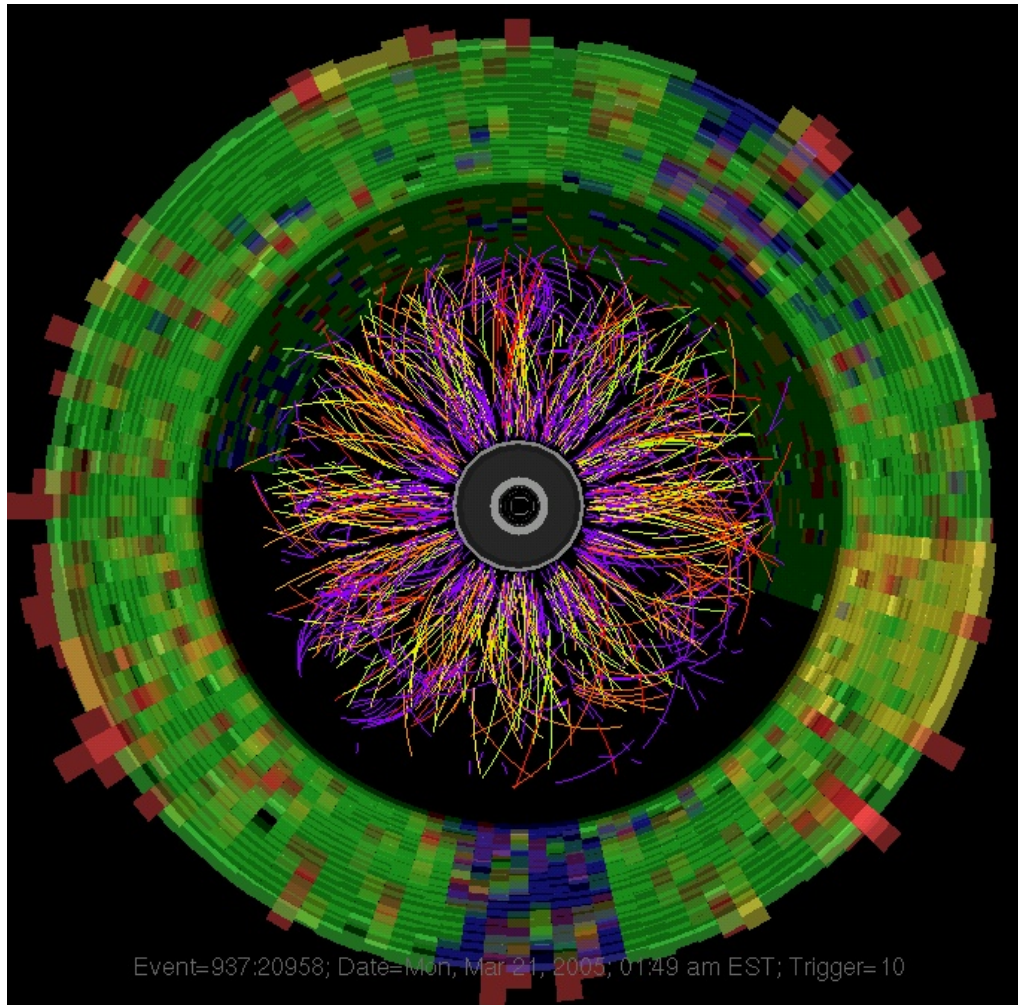


Experimental and Theoretical Challenges in the Search for the Quark Gluon Plasma:

The STAR Collaboration's Critical Assessment of the Evidence from RHIC Collisions

arXiv:nucl-ex/0501009 v3 26 Apr 2005



1. Predicted signatures of the QGP
2. Bulk properties
3. Intermediate sector
4. Hard probes
5. Overview and outlook

Avant-propos du SWP

1. Définition

QGP \equiv un état de la matière en équilibre (localement) thermique state dans lequel les quarks et gluons sont déconfinés des hadrons, de manière telle que des degrés de liberté colorés sont mieux à même de décrire les états nucléaires, plutôt que des degrés de liberté nucléoniques.

2. Non exigés :

- Des quarks et des gluons sans interaction
- Une transition du 1^{er} ou du 2nd ordre
- Une évidence de la restauration de la symétrie chirale

3. Choix

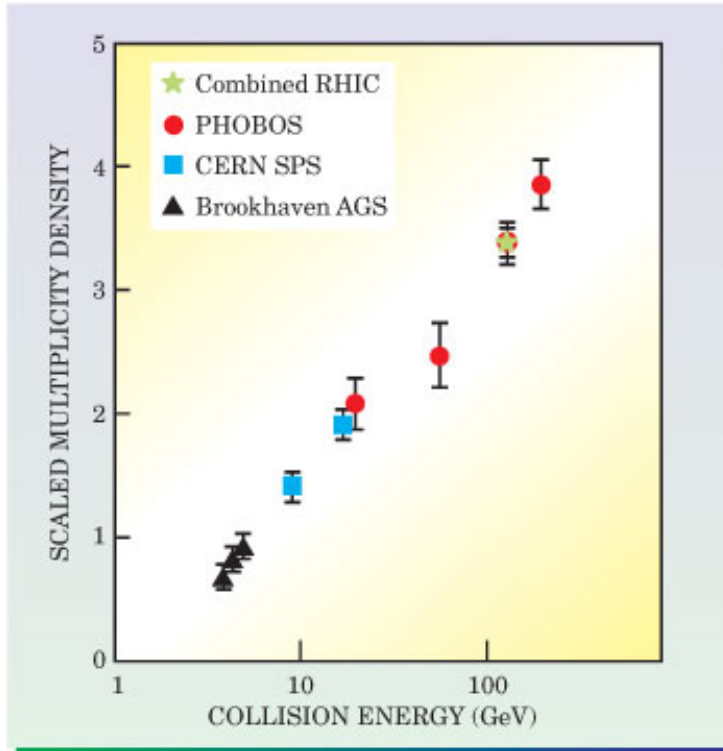
- Résultats de RHIC à tendance STAR



Densités de rapidité

Bulk properties

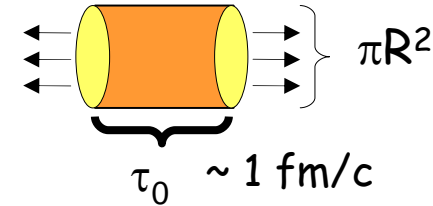
Multiplicité



Progression monotone de la multiplicité

Énergie

Bjorken : matière sans interaction en expansion longitudinale



$$\varepsilon = 1/(\pi R^2 \tau_0) [dE_T/d\eta]$$

$$\varepsilon = 5.5 \text{ GeV/fm}^3 \text{ (3.2@SPS)}$$

➤ x 1.7 par rapport au SPS

➤ > ε_c (QCD) $\sim 1 \text{ GeV/fm}^3$

Augmentation par rapport au SPS en raison de la croissance de la multiplicité

Au freeze-out chimique

Modèles statistiques

équilibres thermique/chimique

Becattini : Eur Phys JC5(1998)143

Braun-Munzinger : PLB518(2001)41

Kaneta : nucl-th/0405068

- 1) $\mu_B = 24 \pm 4$ MeV (250@SPS)
- 2) $T_{ch} = 160 \pm 5$ MeV (155@SPS)

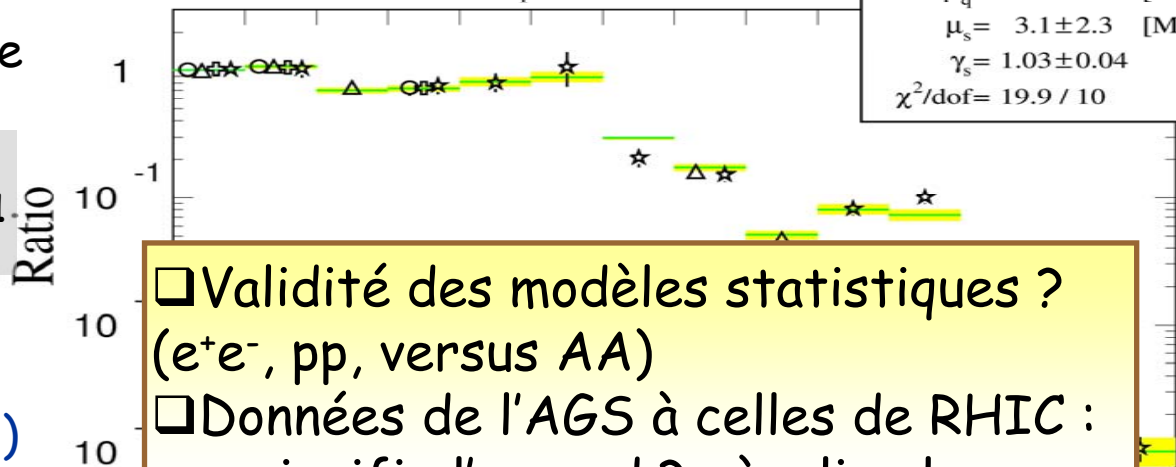
➤ $T_{ch} \approx T_{crit} \Rightarrow T_0 > T_{crit}$

3) Paramètre de saturation en étrangeté

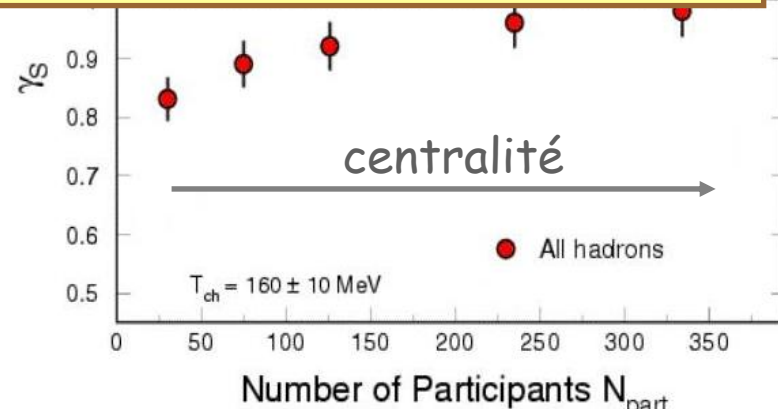
Collisions centrales : $\gamma_s \rightarrow 1$
(0.75@SPS)

Au RHIC : le système est à l'équilibre chimique

200 GeV Au+Au, $\langle N_{part} \rangle = 322$



- Validité des modèles statistiques ? (e⁺e⁻, pp, versus AA)
- Données de l'AGS à celles de RHIC : que signifie l'accord ? où a lieu le changement de phase à basse énergie ?
- Est-ce concevable que le freeze-out chimique coïncide avec le changement de phase ?



Au freeze-out thermique

Modèle hydrodynamique

Source en équilibre thermique T ,
en expansion avec une vitesse
collective (flot) $\langle \beta_T \rangle$

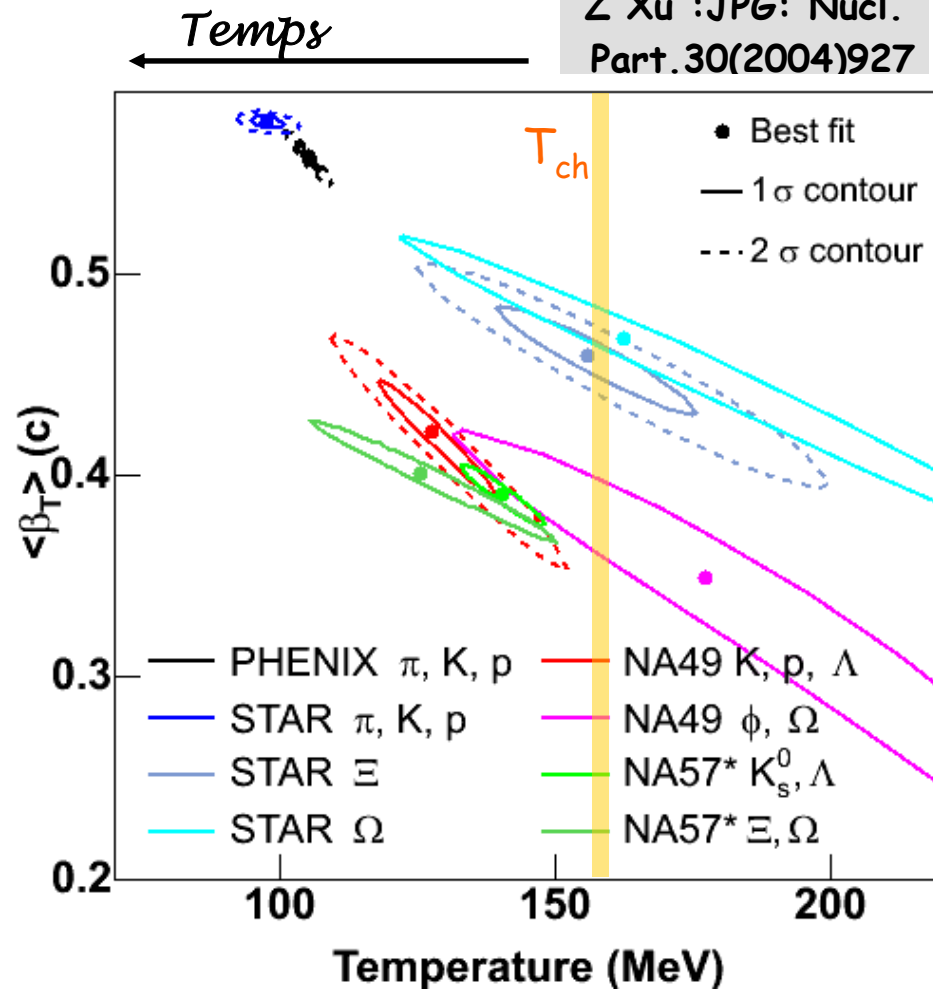
RHIC

- π, K, p :
 - $T \sim 90 \text{ MeV} < T_{ch} \sim 160 \text{ MeV}$
 - $\langle \beta_T \rangle \sim 0.57 c$
 - Rediffusion

- Ξ, Ω
 - $T \sim 150 \text{ MeV}, \langle \beta_T \rangle \sim 0.47 c$
 - Faible σ_{int}
 - \rightarrow création plus tôt

faible $\sigma_{int} + \text{flot} \neq 0$
 \equiv Flot né des interactions,
 très tôt, entre partons

Z Xu :JPG: Nucl.
Part.30(2004)927

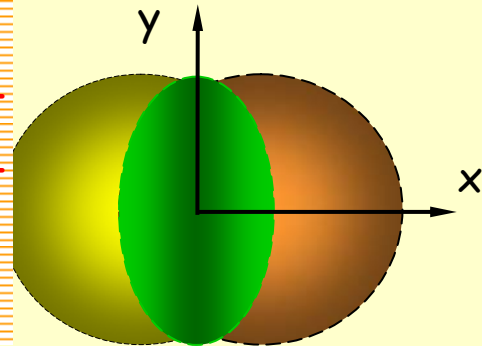


Tendances moins
nettes au SPS

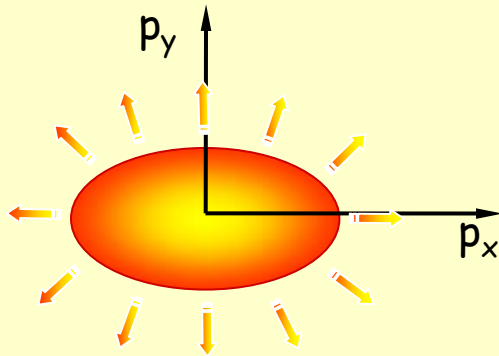
Remonter au début par le flot elliptique

Bulk properties

Collisions non centrales



Asymétrie spatiale



Asymétrie dans l'espace des impulsions

□ Interactions entre les constituants \Rightarrow gradient de pression : asymétrie spatiale \Rightarrow impulsion

□ Émission des particules avec un angle défini par rapport au plan de réaction (décomposition en série de Fourier)

$$\frac{d^2 N}{dp_T^2 d\phi} = \frac{dN}{2\pi dp_T^2} \left(1 + 2 \sum_n v_n \cos(n\phi) \right)$$

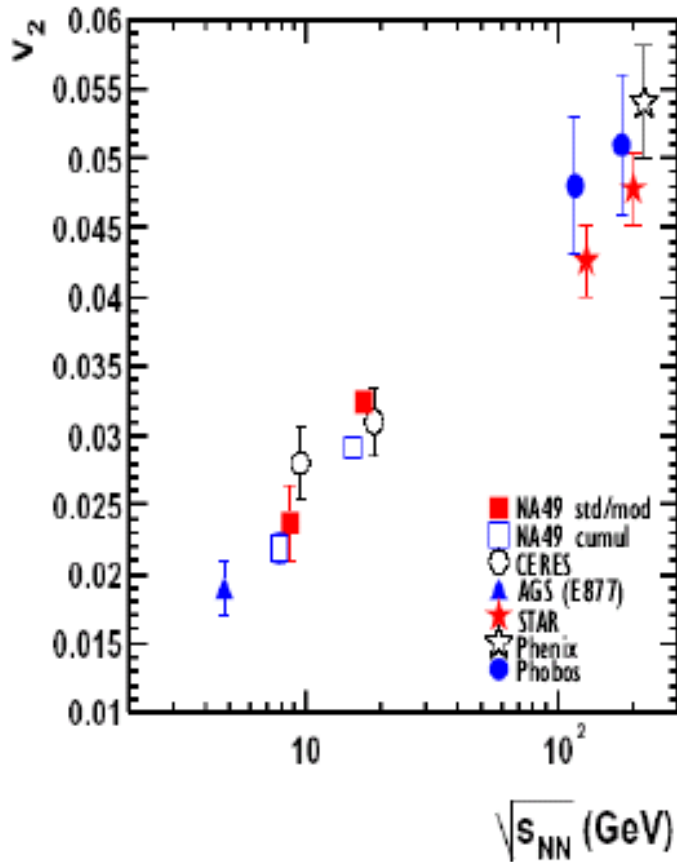
□ A $y \sim 0$: le flow v_1 disparaît, seul v_2 demeure.

$$v_2 = \left\langle \frac{p_x^2 - p_y^2}{p_x^2 + p_y^2} \right\rangle = \langle \cos(2\phi) \rangle \quad \phi = \tan^{-1} \left(\frac{p_y}{p_x} \right)$$

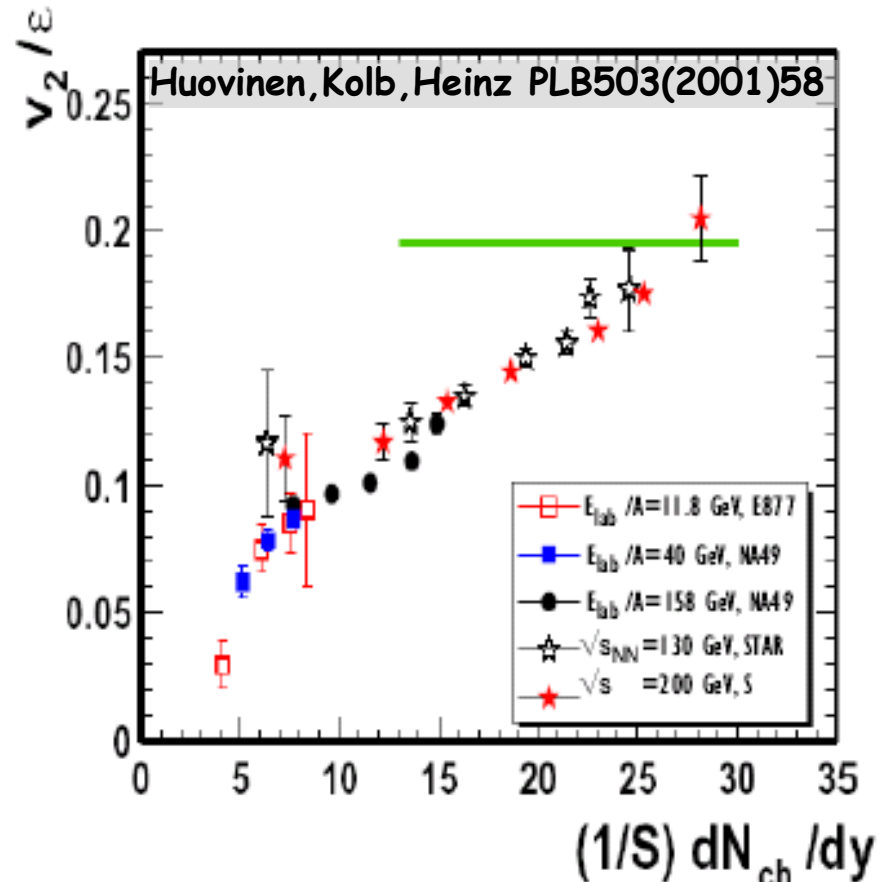
v_2 sensible aux 1^{ers} instants de la collision donc aux interactions partoniques dans le milieu dense

Fonction d'excitation du flot

Bulk properties



Flot elliptique important
(déjà le cas au SPS)

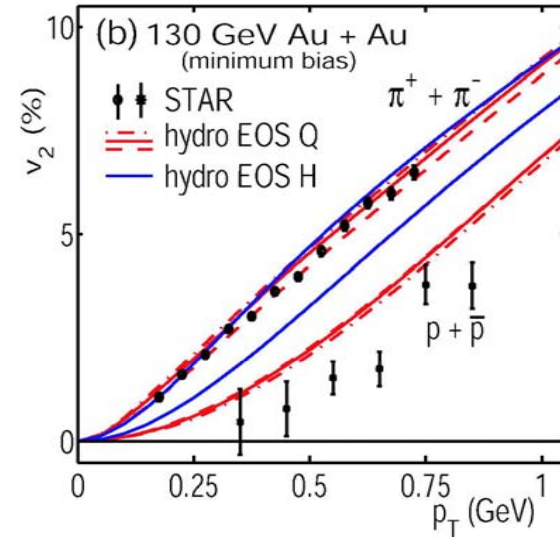
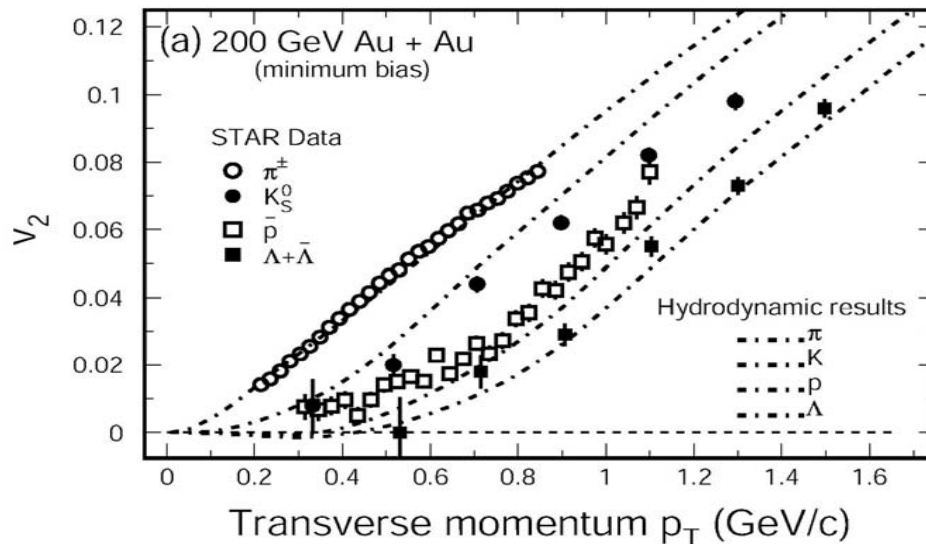


Limite hydrodynamique atteinte
(nouveau)

- Phases hadronique + plasma
- Thermalisation très tôt ($\tau_{therm} \sim 1 \text{ fm}/c$)

Thermalisation ?

Bulk properties



- Hypothèse un fluide idéal qui permet de reproduire :
 - Magnitude du v_2
 - Dépendance en masse du v_2 , signe d'une vitesse de flot commune
- L'hydro suggère une thermalisation très tôt ($\tau_{\text{therm}} < 1$ fm/c)
une EoS soft (phase mixte)
- ≡ l'un des points clés des observations à RHIC

⇒ STAR : hydro versus HBT, sensibilité à l'EoS ?
 ⇒ discussions avec Jean-Yves : un fluide pas si idéal !!

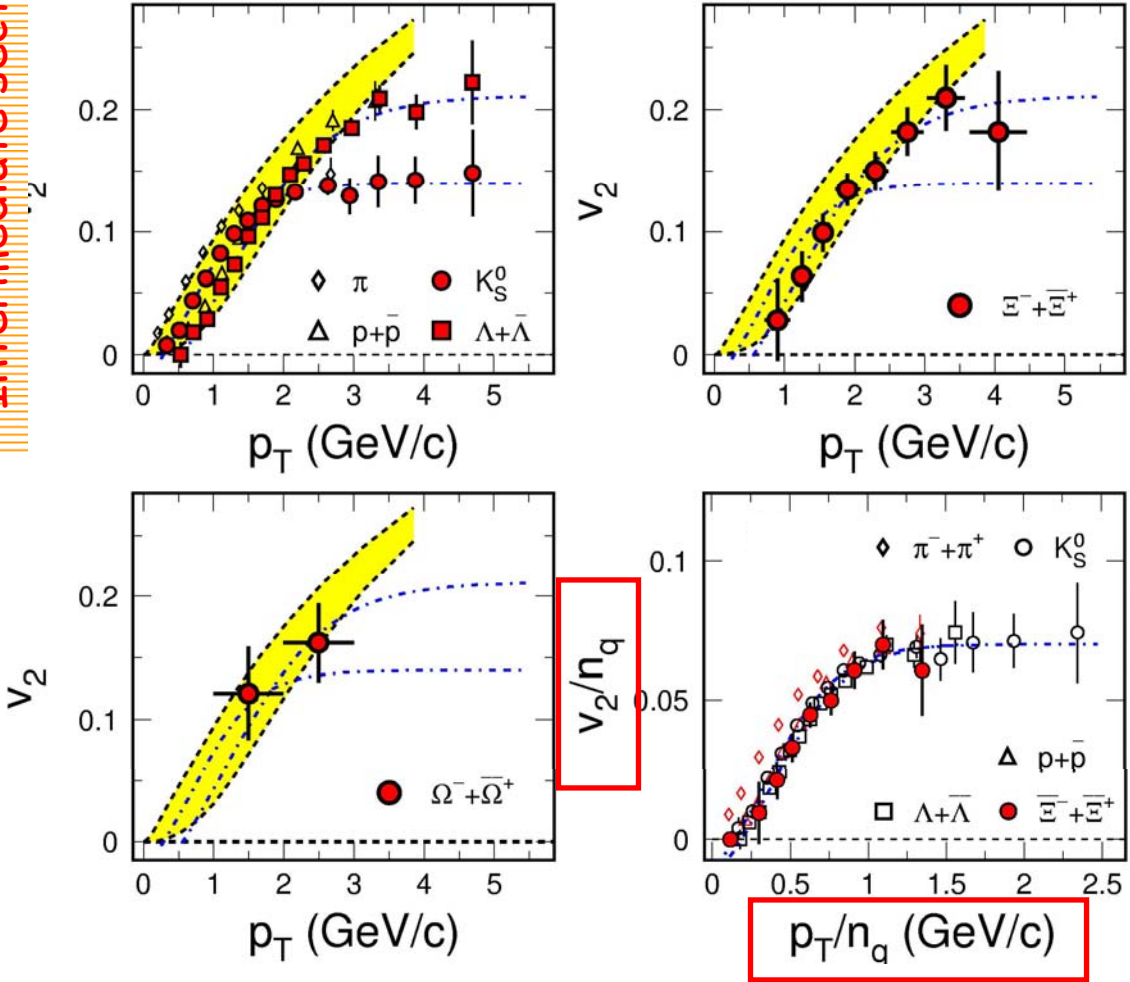


Quarks constituants (1)

Intermediate sector

PHENIX PRL91(2003)182301
STAR PRL92(2004)052302

v_2/n_q versus p_T/n_q



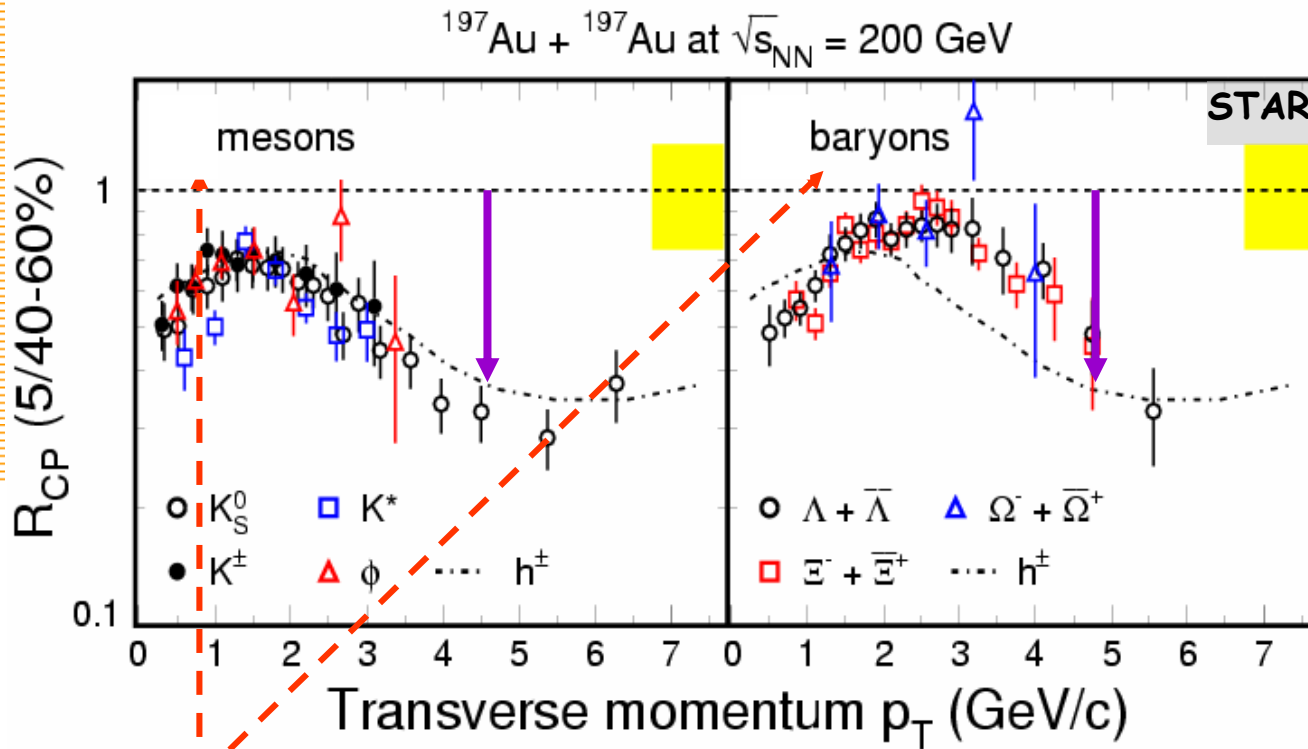
Les degrés de liberté qui priment sont des quarks constituants

Un flot est créé au niveau partonique, et accreditant les modèles de coalescence de quarks



Quarks constituents (2)

Intermediate sector



1- suppression à haut p_T :
«jet quenching»

2- Dépendance au type de particules :
Baryons/Mésons

Des quarks constituants aux partons ???

Perte d'énergie des partons et pQCD

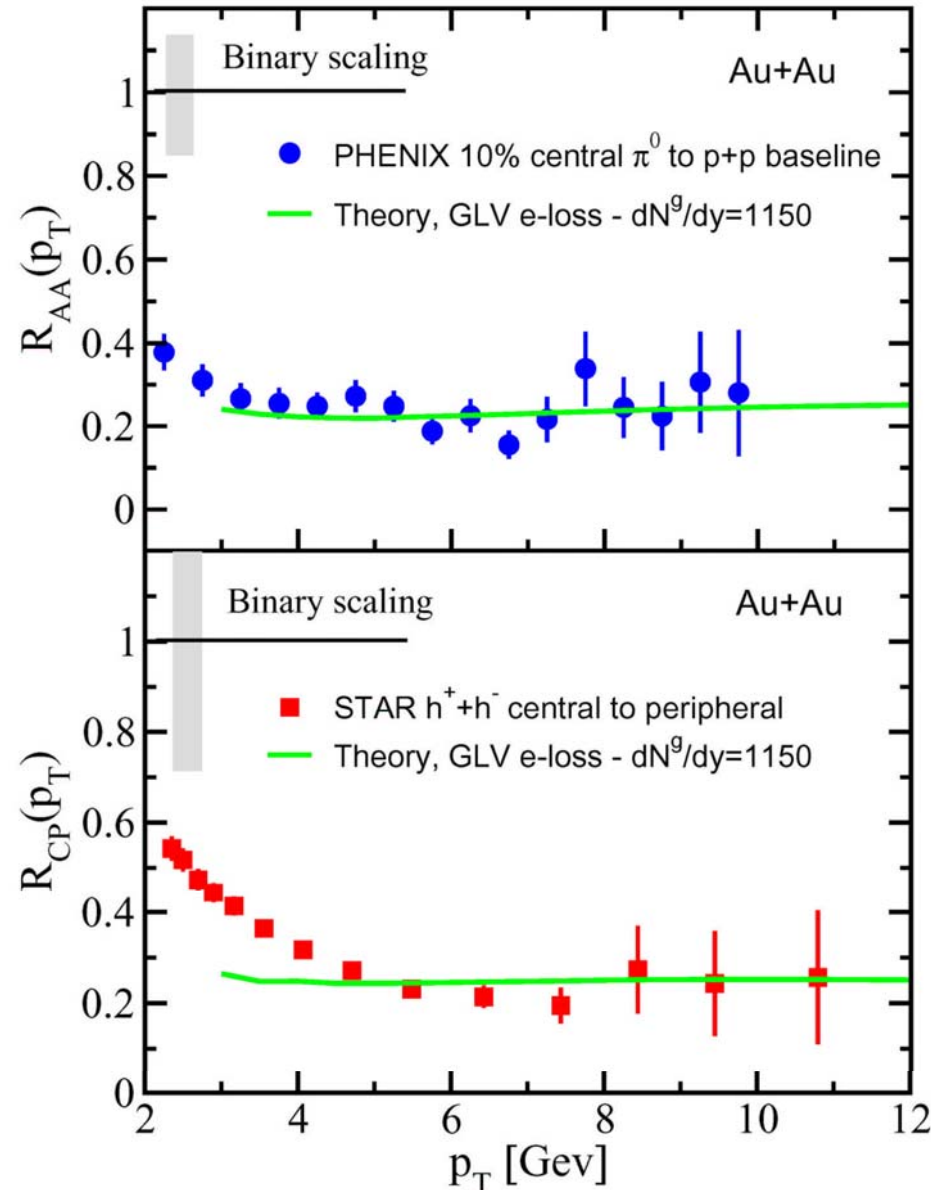
⇒ Talk de David
« Jet quenching à RHIC »

Ajustement avec pQCD
($\subset \Delta E$ des partons)

□ $dN_{\text{gluon}}/dy \sim 1100$ au début de l'expansion

□ $\sim 30-50$ la densité de gluons de la matière froide

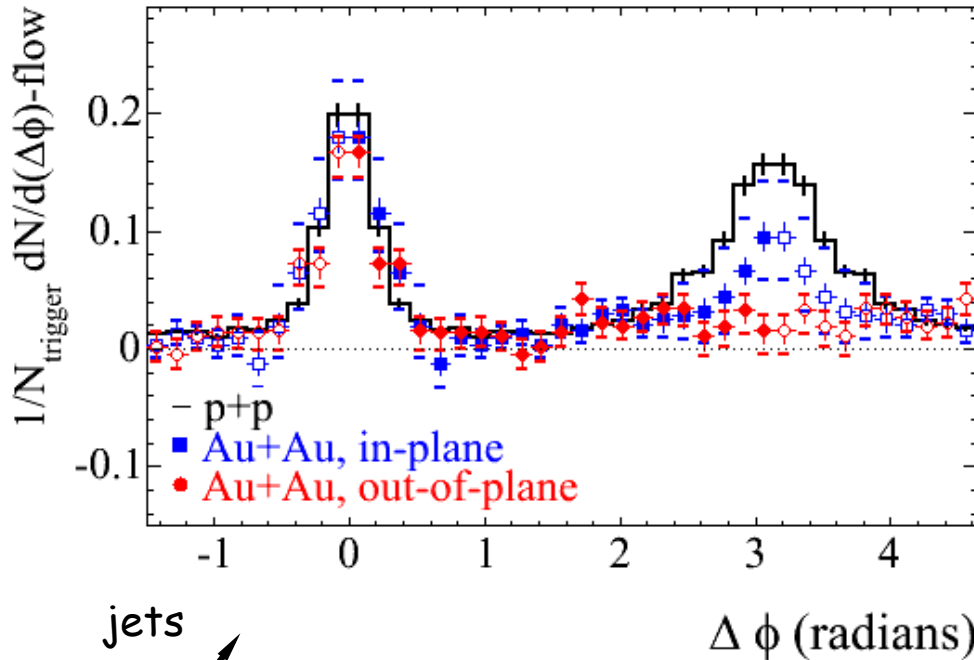
GLV : I. Vitev, JPG30(2004)S791
+ I Vitev, M Gyulassy PRL89(2002)252301



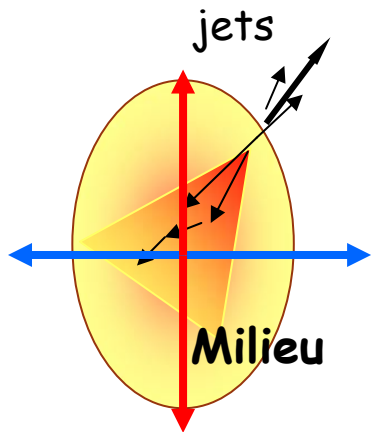
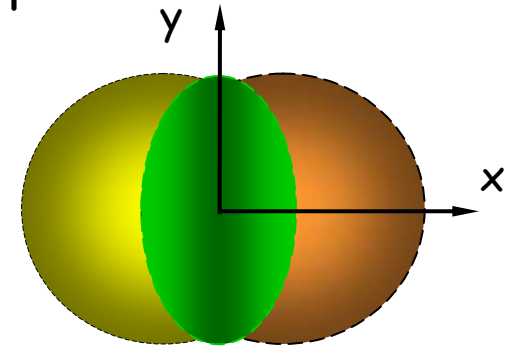
Tomographie du milieu dense

Hard probes

STAR: PRL93(2004)252301



- Les particules subissent une perte d'énergie en traversant le milieu
- La perte d'énergie dépend du chemin parcouru dans le milieu dense

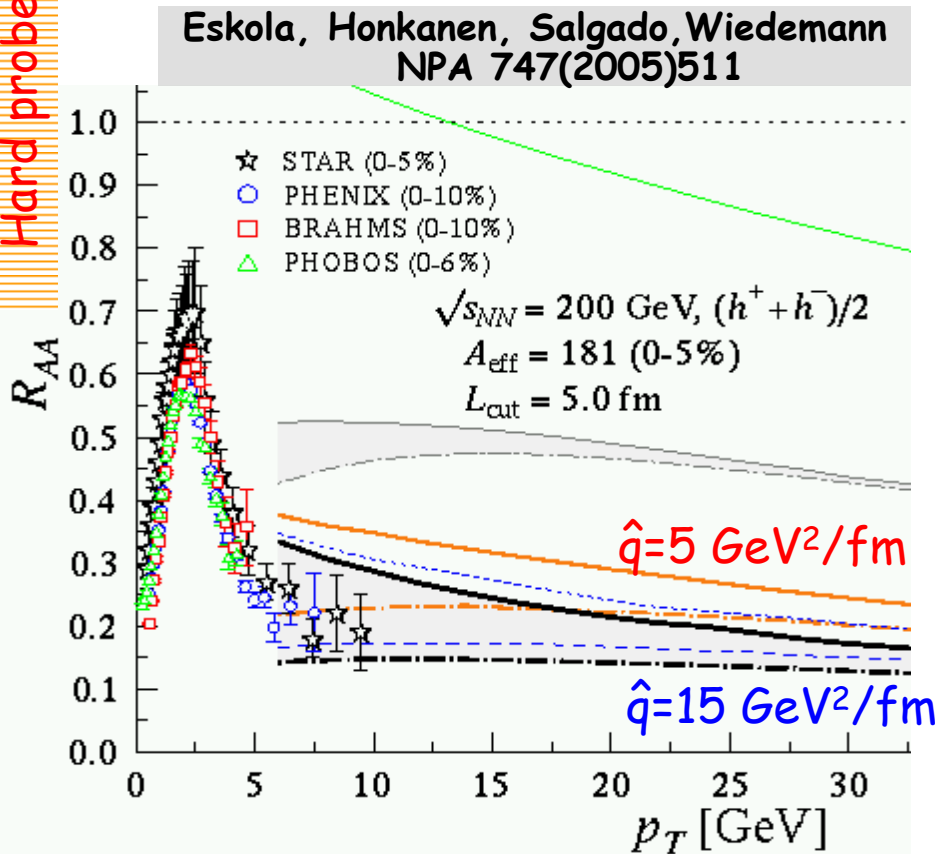


- Au+Au: suppression plus importante dans la direction hors plan de réaction que dans le plan
- Géométrie du milieu dense se révèle d'elle-même

pQCD est-elle capable de reproduire la dépendance à l'orientation des corrélations de di-hadrons ?

Des points à éclaircir

Hard probes

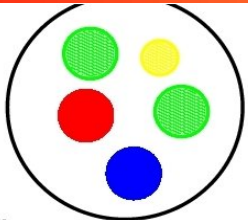


- Que devient la perte d'énergie ?
- pQCD reproduit qualitativement la suppression mais \exists des aspects importants de ΔE des partons :
 - rayonnement induit et son interaction dans le milieu
 - différence gluon/quark (u,c...)
- Constance du R_{AA} avec p_T
 - GLV : compromis entre ΔE , Cronin, shadowing
 - WW : feedback du domaine des p_T intermédiaires
 - EHSW : compromis entre ΔE et le spectre en p_T des partons dont la pente augmente avec p_T

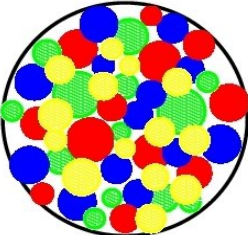
R_{AA} insensible au milieu pour $q > 5 \text{ GeV}^2/\text{fm}$
 production des particules « épidermiques » non supprimées même aux densités les plus élevées.

CGC ...

Hard probes

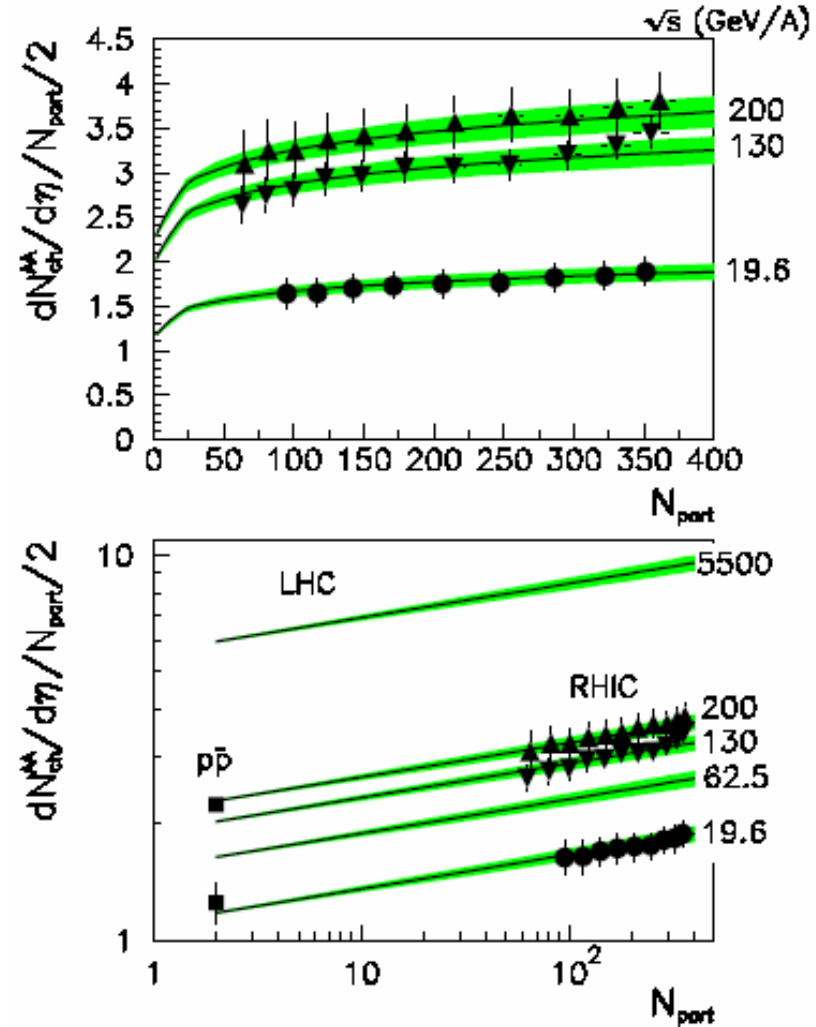
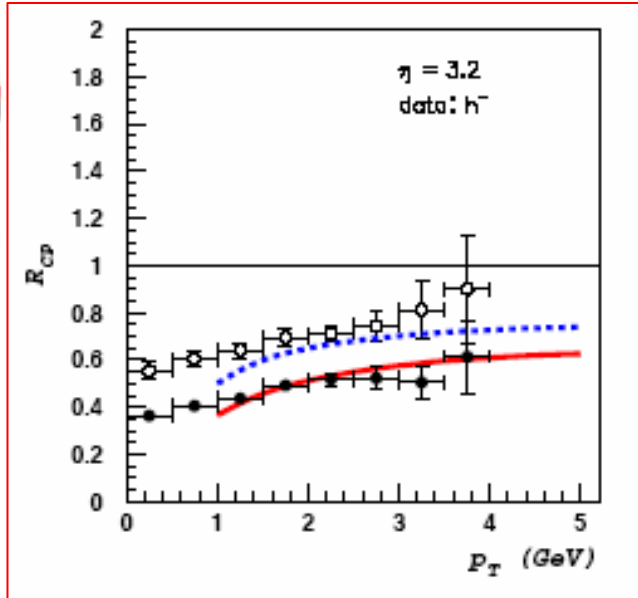


Gluon Density Grows
small A, low energy



large A, high energy

⇒ Talk de François



Le modèle de la saturation doit-il reproduire les données du SPS ?

En résumé du SWP (1)

On sait qu'il s'agit d'une **matière extrêmement dense** qui **thermalise très rapidement**. Des premières estimations de la densité d'énergie à partir de $dE_T/d\eta$ (à la Bjorken), de l'hydro et de la suppression des jets sont cohérentes et bien supérieures à la densité d'énergie nécessaire à un QGP, prédite par LQCG ($\sim 10 - 15 \text{ GeV}/\text{fm}^3$).

MAIS :

- Il n'y a (jusqu'à présent) aucune preuve directe (univoque) que :
 - Cette matière est déconfinée
 - Les premiers degrés de liberté de cette matière sont des quarks et des gluons
- Besoin d'une meilleure compréhension de la sensibilité réelle de l'hydro à l'EoS, améliorer la compatibilité des descriptions des spectres, v_2 , HBT,
- Pas de conclusions quantitatives sur les propriétés de cette matière qui demande une description au-delà d'un scénario purement hadronique

En résumé du SWP (2)

Du travail supplémentaire pour prouver que c'est le QGP selon la définition formulée initialement.

Dans un futur proche :

soft sector:

- Flow elliptique du charme ouvert
- Systématiques du v_2 (+de particules et de stat.)
- Di-leptons de basse masse
- Photons directs

jets et hard probes:

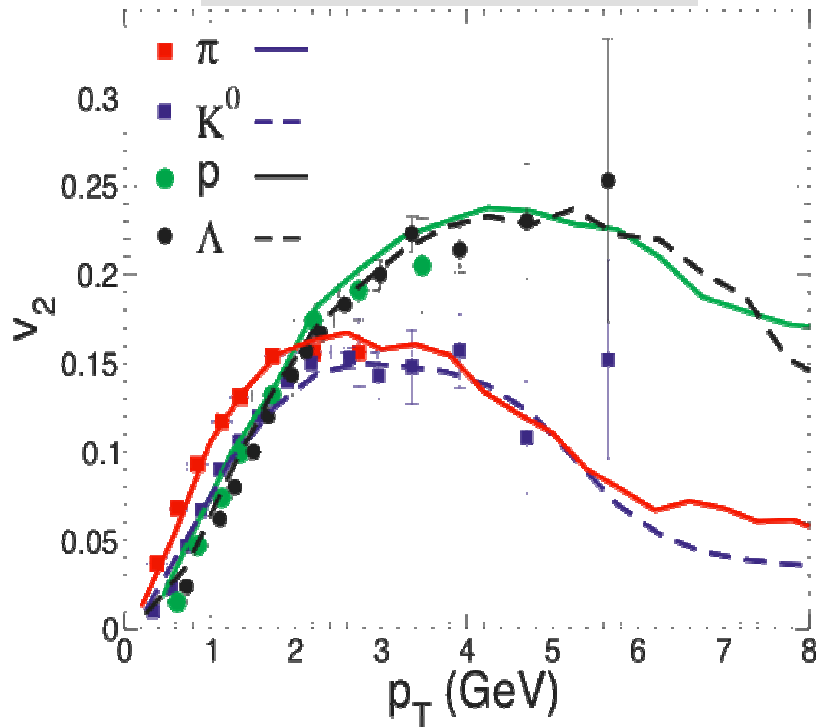
- Pt plus élevés;
- Suppression des quarks lourds (perte d'énergie)



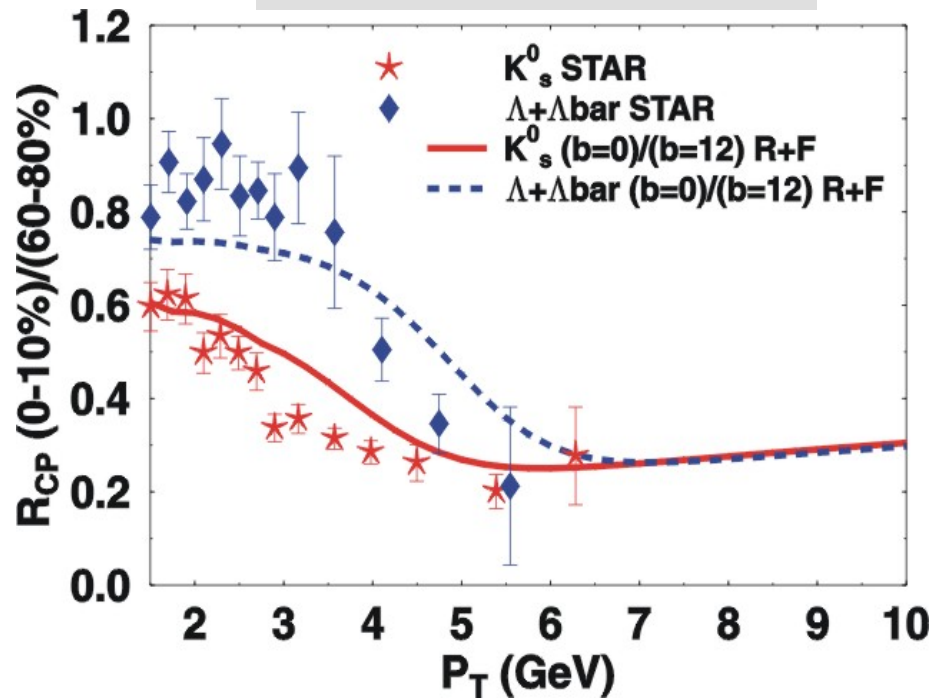
Coalescence des quarks

Dépendance au type de particules reproduite...

V Greco nucl-th/0405040

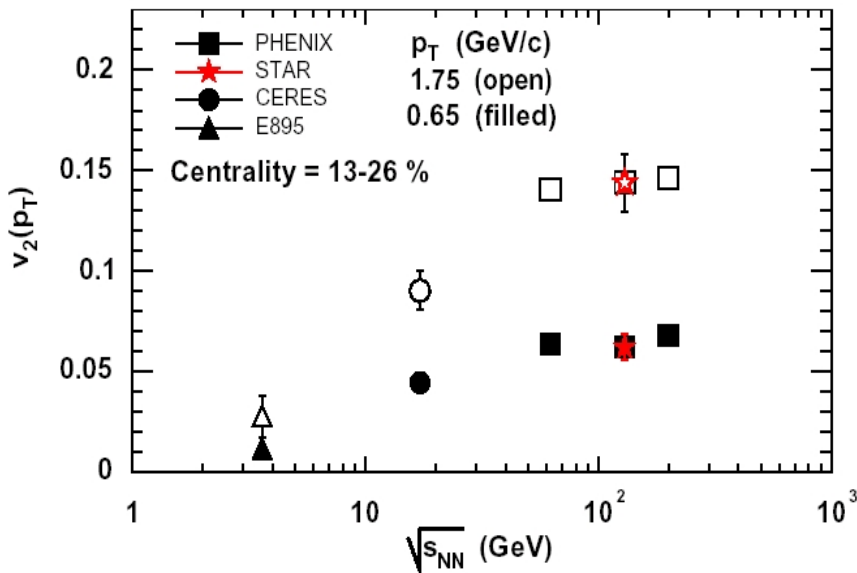
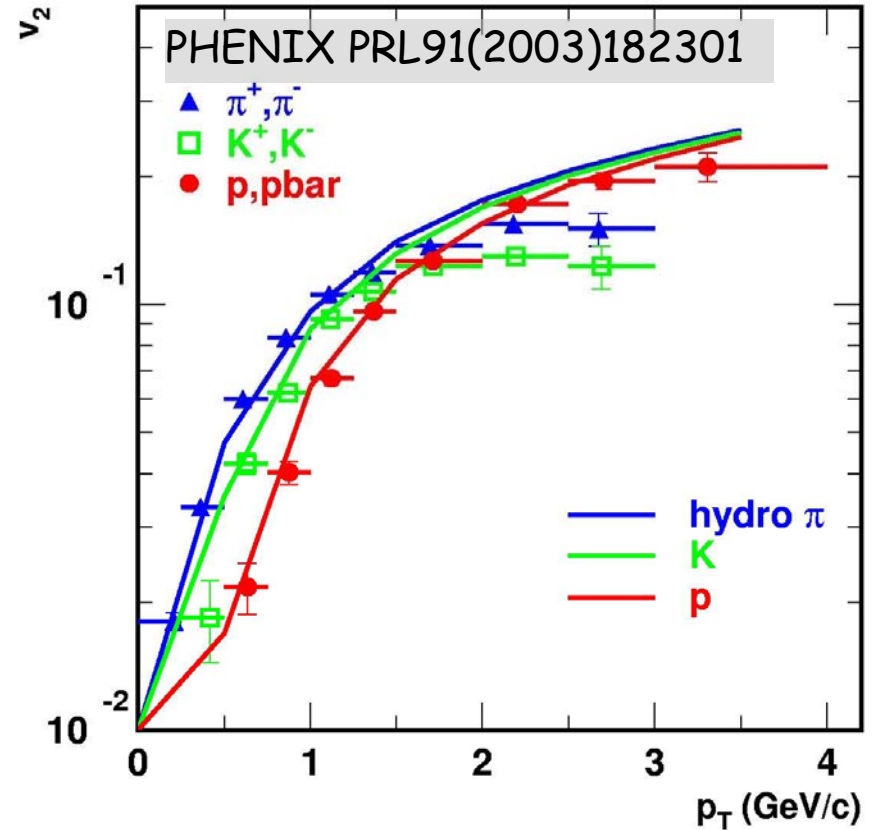
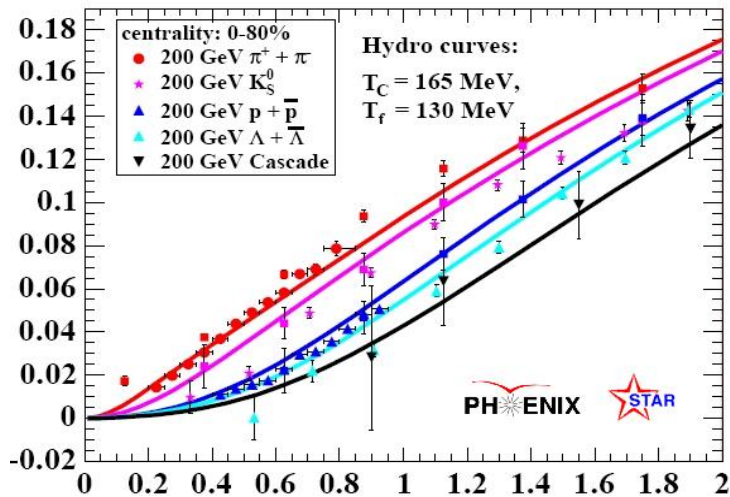


RJ Fries PRC68(2003)044902



... par les modèles basés sur la recombinaison de quarks

Hydrodynamique et thermalisation

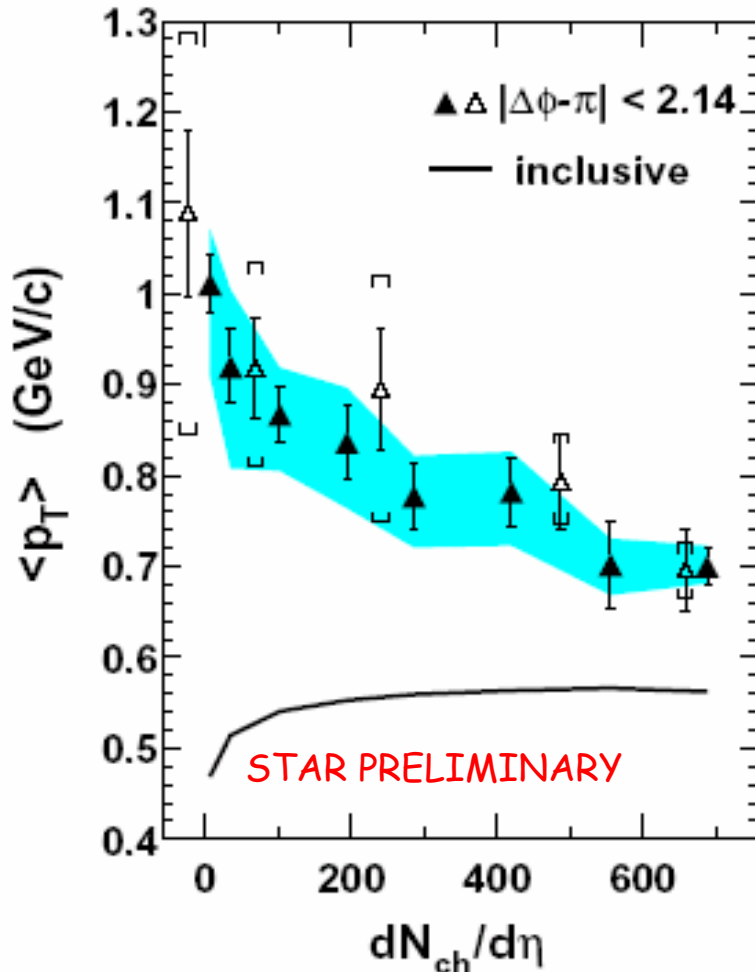


Calculs hydrodynamiques :

Meilleur accord pour une EOS(Q)

P. Huovinen PLB503(2001)58

$\langle p_T \rangle$ et équilibre



Hadrons des collisions centrales Au+Au :

- supérieurs en nombre
- plus « mous » en p_T
- distribués \sim statistiquement en angle [$\sim \cos(\Delta\phi)$] par rapport à pp ou collisions périphériques Au+Au.

\Rightarrow les produits away-side semblent approchés l'équilibre avec le milieu dense traversé, rendant la thermalisation du milieu plausible

AuAu@200 GeV :

Symboles fermés $\Leftrightarrow 4 < p_T^{trig} < 6$ GeV/c

Symboles ouverts $\Leftrightarrow 6 < p_T^{trig} < 10$ GeV/c

Particules associées
 $0.15 < p_T < 4$ GeV/c