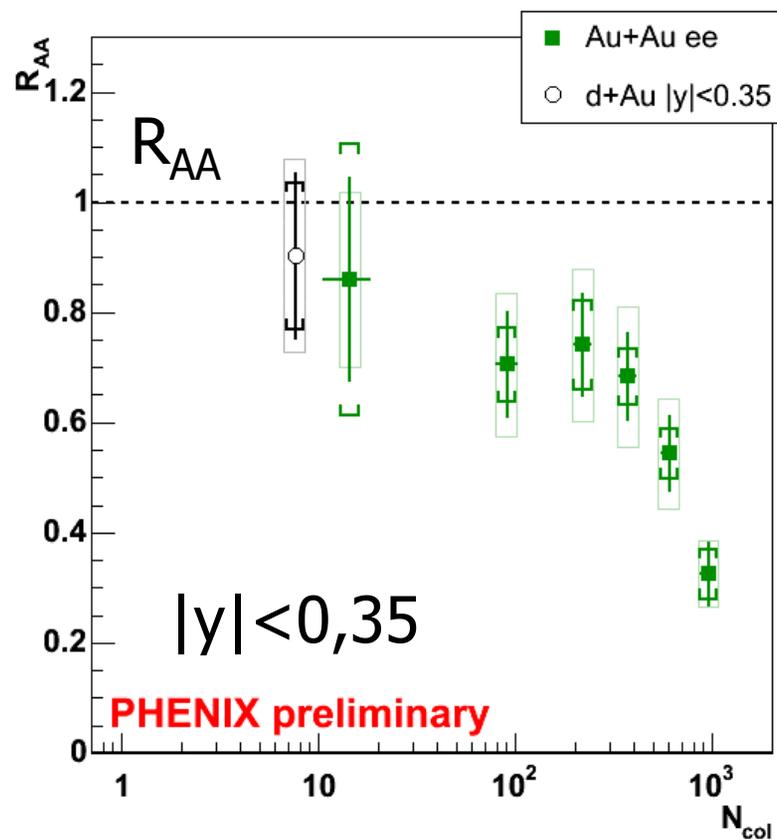
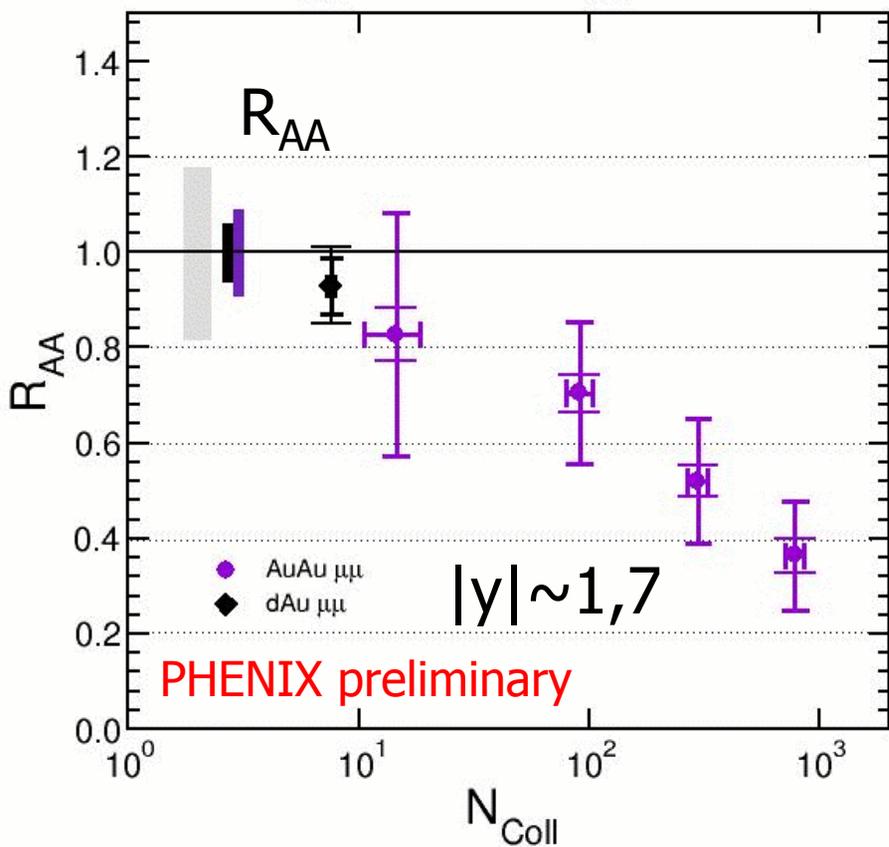
$\sigma^{abs} = 3$  mb est une limite supérieure

(Courbe rouge FGS shadowing et  $\sigma^{abs} = 3$  mb)



Faible shadowing et faible absorption nucléaire observée

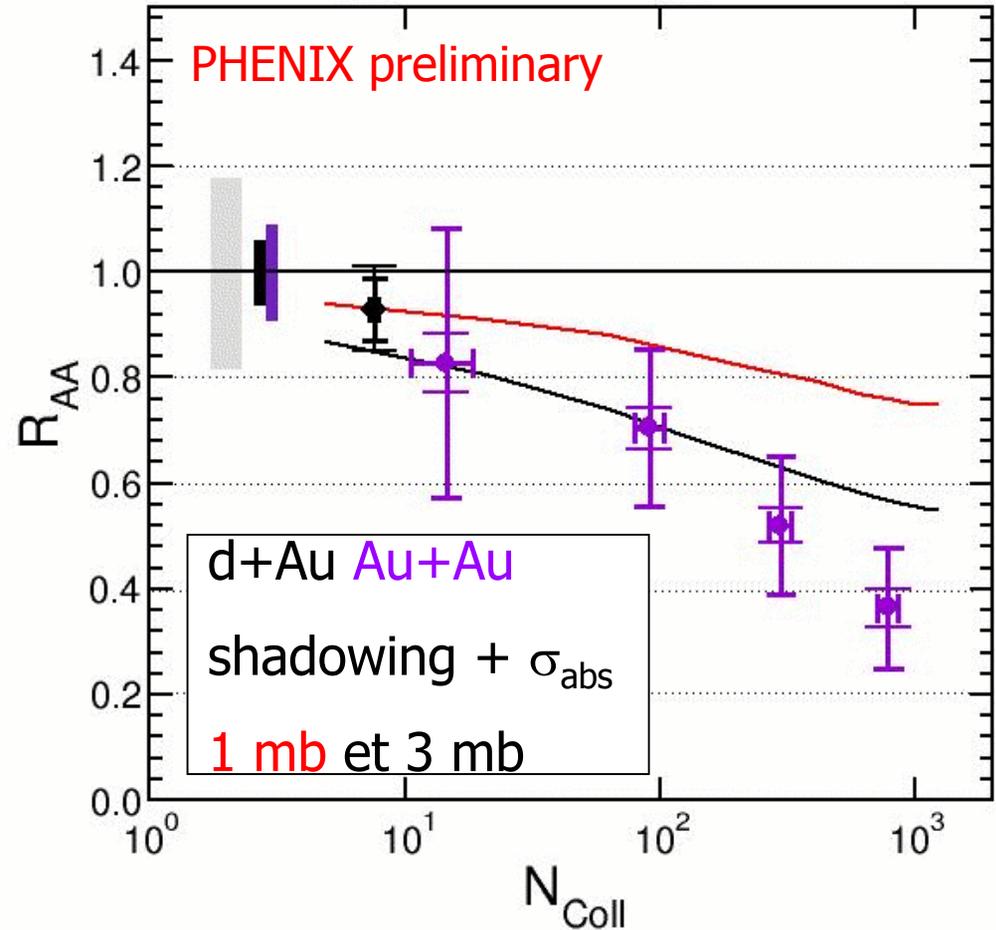
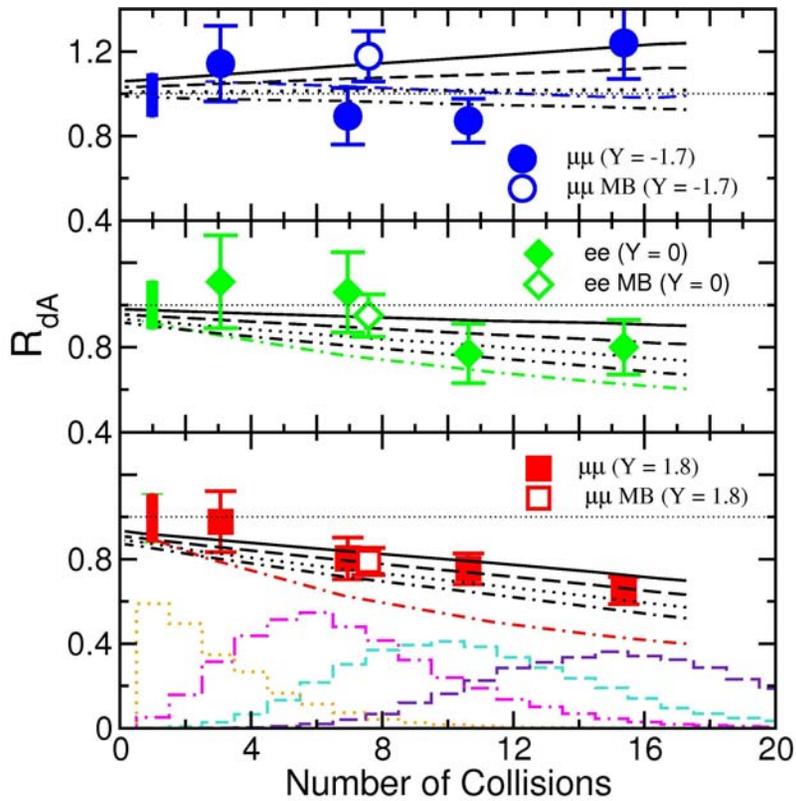
# III – Production de $J/\Psi$ dans Au+Au



Suppression d'un facteur 3 dans les collisions les plus centrales

# III - Effets nucléaires froids seuls

## Résultats en d+Au



Suppression supérieure aux effets nucléaires froids

Suppression anormale ?

# III – Comparaison avec les résultats de NA50

---

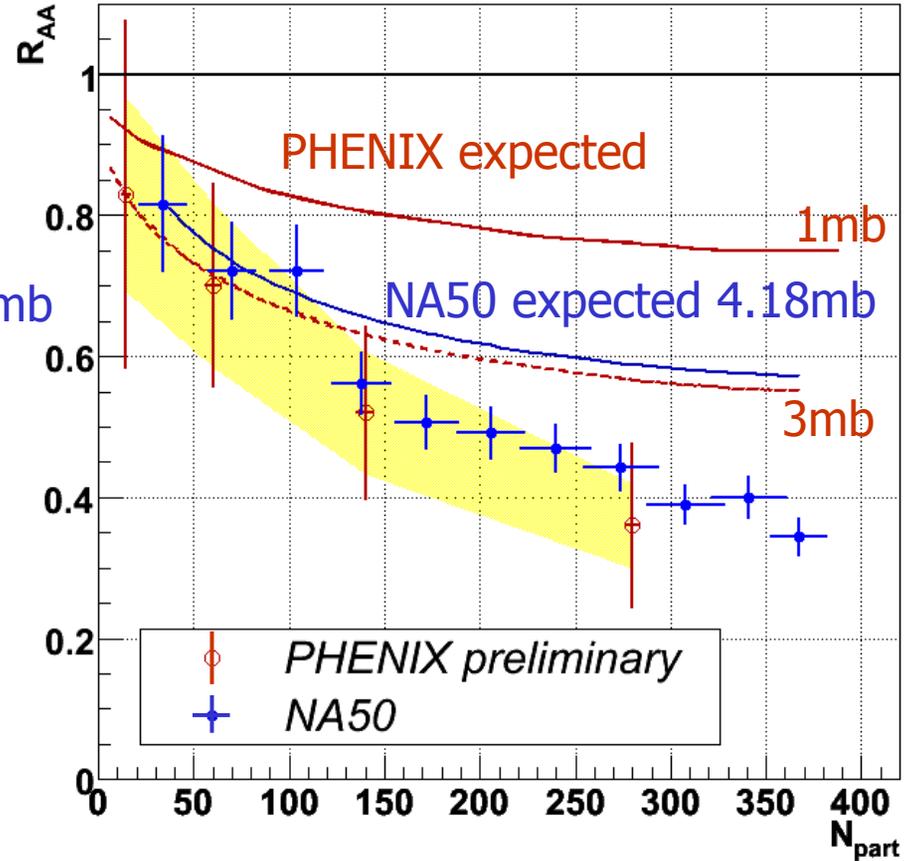
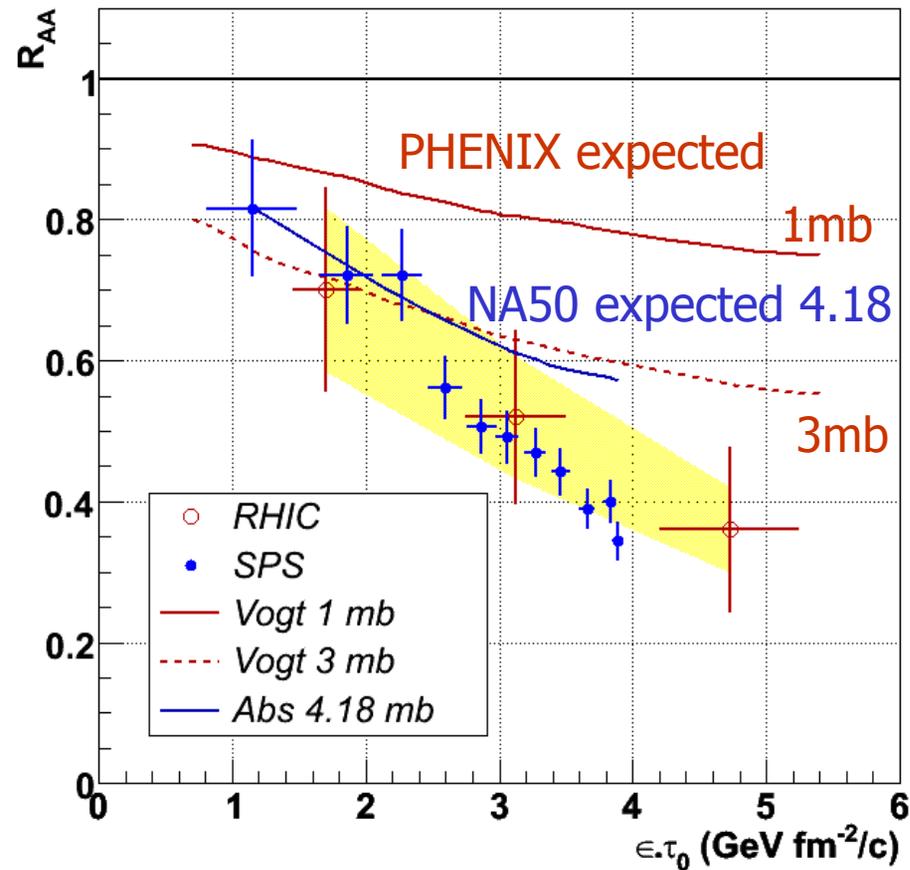
34

- Résultats mesurés en Pb-Pb de NA50 ( $\sqrt{s} = 17,3$  GeV)
- Comparaison de 2 variables en ordonnée :
  - $R_{AA}$  (mesures brutes, sans modèle)
  - Rapport de la production mesurée/attendue
    - NA50 : Absorption nucléaire  $\sigma_{abs} = 4,18$  mb
    - PHENIX : Shadowing + Absorption nucléaire  $\sigma_{abs} = 1$  et 3 mb
- En fonction de 2 variables en abscisse :

- Densité d'énergie  $\varepsilon_{Bj} = \frac{1}{A_{\perp} \tau_0} \frac{dE_t}{dy} \Big|_{y=0}$

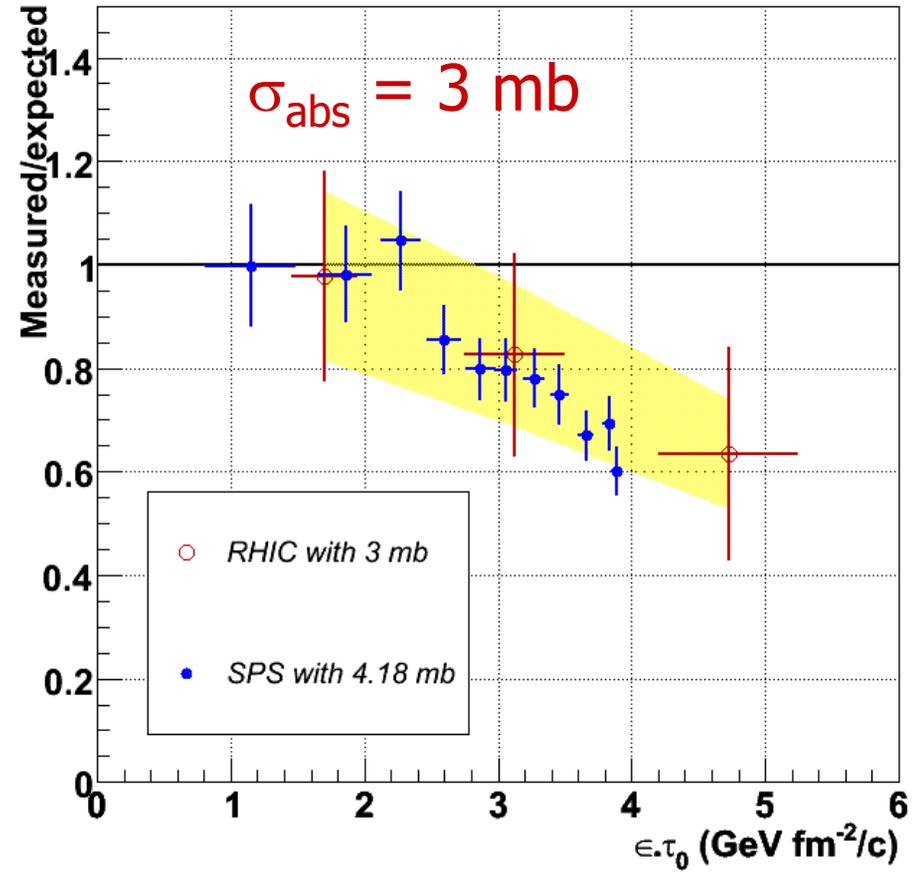
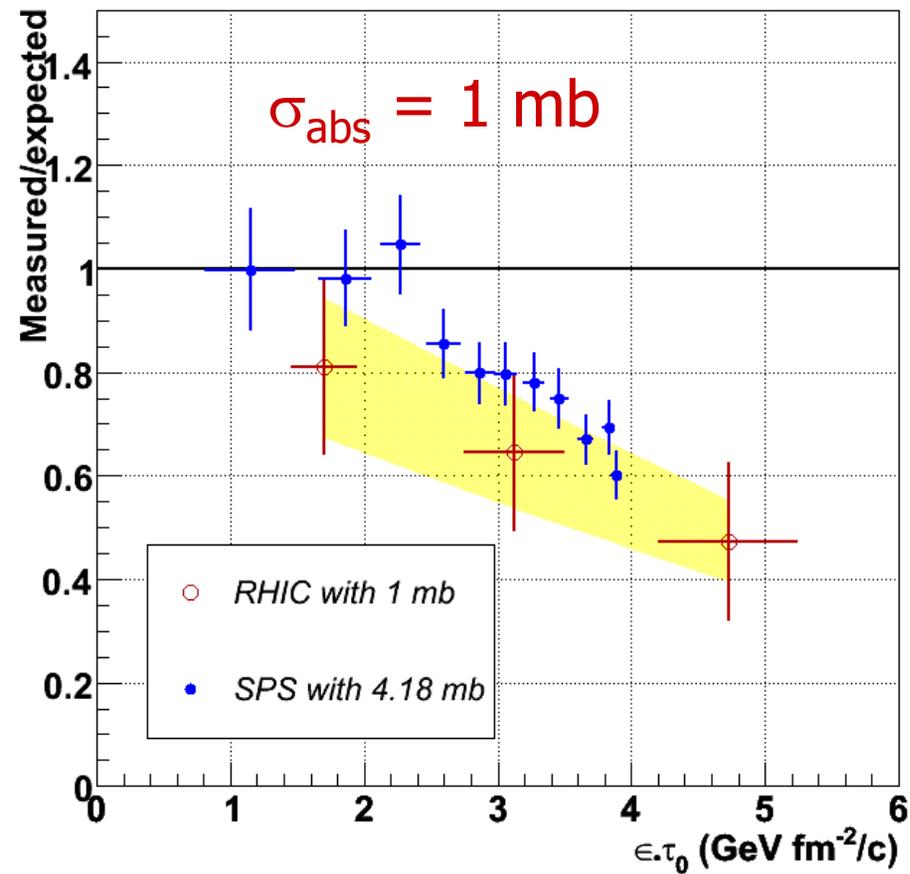
- Nombre de participants  $N_{part}$

# Comparaison des $R_{AA}$



L'amplitude de suppression est similaire entre NA50 et PHENIX  
Mais les effets nucléaires froids différents

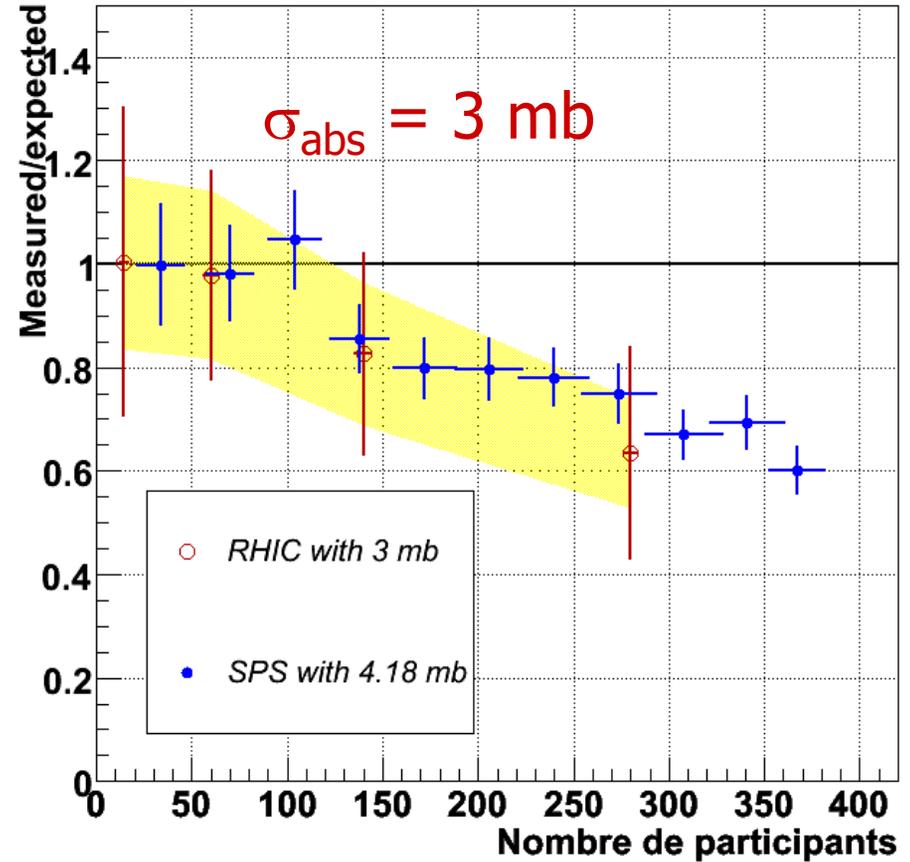
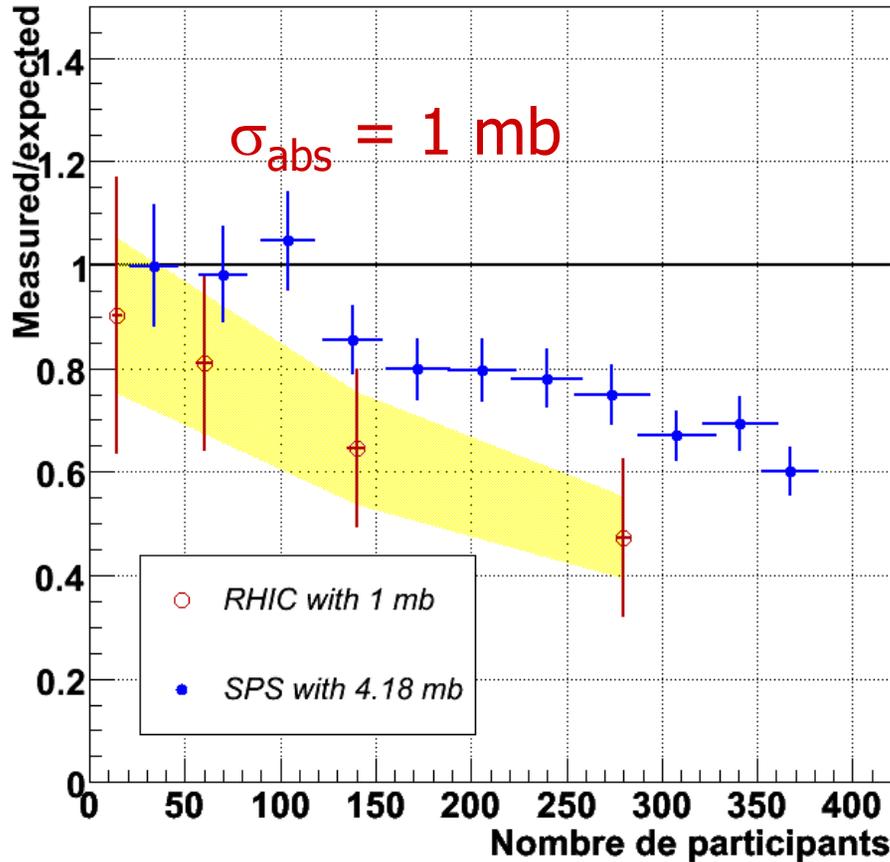
# Rapport Mesuré/attendu vs $\epsilon_{Bj}$ ( $\times \tau_0$ )



Inférieur à l'unité

Amplitude de suppression est compatible dans les barres d'erreurs

# Mesuré/attendu ratios vs $N_{part}$



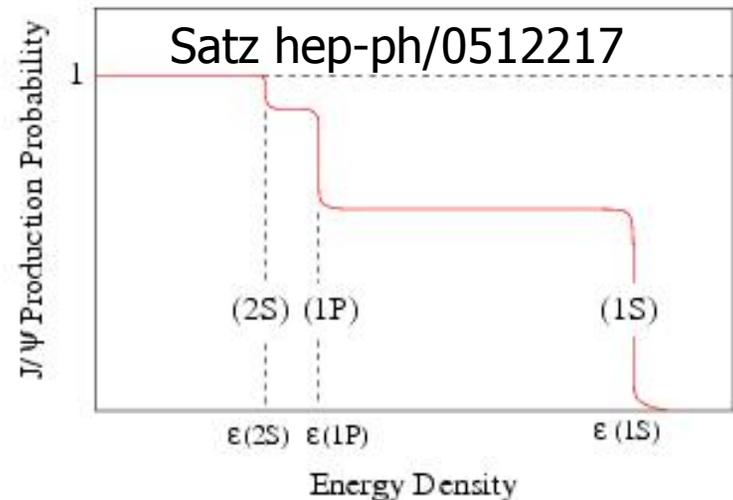
Inférieure à l'unité

Différence + prononcé avec 1 mb

mais compatible dans les barres d'erreurs

# III – Comparaison avec NA50

- Rapport Mesuré/attendu : inférieur à l'unité  
=> suppression anormale ?
- Amplitude de suppression similaire bien que  $\sqrt{s}$  est 1 ordre de grandeur supérieur
- Suppression correspond à la suppression des  $\psi'$  and  $\chi_c$  seulement ? Possible si  $J/\psi$  directs survivent à la température atteinte au RHIC
- Mais effets nucléaires au SPS et au RHIC différents
- Besoin de contraindre les effets nucléaires froids au RHIC



# III – Quelques modèles de suppression

---

Plusieurs modèles disponibles

Modèles qui décrivent bien la suppression observée par NA50 :

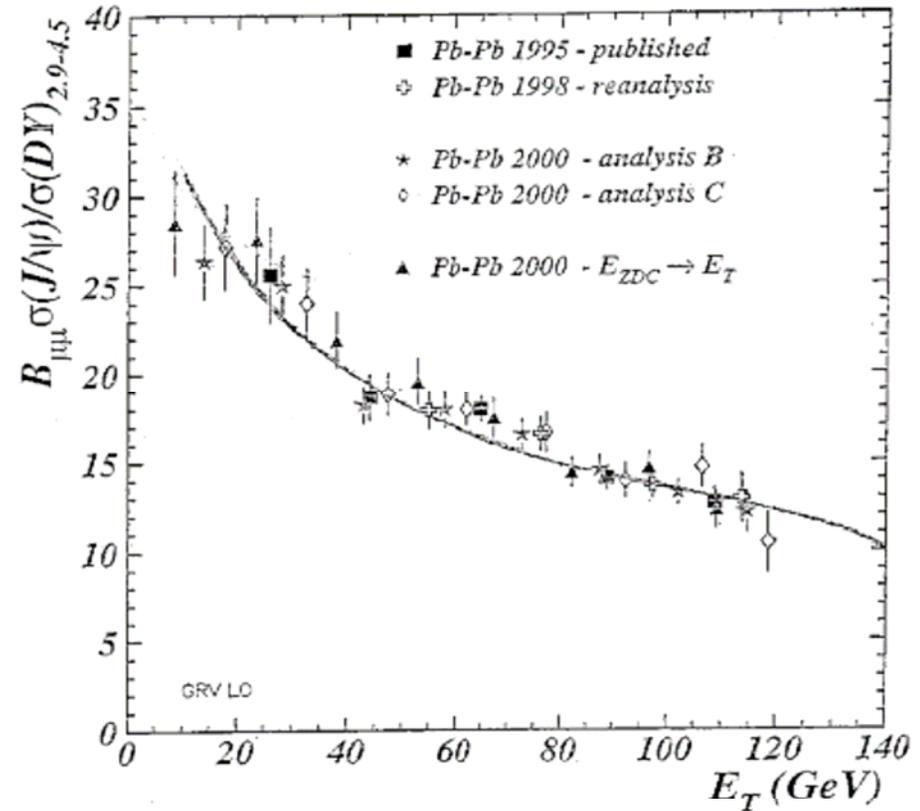
- Les co-voyageurs
- Suppression du  $J/\Psi$  direct par le PQG

# III - Modèle de co-voyageur au SPS (1)

Idée : suppression due aux interactions entre les  $J/\psi$  et les hadrons lors du transport hors de la zone d'interaction

Paramètres utilisés pour NA50

$$\sigma_{\text{abs}} = 4,5 \text{ mb}; \sigma^{\text{co}} = 0,65 \text{ mb}$$



Capella, Sousa EPJ C30, 117 (2003)

# III – Modèle de co-voyageur au RHIC (2)

41

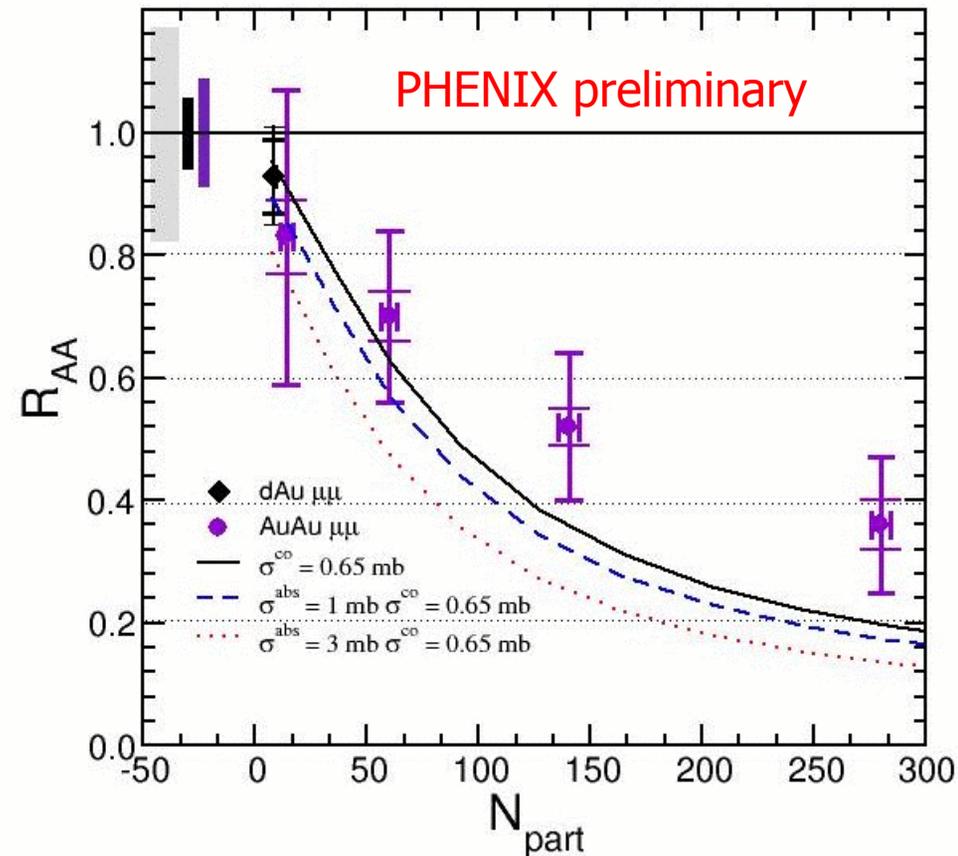
Modèle de co-voyageur  
avec  $\sigma^{co} = 0,65$  mb

+ shadowing

+ Absorption nucléaire

$\sigma_{abs} = 0, 1$  et  $3$  mb

Surement la suppression



Capella, Ferreiro hep-ph/0505032  
+ communications privées

# III – Modèle de suppression dans un PQG (1)

42

Idée : suppression due aux interactions des  $J/\psi$  :

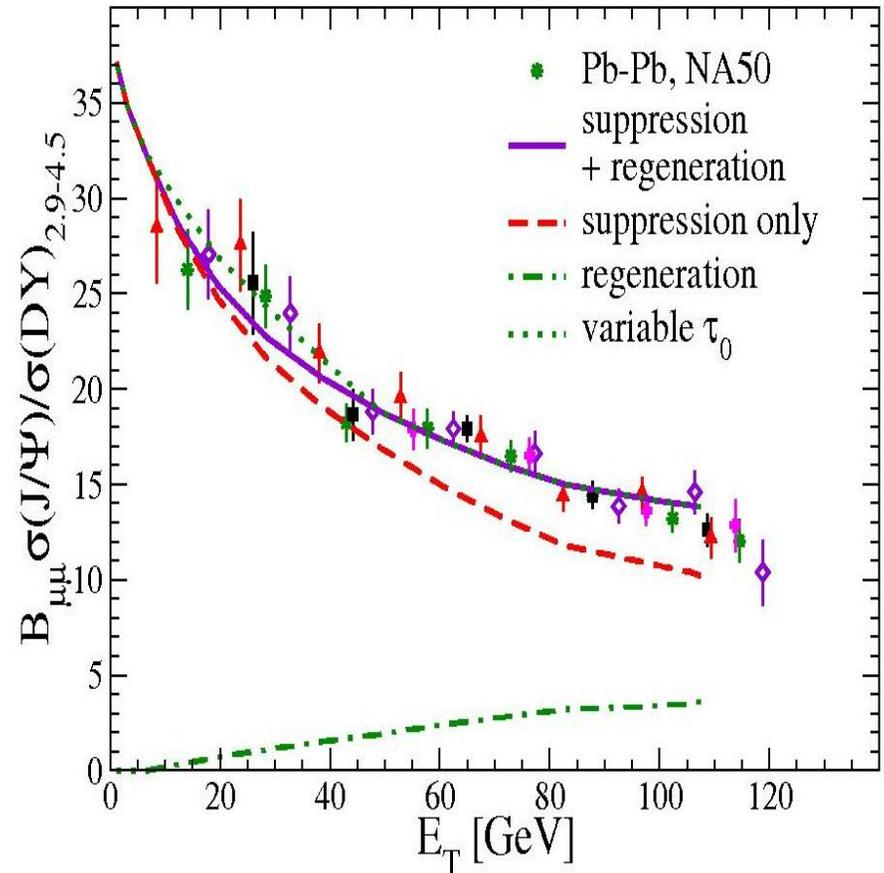
- dans le PQG

$$i + J / \Psi \rightarrow c + \bar{c}$$

$$(i = g, q, \bar{q})$$

- Phase hadronique ( $\pi, \rho$ )

(faible contribution de  
la recombinaison)



Grandchamp, Rapp hep-ph/0306077

# III – Modèle de suppression dans un PQG au RHIC (2)

Idée : suppression due aux interactions des  $J/\psi$  :

- dans le PQG

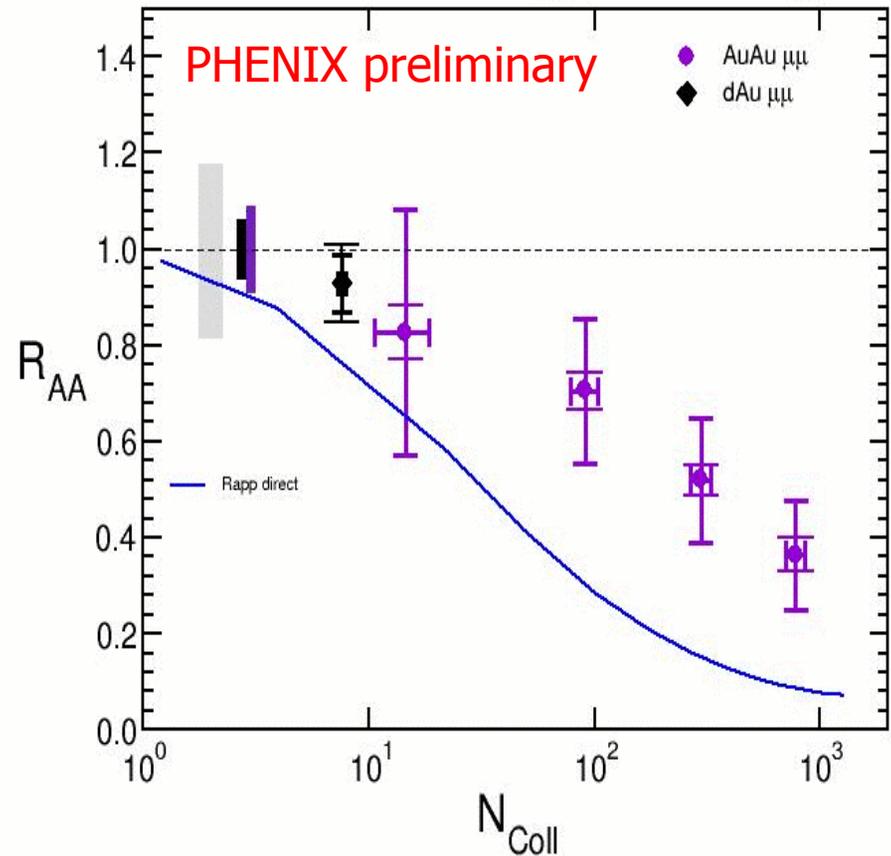
$$i + J / \Psi \rightarrow c + \bar{c}$$

$$(i = g, q, \bar{q})$$

- Phase hadronique ( $\pi, \rho$ )

Surement la suppression

Besoin d'un processus de recombinaison ?



Grandchamp, Rapp hep-ph/0306077  
+ communications privées

# III – L'idée de la recombinaison

---

Idée :

- Collisions à hautes énergies (RHIC), production de multiples paires  $c\bar{c}$  dans les collisions centrales
- Dans un milieu déconfiné mobilité des quarks et donc recombinaison possible  $N_{J/\Psi} \propto \sigma_{c\bar{c}}^2$

2 modèles développés :

- Recombinaison statistique
- Recombinaison cinétique

# III - Suppression + Recombinaison

1/ Suppression due aux interactions des  $J/\psi$  :

- dans le PQG

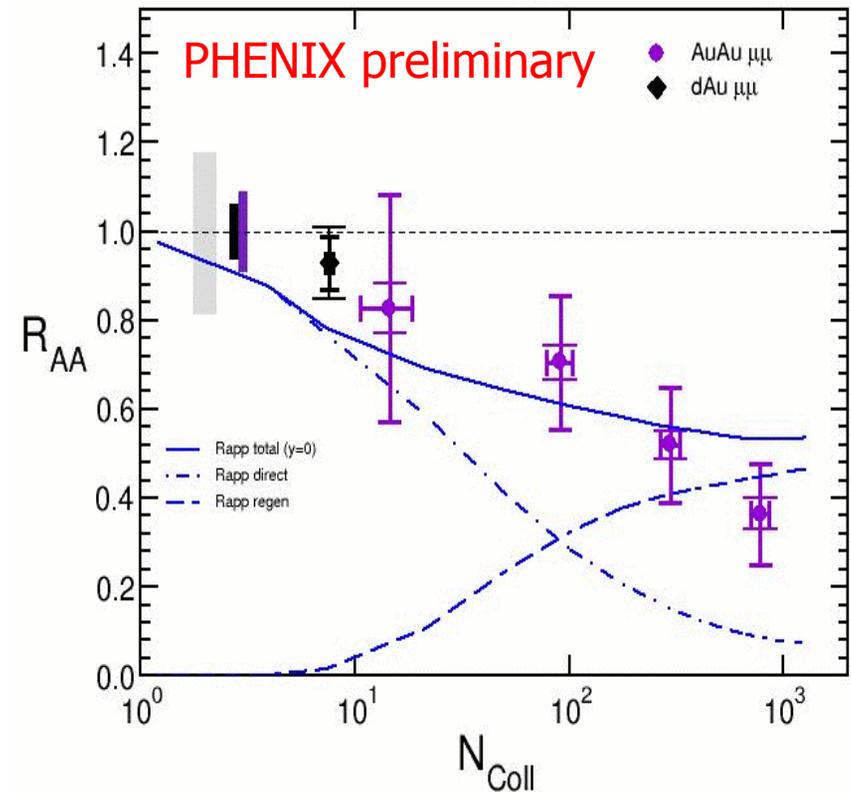


$$(i = g, q, \bar{q})$$

- Phase hadronique ( $\pi, \rho$ )

2/ Recombinaison

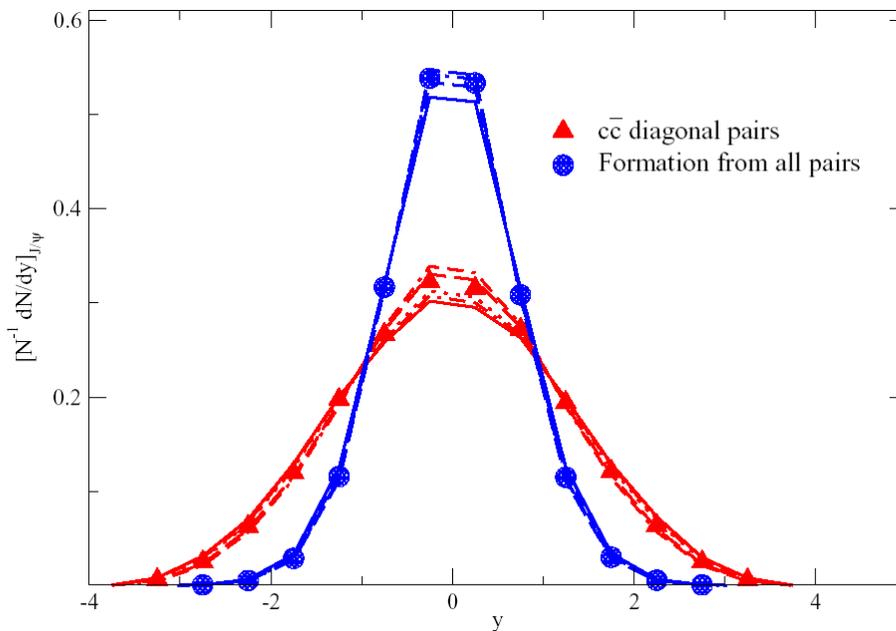
Meilleure description en amplitude en fonction de la centralité



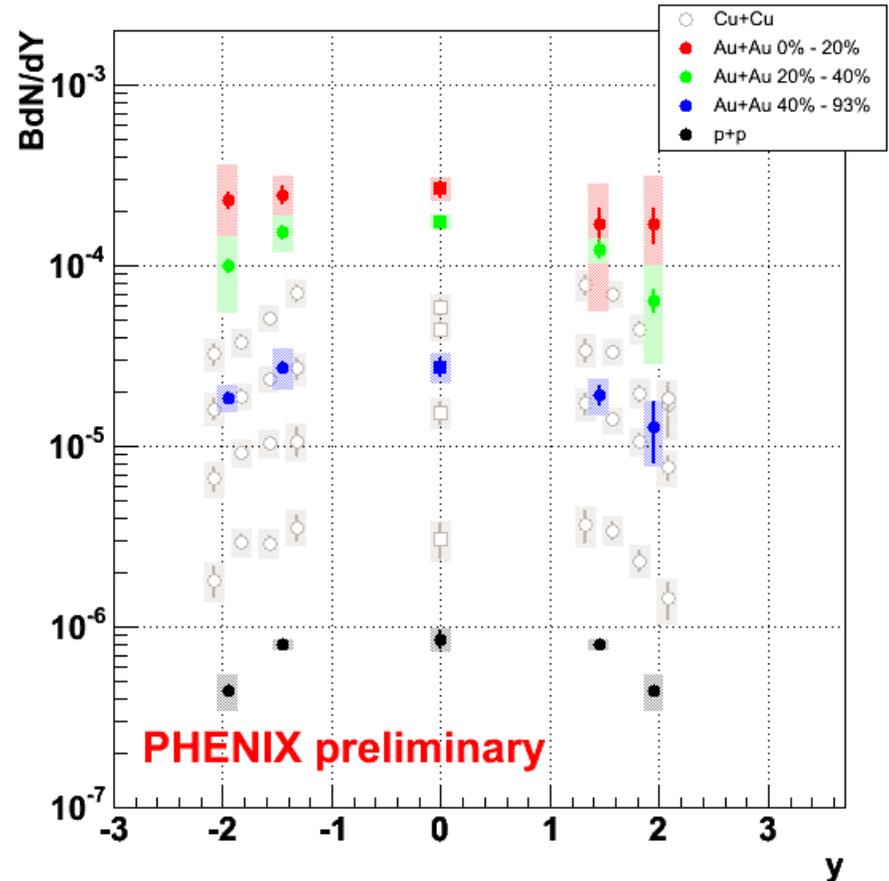
# III – Prédiction en fonction de $y$

Idée : Production de quarks charmés (pQCD) favorisée dans la région  $y = 0$

Favorise la recombinaison des  $J/\psi$  à  $y = 0$

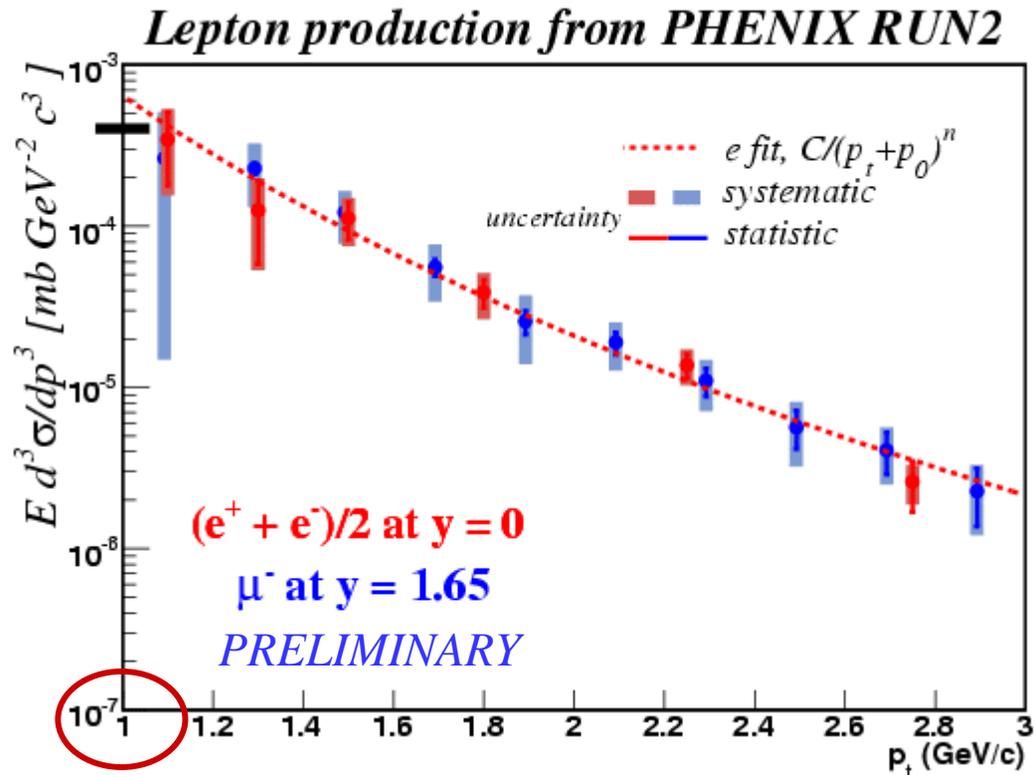


R.L. Thews et. al. nucl-th/0505055



Pas de changement significatif de la forme en rapidité en fonction de la centralité

# III - Mesure du charme à différent $y$

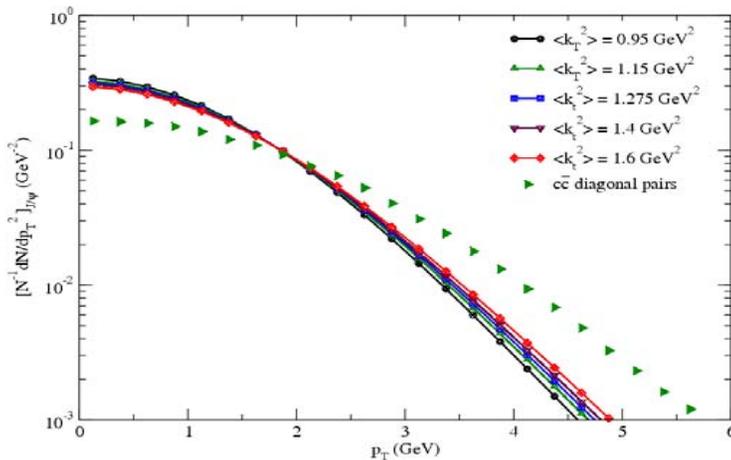


Production « similaire » entre  $y \sim 0$  et  $|y| \sim 1,7$   
Mais pas de mesure à faible  $p_t$

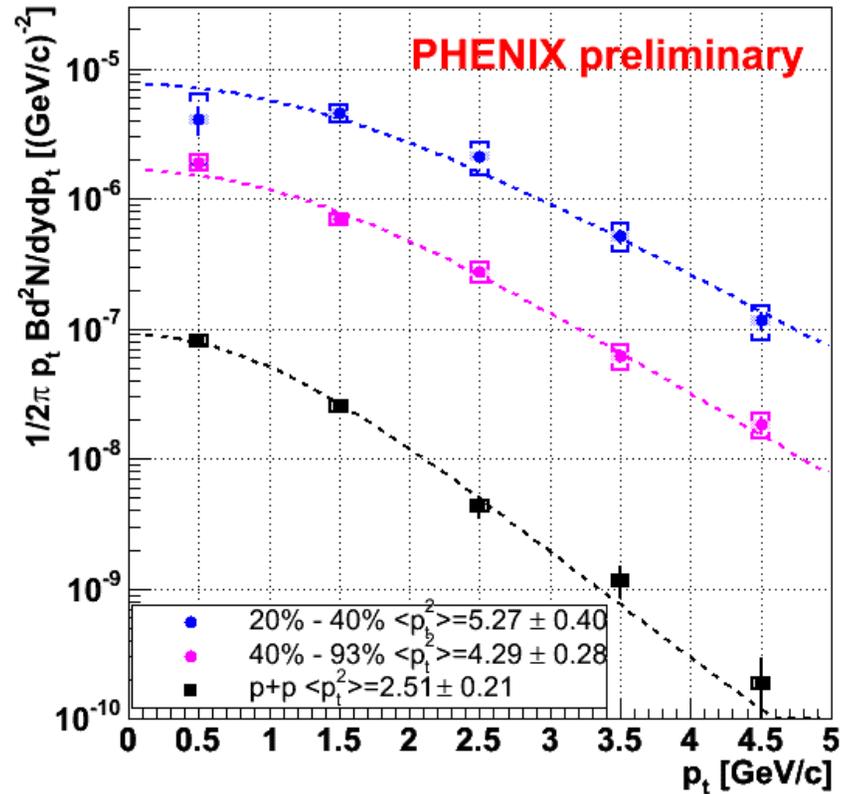
# III – Prédiction de la production des $J/\Psi$ en fonction de $p_t$

Idée\* : Production de quarks charmés (pQCD) importante à bas  $p_t$

Favorise la recombinaison des  $J/\Psi$  à bas  $p_t$



$J/\Psi$  invariant yield vs  $p_t$  - Au+Au @  $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$

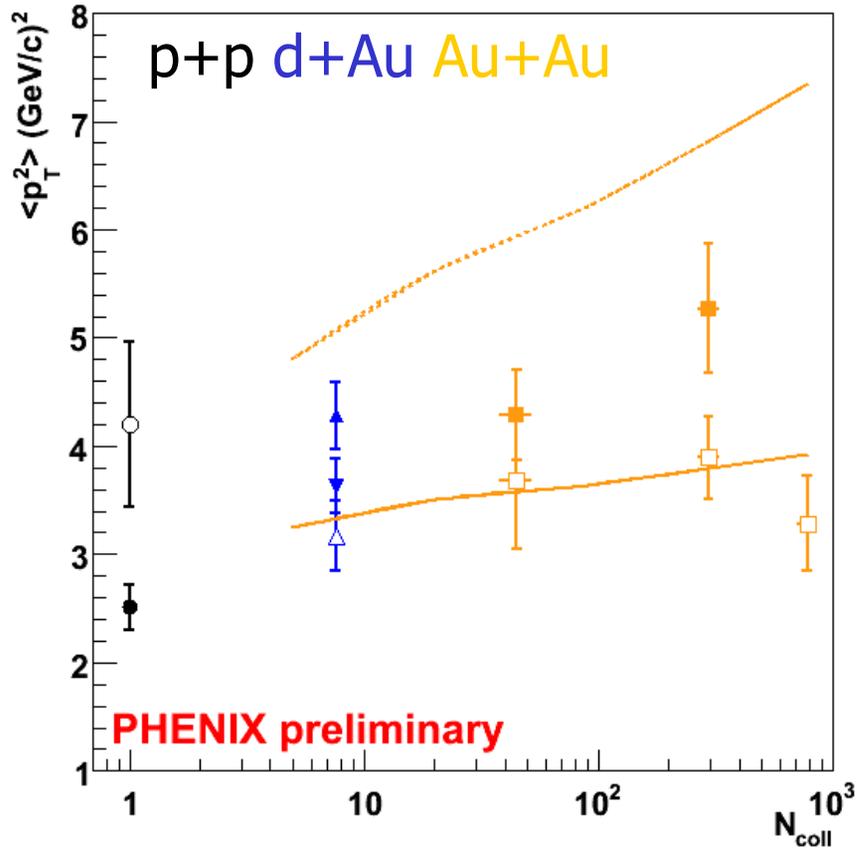


\*R.L. Thews et. al. nucl-th/0505055

# III – Prédiction des valeurs moyennes du carré de l'impulsion transverse

Symboles creux :  $|y| < 0.35$

Symboles pleins :  $y \sim 2$



Prédiction des  $\langle p_t^2 \rangle$  :

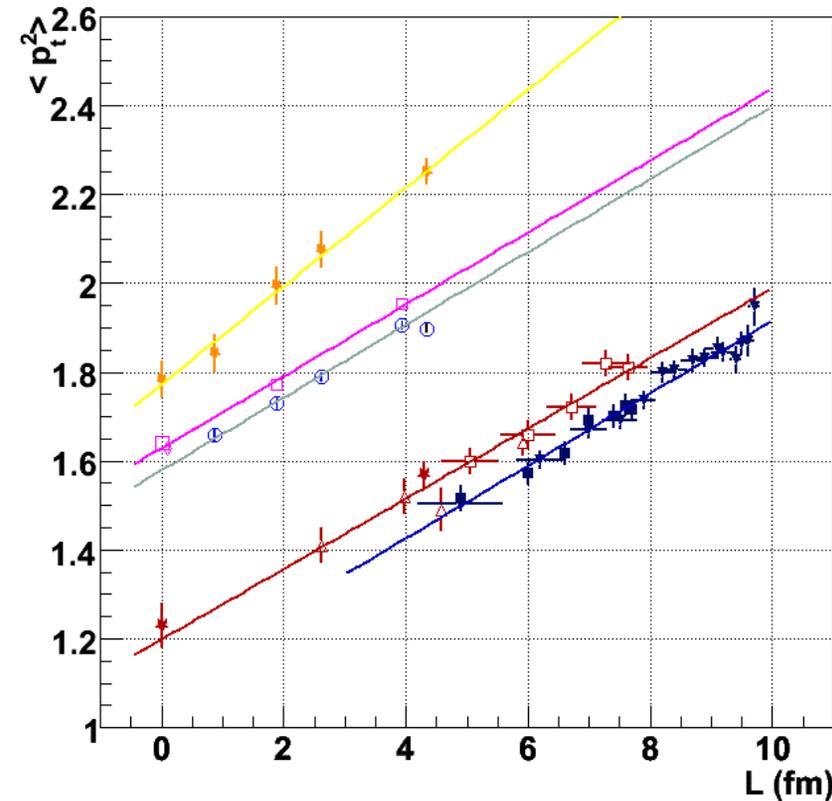
- Sans recombinaison (pointillée) qui prend en compte la diffusion des partons initiaux
- Avec recombinaison (continue)

Les  $\langle p_t^2 \rangle$  mesurés sont entre ces 2 prédictions

Superposition recombines + non recombines ?

Autre interprétation possible ?

# III - $\langle p_t^2 \rangle$ vs L pour d'autres $\sqrt{s}_{NN}$



$\sqrt{s} = 17,3$  GeV : NA50/60 : Pb+Pb, In+In

$\sqrt{s} = 19,4$  GeV : NA3 p+p, NA38 p+Cu, p+U, O+U, S+U

$\sqrt{s} = 27,4$  GeV : NA50 p+Be, p+Al, p+Cu, p+W

$\sqrt{s} = 29,1$  GeV : NA51 p+p, p+d, NA50 p+Al, p+W

$\sqrt{s} = 38.8$  GeV : E866/789/771

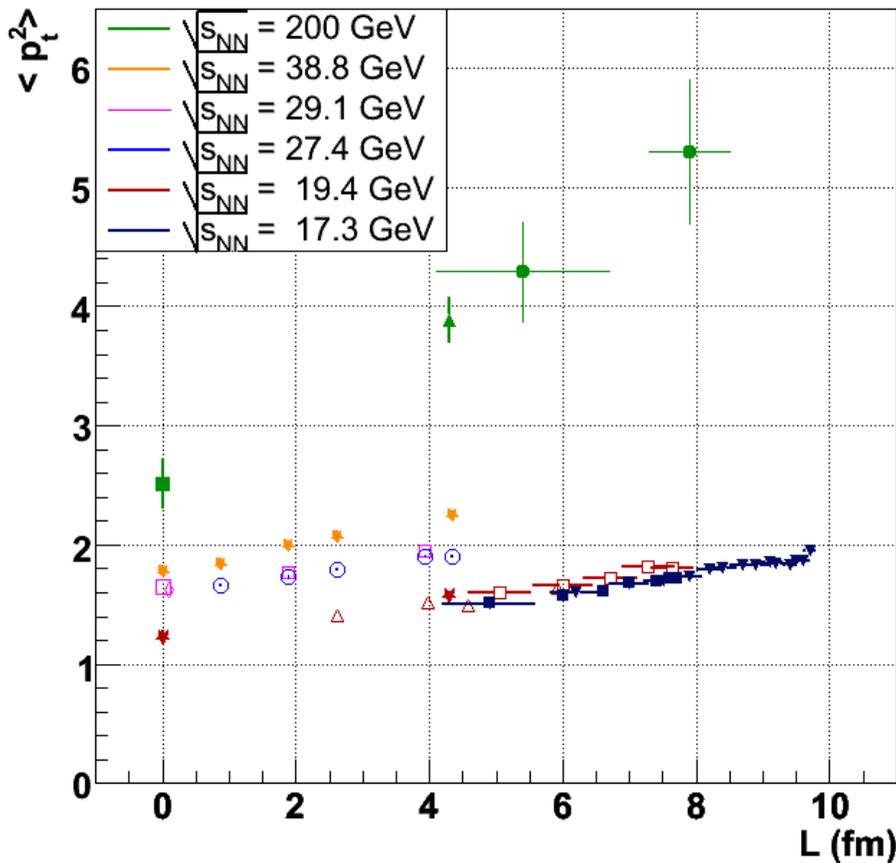
Effet Cronin :  $\langle p_t^2 \rangle_{AA} = \langle p_t^2 \rangle_{pp} + \rho \sigma \Delta(\langle p_t^2 \rangle) L_{AA}$

**Ajustement linéaire**

$\rho$  densité nucléaire,  $\sigma$  section efficace de diffusion élastique et  $\Delta(\langle p_t^2 \rangle)$  gain à chaque diffusion et L la longueur moyenne de matière nucléaire traversée

# III – Les résultats du RHIC : pp, dAu, AuAu

51



Variation de  $\langle p_t^2 \rangle$  en Au+Au est linéaire en fonction de  $L$

Idée : modéliser l'effet Cronin avec les valeurs mesurées en p+p et d+Au

$$\langle p_t^2 \rangle = 2,51 + 0,32 L$$

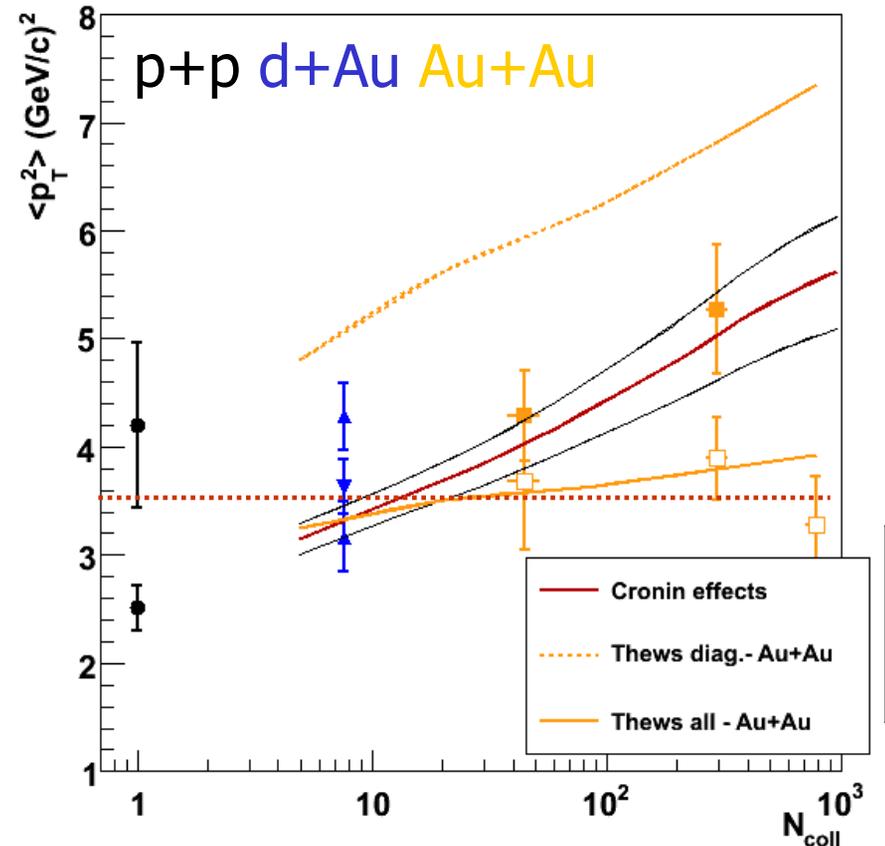
# III – Prédire l'effet Cronin expérimentalement ? 52

Rapidité vers l'avant  $y \sim 2$  :

Variation de  $\langle p_t^2 \rangle$  est compatible avec la simple extrapolation de l'effet Cronin déterminée expérimentalement

Rapidité médiane  $|y| < 0.35$  :

Mesures en p+p et d+Au indiquent un faible effet Cronin



La suppression anormale des  $J/\Psi$  n'a pas d'effet additionnel mesuré sur  $\langle p_t^2 \rangle$

# CONCLUSION (1)

---

- Observation du  $J/\Psi$  dans les collisions Au+Au à  $\sqrt{s} = 200$  GeV
- Suppression d'un facteur 3 dans les collisions les plus centrales, défavorisant :
  - les effets nucléaires froids seuls
  - les co-voyageurs
- Pas de variation significative des distributions en  $y$  (en fonction de la centralité)
- Variation de la distribution en  $p_t$  interprétable par l'effet Cronin

## 2 interprétations possibles :

### – La recombinaison :

- Description convenable de l'amplitude de suppression en fonction de la centralité, *mais dans nos erreurs*, pas de signe des comportements attendus en  $y$  et  $p_t$
- Mesure précise (centralité, rapidité et  $p_t$ ) de la production de charme nécessaire pour contraindre ces modèles
- Si recombinaison, effet spectaculaire attendu au LHC

### – Suppression des résonances $\chi_c$ et $\Psi'$

- Température atteinte au RHIC insuffisante ? Manque de statistique ?
- La suppression des  $J/\Psi$  directs *devrait* être observée au LHC.

- Statistiques plus importantes en d+Au
  - Contraindre les modèles des effets nucléaires froids
- Statistiques plus importantes en Au+Au
  - Mesurer à des densités d'énergie plus importantes (plus de points de mesure en centralité) et voir une éventuelle suppression du  $J/\Psi$  direct
  - Planifié pour 2008
- Mesures précises du charme (centralité, rapidité)
  - Contraindre les modèles de recombinaison
  - Contraindre les distributions de partons
  - Détecteur vertex pour 2008