

# Plasma de Quarks & de Gluons

Sondes prédites &  
étudiées au SPS...  
(deuxième partie)

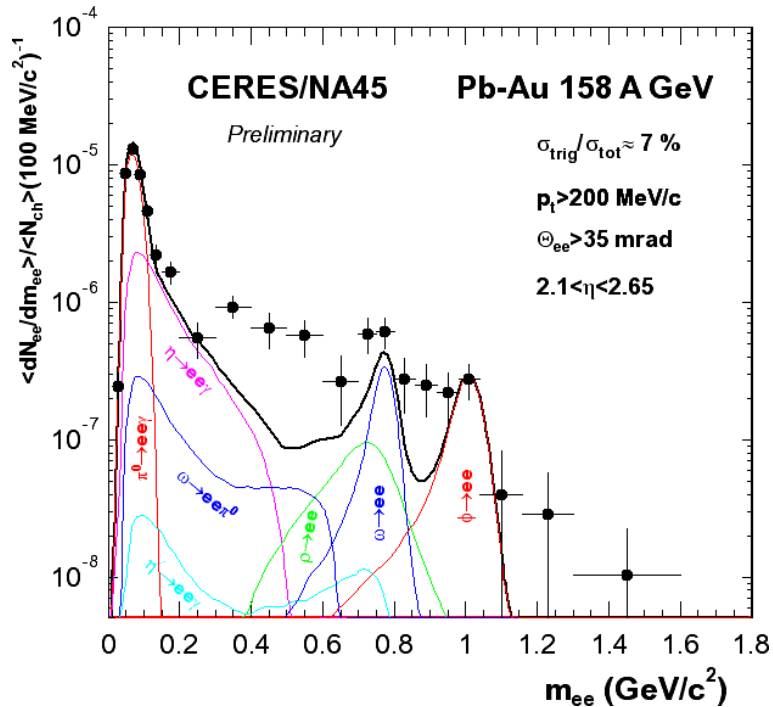
## II. Modification des mésons

- Restauration de la symétrie chirale
  - (Cf. Bachir)
  - En même temps que confinement (réseau)
- Effet sur les résonances
  - $\rho$  vit  $1,3 \text{ fm}/c \ll 10 \text{ fm}/c$  que dure la collision
    - Élargissement de sa largeur
    - Éventuelle modification de sa masse

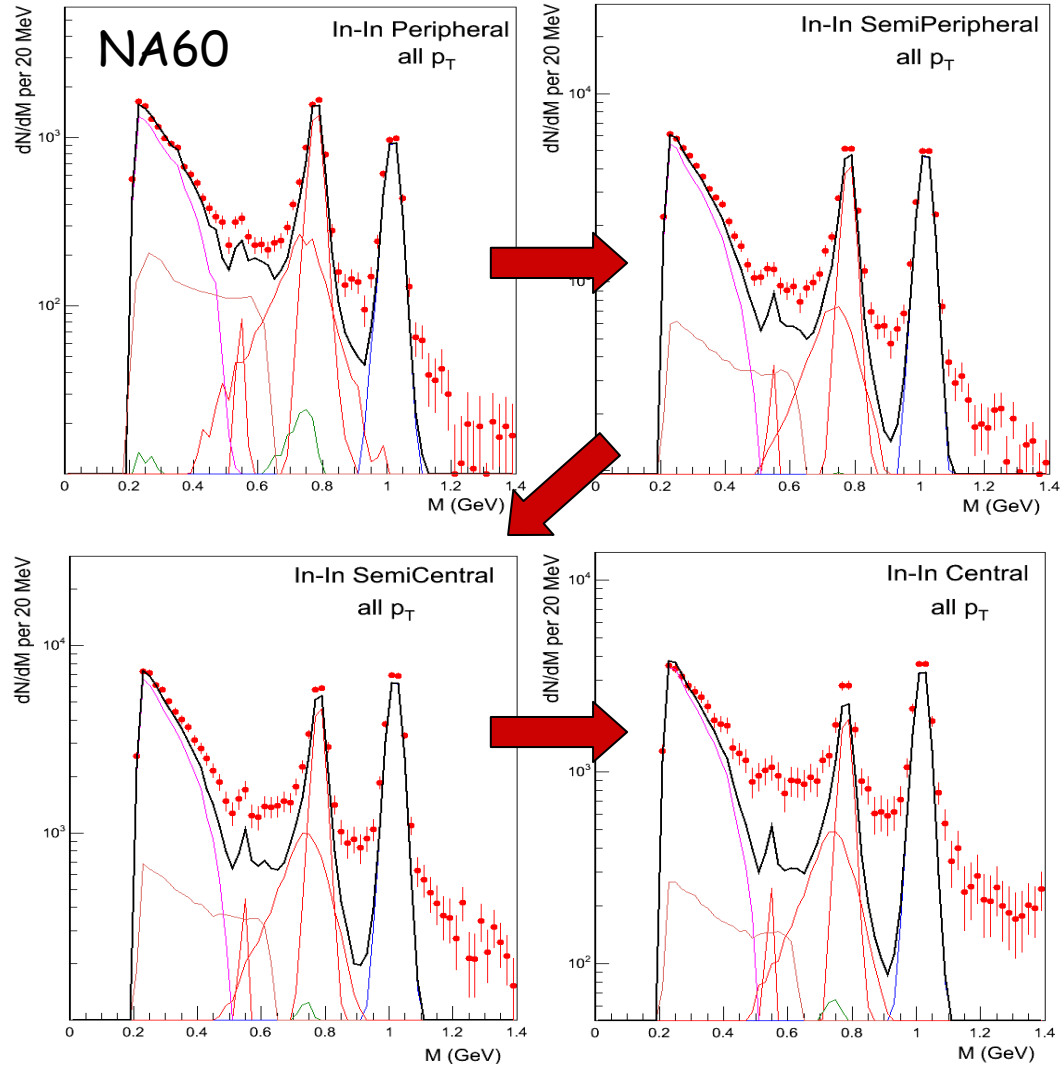
Pisarski, PL110B (1982) 155  
Pisarski, Wilczek, PRD29 (1984) 338

# Spectre de masse @ SPS

- Excès sous la masse du  $\rho$



Centralité

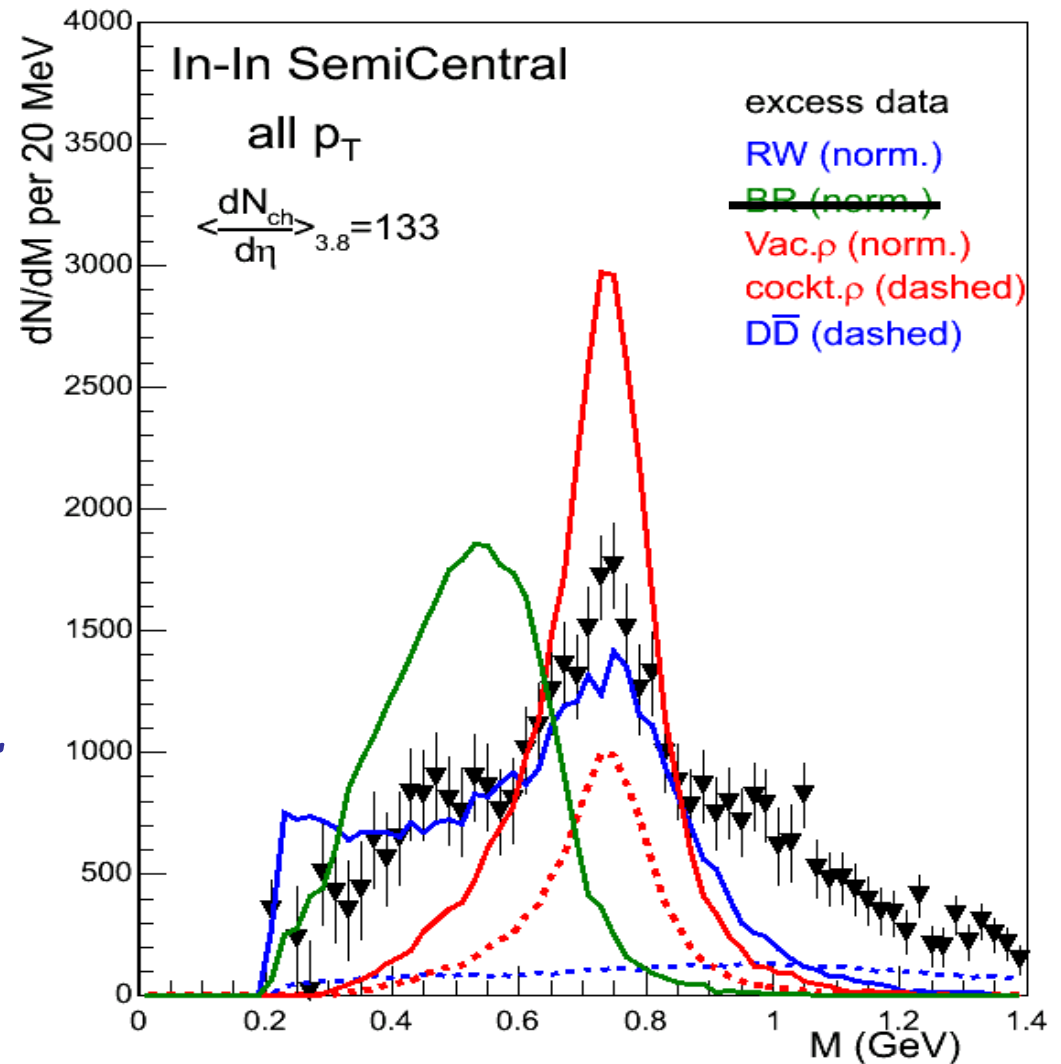


Damjanovic, Quark Matter 2005

# Comparaison aux modèles

- Masse inchangée
- Élargissement
- Croissant avec centralité

« We request that the readers remove the initials BR from the calculated green curve with our names erroneously associated with it » ☺



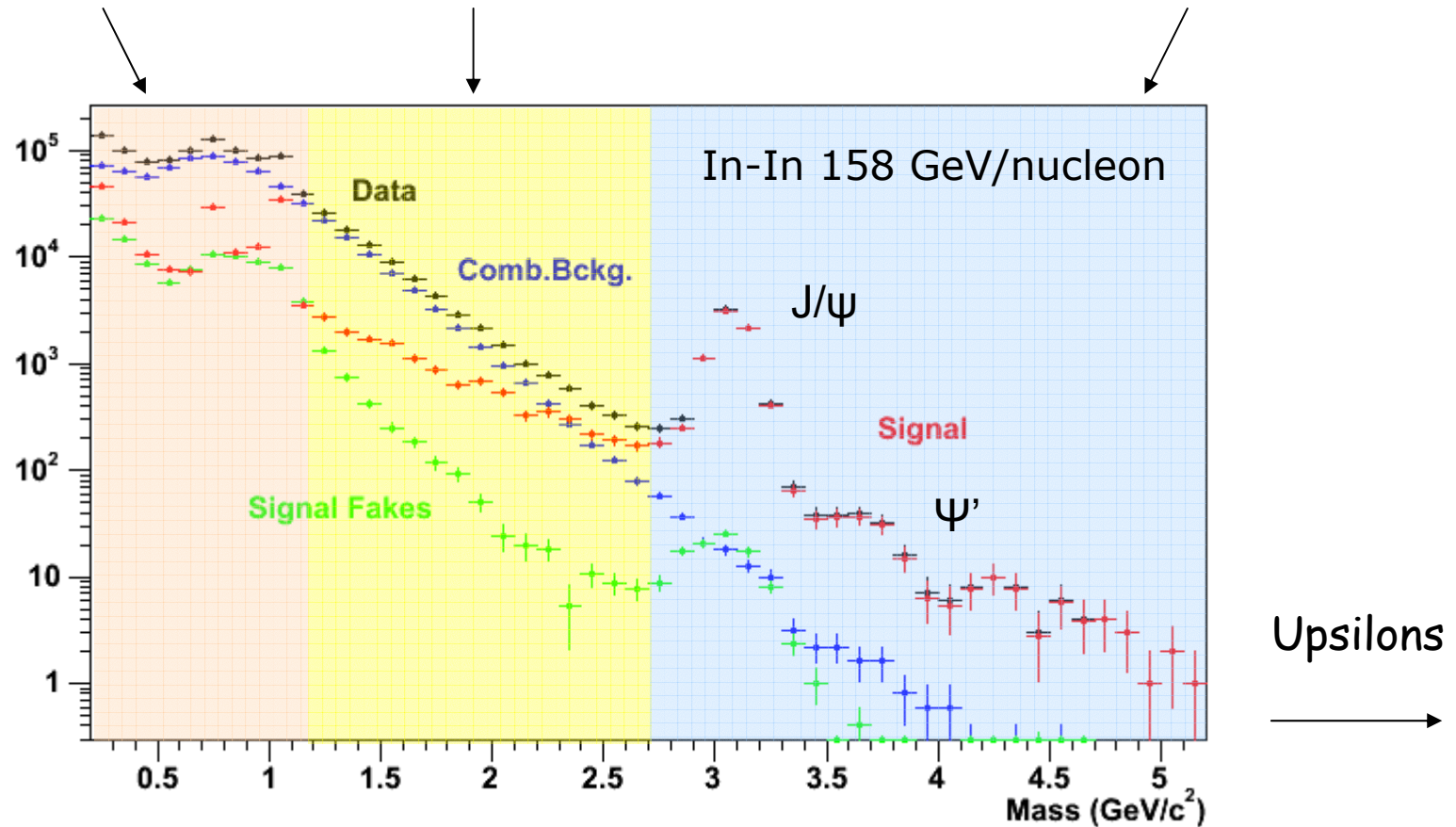
Brown-Rho, nucl-th/0509001

# Intérêt du spectre dileptonique

Modification  
des résonances

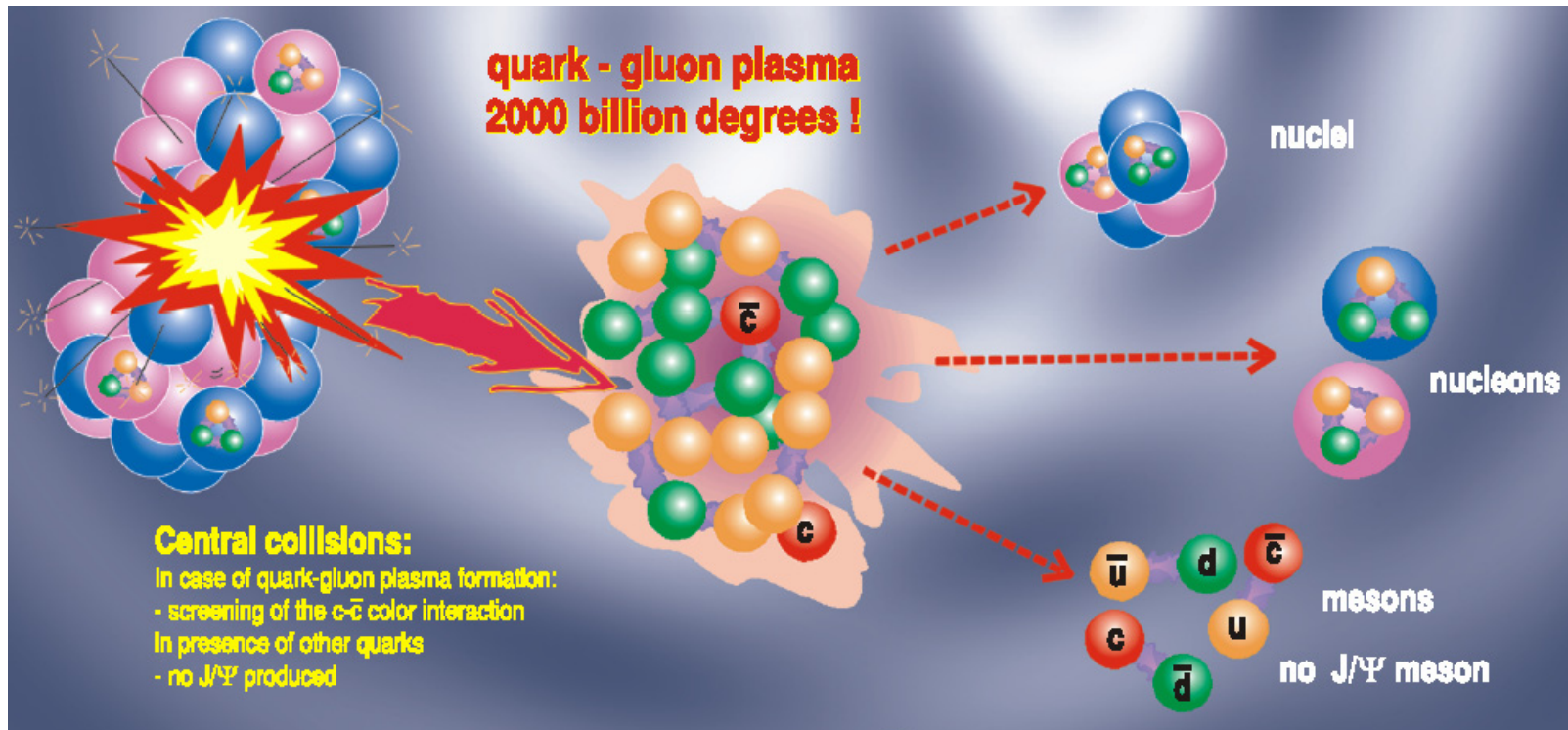
Dileptons  
thermiques

Suppression  
des quarkonia



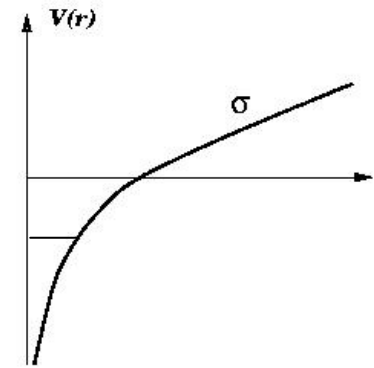
# III. Suppression quarkonia

- Peu de paires  $c\bar{c}$ , tendance à se lier  $\rightarrow J/\psi$
- Pourraient fondre dans le plasma ?

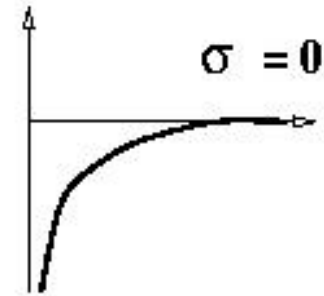


# Potentiel $c\bar{c}$

- $V(r) = \sigma \cdot r - a_{\text{eff}}/r$  @  $T=0$ 
  - Tension entre deux quarks
  - Interaction « coulombienne »
  - >  $m_\psi = 3,1 \text{ GeV}$  &  $r_\psi = 0,2 \text{ à } 0,5 \text{ fm}$
- À température croissante
  - $\sigma(T)$  décroît jusqu'à  $\sigma(T_c) = 0$
  - $V = - a_{\text{eff}}/r \exp -r/r_D(T)$
  - Potentiel écranté (Debye)
  - $r_D(T)$  calculé sur le réseau
- Atteint une température  $T_e$ 
  - Plus de  $J/\psi$  !



$T = T_c$



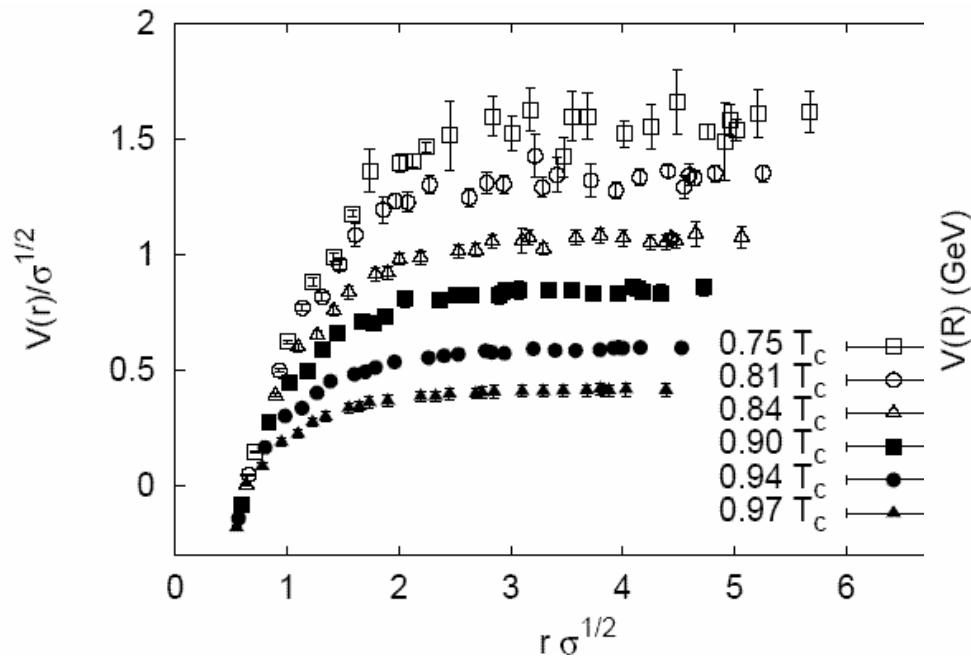
$T_e > T_c$



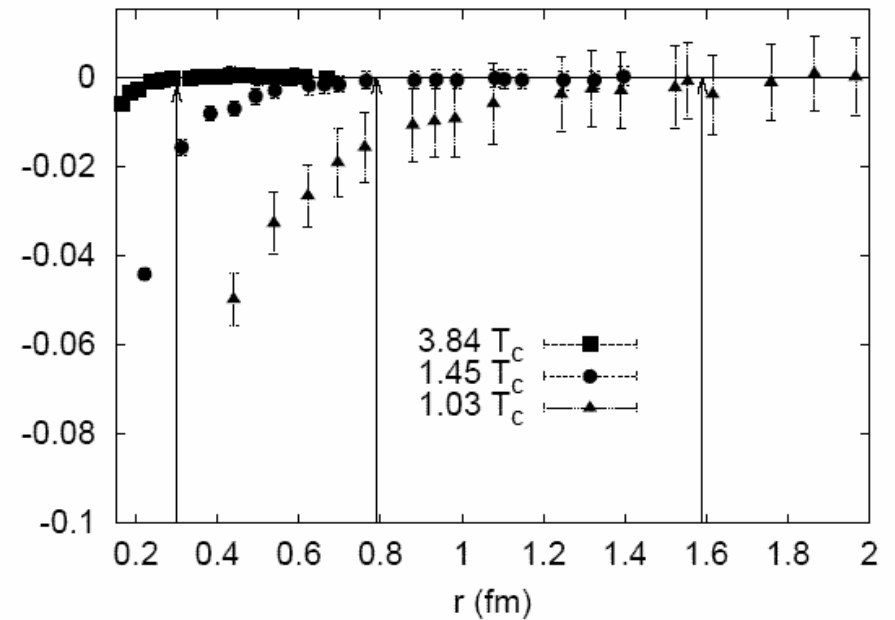
# QCD sur réseau

- Potentiel extrait du réseau

Au dessus de  $T_c$



En dessous de  $T_c$

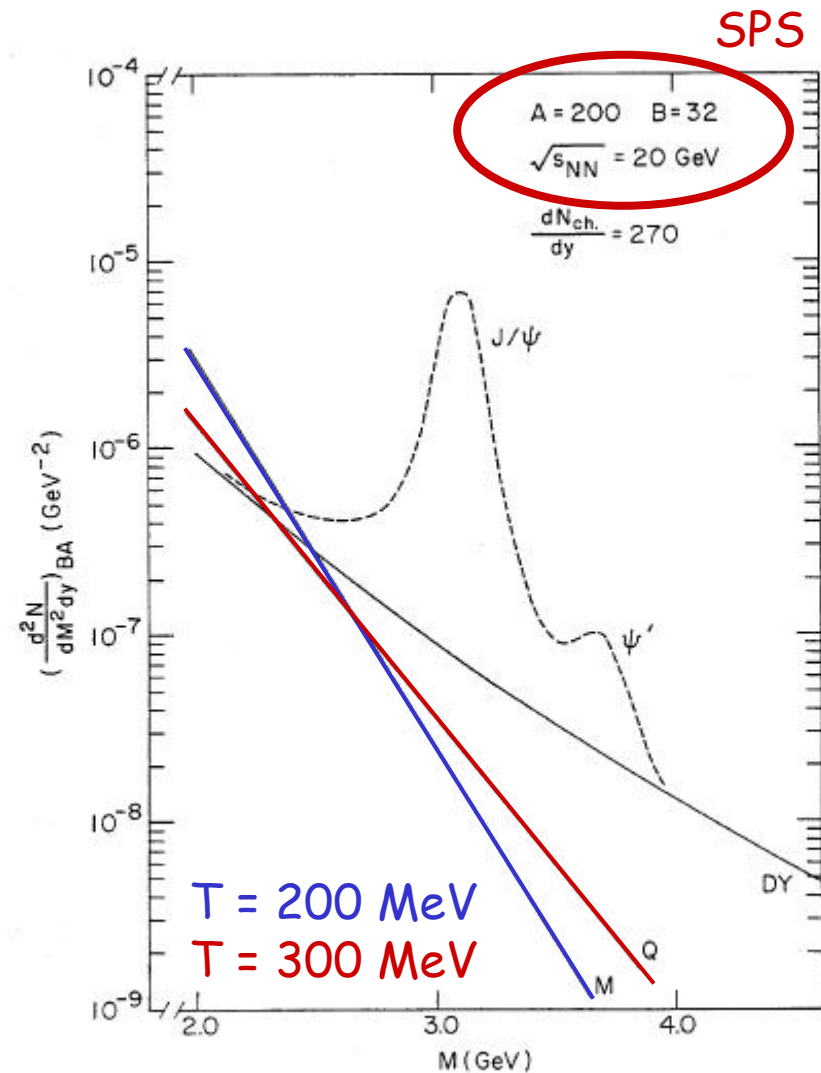


Digal, Petrecsky & Satz,  
PRD64 (2001) 094015  
et hep-ph/0110406



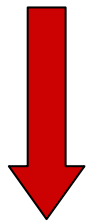
# Prédiction de Matsui & Satz

- Le plasma tue le  $J/\psi$  juste au dessus de  $T_c$
- Peu d'absorption nucléaire (1 à 3 mb)
- Dilepton thermique inférieur Drell-Yan
- Devrait être observable !

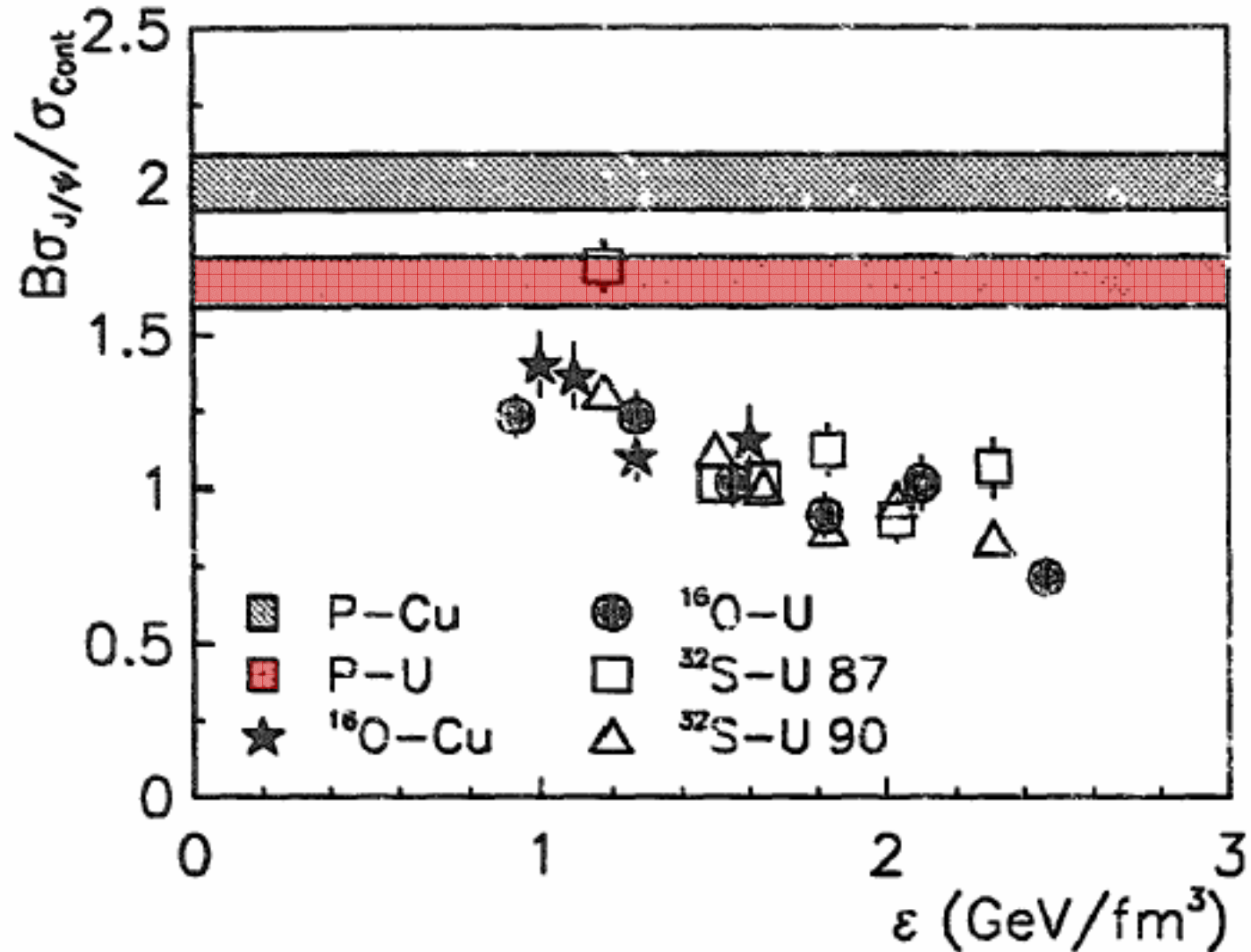


# NA38 : collisions jusqu'à S+U

@ 200 GeV  
Suppression  
croissante  
avec densité



? Plasma ?



# NA38 & 51 : collisions p+A

@ 450 GeV

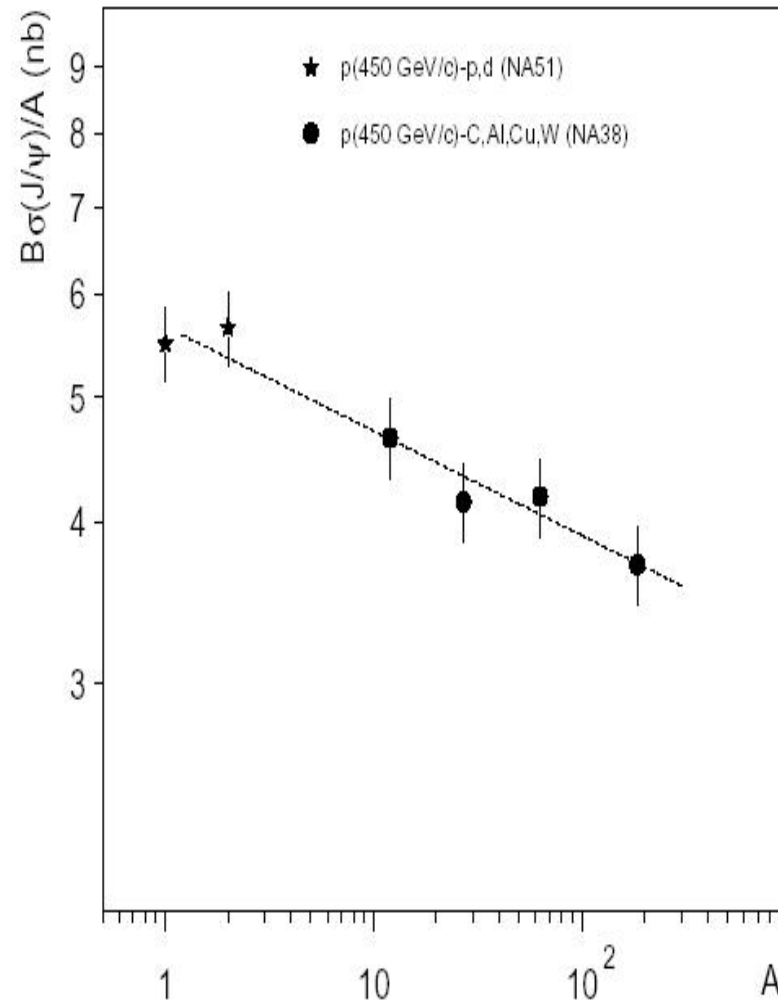
Étude systématique

pA où A=p,d,C,Al,Cu,W

$$\sigma_{\psi}(pA) = \sigma_{\psi}(pp) \times A^{\alpha}$$

$$\alpha = 0,919 \pm 0,015$$

Le J/ $\psi$  est supprimé  
dans la matière  
nucléaire normale !

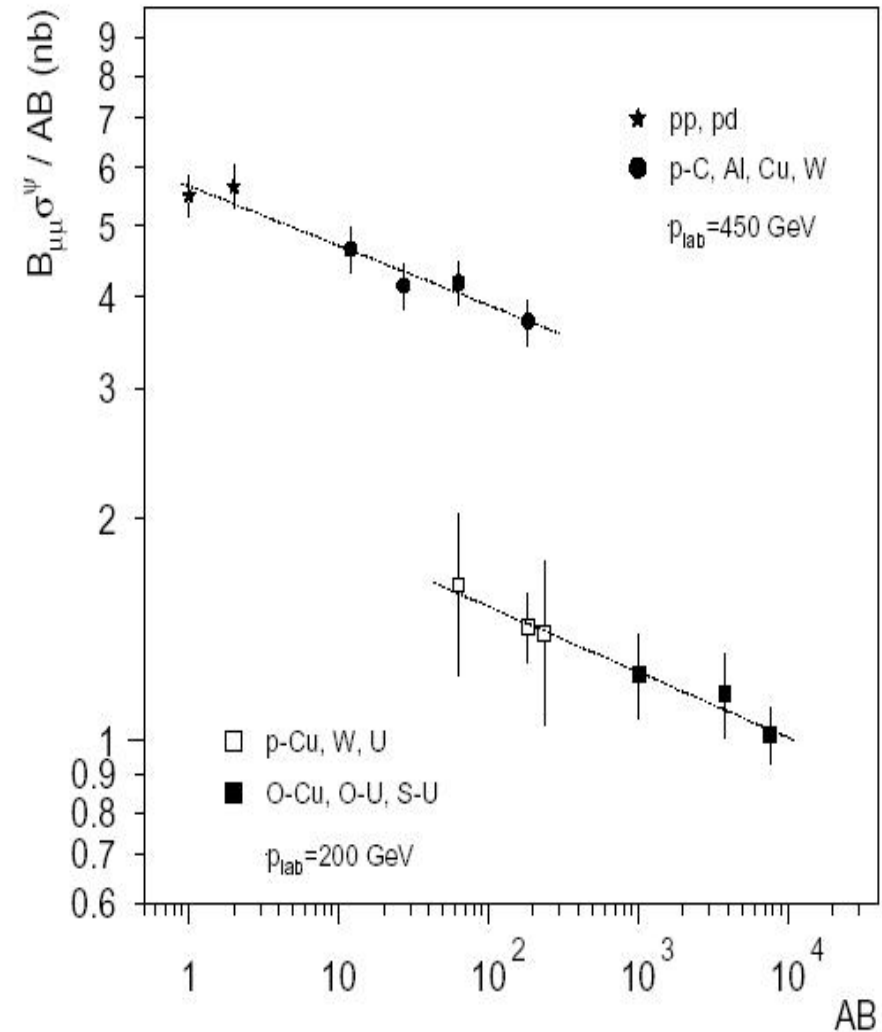


# NA38 : toutes collisions

@ 200 et 450 GeV

Mêmes pentes !

$$\sigma_{\psi}(AB) = \sigma_{\psi}(pp) \times (AB)^{\alpha}$$



# NA38 : toutes collisions

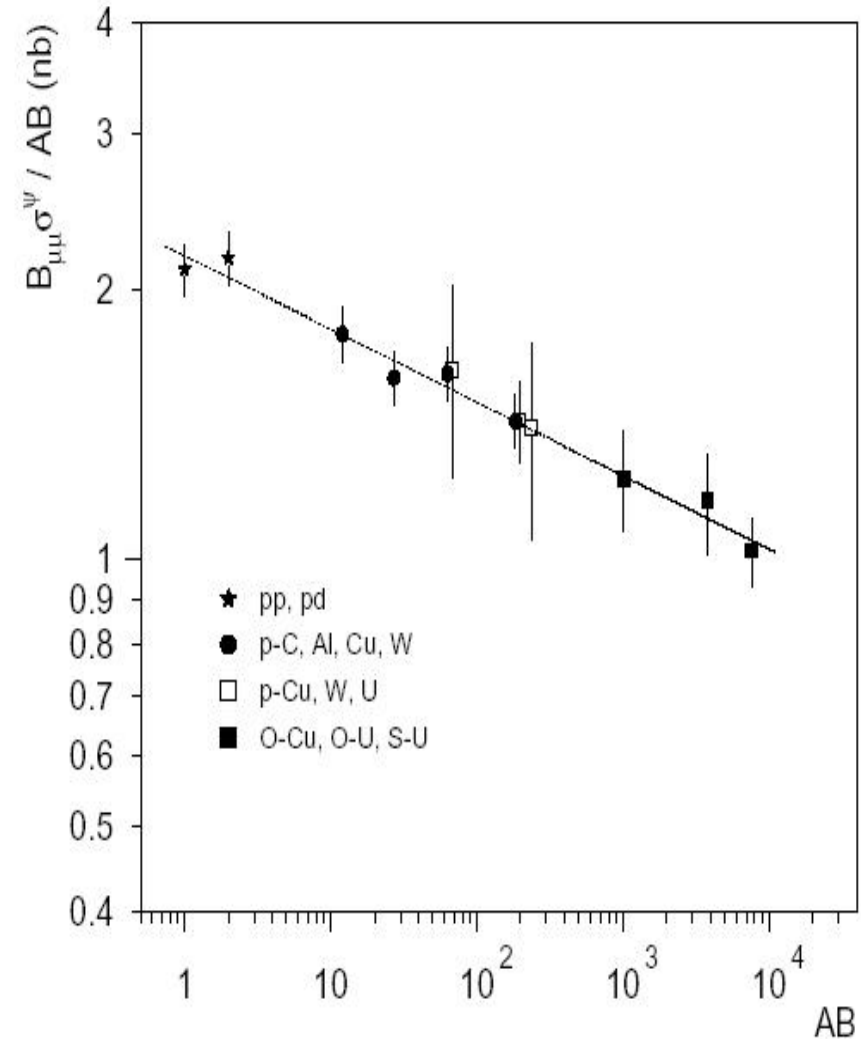
@ 200 et 450 GeV  
Mêmes pentes !

$$\sigma_{\psi}(AB) = \sigma_{\psi}(pp) \times (AB)^{\alpha}$$
$$\alpha = 0,918 \pm 0,015$$

Même suppression  
en pA et AB !

! pas de plasma !

NA38, PLB466 (1999) 408



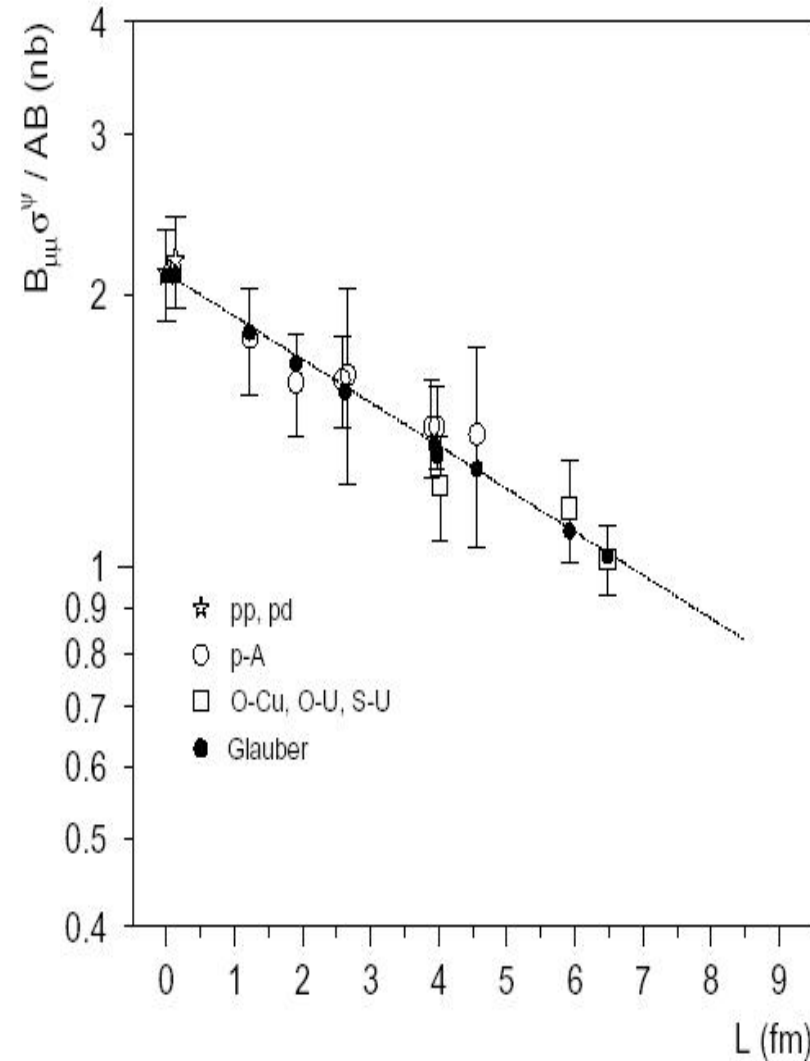
# Absorption nucléaire ?

En fonction de la  
longueur de matière  
traversée...  
(Glauber)

$$\exp(-\sigma_{\text{abs}} \rho^{\circ} L)$$

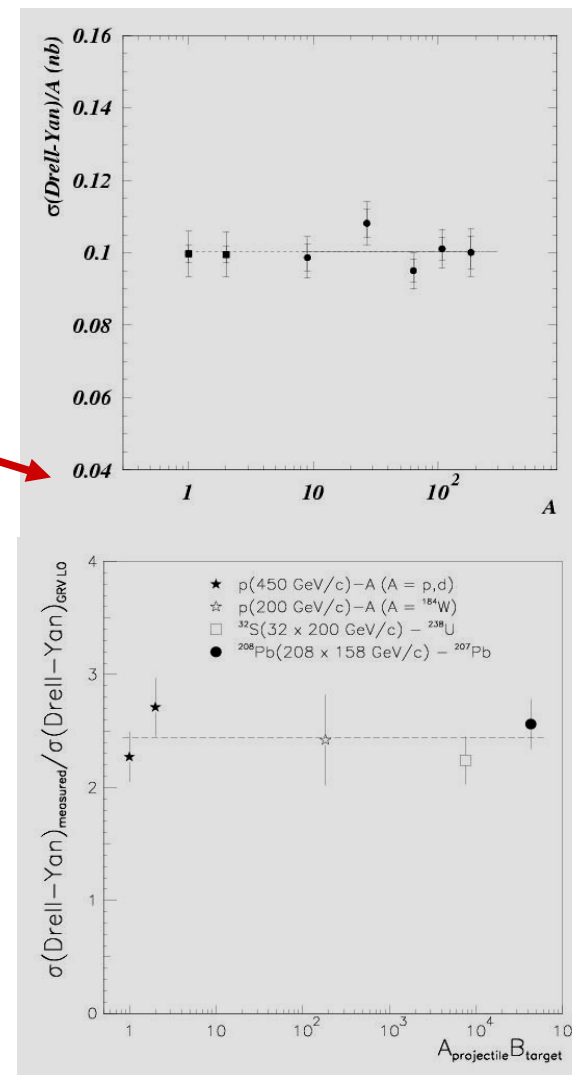
↓

$$\sigma_{\text{abs}} = 6,5 \pm 1,0 \text{ mb}$$
$$(\rho^{\circ} = 0,17 \text{ nucl/fm}^3)$$



# Absorption nucléaire !

- Processus durs (Drell-Yan, charme ouvert) vont bien comme  $(AB)^1$ !
  - pas un effet initial pour le  $\psi$  !
- Analyse finale NA50
  - $\sigma_{abs} = 4,18 \pm 0,35 \text{ mb}$
  - calculé sur pA seuls
  - pas de déviation en SU

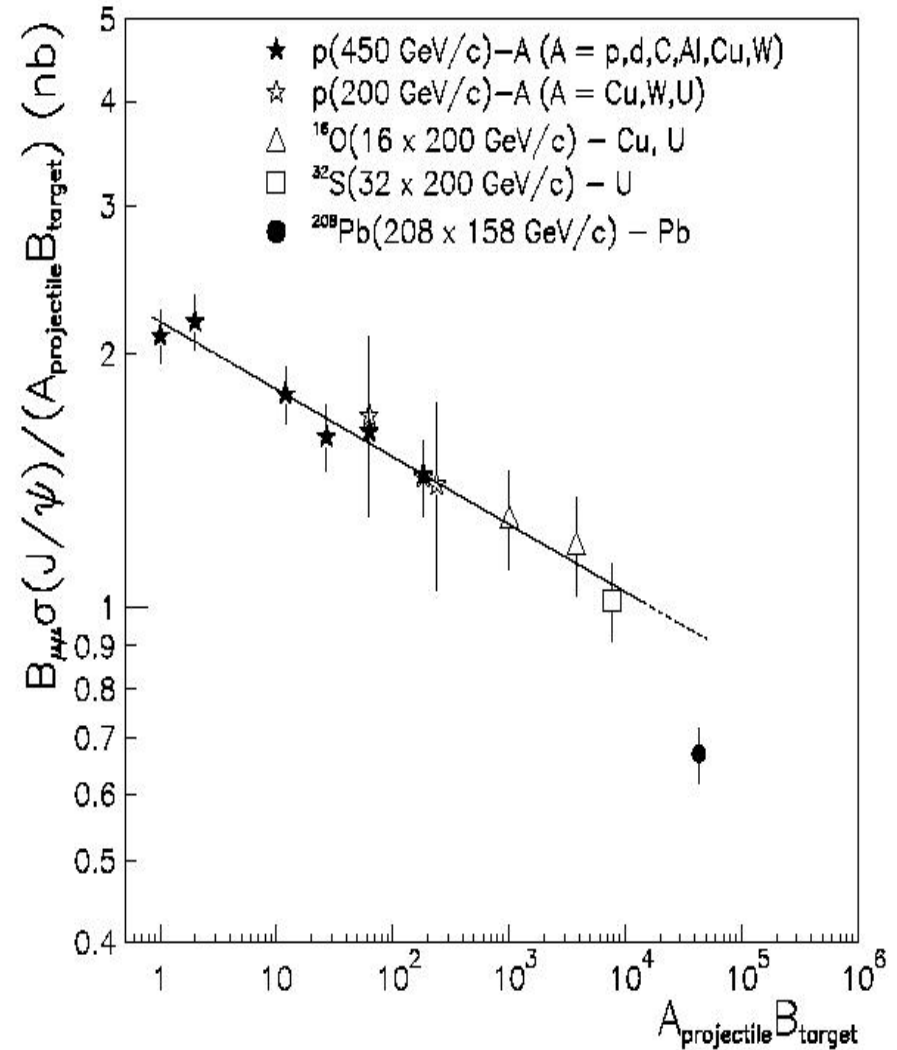


# NA50 : collisions Pb+Pb

@ 158 GeV

Suppression

« anormale »





# NA50 en fonction de la centralité

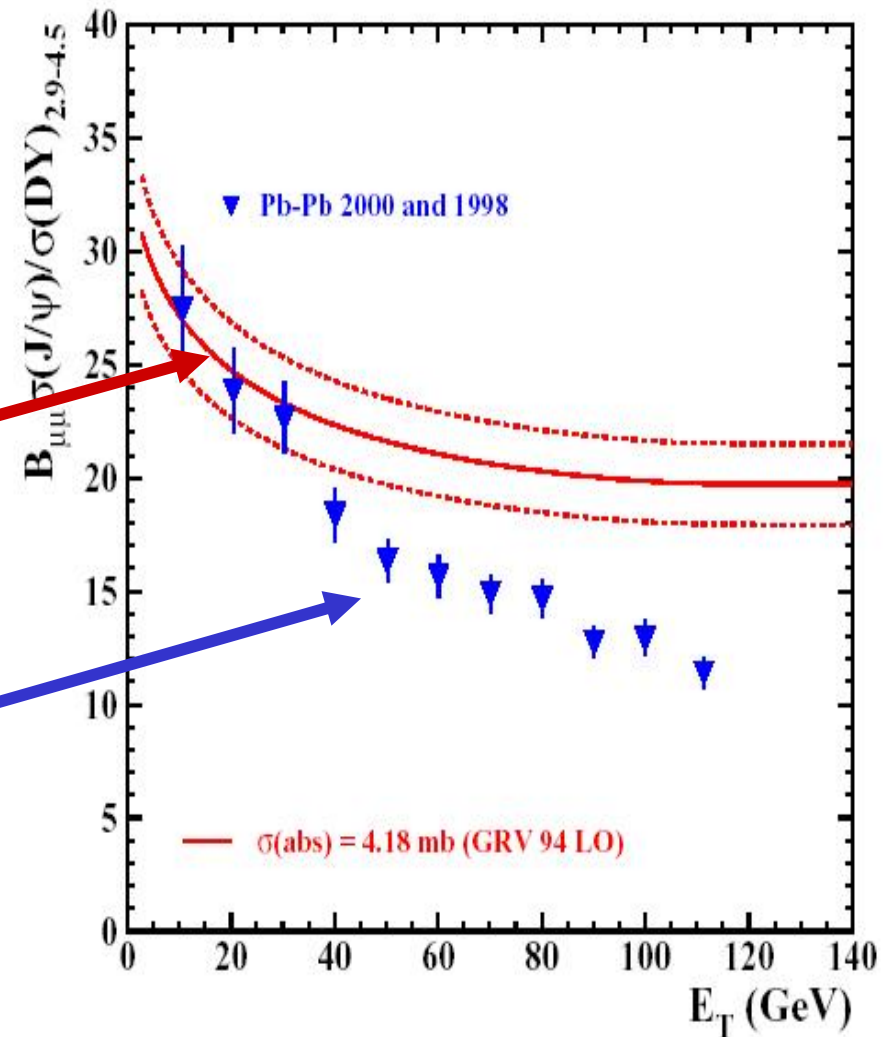
Ici, en fonction de l'énergie transverse

En rouge, effet de l'absorption

Collisions périphériques en accord avec absorption

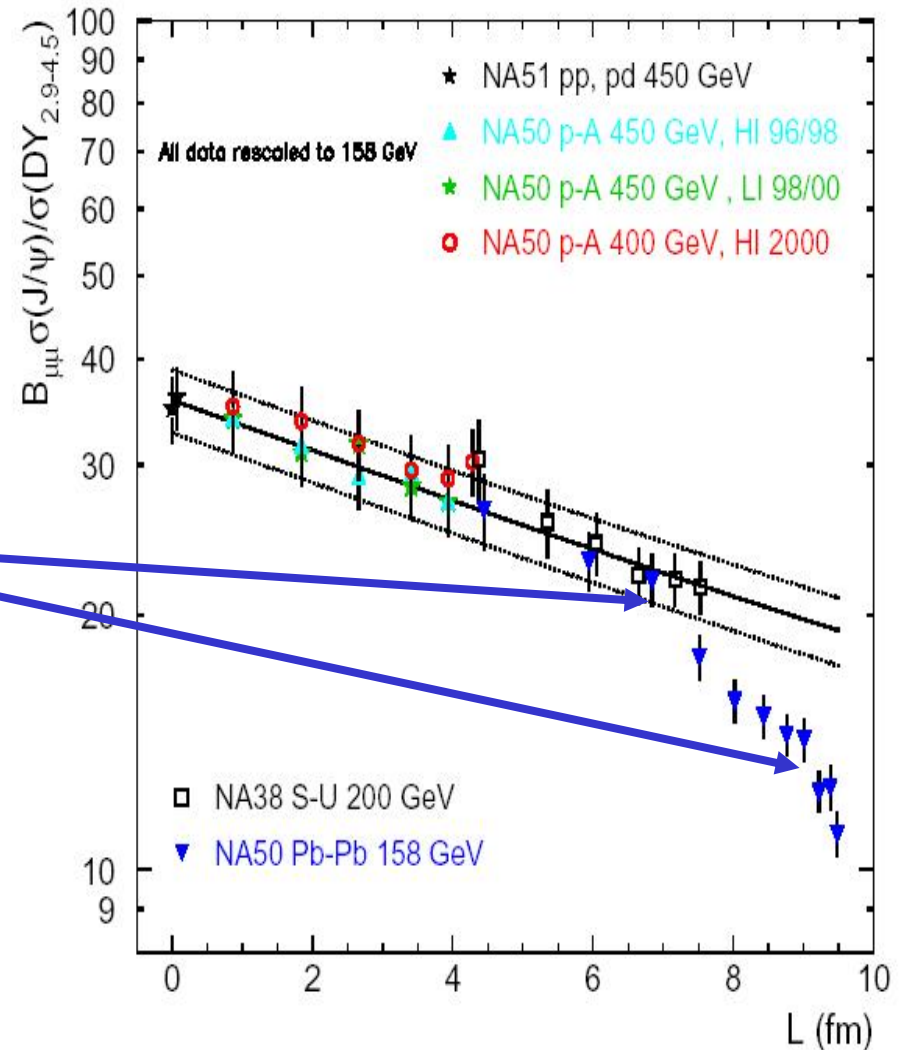
Suppression anormale

(résultats finals)



# Résumé de NA38 à NA50

- En fonction de  $L$
- Raccordement S+U / Pb+Pb périphérique = absorption nucléaire
- On devine deux décrochements
  - Attention  $L \neq \varepsilon$  !
- Les théories arrivent-elles à reproduire ça ?



# Th1 : Co-voyageurs hadroniques

Absorption par hadrons  
voyageant avec le  $J/\psi$



Progressive & déjà en SU

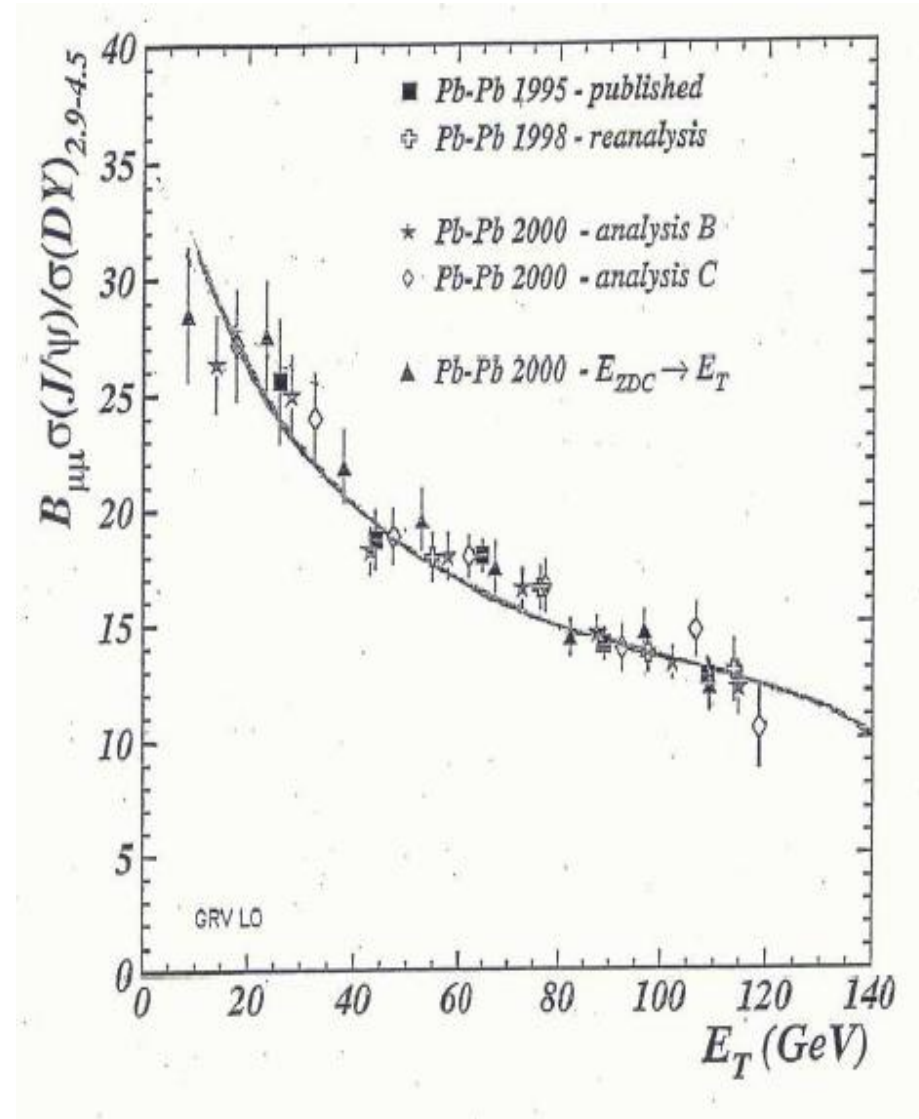
Trois paramètres :

$$\sigma_{\text{abs}} = 4,5 \text{ mb (sur pA)}$$

$$\sigma_{\text{co}} = 0,65 \text{ mb (sur PbPb)}$$

Normalisation (PbPb=SU)

Capella & Sousa, nucl-th/0303055  
PRC65 (2002) 054908



# Critique : co-voyageurs

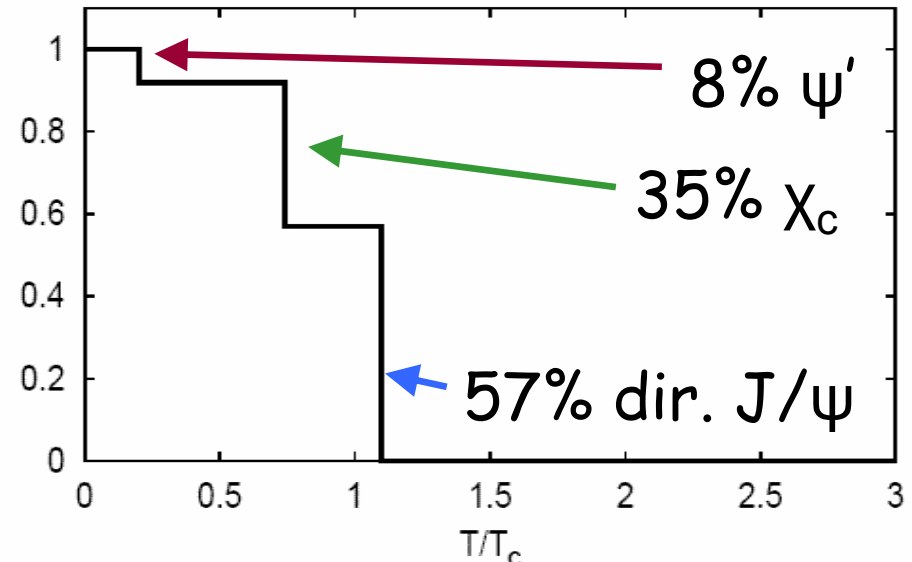
- Pour ajuster pA,  $\sigma_{co}$  est faible
  - Pour ajuster PbPb, la densité de comovers semble (trop) élevée... ( $> 1 \text{ co}/\text{fm}^3$ )
  - Mais bon, ça marche...
- 
- NB : d'autres approches hadroniques du même style ne marchent pas !
    - Ex: Gaz de hadrons avec  $T < 177 \text{ MeV}$

## Th2 : Fonte séquentielle

- En fait :  $J/\psi \sim 0,6 J/\psi + 0,3 \chi_c + 0,1 \psi'$   
Désintégration de mésons plus lourds  
Exemple :  $\psi' \rightarrow J/\psi + \dots$  (58% et plus de  $10^3 \text{fm}$ )

- États excités moins liés

- Fondent mieux
- $T_{\text{diss}}(\psi') \sim 0,2 T_c$
- $T_{\text{diss}}(\chi) \sim 0,7 T_c$
- $T_{\text{diss}}(J/\psi) \sim 1,1 T_c$



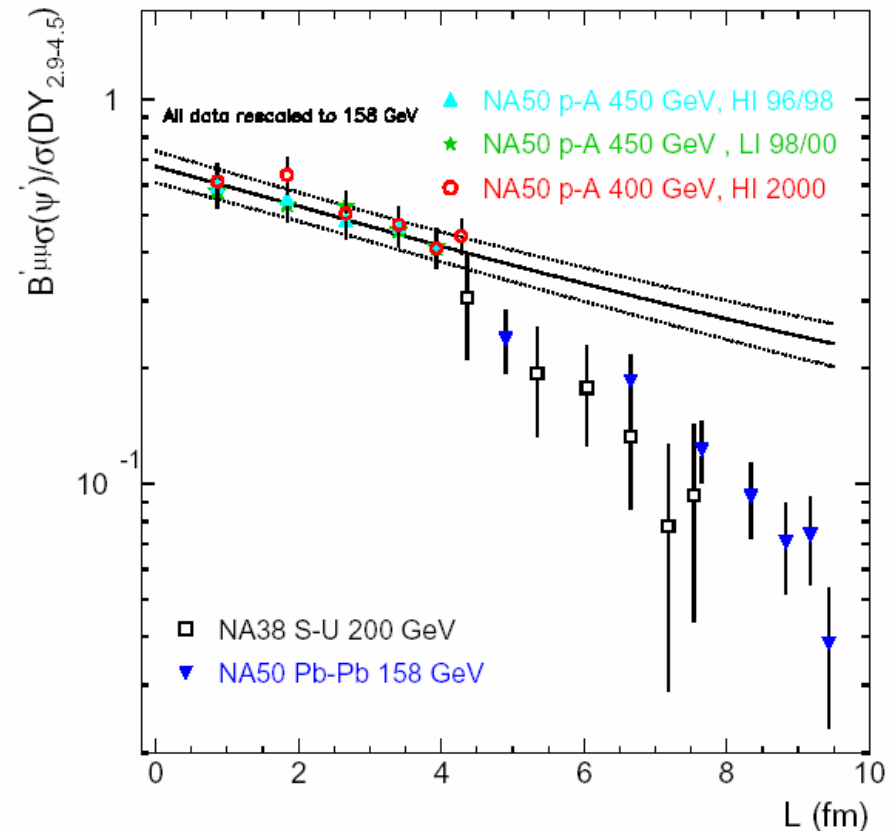
# (parenthèse sur le $\psi'$ )

- Suppression anormale dès S-U ! à  $L = 4$  fm



? Plasma ?

- Énergie de liaison si faible que personne n'ose conclure sur ce qui l'absorbe...



# Th2 + nouvelles du réseau

- Nouvelles  $T_{\text{diss}}$  plus hautes :

- $T_{\text{diss}}(\psi') \sim T_{\text{diss}}(\chi)$

- >  $1,1 T_c$

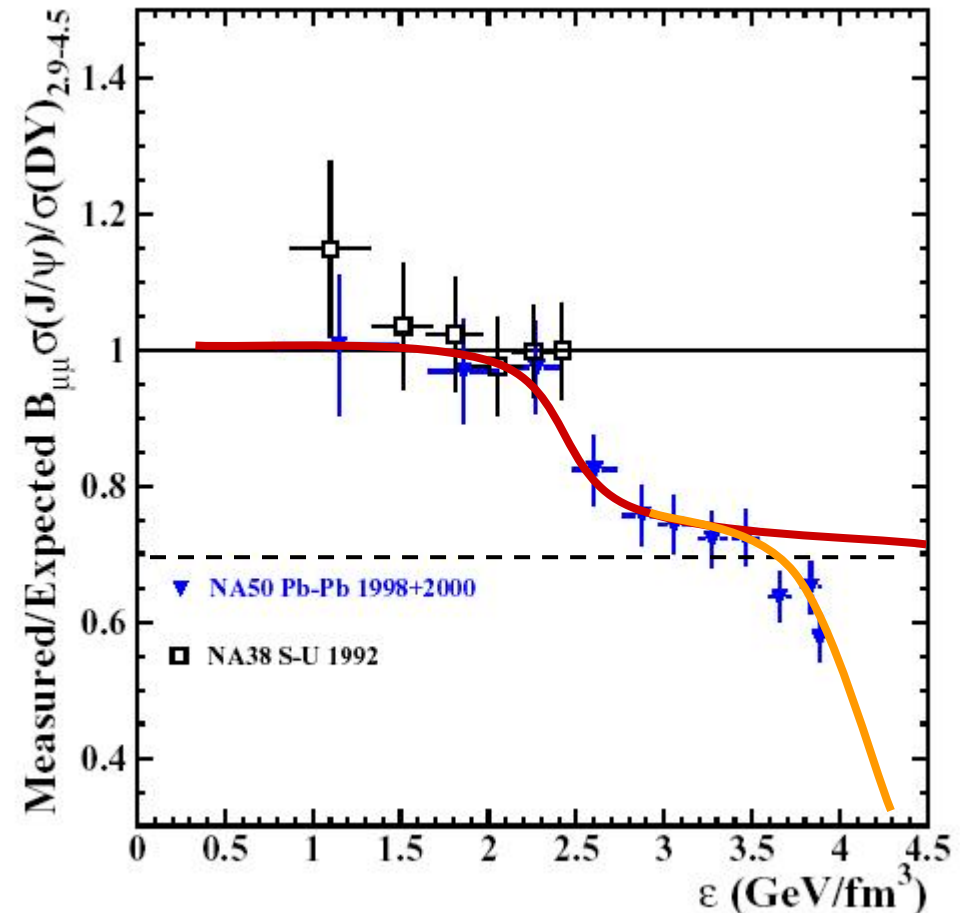
- $T_{\text{diss}}(J/\psi)$

- $\sim 1,5 \text{ à } 2 T_c$

Mais  $\varepsilon$  va comme  $T^4$ ...

Second décrochement trop haut ?

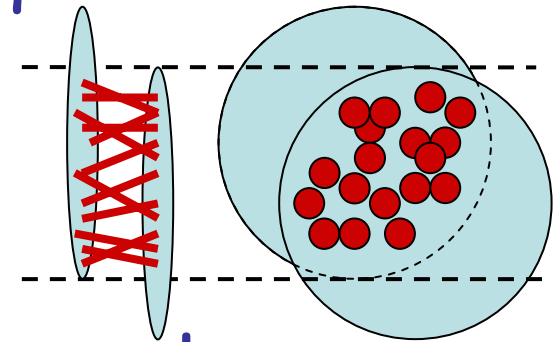
Datta & al, hep-lat/0409147  
Alberico & al, hep-ph/0507084  
Wong, hep-ph/0408020  
Courbes = microsoft !



# Th3 : Percolation de partons\*

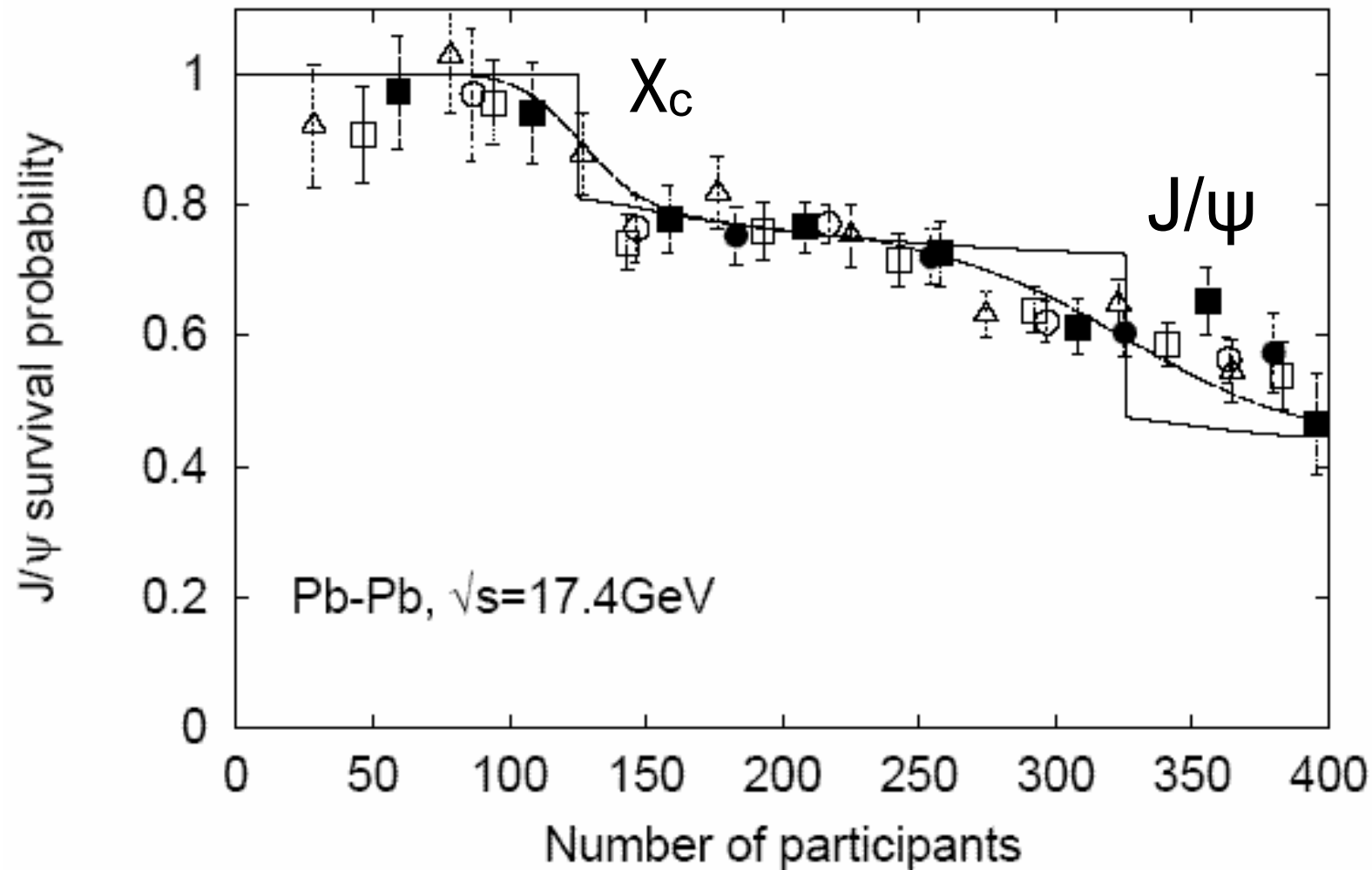
\* par un nul...

- Percolation = phénomène critique
  - Empilement aléatoire de disques
  - Taille des clusters = paramètre d'ordre
- Partons interagissant au pré-équilibre
  - « Déconfinement géométrique »
  - « Plasma non thermalisé »
  - Pré-requis du plasma ?
- $J/\psi$  supprimé par écrantage de couleur
- Percolation ou plasma thermalisé ?
  - ≠ branchement : densité de partons / énergie...



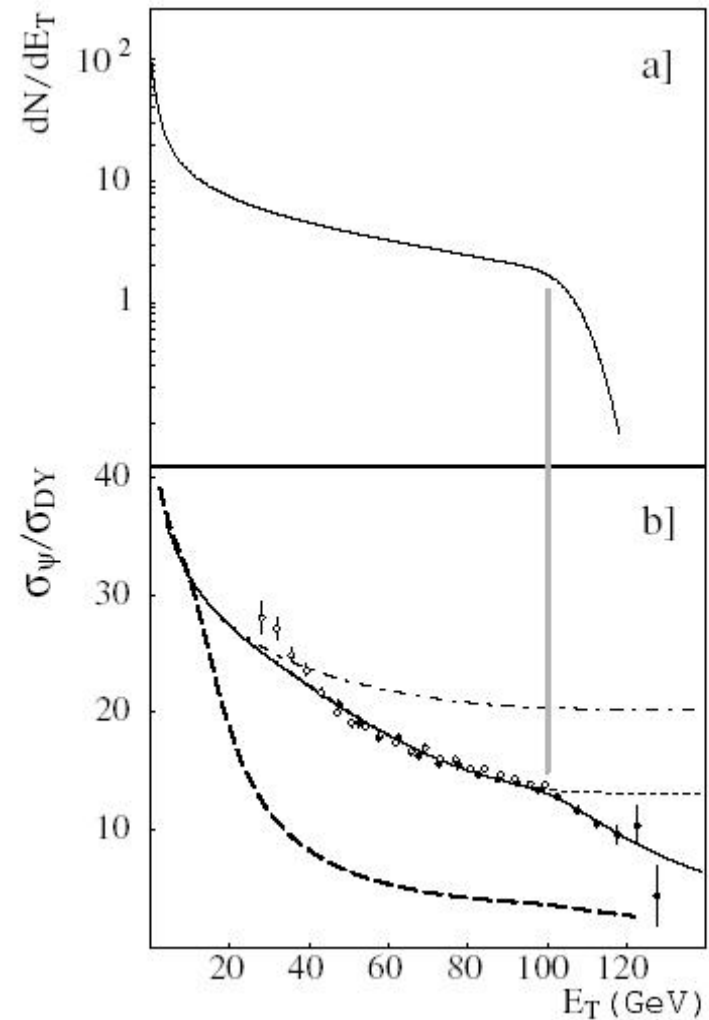


# Th3 : Percolation de partons



# Th 4 : fluctuations

- Fluctuations de  $E_T$  échantillonnent des densités d'énergie différentes...
- Suppression artificielle
- Extrême prudence % second décrochement



# Th5 : Modèles de plasma

- Plusieurs modèles de plasma reproduisent les données !

1. hydro+transport dans un plasma

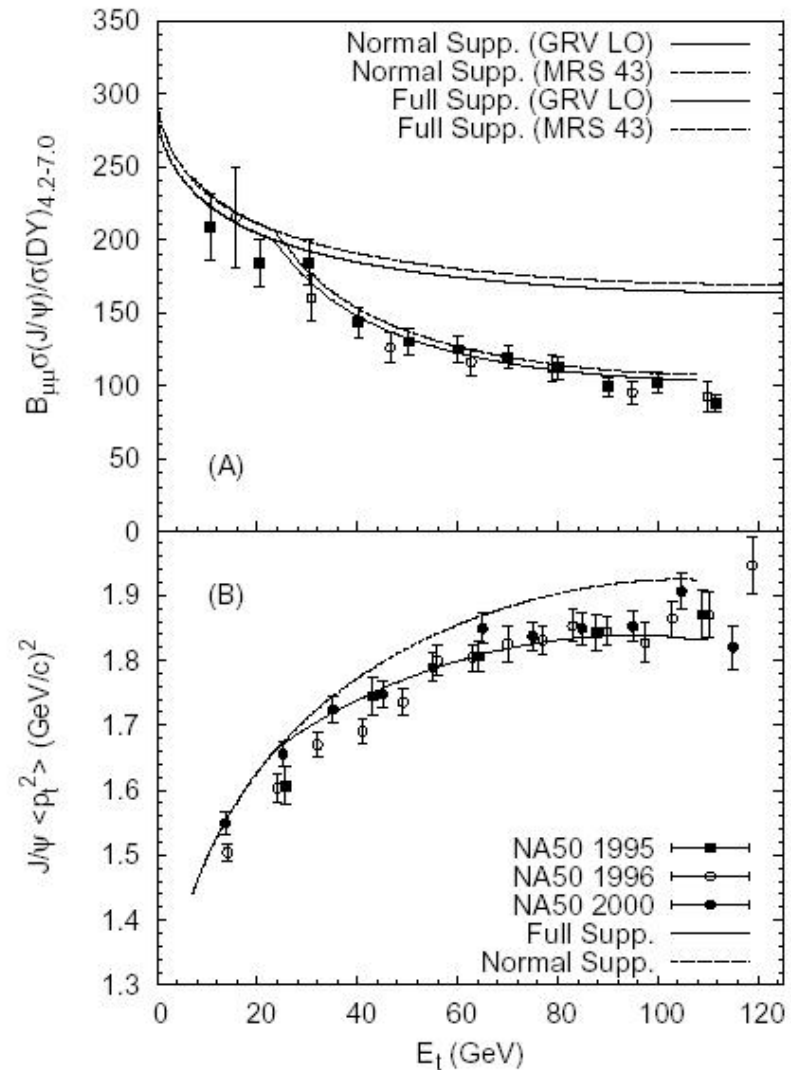
Prédiction  $\langle p_T^2 \rangle \rightarrow$

2. Suppression + régénération

- Et autres...

(incluent la fonte du  $x_c$ )

1. Zhu, Zhuang, Xu, PLB607 (2005) 107
2. Grandchamp & al, PRL92-2004-212301

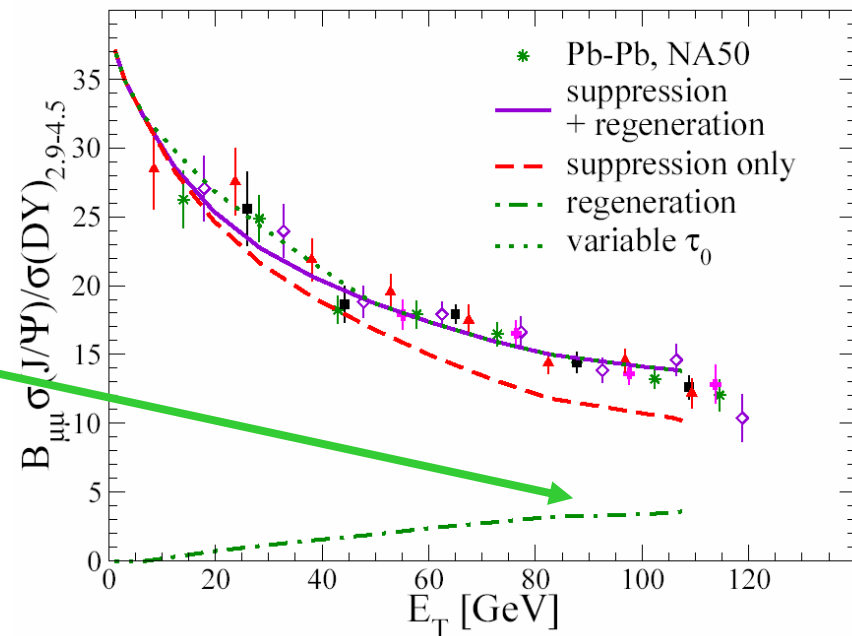


# Th5b : Modèles de plasma

- Deux composantes
  - Suppression dans PQG (et hadrons)
  - Production statistique à l'hadronisation

Régénération : les quarks  
c et c se retrouvent à  
l'autre bout du plasma  
négligeable au SPS...

Faible au SPS



# Interprétations NA50

- En résumé...
  - Suppression anormale bien décrite par la fonte du  $\chi_c$  par déconfinement...
  - Que se soit dans un plasma thermalisé
  - Ou par percolation
- Mais il reste un modèle hadronique...
  - (les covoyageurs, peut-être un peu exagéré)



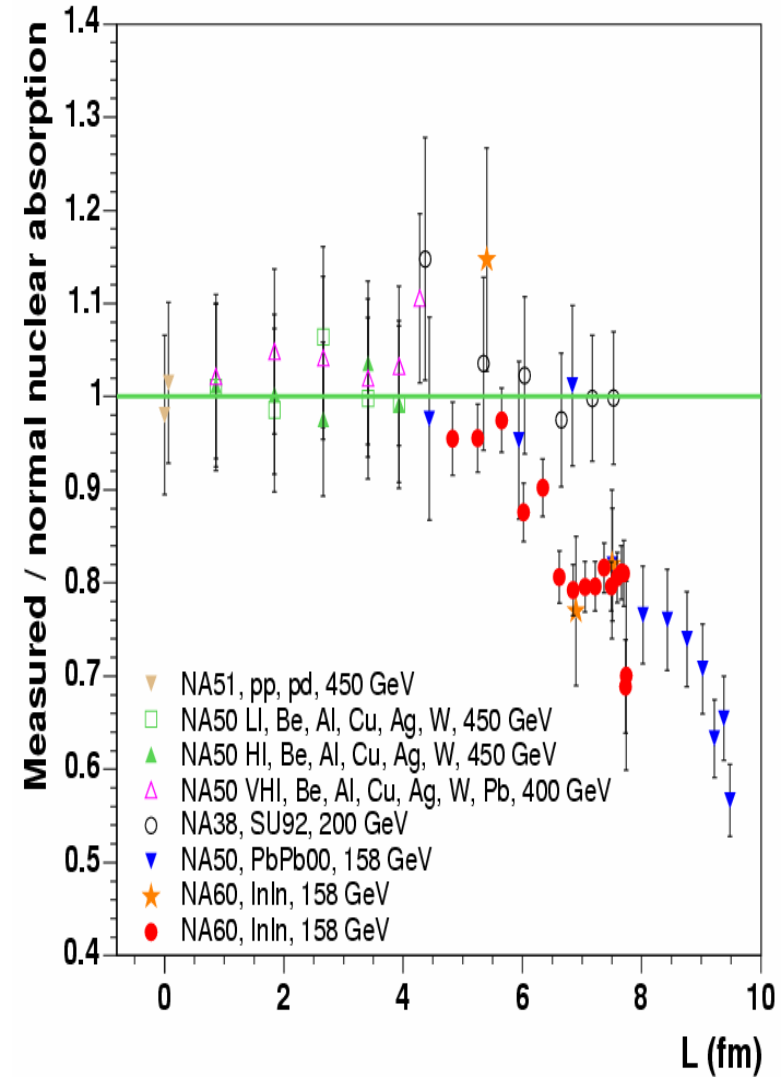
Attention !

À partir d'ici toutes les données  
 $A+A \rightarrow J/\psi$  sont préliminaires !

<http://qm2005.kfki.hu/>

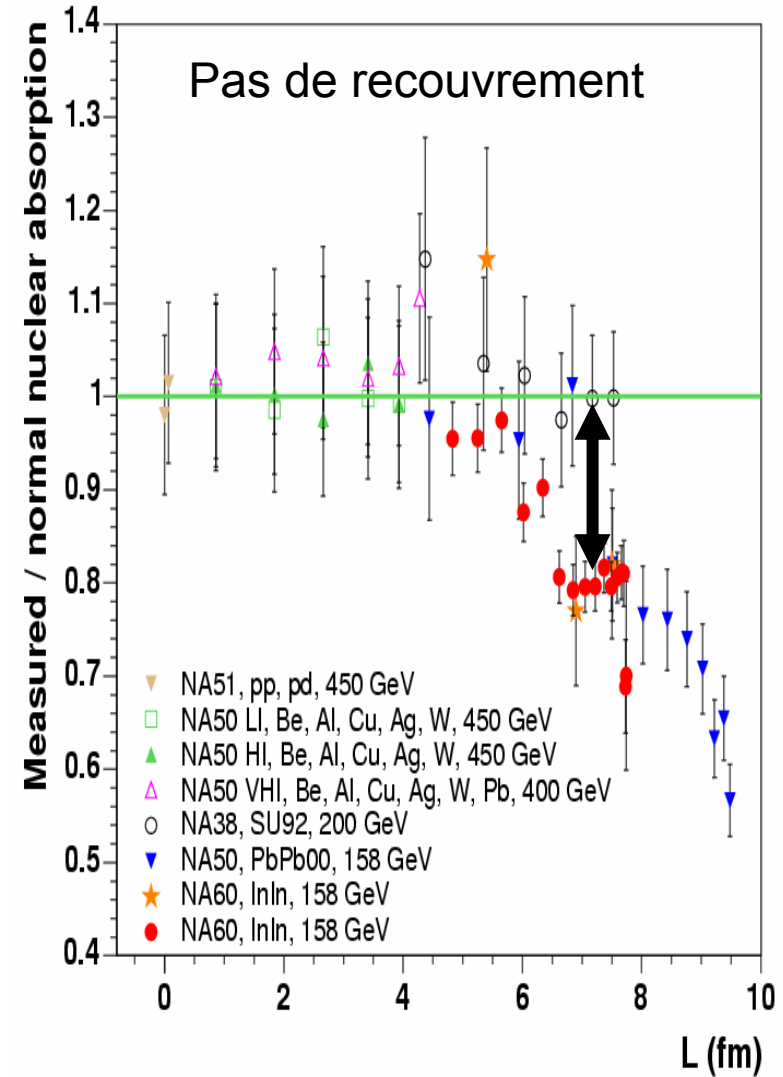
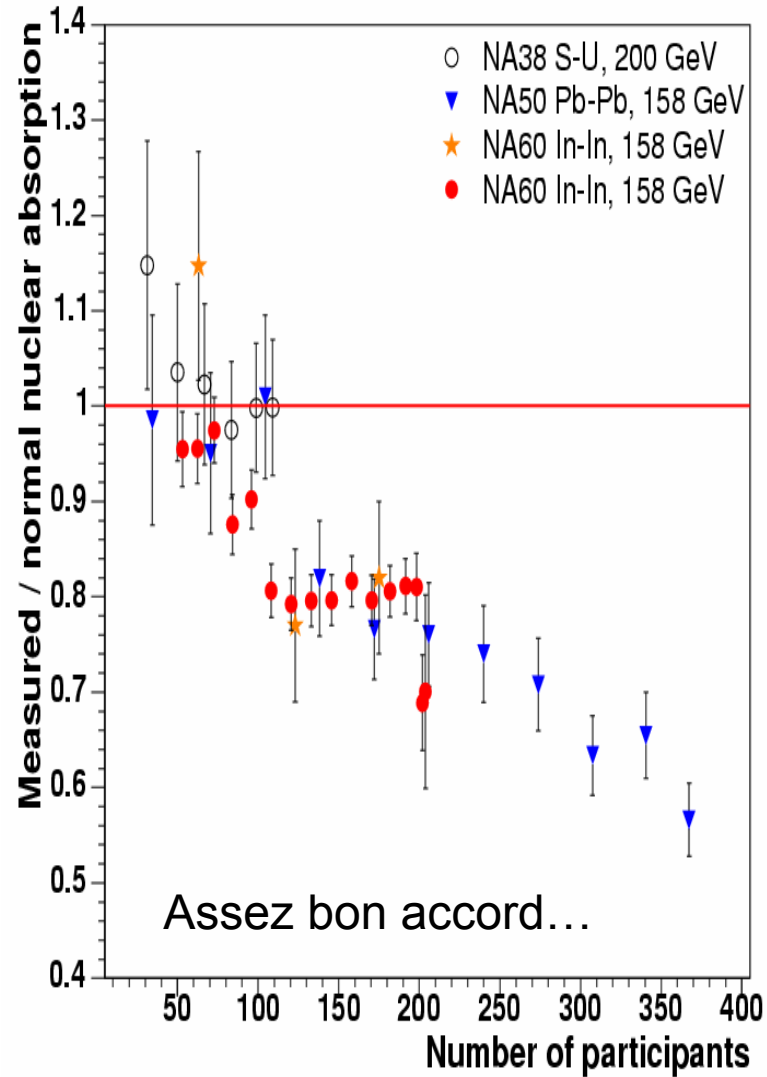
# NA60 : collisions In+In

- Résultat tout récent !
  - QM05, août 2005
- Suppression anormale en In+In !
  - $J/\psi$  / DY
  - $J/\psi$  / nucl. abs.
- Ne se superpose pas à S-U en fonction de L !



Arnaldi, Quark Matter 2005  
Philippe Pillot, Joliot Curie 2005

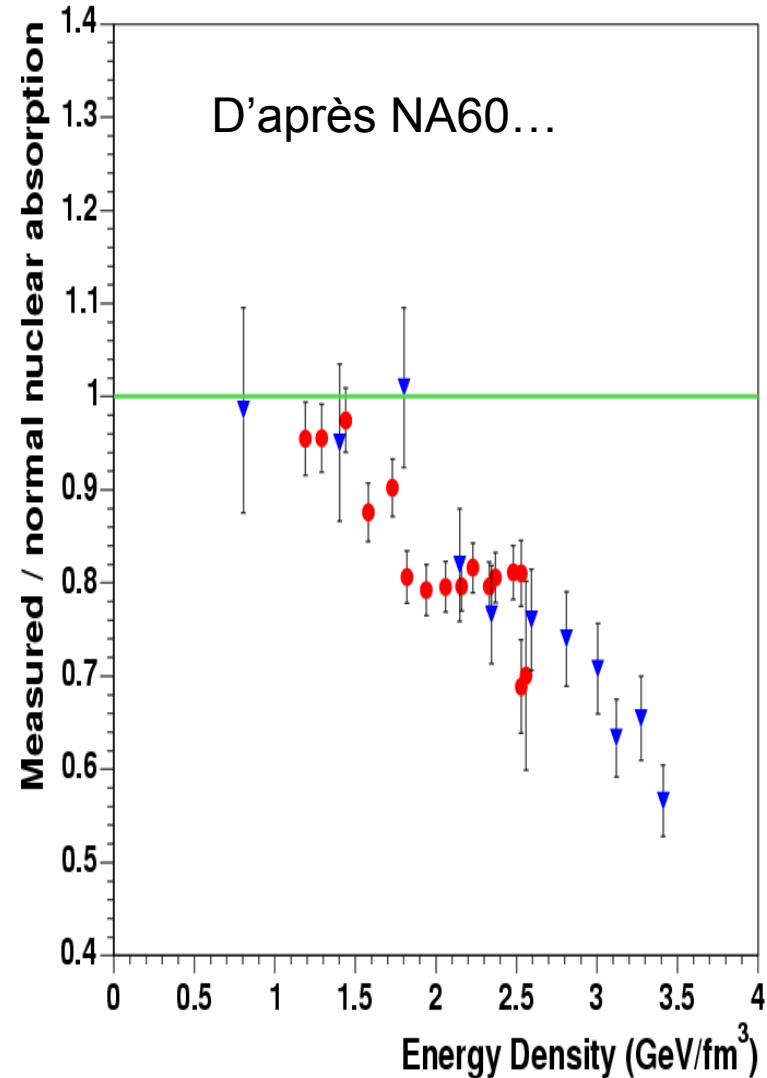
# Quelle est la bonne variable ?





# Densité d'énergie ?

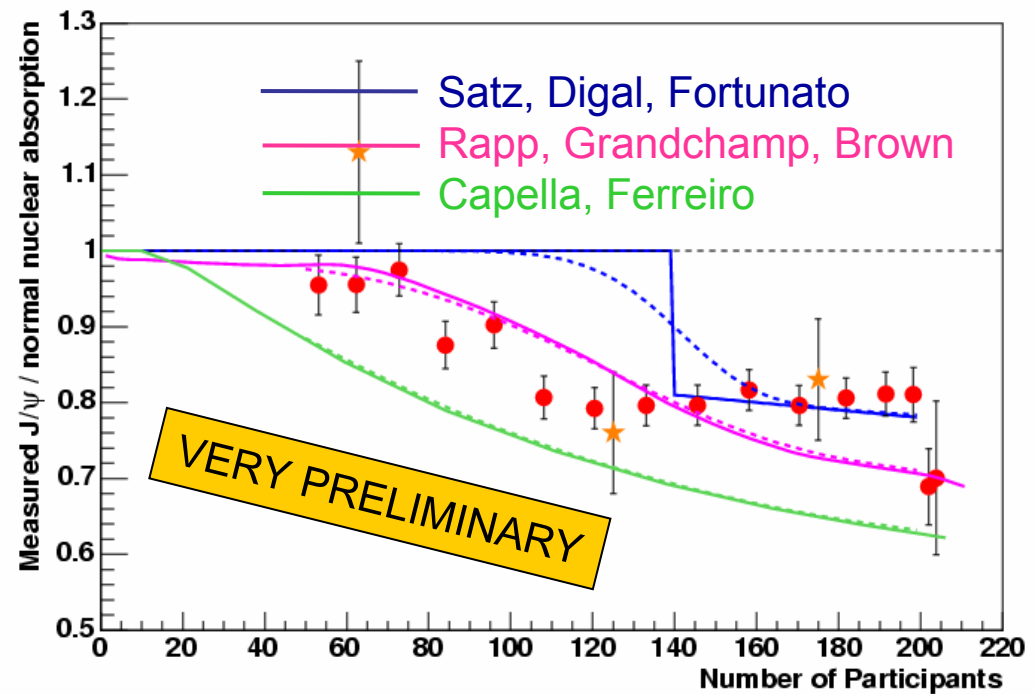
- Pas facile à mesurer...
- Points NA50  $\neq$  NA50 publiés !  
(et donc de SU)
- Analyse cohérente  
NA38, 50 et 60 !

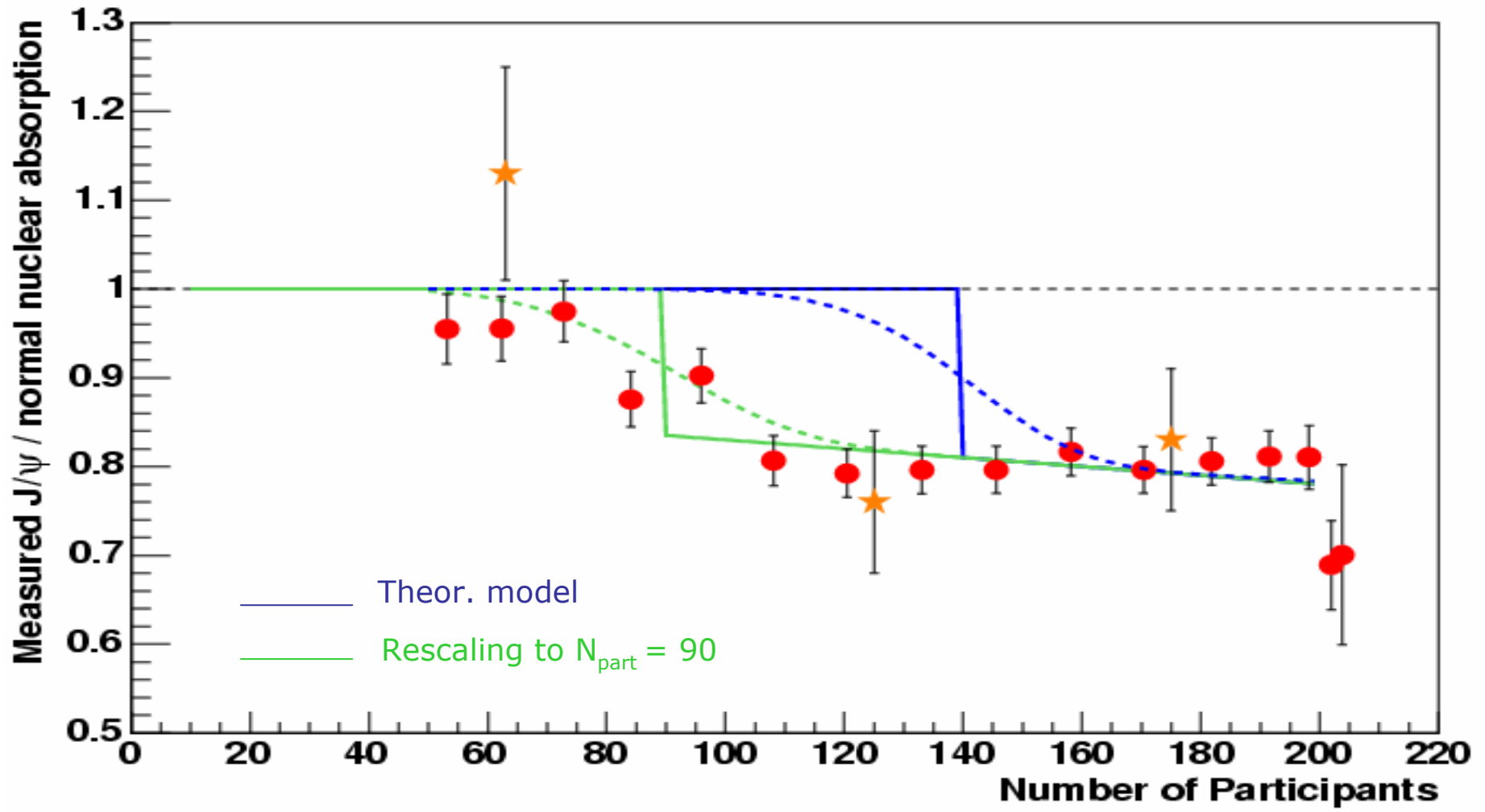


# NA60 : comparaison

- Modèles qui marchaient pour NA50 ne marchent pas pour NA60...
- Mais ils n'ont pas encore eu le temps de s'adapter 😊
- À suivre...

- Percolation
- Plasma
- Covoyageurs



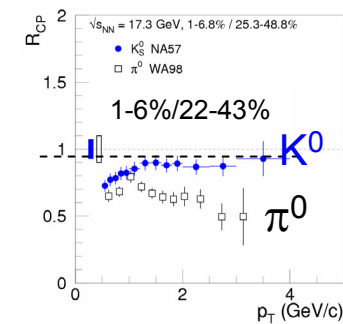
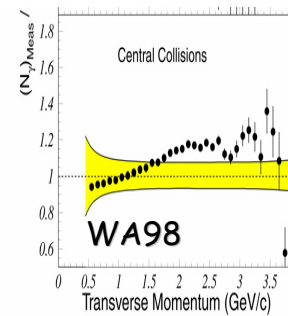
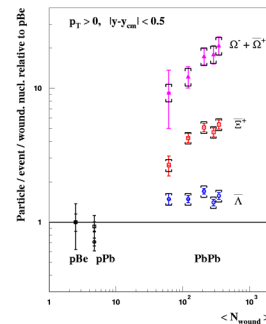
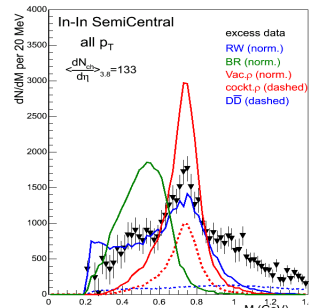
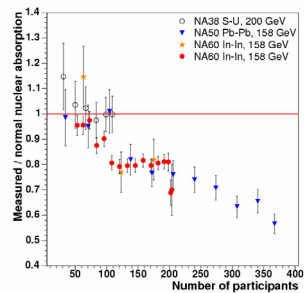


# Moralité SPS ( $\sqrt{s}=17,3 \text{ GeV}$ )

- On observe une suppression anormale !
  - Plutôt discontinue  $\rightarrow$  transition de phase ?
    - Vers  $N_{\text{part}} \sim 90$  en In+In et en Pb+Pb
    - Vers  $\varepsilon \sim 2$  à  $2,5 \text{ GeV}/\text{fm}^3$
    - Percolation ou plasma thermalisé ?
  - Incomplète  $\rightarrow$  fonte des états excités ?
    - Plateau très net en In+In (mais très préliminaire)
  - Inexplicable par modèle hadronique
    - (pour l'instant)
- Reste le déconfinement non ?

# Conclusions au SPS

- Suppression anormale du  $\psi$
- Élargissement du  $\rho$
- Augmentation (thermique) de l'étrangeté
- Photons (& dileptons) thermiques
- Soupçon de « jet quenching »



# Étrangeté versus $J/\psi$

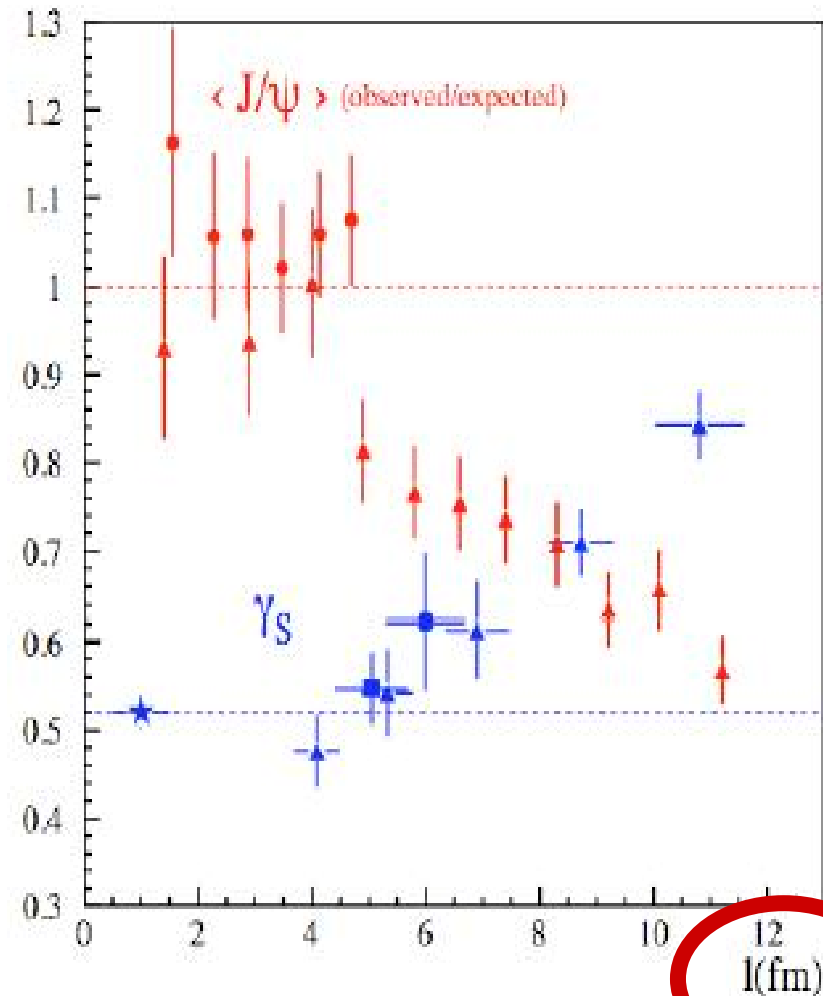
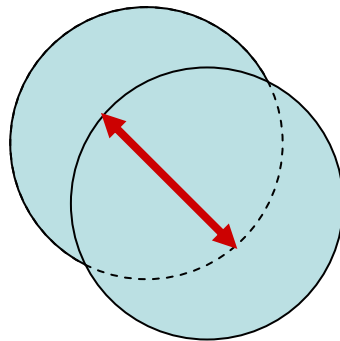
- Ce qu'on aimerait...

Corréler des signatures !

- Suppression  $J/\psi$
- Augmentation étrangeté

- Mais avec une autre variable...

- longueur de recouvrement



# Coup de publicité...

- Annonce faite le 10 février 2000
- Résultats combinés de plusieurs expériences...
- Mais le consensus n'était pas général...
- L'est-il aujourd'hui ?

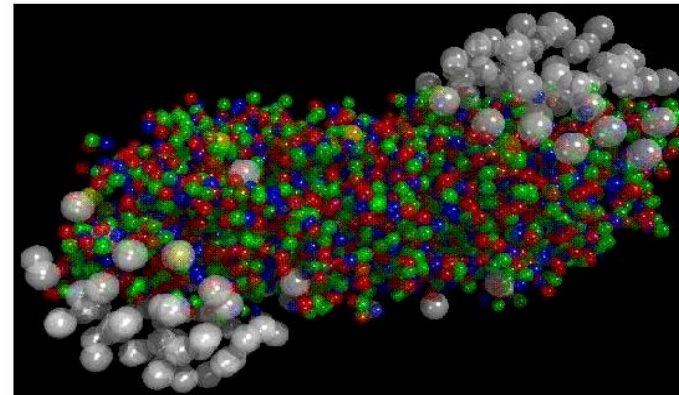


Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire  
European Organization for Nuclear research

Laboratoire Européen pour la Physique des Particules  
European Laboratory for Particle Physics  
Europäisches Laboratorium für Teilchenphysik  
Laboratorio europeo per la fisica delle particelle

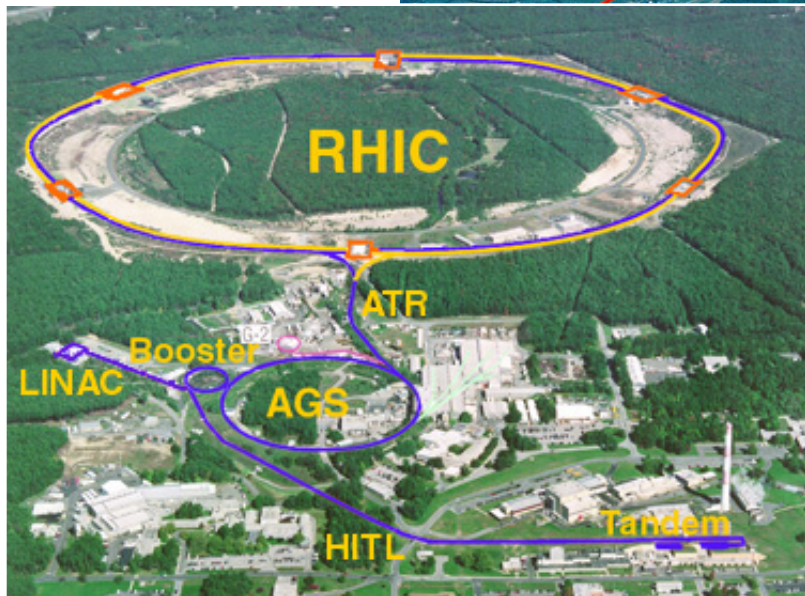
PRESS RELEASE

## New State of Matter created at CERN



At a special seminar on 10 February, spokespersons from the experiments on CERN\* 's Heavy Ion programme presented compelling evidence for the existence of a new state of matter in which quarks, instead of being bound up into more complex particles such as protons and neutrons, are liberated to roam freely.

Theory predicts that this state must have existed at about 10 microseconds after the Big Bang, before the formation of matter as we know it today, but until now it had not been confirmed experimentally. Our understanding of how the universe was created, which was previously unverified theory for any point in time before the formation of ordinary atomic nuclei, about three minutes after the Big Bang, has with these results now been experimentally tested back to a point only a few microseconds after the Big Bang.

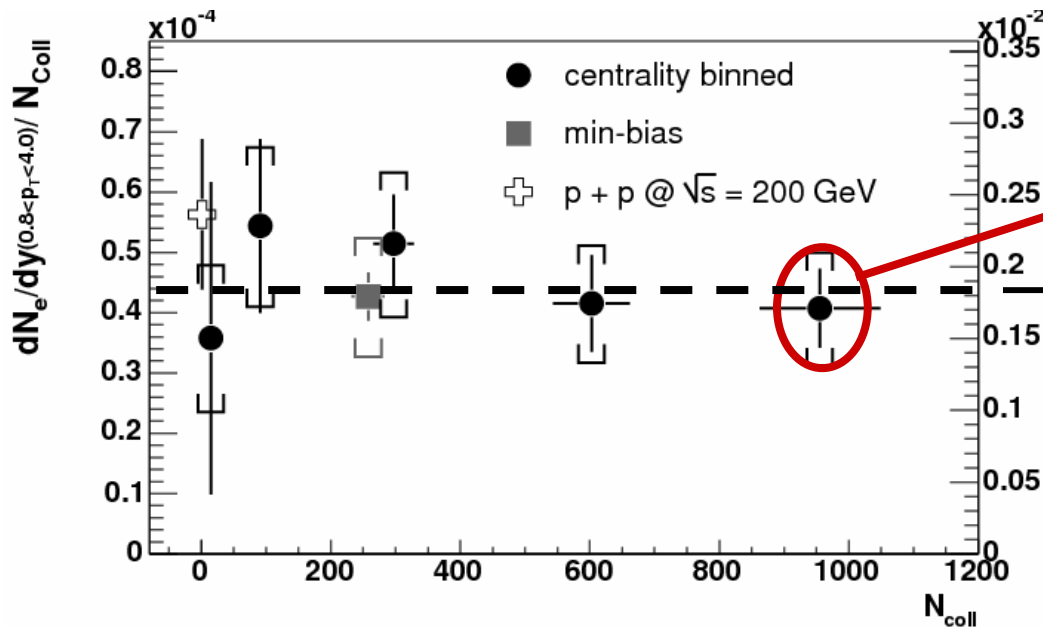




# RHIC : référence pour J/ψ ?

- Plus de Drell-Yan auquel se référer !

- Charme ouvert ( $c\bar{c} \rightarrow DD$ ) à terme



10 à 20 paires  $cc$  !

Le charme ouvert  
va comme  $N_{coll}$

25% d'erreur systématique  
(besoin d'un détecteur de vertex)

- Pour l'instant  $R_{AB}$

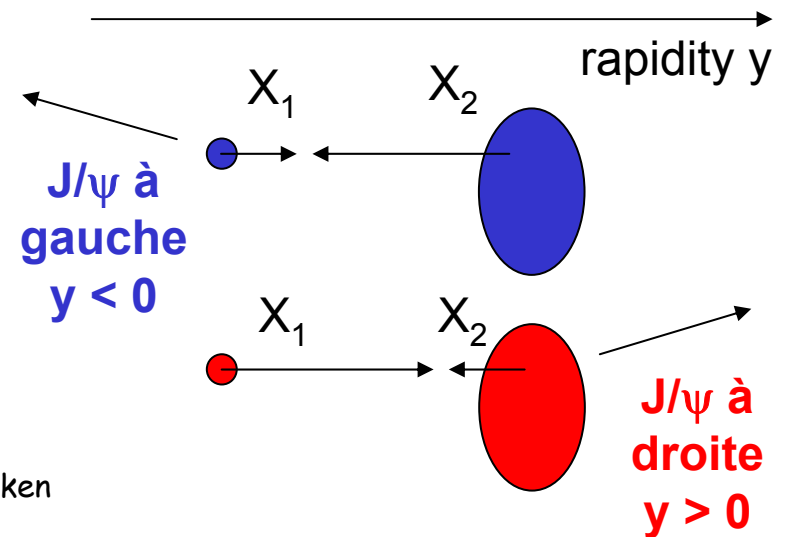
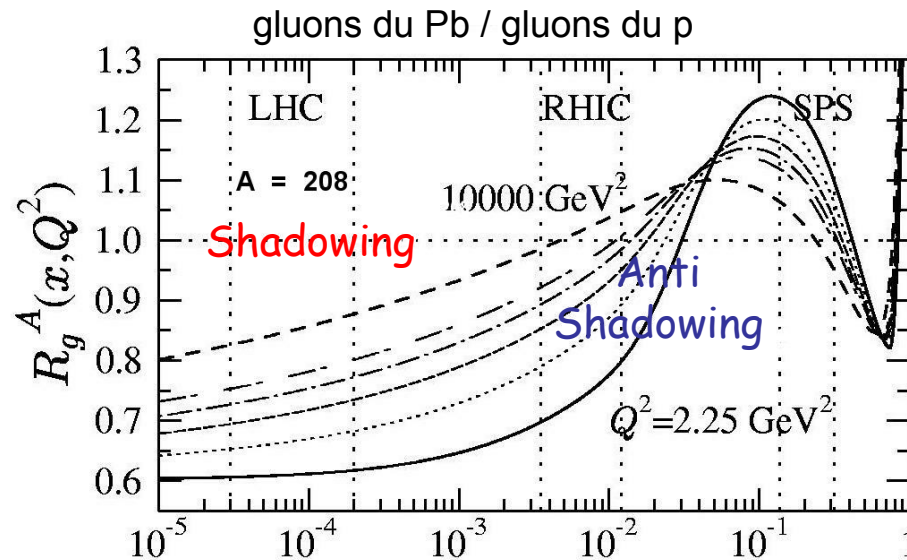
$$R_{AB} = \frac{N_{\psi}^{AB}}{N_{\psi}^{PP} \times \langle N_{coll} \rangle}$$

# RHIC : collisions d+Au

Nouvel effet : le shadowing (Cf. Jean-Marc)

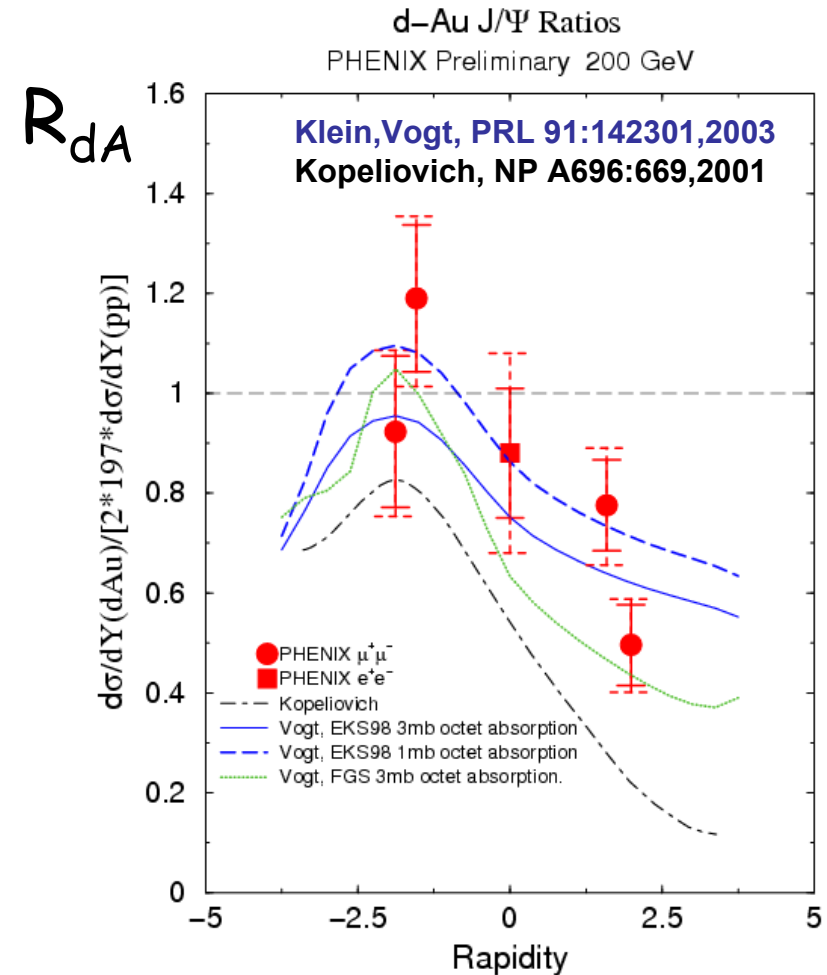
- Partons dans un noyau  $\neq$  partons dans nucléons
- Modification des fonctions de structure

Exemple de shadowing des gluons

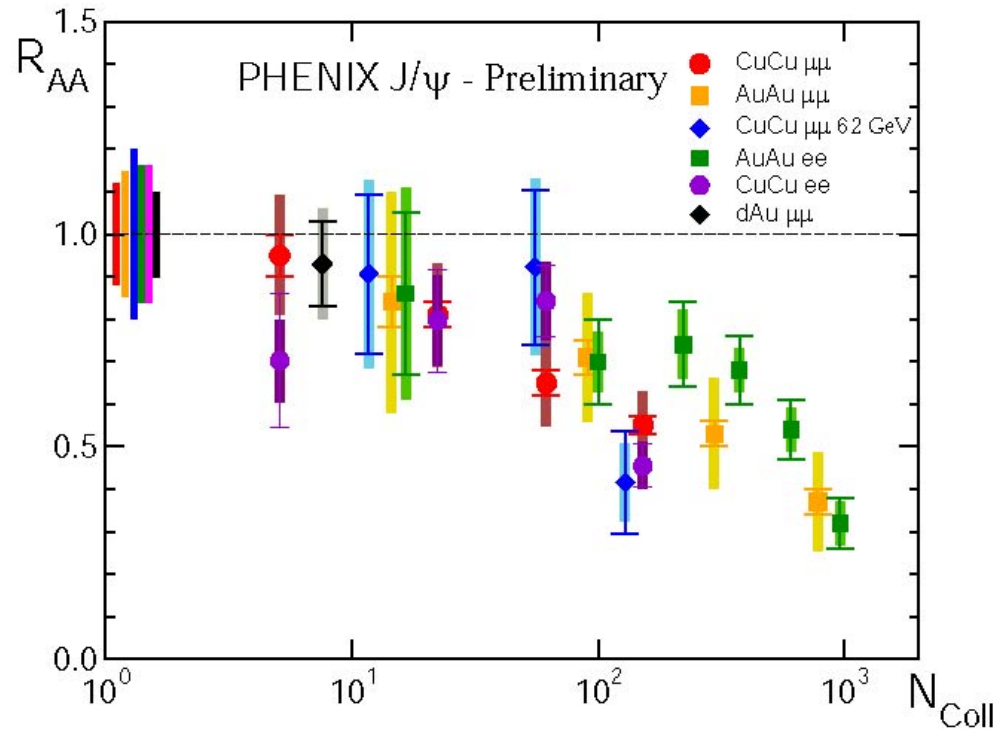


# RHIC : collisions d+Au

- On voit un peu de shadowing à RHIC...



# RHIC : collisions Au+Au



**$J/\psi \rightarrow \mu\mu$**   
**muon arm**  
 **$1.2 < |y| < 2.2$**

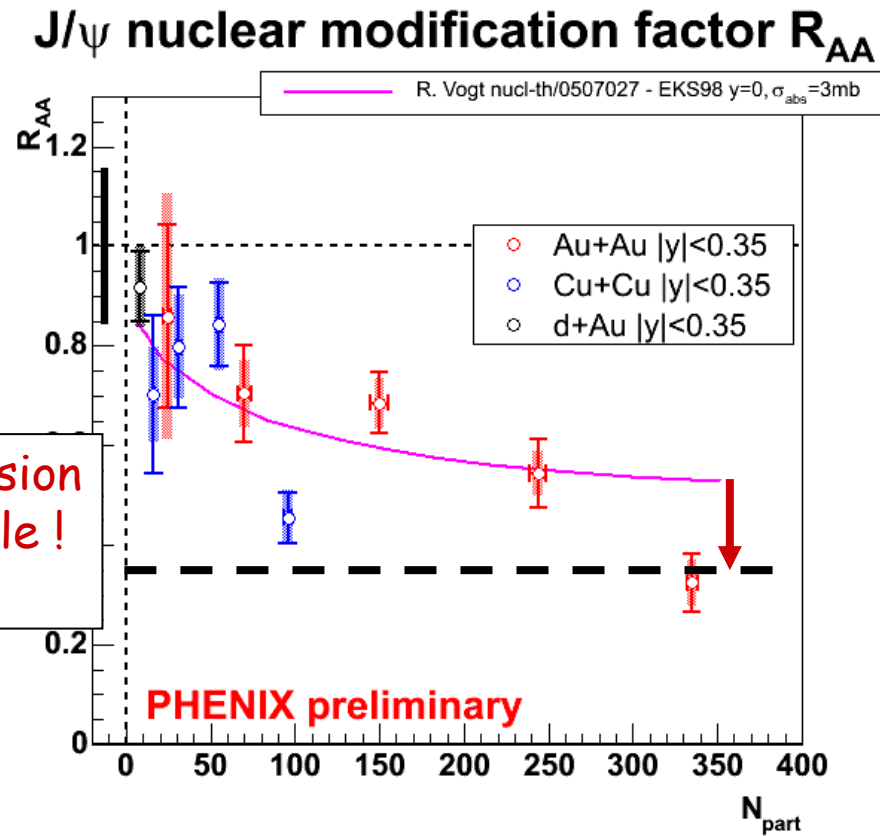
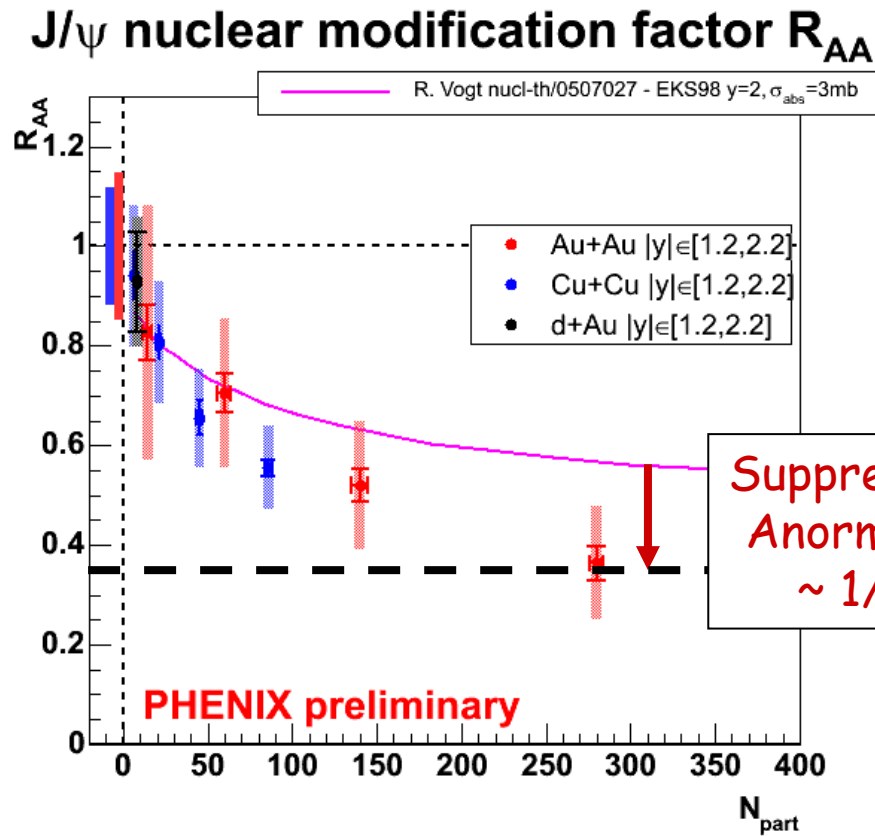
**$J/\psi \rightarrow ee$**   
**Central arm**  
 **$-0.35 < y < 0.35$**

<b>dAu</b> ○○ 200 GeV/c	<b>AuAu</b> ○○ 200 GeV/c	<b>CuCu</b> ○○ 200 GeV/c	<b>AuAu</b> ee 200 GeV/c	<b>CuCu</b> ee 200 GeV/c	<b>CuCu</b> ○○ 62 GeV/c
-------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	-------------------------------

Pereira da Costa, Quark Matter 2005  
 Andry Rakotozafindrabe, Joliot-Curie 2005

# RHIC : effets froids...

- Shadowing + absorption nucléaire
  - Grande incertitude mais plutôt pessimiste...



Vogt, nucl-th/0507027

# RHIC : prédictions théoriques

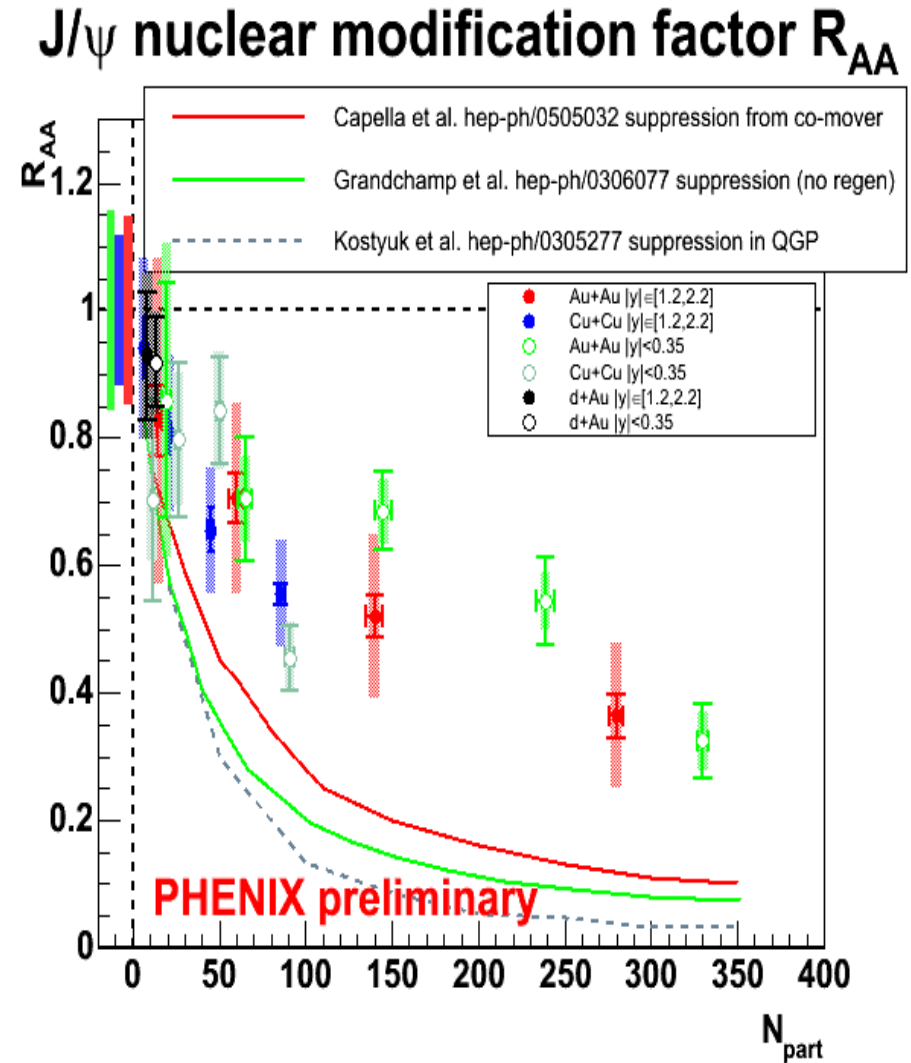
- Modèles incluant les effets du SPS

- Absorption normale

+ Comovers

+ Plasma

+ Plasma



# RHIC : prédictions théoriques

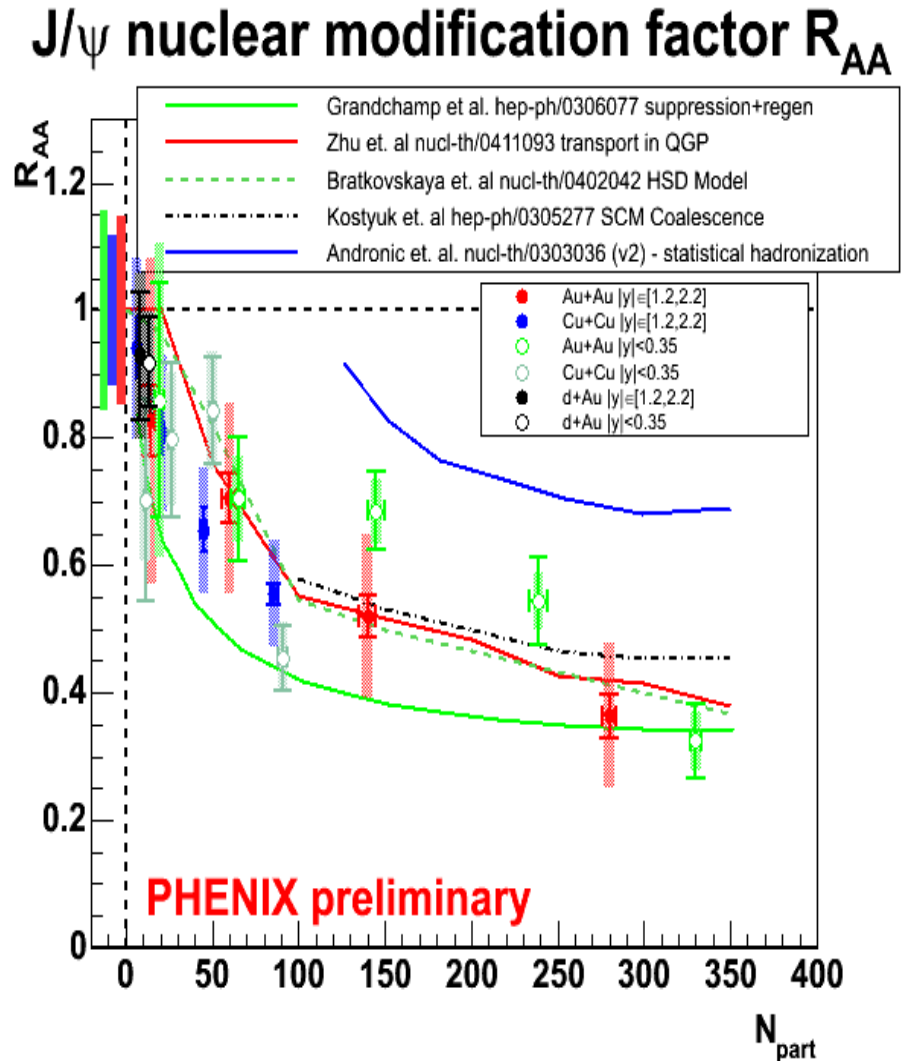
Plusieurs modèles  
incluant de la  
recombinaison...



Mais prudence :

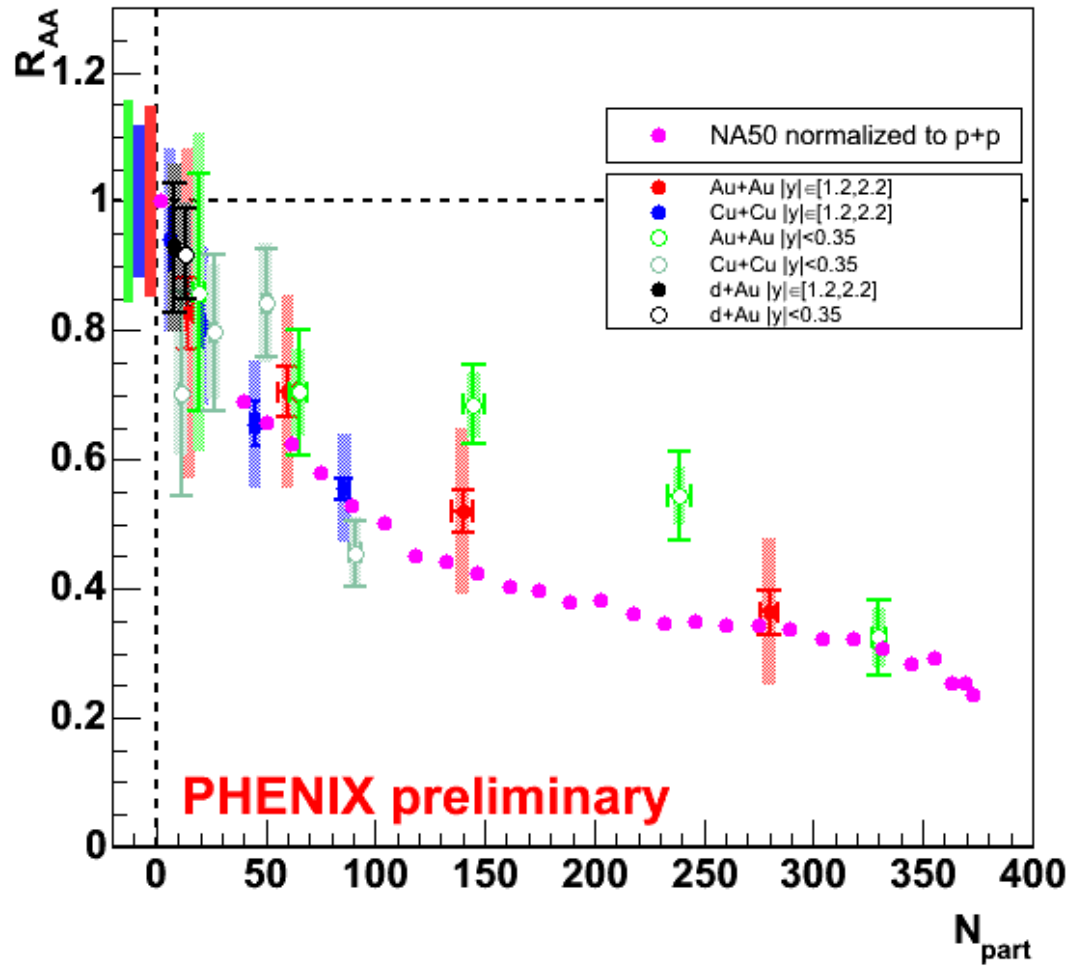
- Référence pp  
différente...
- $N_{c\bar{c}}$  initial mal connu...

À suivre...



# Comparaison avec NA50

$J/\psi$  nuclear modification factor  $R_{AA}$

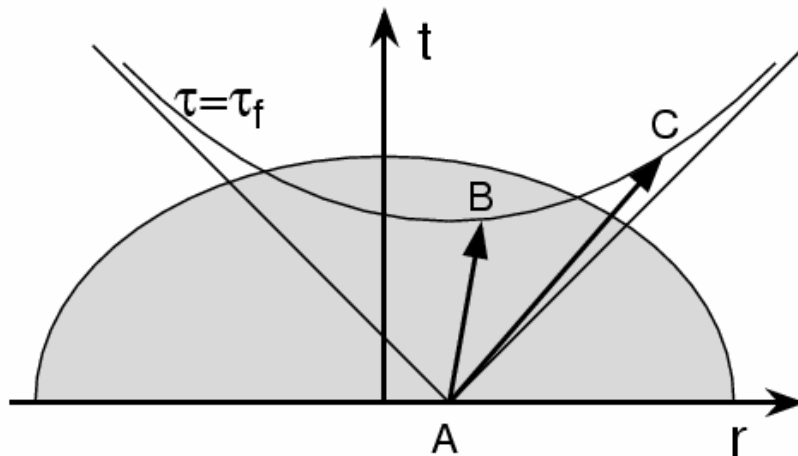


Ça ressemble ?...  
Aucune raison  
fondamentale  
Les densités  
d'énergie n'ont  
rien à voir...

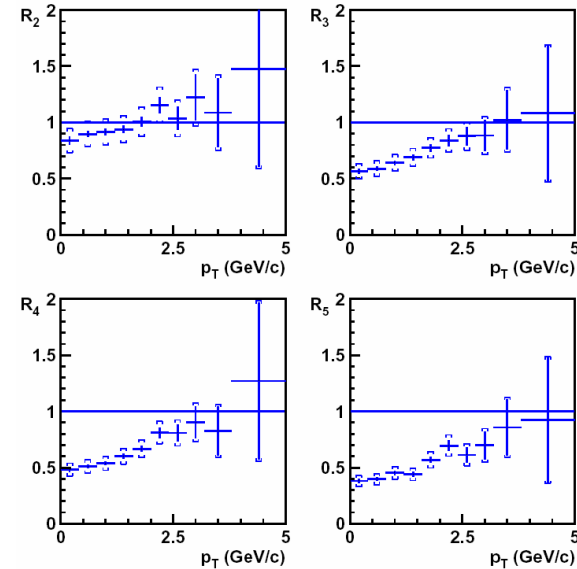


# Évasion des $J/\psi$ ?

- Au SPS, suppression à bas  $p_T$  ...
  - Compatible avec pair cc de grand  $p_T$  s'échappant du plasma avant de former un  $J/\psi$



F. Karsch & R. Petronzio  
M.C. Chu & T. Matsui  
J.P. Blaizot & J.Y. Ollitrault



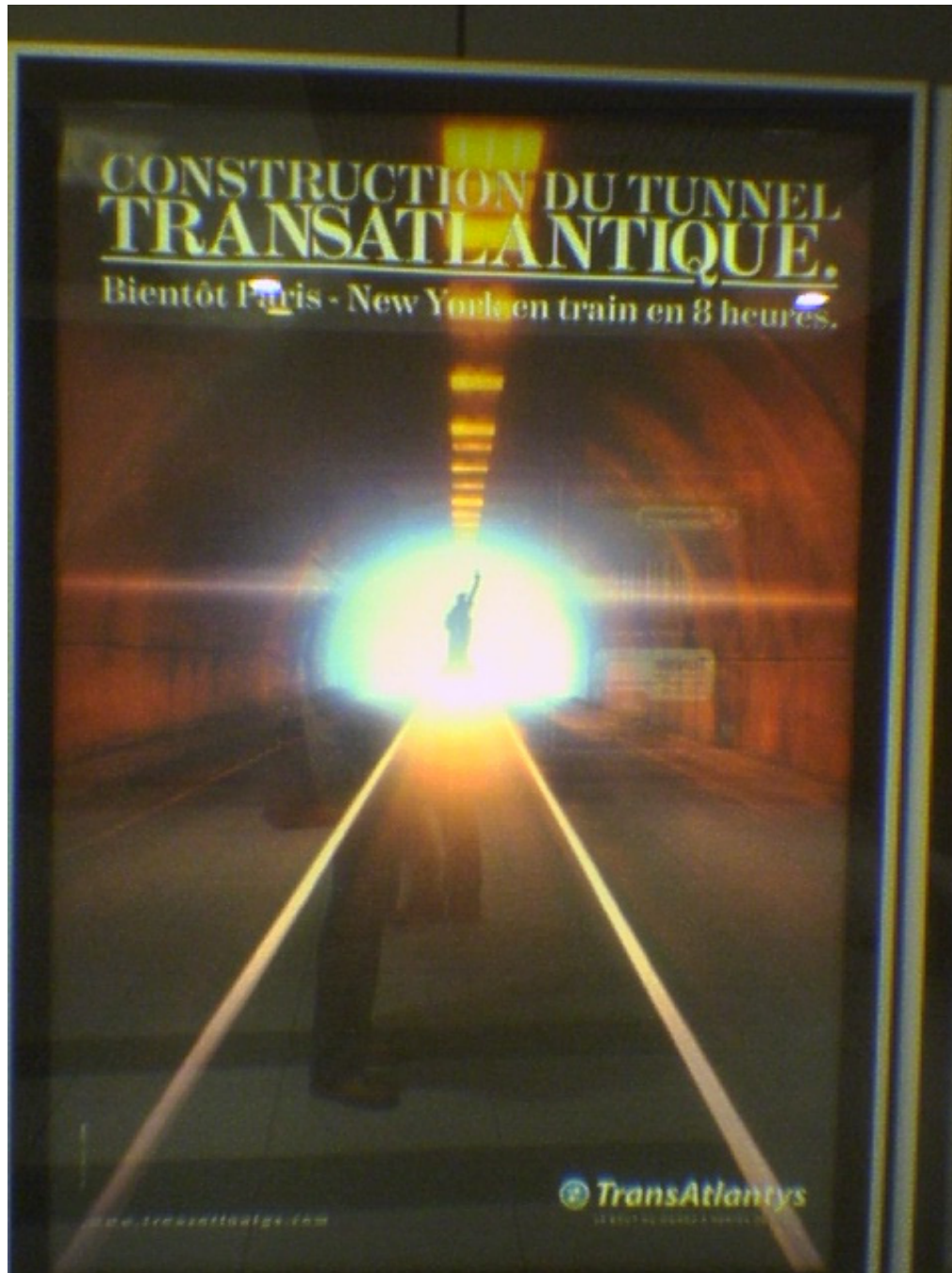
- À RHIC, concurrence :
  - $p_T$  plus grand,
  - mais plasma plus long...
  - À vérifier !!!

# Quoi de neuf à RHIC ?

(pour les  $J/\psi$ , pour le reste, restez jusqu'à samedi matin !)

- Recombinaison ?
  - Dépend (au carré) du nombre (mal connu) de cc produites
- Évasion des  $J/\psi$  ?
  - Paire cc de grand  $p_T$  pourraient s'échapper
- Fonte des  $\chi_c$  (mais le  $\psi$  résiste ?)
  - Réseau :  $T_{diss} \rightarrow 2T_c$
- Études systématiques des distributions en rapidité (Cf. Andry),  $p_T$ , centralité, du  $v_2$  (bientôt ?!...)
- Besoin de mieux comprendre les effets nucléaires froids !

À suivre !



# Réclame

Aller-retour  
Brookhaven - CERN  
pour vous,  
les physiciens et  
les physiciennes  
qui voulez voir  
le plasma de  
quarks et gluons  
dans tous ses  
états !