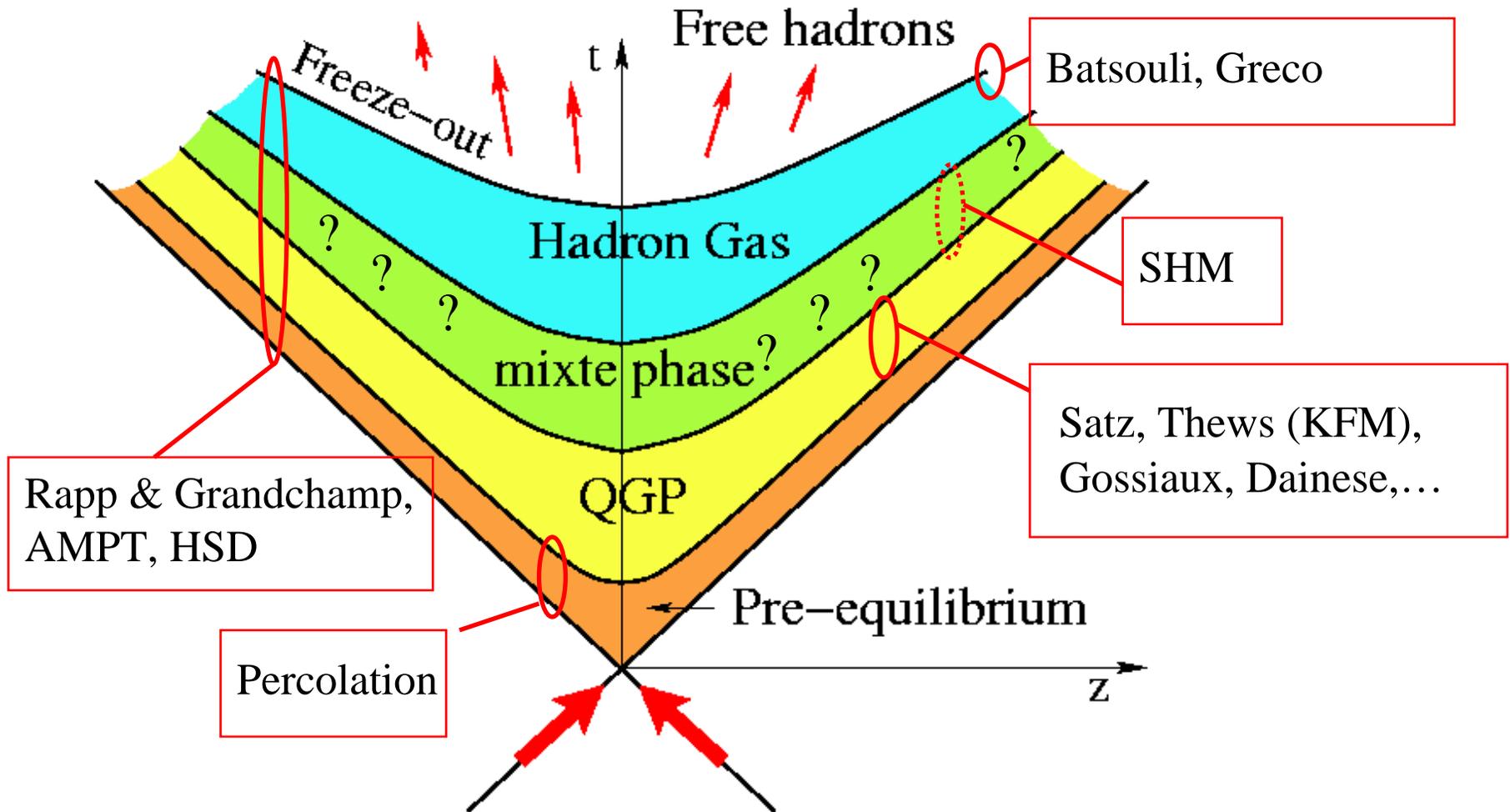


Quarkonia dans le QGP

QGP France - Etretat 2006 - PB Gossiaux

- Même avant le QGP: Percolation
- Suppression séquentielle dans le plasma:
play it again Sam ~~!~~ (euh...Helmut)
- Modèles de (re)combinaison
- Conclusions

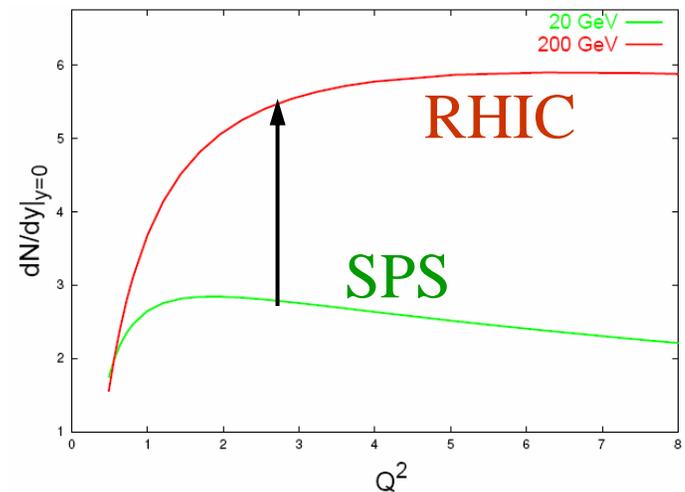
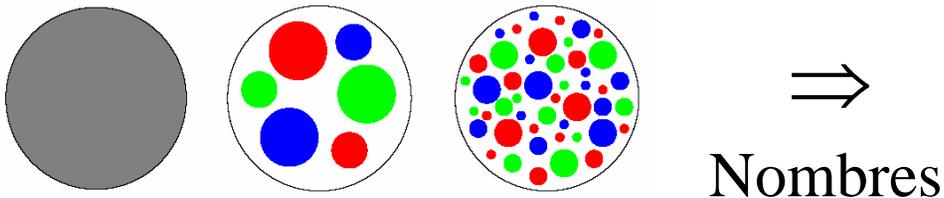
Une collision A-A schématique



I: Percolation

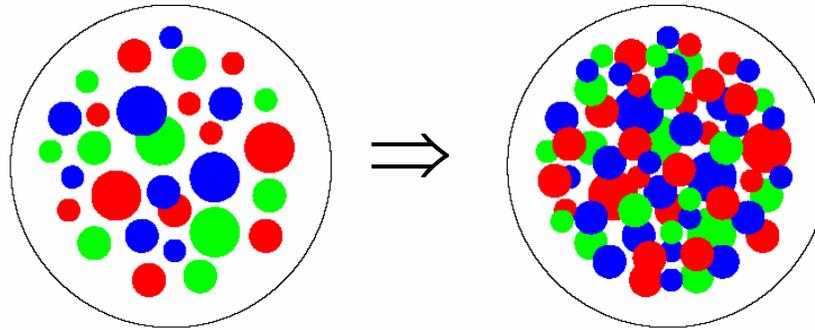
Percolation

- Digal, Satz et Fortunato 02
- État de pré-équilibre précède le plasma.
- Condition nécessaire au déconfinement: connexion de couleur durant ce pré-équillibre
- Structure du hadron dépend de l'échelle de résolution



Percolation

- De 1 à A nucléons: La taille du cluster le plus grand croît:



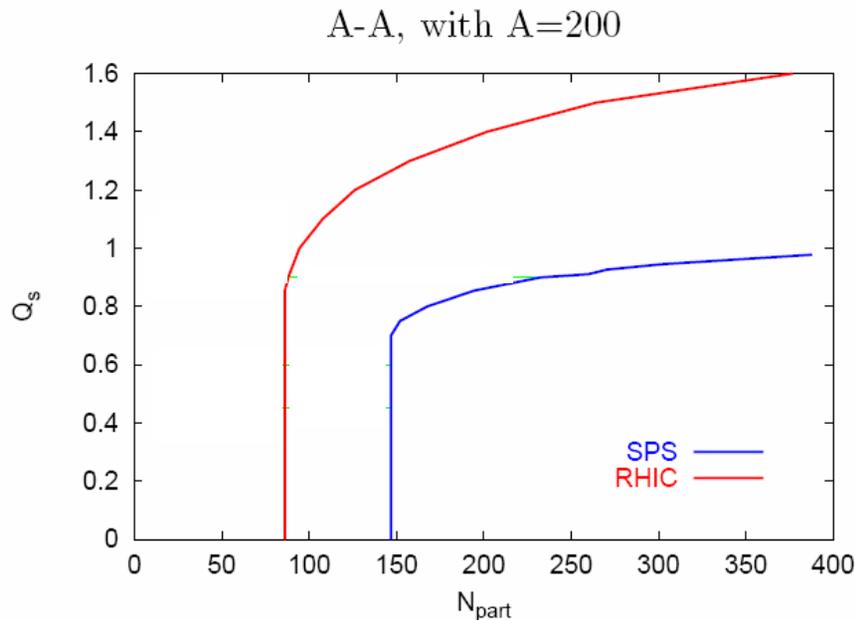
- Idée de percolation (**Pour un noyau unique ?!**). Densité critique de disques. Seuil critique pour la connectivité de couleur:

$$\underbrace{\frac{1}{Q^2} \left(\frac{dN}{dy} \right)_{y=0}}_{\text{PDF}} = \underbrace{\frac{1.128}{2A^{1/3}}}_{\text{Noyau + param impact}}$$

Noyau + param impact

Percolation

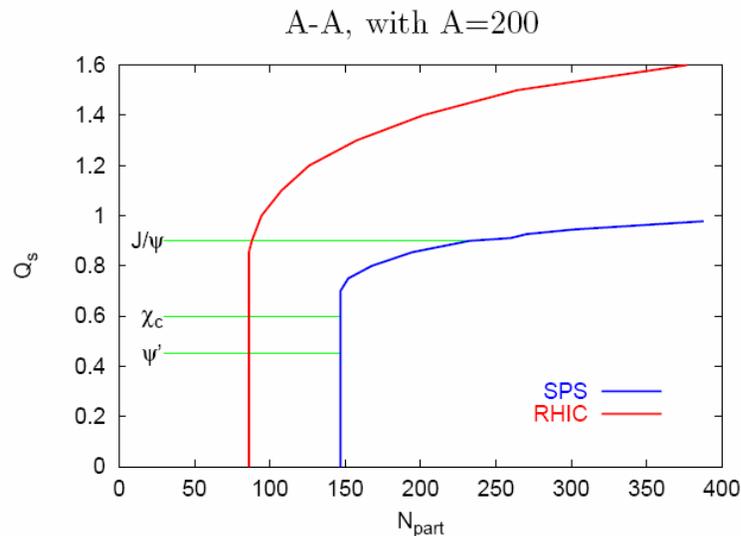
- Seuil: $N_{\text{part}}=150$ ($b=6\text{fm}$) pour Pb-Pb à SPS; $N_{\text{part}}=80$ ($b=10\text{fm}$) pour Au-Au à RHIC.
- Échelle de percolation (connexion de couleur en dessous de cette échelle):



" $T \uparrow$ ". Q est un précurseur de T dans l'état équilibré qui s'ensuit (éventuellement)

Percolation et suppression des quarkonia

- Idée: Échelle de percolation joue un rôle similaire à celui de la température au moment de la formation (rapide: quelques 0,1 fm/c) des quarkonia.
- Si $Q_s >$ seuil de dissolution $\alpha(\text{rayon de l'état})^{-1}$, cet état n'est pas formé \Rightarrow suppression.



- Suppression séquentielle au SPS ($N_{part} = 150$ puis 250), même si pas thermalisation

Percolation et suppression des quarkonia : espoirs...

- Satz (2002): "we note also that the onset points ... agree fairly well with the 'steps' seen in the measured J/ψ survival probability."
- N_{part} semblait l'emporter sur ε (densité d'énergie)
- Digal, Satz et Fortunato (2004): "good agreement... However second threshold depends on the J/ψ radius"

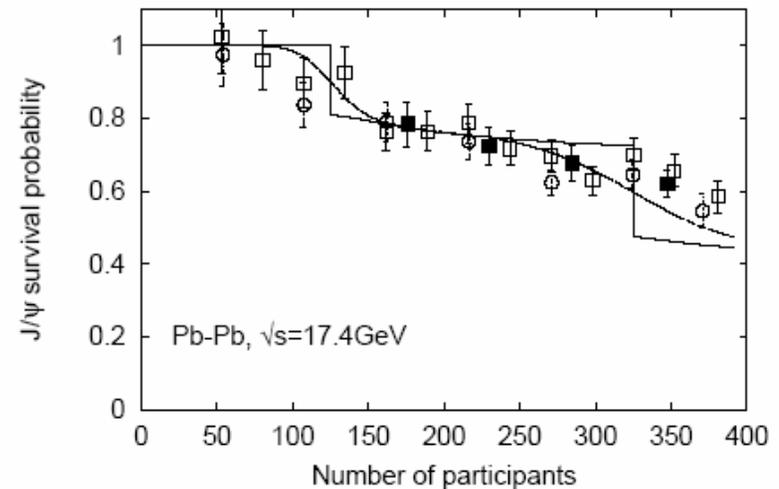
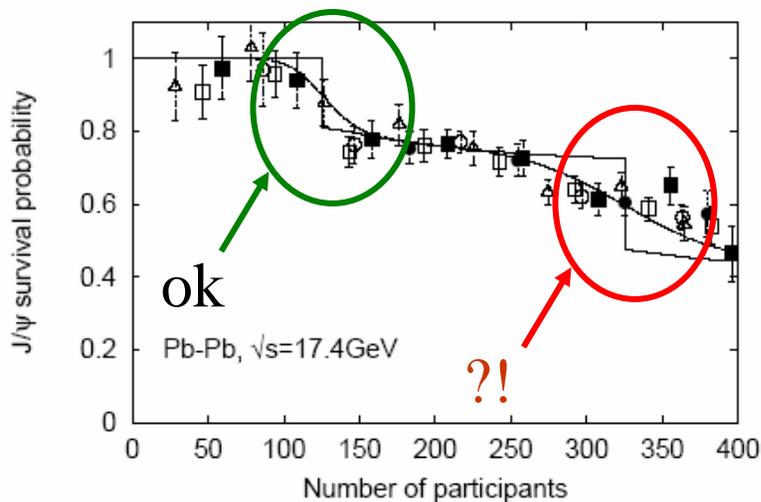
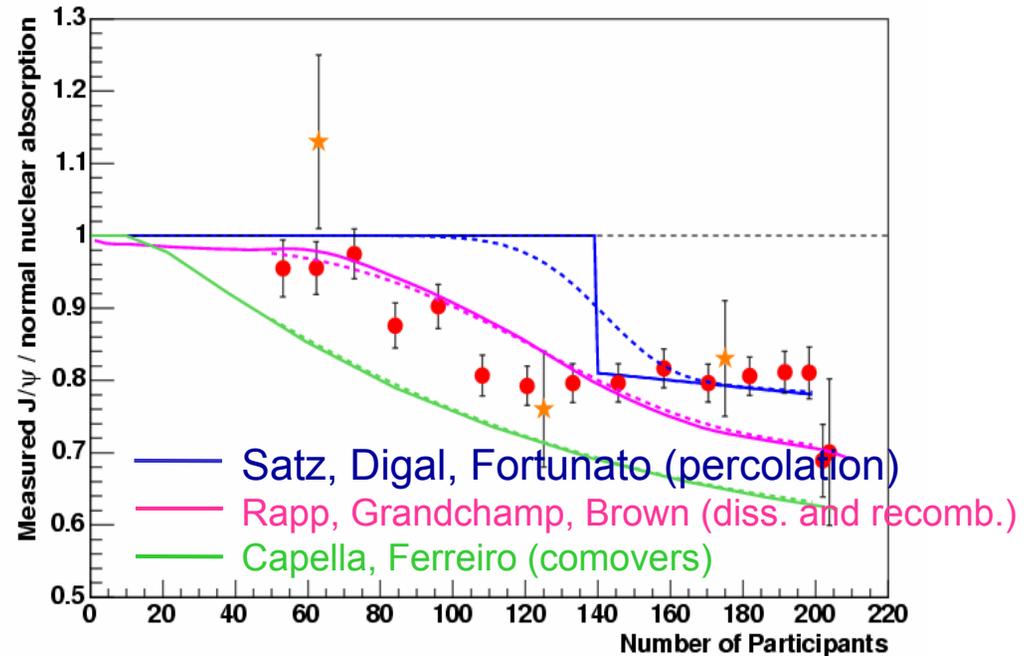
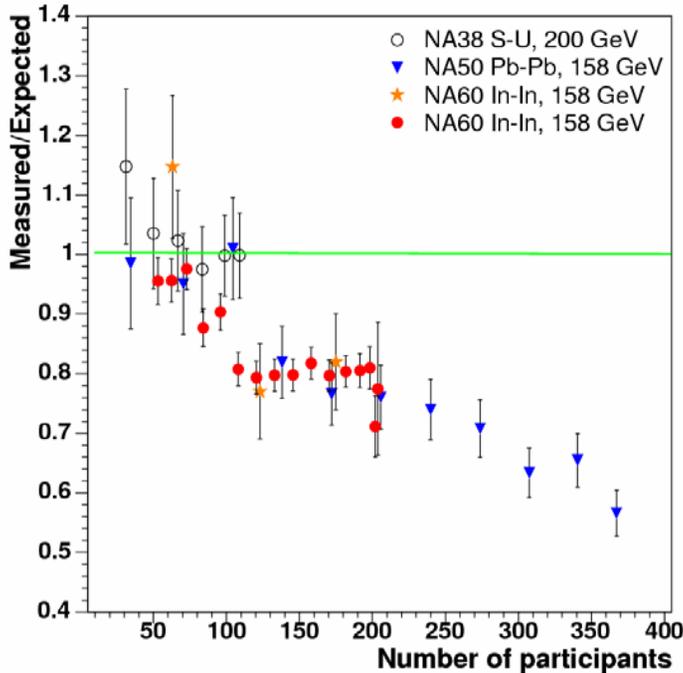


Figure 5: J/ψ survival pattern in Pb-Pb collisions at the SPS, as function of centrality, determined from E_T (left) and from E_{ZDC} (right).

Percolation et suppression des quarkonia : ...et désillusions (I)

- QM (2005):



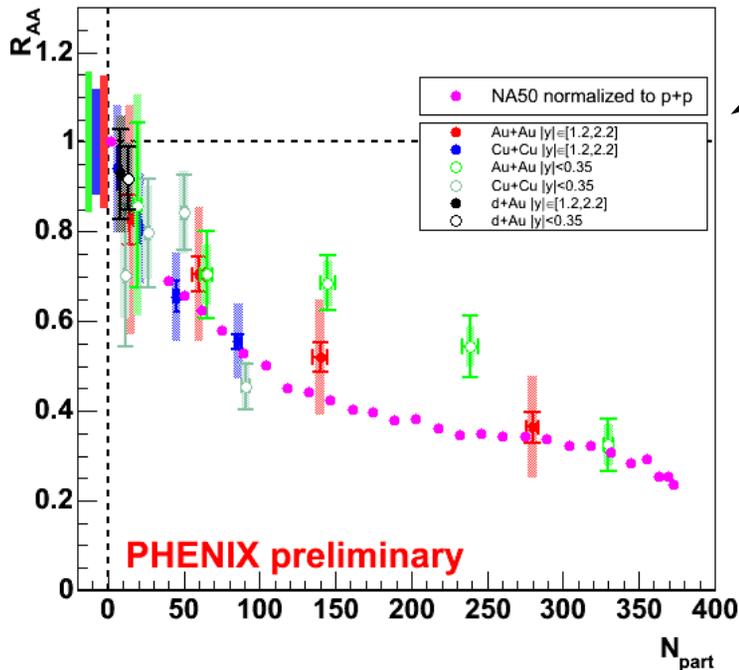
“None of the models (tuned to reproduce the NA50 data and with specific predictions for In-In) properly describes the observed suppression pattern.”

- La vertu principale d'un bon modèle physique, c'est d'être prédictif !
- Indice: modèles basés sur l'existence d'un milieu thermalisé dont moins "loin" des données

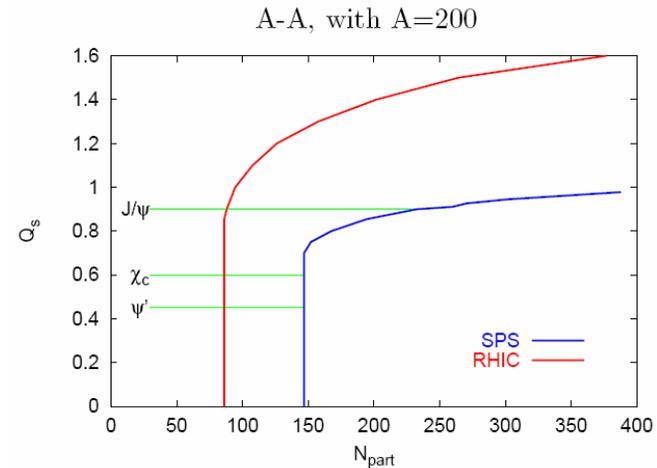
Percolation et suppression des quarkonia : ...et désillusions (II)

- QM (2005):

J/ψ nuclear modification factor R_{AA}



"Suppression" a RHIC :
similaire aux résultats SPS



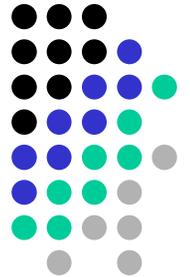
- La mort de la percolation (appliquée à la suppression des quarkonia)... Pourquoi ? Une idée, quelqu'un ? Helmuuuut ?

II: Suppression séquentielle

Quarkonia sur réseau

Résumé de T. Umeda à Hard Probes 2006 :

Summary of this talk



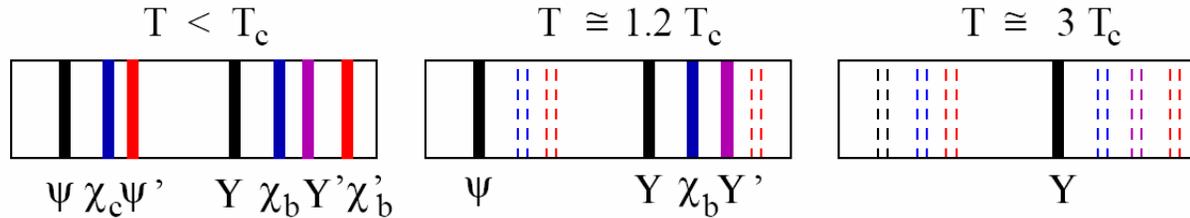
- From recent MEM results,
 - J/ψ , η_c states survive even in QGP phase
 - dissociation temp. may be $1.4 \sim 2 T_c$ (large uncertainty)
 - χ_c state may disappear just above T_c
- Wave function shows
 - strong spatial correlation even at $T=1.5T_c$

Next step

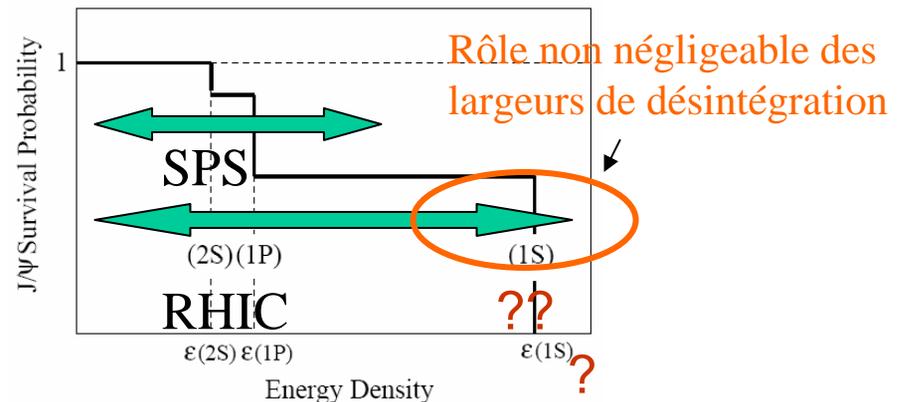
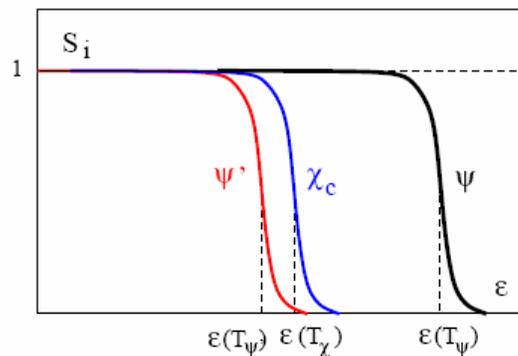
- Improvement of MEM analysis & dynamical quark effects
- New ideas ...

LES LARGEURS de DESINTEGRATION ?

Suppression séquentielle



- Idée: Le plus simple: la densité critique d'énergie ε de dissolution du J/ψ pourrait être aussi grande que $10\text{-}30 \text{ GeV}/\text{fm}^3$, et donc pas atteinte (même au RHIC ?) alors que les énergies de dissolution ψ' et du χ_c ($0,5\text{-}2 \text{ GeV}/\text{fm}^3$) seraient atteintes dès le SPS.
- $S(J/\psi) = 0.6 S(J/\psi \text{ direct}) + 0.3 S(\chi_c) + 0.1 S(\psi')$



- Retour à une idée en prise directe avec les propriétés du plasma !

Suppression séquentielle (II)

- Retour à ϵ comme un paramètre "explicatif" des données de suppression anormale, extraite des données expérimentales:

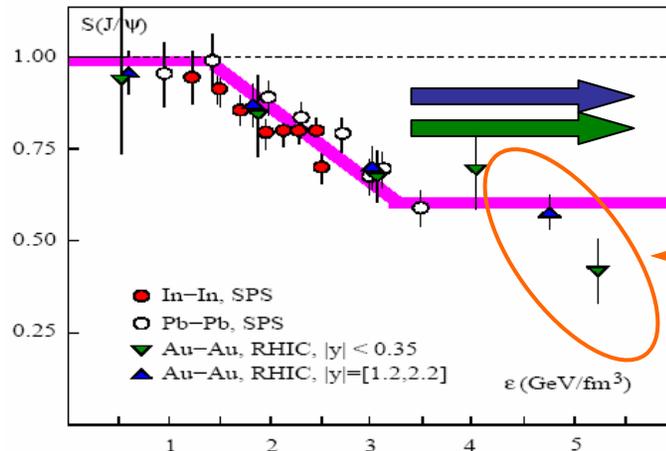
$$\epsilon = \frac{w_h}{S\tau_0} \left(\frac{dN_h}{dy} \right)_{AA}$$

Karsch, Kharzeev, Satz 2005

☹ Choisi = 1 fm/c indépendamment de l'énergie.

- La surprise:

FAUT-IL
CHERCHER
(beaucoup) PLUS
LOIN ?

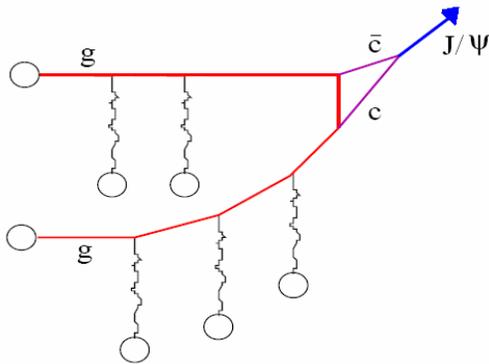


RHIC (si $\tau_0 = 0.6$ fm/c)

Dissociation
additionnelle par des
gluons durs ?

Suppression séquentielle: au delà de la production intégrée (SPS)

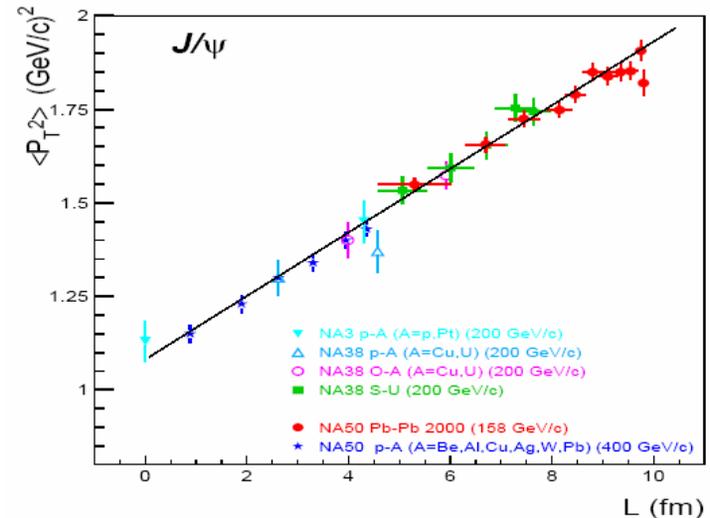
- $\langle P_t^2 \rangle$ moyen évolue suivant un modèle de diffusions stochastiques indépendantes:



$$\langle p_T^2 \rangle_{AA} = \langle p_T^2 \rangle_{pp} + N_c^{AA} \delta_0$$

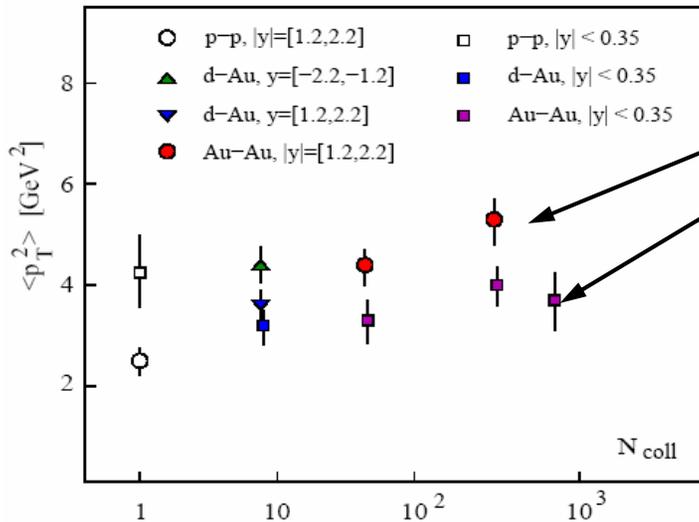
Nombre de collisions

"kick" pour chaque collision



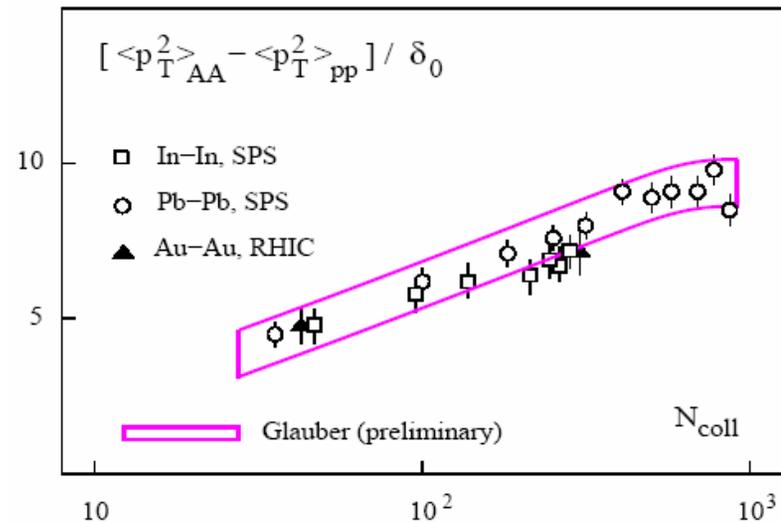
- Modèle étonnamment "efficace"
- δ_0 ne dépend a priori pas du type de quarkonium considéré.

Suppression séquentielle: au delà de la production intégrée (RHIC)



Mécanismes différents à rapidité centrale et grande rapidité ?

En privilégiant les grandes rapidités:

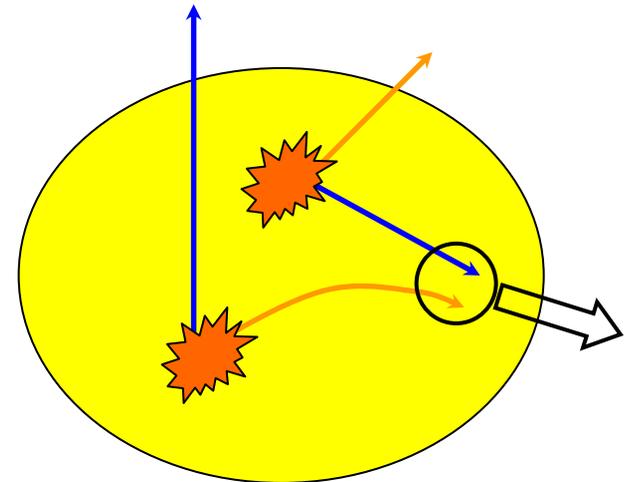


- Bon accord global. Encore de grandes incertitudes expérimentales
- Pas de grosse modification de la production en fonction de la rapidité par rapport à pp.

III: Régénération / Production "non
diagonale" / Recombinaison /
Coalescence / ...

Deux Questions

- Idée derrière tous ces modèles : des quarks c et $c\bar{c}$ issus de collisions N-N initiales indépendantes migrent ensuite dans le plasma, viennent à proximité (dans l'espace des phases) et se combinent en quarkonia (que ce soit au sein du plasma ou dans la phase "mixte")
1. A-t-on besoin de cette production supplémentaire ? **NON** si $\Gamma_\psi=0$, **OUI** sinon (dissociations gluoniques $g+\psi \rightarrow c+c\bar{c}$)
 2. Peut-on l'éviter ? **Tout dépend de la température de dissociation des quarkonia** (supposée ici $> T_c$)



Kinetic Formation Model

Thews, Rafelski & Schroedter

Thews & Mangano

- Le modèle en bref
- Résultats pour les collisionneurs
- ☺ et ☹ (de mon point de vue)

Refs':

Thews R L, Schroedter M and Rafelski J 2001 Phys. Rev. C 63 054905 [arXiv:hep-ph/0007323]

Thews R L 2002 Nucl. Phys. A 702 341 [arXiv:hep-ph/0111015]

...

Proceedings of Pan American Advanced Studies Institute on New States of Matter in Hadronic Interactions (**hep-ph/0206179**)

Journal of Phys G30 (2004) S369-S374 (SQM03)

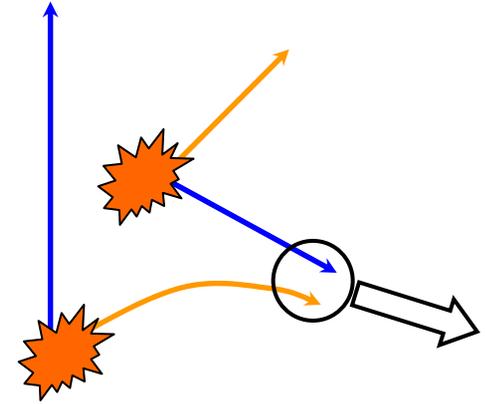
Cern Yellow Report (Hard probes)

SQM04 (in Journal of Phys G30)

...

Thews, Rafelski & Schroedter: Main ideas

Main focus: « ...a direct extrapolation of anomalous suppression (of J/ψ) from the SPS energy range could be **supplanted** by a new formation mechanism fueled by the presence of multiple pairs of charm quarks in each nuclear collision at sufficiently high energy».



Recombination de quarks non corrélés spatialement => dépendance **quadratique** en N_c . Pour un quark c donné, la probabilité P de se (re)combinaison et de former un J/ψ est

$$P \propto \frac{N_{\bar{c}}}{N_{\bar{u},\bar{d},\bar{s}}} \propto \frac{N_{c\bar{c}}}{N_{ch}}.$$

Vrai pour chaque quark c disponible (N_c au total) => Nombre de J/ψ 's via les "coalescence" c - \bar{c} "non - diagonale" :

$$N_{J/\psi} \propto \frac{N_{c\bar{c}}^2}{N_{ch}}$$

Question: Valeur de α ???

Thews, Rafelski & Schroedter: Ingredients

Le modèle de formation cinétique (KFM) considère la formation des J/ψ au sein de la région de déconfinement, et évalue le nombre total à la hadronisation du à la compétition entre la formation "retardée" et les réactions de dissociation.

1. Des états liés " J/ψ " situés au-dessus de la température de transition (en cas de recombinaison entre c et $cbar$, la manière la plus efficace, c'est bien quand ils sont encore "proches" l'un de l'autre, i.e. quand la densité en quarks c est élevée.
2. Les J/ψ peuvent être détruits par gluo-dissociation: $g + J/\psi \rightarrow c + cbar$ (σ_{dis} évaluée via OPE, suivant Bhanot and Peskin), et formés via the processus inverse (σ_{form} évalué à partir de σ_{dis} via la balance détaillée).
3. Distributions de c , $cbar$ et J/ψ sont prises soit à l'équilibre, soit comme celles des particules initiales (sections efficaces \rightarrow taux de réaction).

$$\frac{dN_{J/\psi}(\tau)}{d\tau} = \frac{\lambda_F(\tau)}{V(\tau)} N_c N_{\bar{c}} - \lambda_D(\tau) \rho_g(\tau) N_{J/\psi}(\tau)$$

4. Equation cinétique:
 Où $\lambda_{D/F} = \langle v_{rel} \sigma_{dis/form} \rangle$, $V(\tau)$ est le volume de la région spatiale déconfinée et ρ_g est la densité gluonique.

Thews, Rafelski & Schroedter: Une solution simple

Solution formelle ☺ :

$$N_{J/\psi}(\tau_f) = \boxed{N_{J/\psi}(\tau_0) \times S(\tau_0, \tau_f)} + \boxed{N_{c\bar{c}}^2 \int_{\tau_0}^{\tau_f} \frac{\lambda_F(\tau)}{V(\tau)} \times S(\tau, \tau_f) d\tau}$$

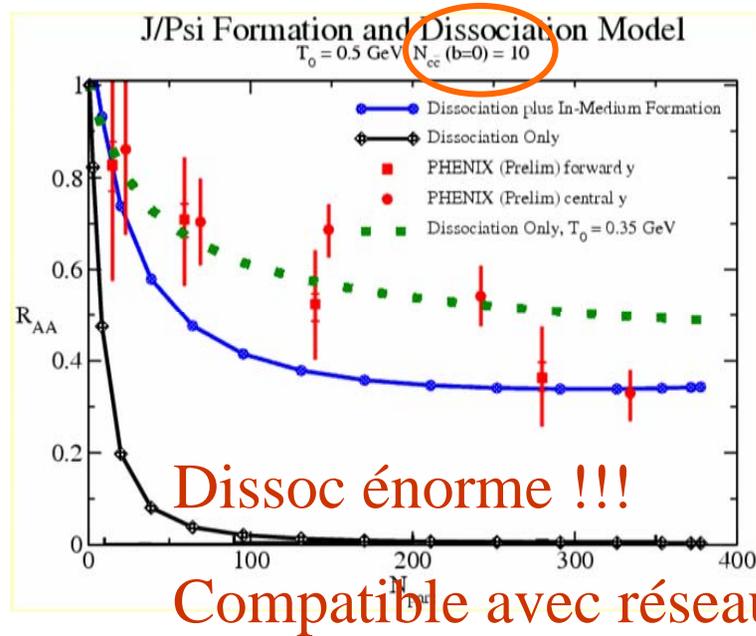
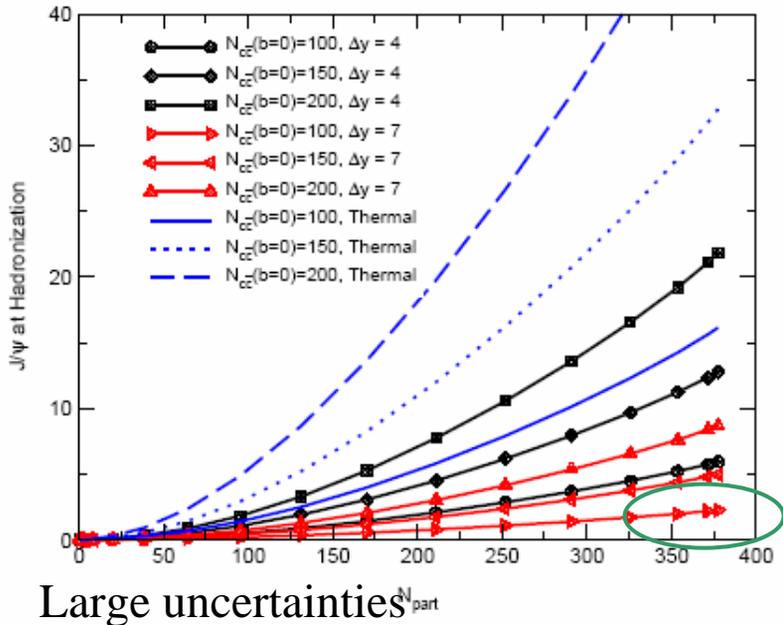
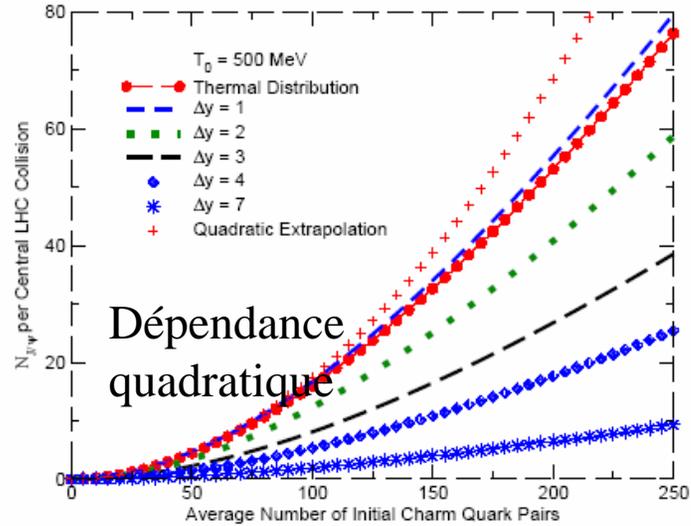
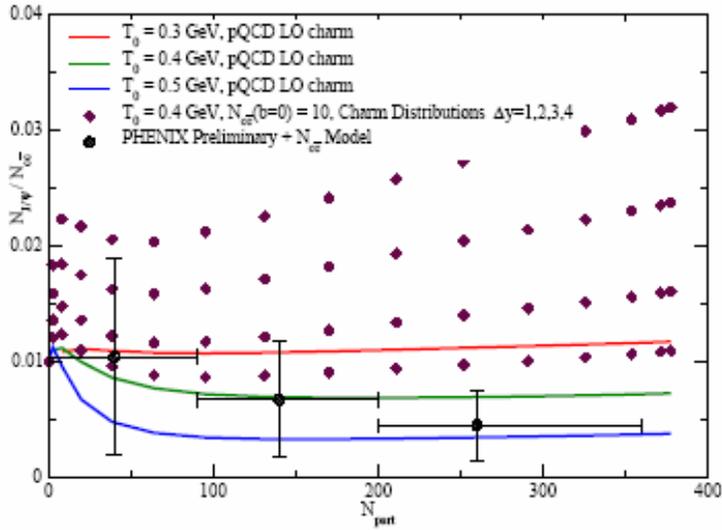
Suppression des J/ψ initiaux

Production à partir de c et cbar
(initialement) décorrélés

avec : $S(\tau, \tau_f) = \exp\left(-\int_{\tau}^{\tau_f} \lambda_D(\tau') \rho_g(\tau') d\tau'\right)$ (gluo-dissociation)

Pourvu que le premier terme soit négligeable, $N_{J/\psi}(\tau_f)$ devient quadratique en $N_{c\bar{c}}$

Thews, Rafelski & Schroedter: résultats divers



Valeur (trop?) faible

Compatible avec réseau ?

Thews et al: 😊 and ☹️



1. Simple, mais pourrait bien contenir l'essentiel de la physique nécessaire à la description de la production intégrée de quarkonia.
2. Efficace \Rightarrow facilite les études paramétriques rapides



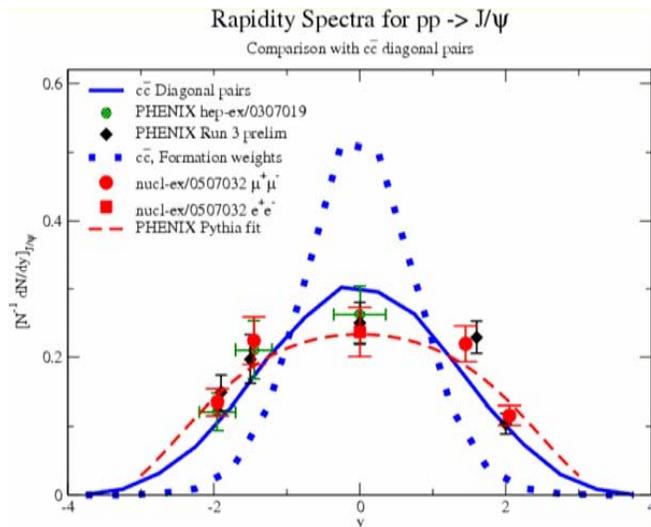
1. Grande dépendance vis-à-vis de la distribution des quarks c et des quarkonia (qui sont des "inputs" du modèle et n'évoluent pas dans le temps)
2. Pas de scénario "réaliste" des collisions $A+B$
3. Description globale (pas de dépendance vis-à-vis de x ni de p), et donc pas de spectres différentiels.

Thews & Mangano: Nouvelle approche

1. But: fournir des sections efficaces différentielles.
2. Implémenter des distributions de quarks issues de pQCD + k_t kicks
3. Sections efficaces de recombinaison dans l'espace des impulsions:

$$\frac{dN_{J/\psi}}{d^3p_{J/\psi}} = \int dt \sum_{i=1}^{N_{c\bar{c}}} \sum_{j=1}^{N_{c\bar{c}}} y_{rel} \frac{d\sigma(p_i + p_j \rightarrow p_{J/\psi} + X)}{d^3p_{J/\psi}}$$

Mais corrélations espace - impulsion, qui se construisent dans le temps, sont négligées, faute d'un modèle réaliste pour la collision.



Question: La (mauvaise) comparaison expérience \leftrightarrow hypothèse de coalescence (physique), ou a cause des corrélations négligées ?

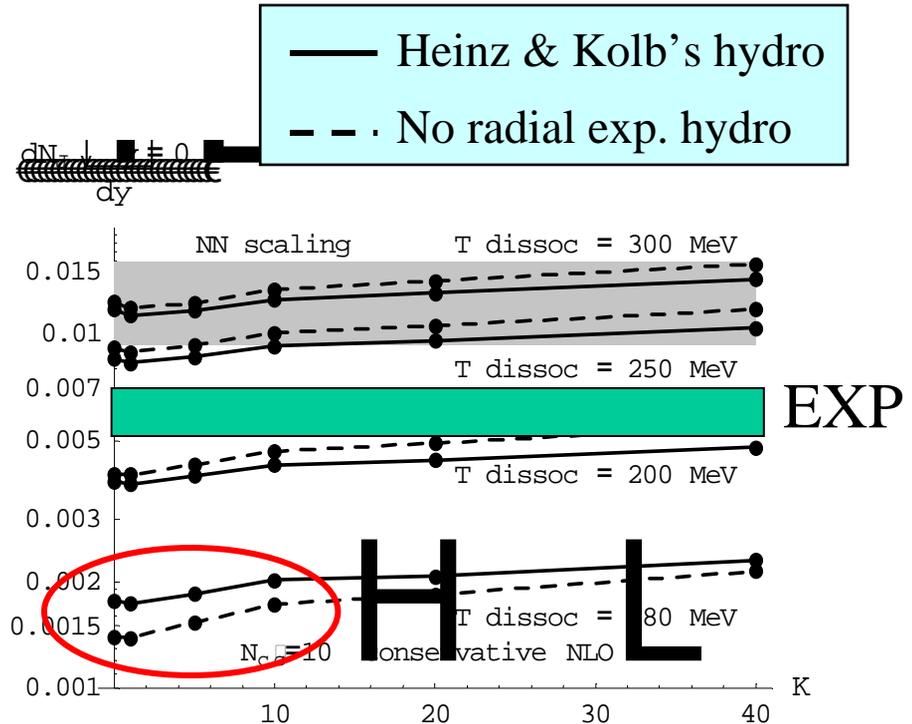
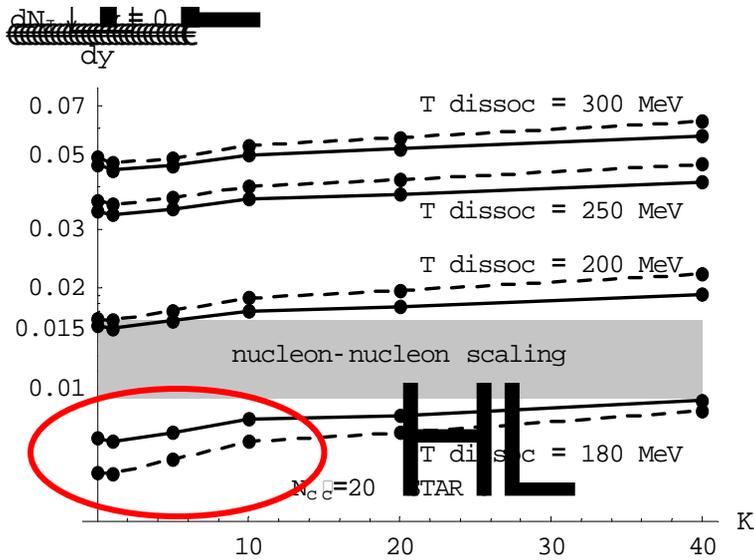
III.b Aichelin, Gossiaux et Guiho

Ingrédients du modèle spécifiques à la production de J/ψ

- Même philosophie que Thews, mais avec modèle dynamique de la collision A+B (code hydro) et de la population des quarks lourds (cf. talk Guiho).
- Puisque $\sigma_{el}(J/\psi)$ est petit, nous supposons que les J/ψ évoluent librement à travers le QGP une fois produits (pas de thermalisation rapide des J/ψ).
- Seuil de dissolution (en plus de la dissociation): Les J/ψ ne peuvent exister / être formés si la température locale $T > T_{dissoc}$ (considérée comme un paramètre libre pris entre T_c et $2 * T_c$)
- Pas de J/ψ prompt (supposés dissous ou dissociés)

Production de J/ψ à mi-rapacité (Au-Au, $b=0$, RHIC)

Composante due à la coalescence:

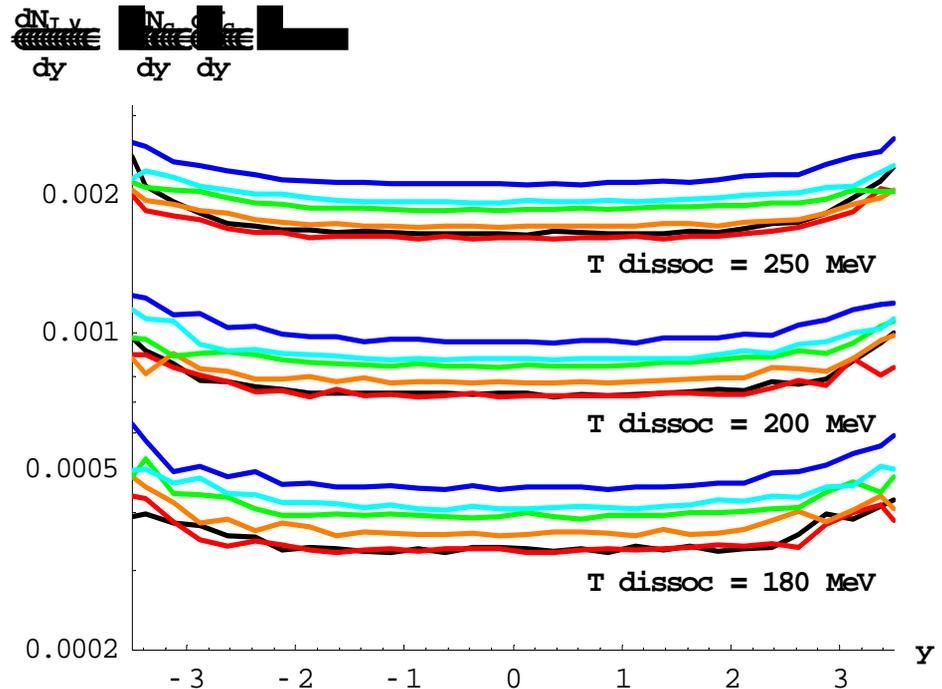
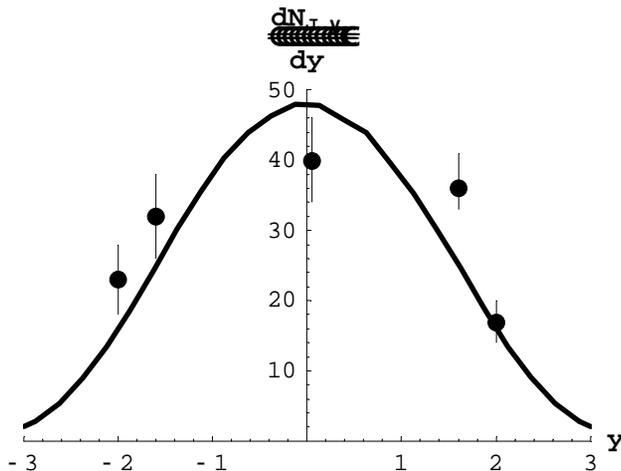


- N_c et T_{dissoc} : paramètres clés pour expliquer les nombres globaux
- La thermalisation augmente les taux de production, modérément.
- INCOMPATIBILITE entre expérience, N_c et T_{dissoc} (réseau)

Production de J/ψ vs rapidité (Au-Au, $b=0$, RHIC)

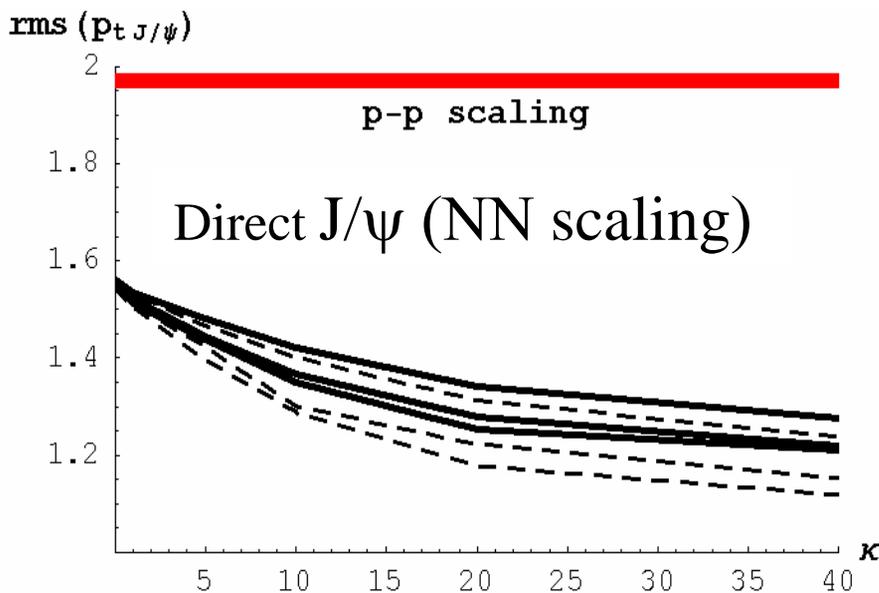
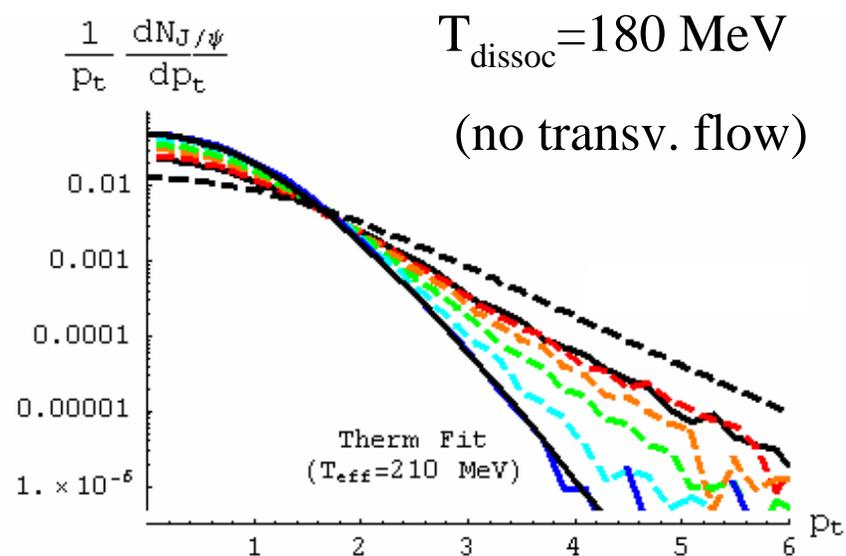
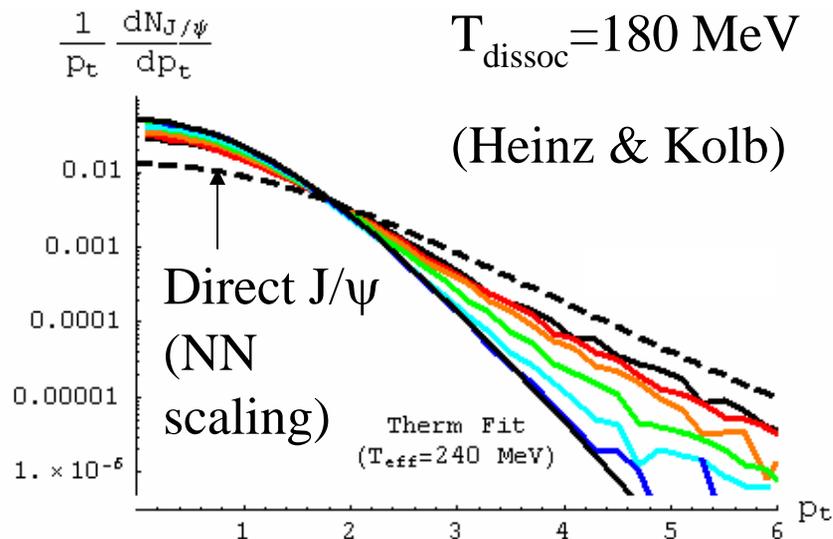
- Scaling avec $(dN_c/dy)^2$
- Un test de l'hypothèse de la production "off diagonale"
- Attention: dynamique hydro:
2D + boost

Exp vs Modèle:



La distribution en rapidité est un peu plus étroite que celle de p-p, mais pas un veto \therefore . Hypothèse de recombinaison.

Production de J/ψ vs p_t à mi rapidité (Au-Au, $b=0$, RHIC)



Evidence du mécanisme de recombinaison:

- anti-broadening p_t dans Au-Au
- températures effectives $> T_c$

NON
30

IV:Conclusions et...

1. Avec la croissance en énergie, on s'attend à une suppression des quarkonia initiaux de plus en plus élevée et à une production "retardée" et "non diagonale" accrue. Ou les "énergies RHIC" sont-elles localisées ?
2. La production retardée est sensible aux propriétés du QGP via des interactions des quarks c et \bar{c} avec cet état aux temps antérieurs. L'analyse conjointe du charme ouvert et du charme fermé sera dès lors de plus en plus nécessaire
3. On apprend en marchant ! D'un point de vue expérimental, la production "non diagonale" ne semble pas nécessaire pour l'instant voire incompatible avec les observables cinématiques
4. D'un point de vue théorique, elle semble par contre incontournable et devrait même être abondante (avec paramètres "réalistes")... A-t-elle lieu ? Pourquoi n'observe-t-on dès lors pas une augmentation de la production de J/ψ en lieu et place d'une suppression ? **Méfions-nous des compensations opportune...**

IV: ... perspectives

1. Test de la production retardée: observables sensibles à l'historique des quarks lourds dans le plasma : $\langle P_t^2 \rangle$ & flot elliptique des J/ψ
2. Largeur des quarkonia dans le plasma: indispensable
3. Et si les quarks lourds étaient tellement couplés au plasma qu'ils ne diffusaient (presque) pas ($D_x = B/A^2 \propto 1/K$) ?