

*IV- Quel « degré » de
thermalisation ?
Des effets de la viscosité...*

Quelques désaccords théorie / expérience

Deux hypothèses :

1 - Système thermalisé donc l'hydro idéale :

- Peut-on trouver un scaling universel par certaines grandeurs macroscopiques ?
- Pourquoi l'hydro idéale ne reproduit pas parfaitement toutes les observables expérimentales dans son domaine de validité en impulsion y compris et surtout v_2 même si l'accord à 200 GeV est encourageant ?

2 - Thermalisation non complète :

- Cela peut expliquer les petits/grands désaccords avec l'hydro idéale.
- Dans ce cas, y a-t-il moyen d'estimer où l'on se trouve par rapport à la thermalisation complète du système ?
- Comment modifier l'hydro idéale pour bien reproduire les données ?

A la recherche d'un scaling universel

- Les propriétés de scaling relient des observables macroscopiques à des propriétés propres et microscopiques du système étudié
- En physique des ions lourds, elles peuvent permettre de trouver des lois simples pour relier l'anisotropie mesurée aux propriétés du système et/ou aux degrés de liberté
- Différents tests :
 - p_T/m scaling
 - scaling par rapport à l'excentricité
 - scaling par rapport à la taille du système
 - scaling en masse et quarks constituants
- Que peut-on apprendre de ces propriétés de scaling ?

Collisions centrales
mi-rapiditéPrédictions générales pour un **fluide idéal** :

➤ Distinction :

- particules lentes : $p_T/m < u_{\max}(\pi/2)$: les particules se **déplacent ensemble** avec le fluide. $v_{\text{part}} \sim v_{\text{fluid}}$ Spectres $\sim p_T/m$ - particules rapides : $p_T/m > u_{\max}(0)$: les particules se **déplacent plus vite** que le fluide.

Les particules arrivent de l'endroit où le fluide est le plus rapide le long de la direction de sa vitesse.

M. Estienne

Borghini, Ollitrault
Nucl-th/0506045

Prédictions générales pour un **fluide idéal** :

➤ Distinction :

- particules lentes :

$p_T/m < u_{\max}(\pi/2)$: les particules se **déplacent ensemble** avec le fluide.

$v_{\text{part}} \sim v_{\text{fluid}}$

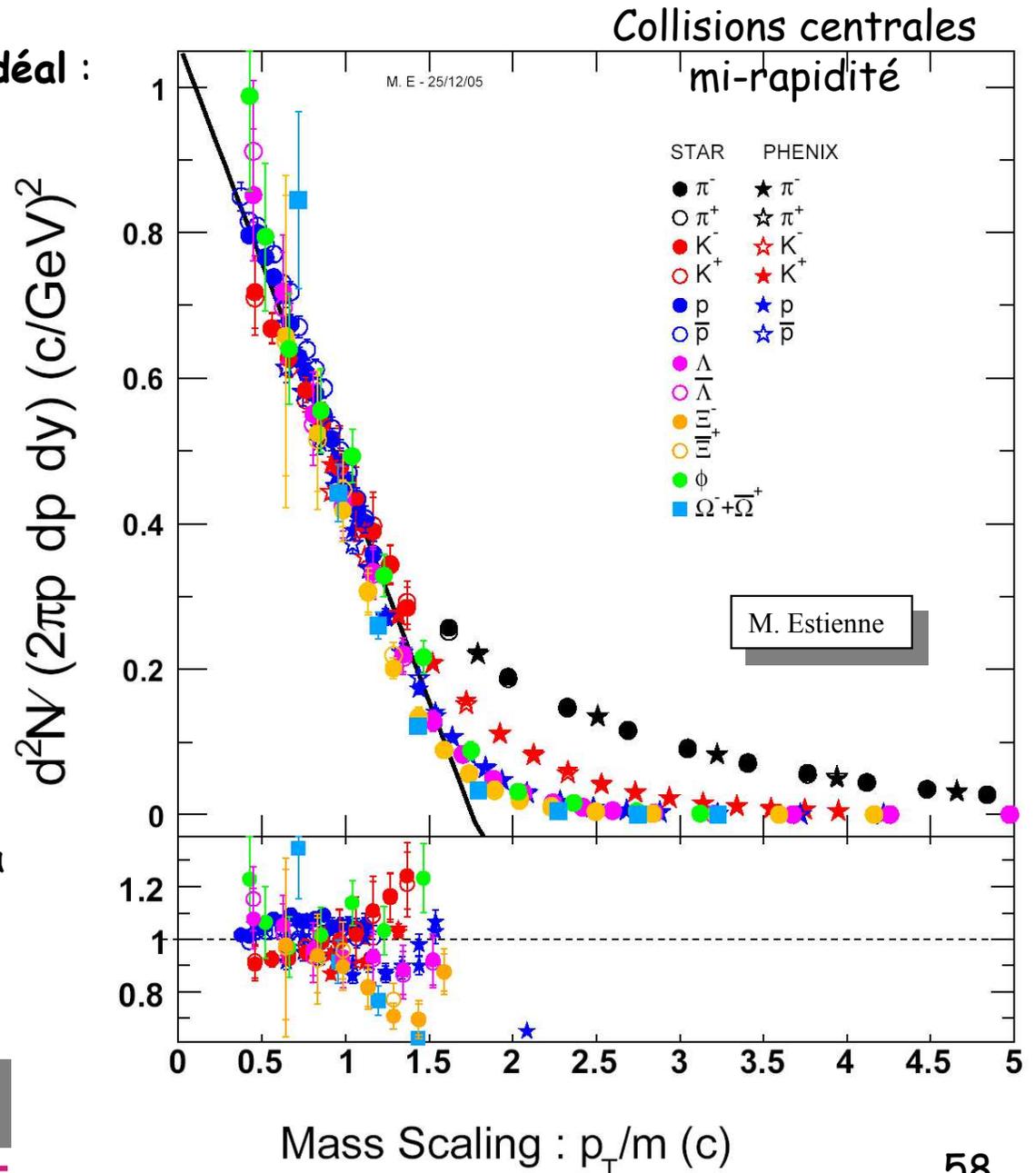
Spectres $\sim p_T/m$

- particules rapides :

$p_T/m > u_{\max}(0)$: les particules se **déplacent plus vite** que le fluide.

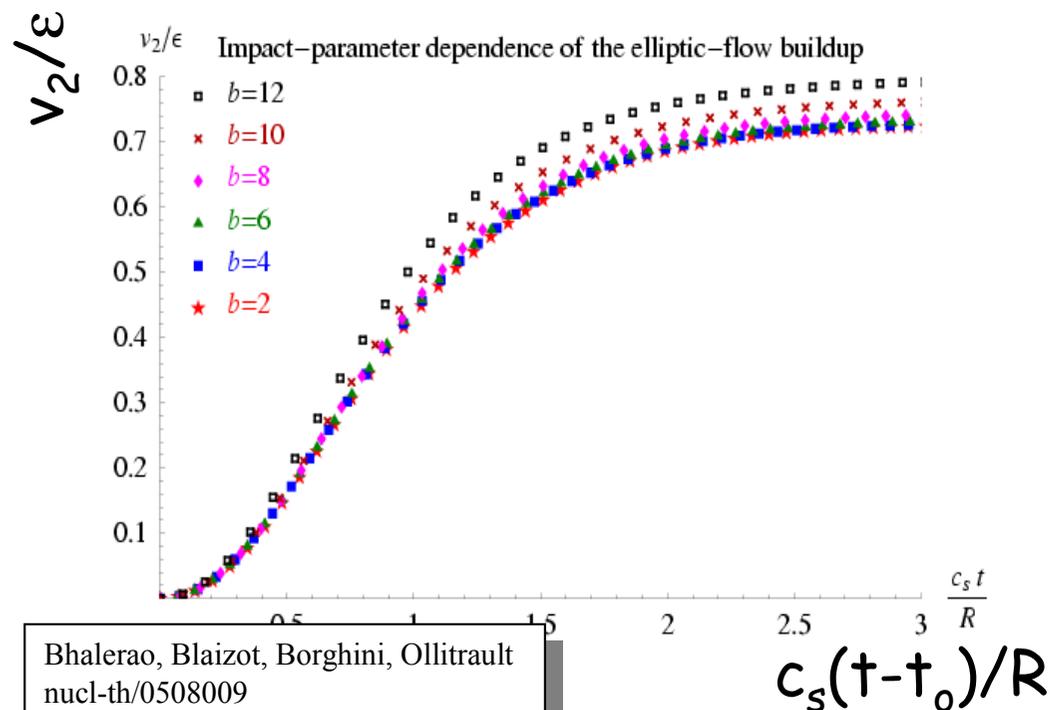
Les particules arrivent de l'endroit où le fluide est le plus rapide le long de la direction de sa vitesse.

Borghini, Ollitrault
Nucl-th/0506045



Scaling avec l'excentricité ?

- Peut-on trouver d'autres observables qui montrent la thermalisation de la matière lors des collisions ? Scaling par l'excentricité ?
- L'hydro idéale est un invariant d'échelle. Si la matière se comporte hydrodynamiquement et est thermalisée, v_2 devrait être indépendant de la taille du système.



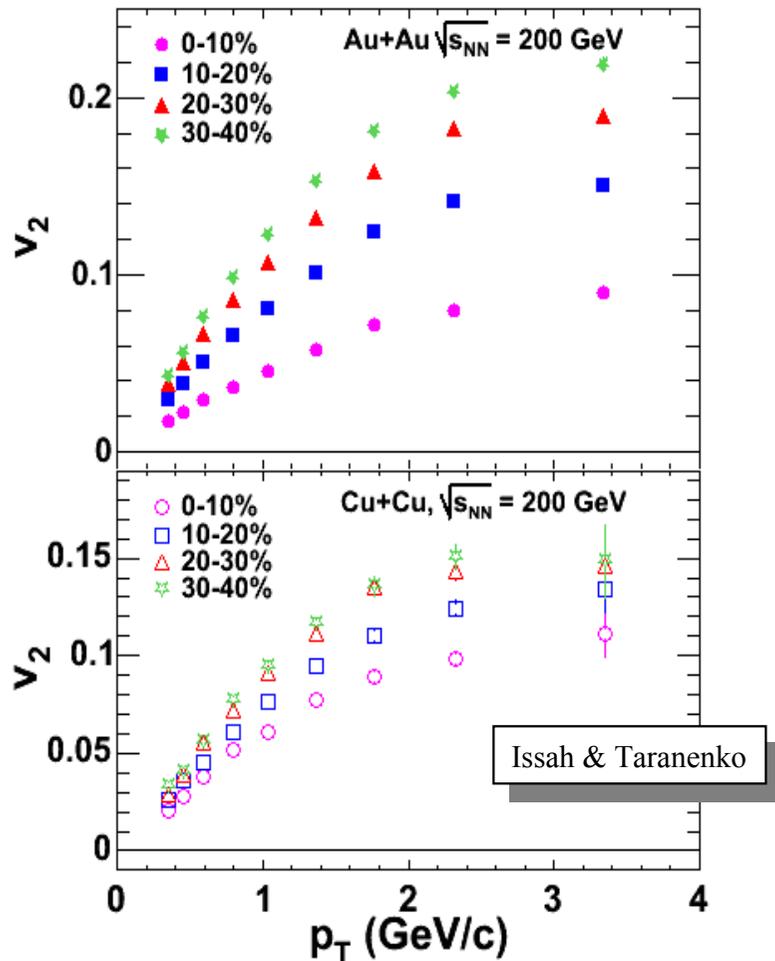
$$\epsilon = \frac{\langle y^2 - x^2 \rangle}{\langle y^2 + x^2 \rangle}$$

Le flot elliptique se développe sur $R/\langle c_s \rangle$
 t_0 = temps de thermalisation
 Valable tant que $t_0 \ll R/\langle c_s \rangle$

v_2/ϵ varie très peu pour différentes valeurs de b excepté pour les collisions les plus périphériques.

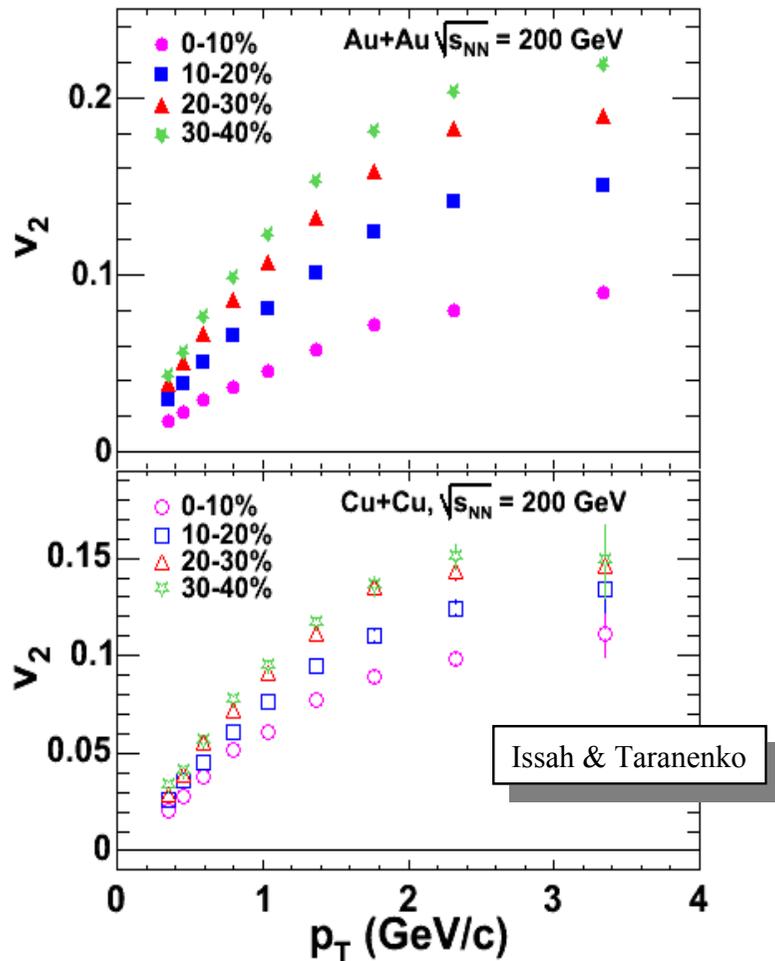
● La valeur finale de v_2 est indépendante de la taille du système (R) pour une forme donnée (ϵ).

PHENIX Au+Au et Cu+Cu @ 200 GeV



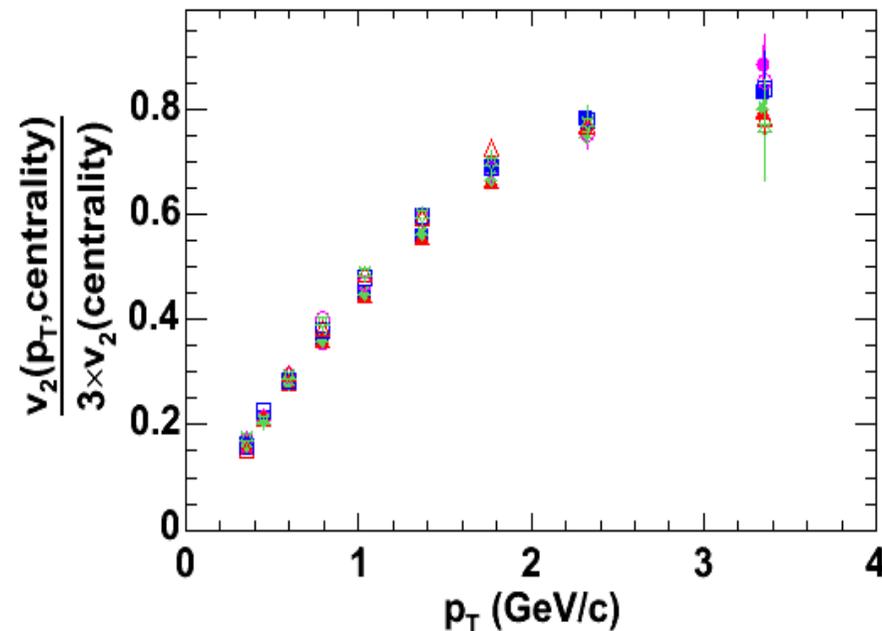
▪ "Integrated v_2 reflects momentum anisotropy of bulk matter and saturates within the first 3-4 fm/c just after collision" (Gyulassy, Hirano nucl-th/050604)

PHENIX Au+Au et Cu+Cu @ 200 GeV



En considérant que v_2 (intégré en p_T) évolue à peu près linéairement avec la centralité de la collision $\Rightarrow \varepsilon \propto k \times v_2$ ($k=3$ Glauber)

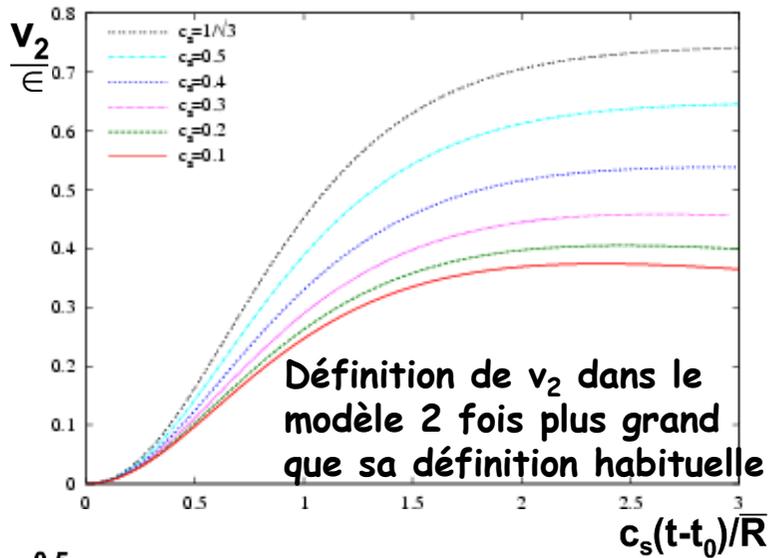
▪ "Integrated v_2 reflects momentum anisotropy of bulk matter and saturates within the first 3-4 fm/c just after collision" (Gyulassy, Hirano nucl-th/050604)



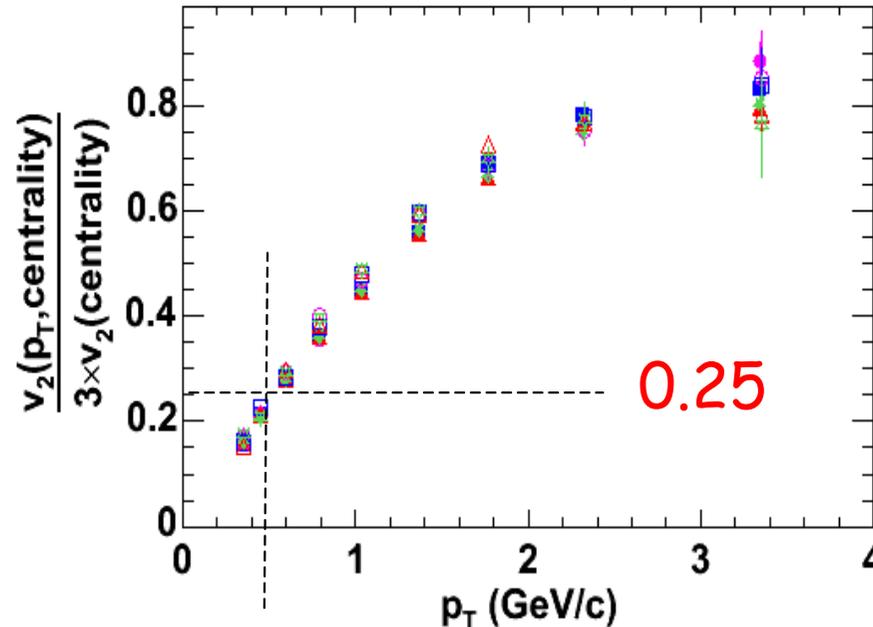
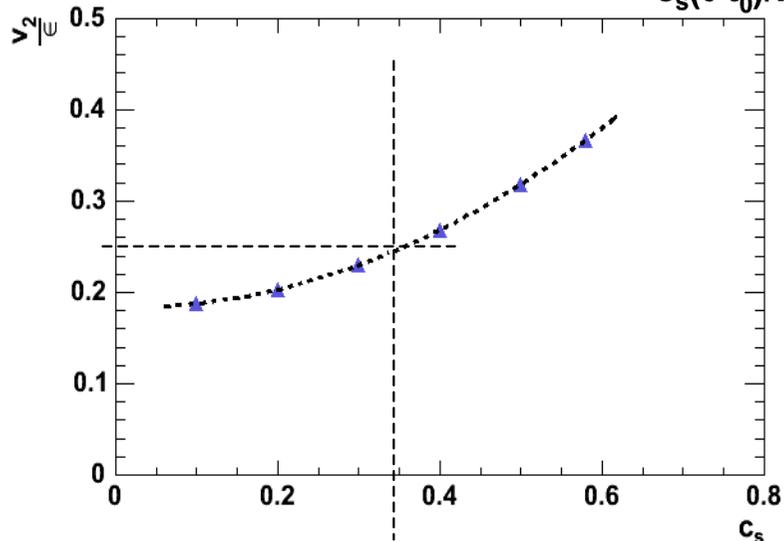
- Scaling en excentricité prédit par l'hydro idéale
- Indépendance avec le taille des systèmes collisionnant

Estimation de c_s ?

- L'amplitude de v_2 dépend aussi des propriétés du système et en particulier de la vitesse du son.
- Peut-on en tirer une information sur la « dureté » de l'EOS ?



Définition de v_2 dans le modèle 2 fois plus grand que sa définition habituelle



$\langle p_T \rangle \sim 0.5 \text{ GeV}/c$

$c_s \sim 0.35 \pm 0.5$
 $c_s^2 \sim 0.12$, EOS douce

Scaling avec l'énergie cinétique transverse

Vitesse d'une particule dans un fluide parfait non relativiste :

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_{\text{flow}} + \mathbf{V}_{\text{th}} \quad \text{Ollitrault, NPA638}$$

- Energie cinétique moyenne d'une particule :

$$KE = KE_{\text{coll}} + KE_{\text{th}}$$

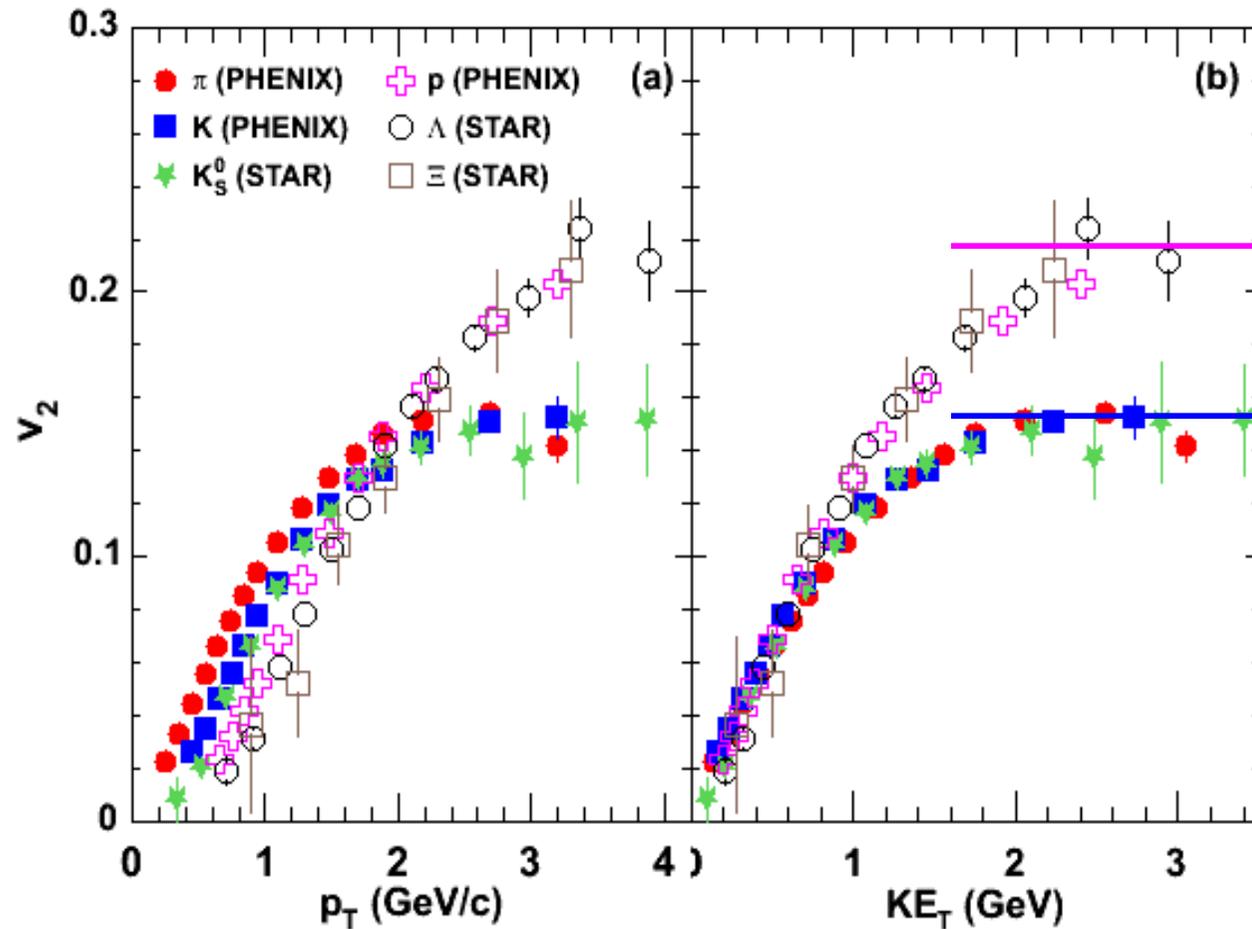
- La pression est une mesure de l'énergie cinétique moyenne. Le **flot elliptique** créé par les gradients de pression devrait être **sensible à l'énergie cinétique collective transverse**.

- Energie cinétique transverse d'une particule dans un fluide relativiste

$$KE_T = m (\gamma_T - 1)$$

- 1^{er} scaling a avoir exploité cette idée mais avec une expression non relativiste de l'énergie transverse : le **buda lund model** nucl-th/0310040 et résultats QM 2005 : R. Lacey

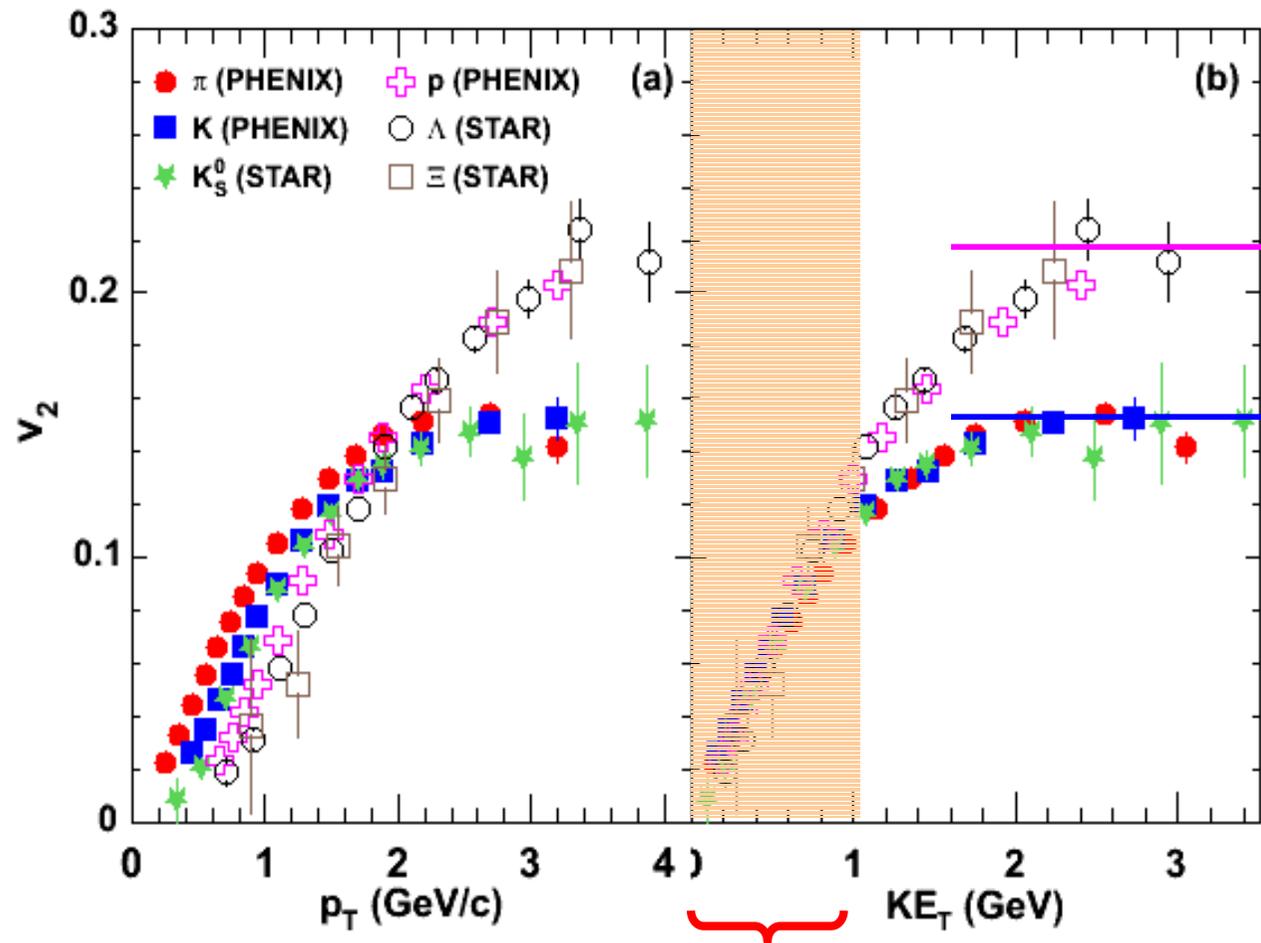
Masse transverse et n_q dépendances



Comportement similaire pour les baryons

... et différent pour les mésons mais similaire entre eux également

Masse transverse et n_q dépendances

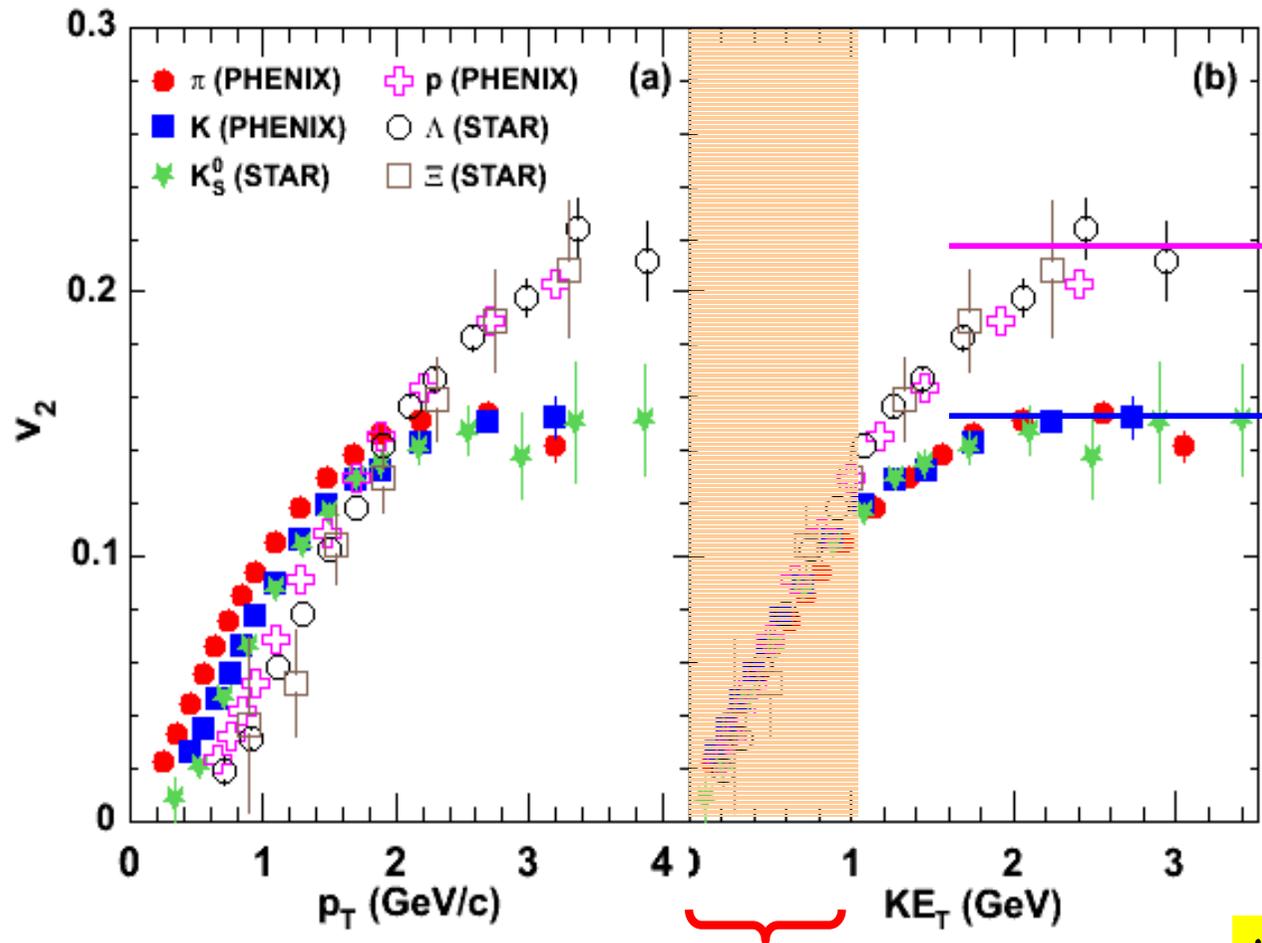


Comportement similaire pour les baryons

... et différent pour les mésons mais similaire entre eux également

Le scaling marche jusqu'à 1 GeV

Masse transverse et n_q dépendances



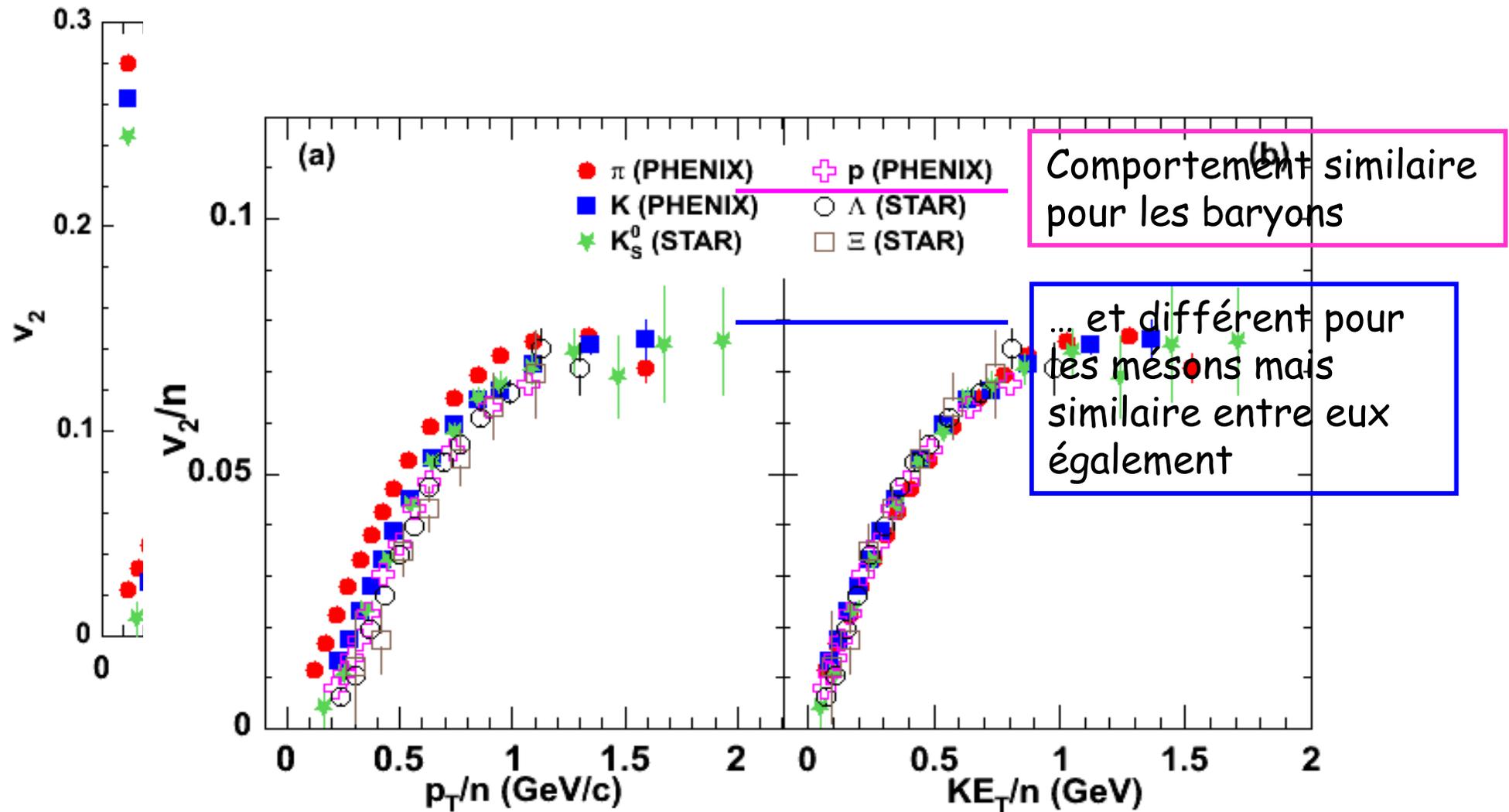
Comportement similaire pour les baryons

... et différent pour les mésons mais similaire entre eux également

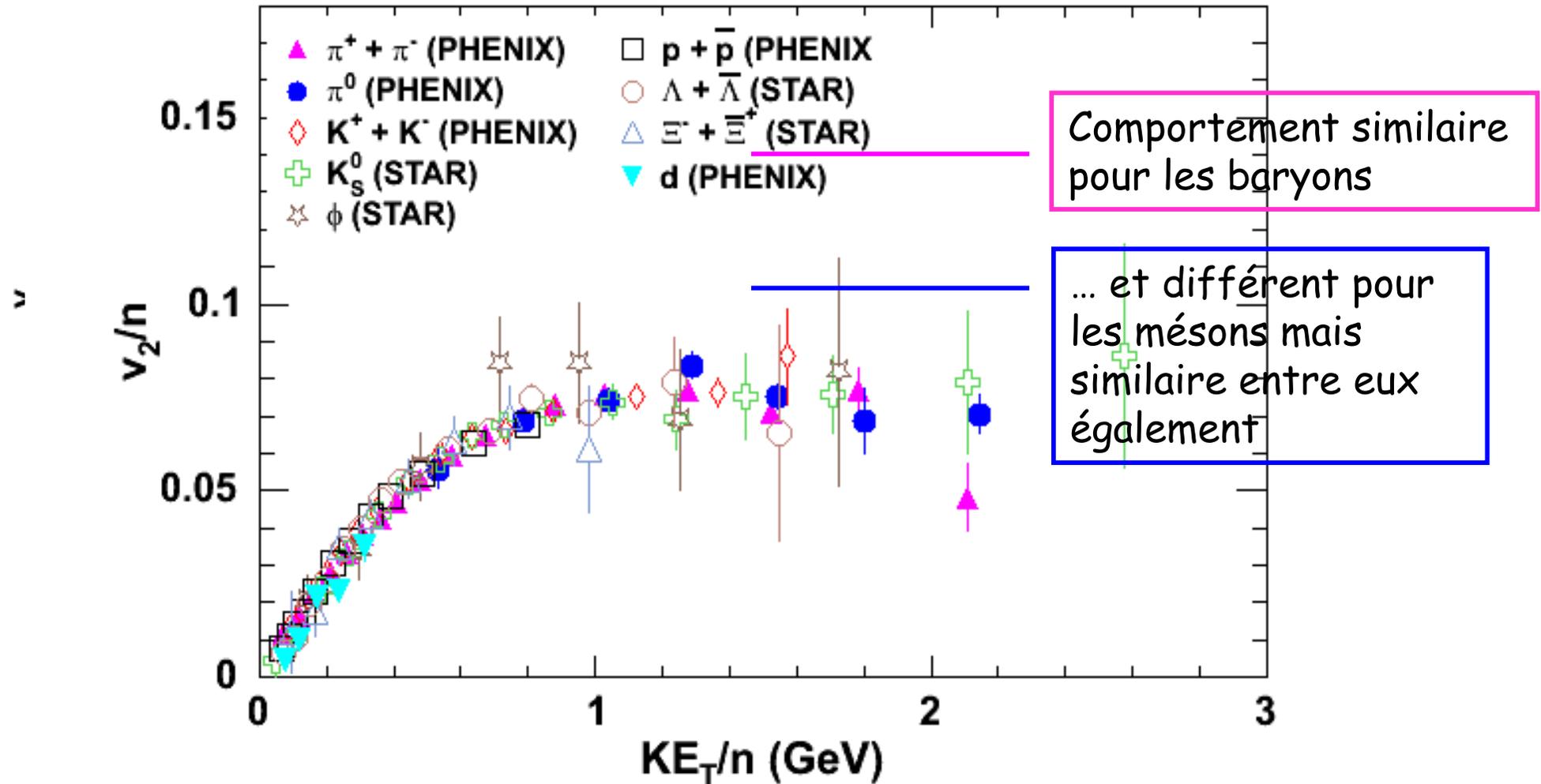
Le scaling marche jusqu'à 1 GeV

Une dépendance en quarks au delà de 1 GeV ?

Masse transverse et n_q dépendances



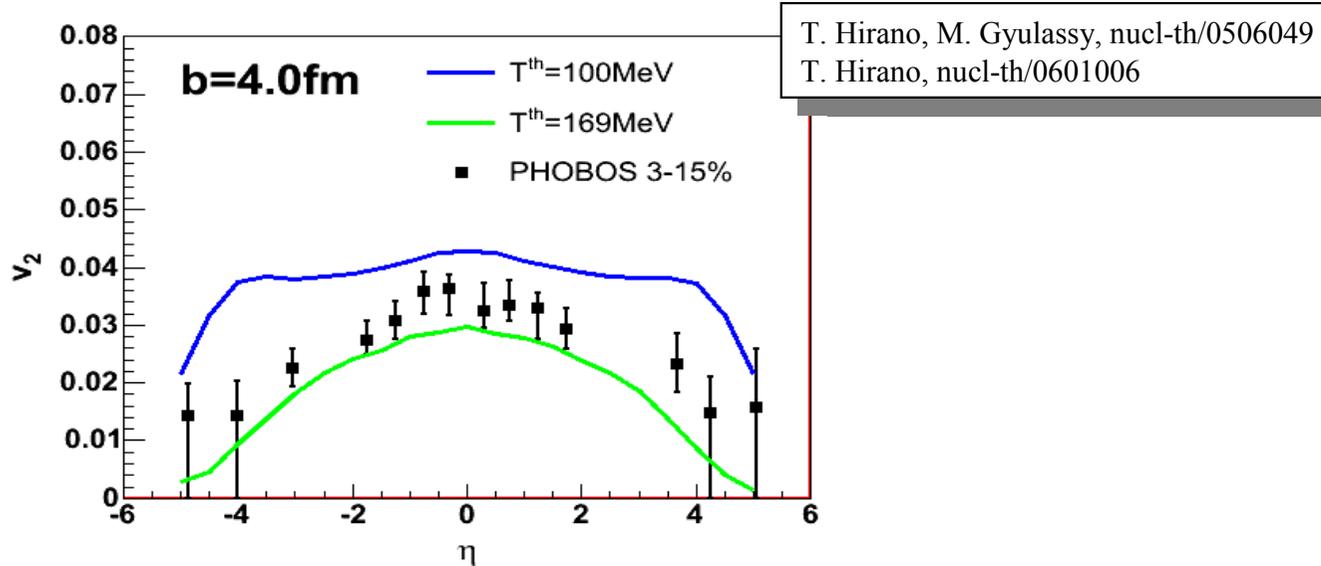
Masse transverse et n_q dépendances



Aussi vrai pour ϕ et d ...
 KE_T bon scaling pour le flot
 KE_T/n scaling universel ?

Au delà de l'hydro idéale...

● **3D hydro** (T. Hirano) : reproduction de la dépendance du flot elliptique avec la rapidité ou pseudorapidité



● **Hydro + Cascade**

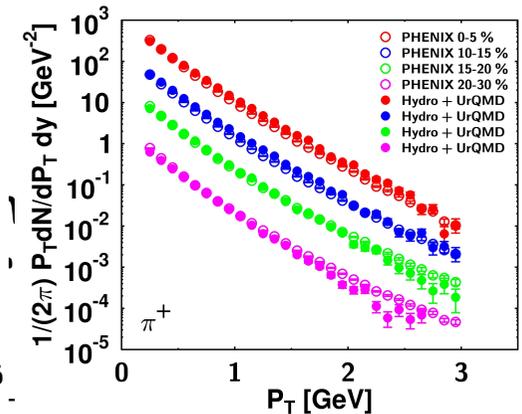
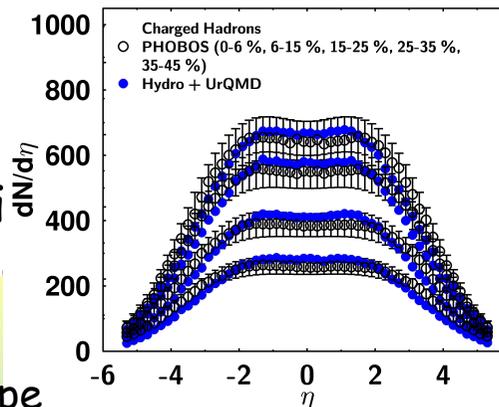
Supposer la thermalisation génère trop de flot.

Idée : cascade



CE : chemi
PCE : parti
HC : reson

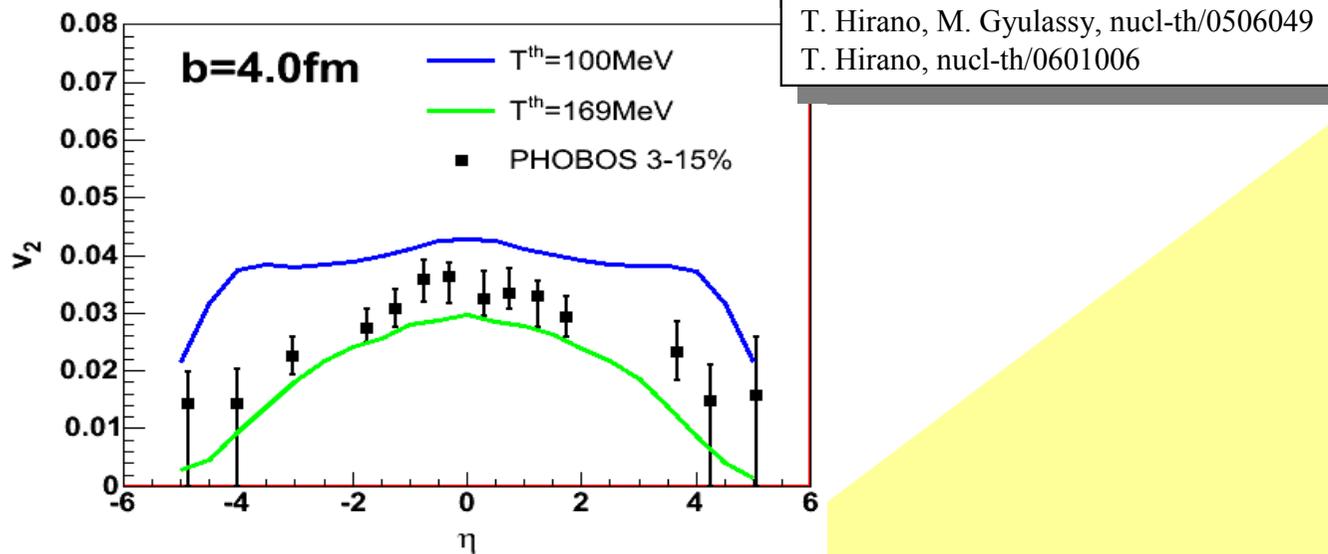
- Hydro = fluide parfait
- A $T_{ch} = T_c$, un modèle microscopique de type hadron/parton cascade peut jouer le rôle de la viscosité et entraîner des effets dissipatifs dans la phase hadronique



S. Nonaka, S. A. Bass,
nucl-th/0510038

Au delà de l'hydro idéale...

● **3D hydro** (T. Hirano) : reproduction de la dépendance du flot elliptique avec la rapidité ou pseudorapidité



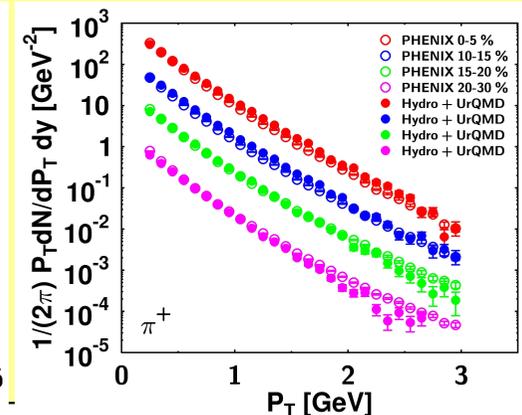
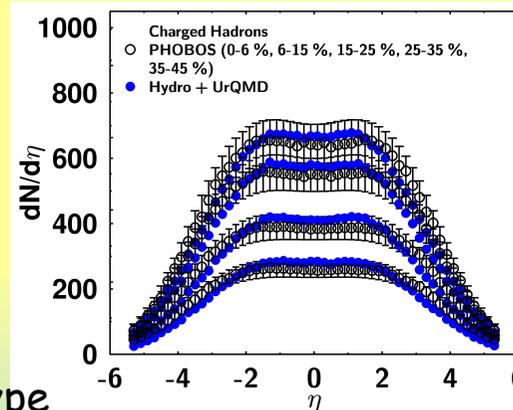
● **Hydro + Cascade**

Supposer la thermalisation génère trop de flot.

Idée : cascade



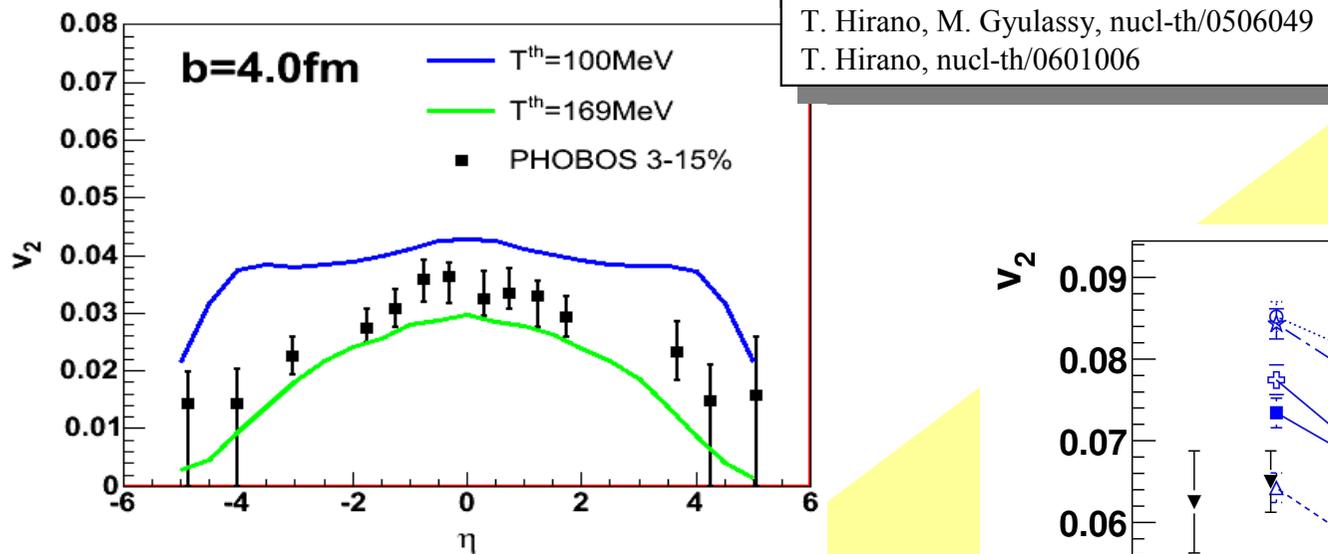
- Hydro = fluide parfait
- A $T_{ch} = T_c$, un modèle microscopique de type hadron/parton cascade peut jouer le rôle de la viscosité et entraîner des effets dissipatifs dans la phase hadronique



S. Nonaka, S. A. Bass, nucl-th/0510038

Au delà de l'hydro idéale...

● **3D hydro** (T. Hirano) : reproduction de la dépendance du flot elliptique avec la rapidité ou pseudorapidité

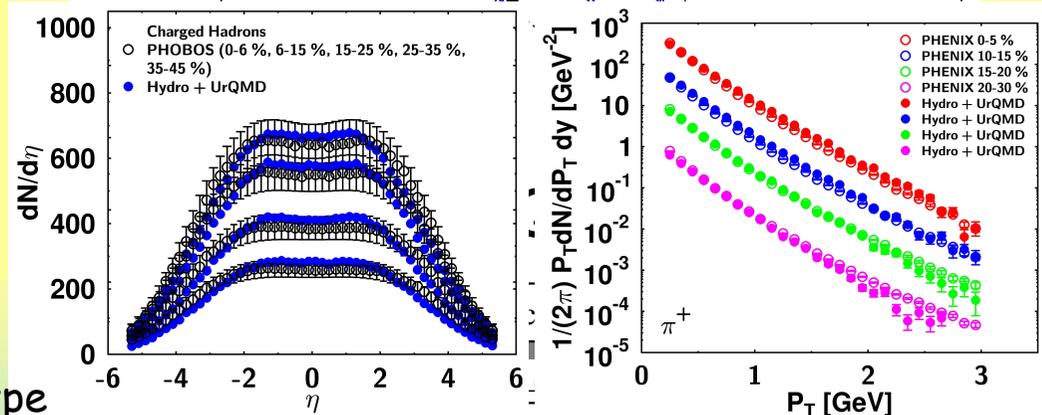
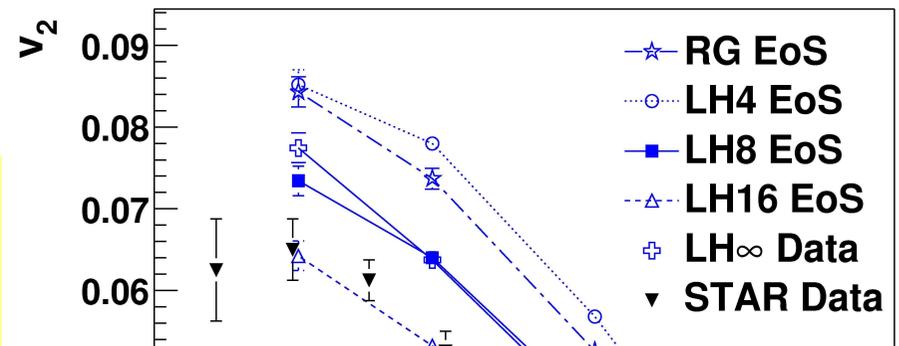


● **Hydro + Cascade**

Supposer la thermalisation génère trop de flot.

Idée : cascade

- Hydro = fluide parfait
- A $T_{ch} = T_c$, un modèle microscopique de type hadron/parton cascade peut jouer le rôle de la viscosité et entraîner des effets dissipatifs dans la phase hadronique



S. Nonaka, S. A. Bass, nucl-th/0510038

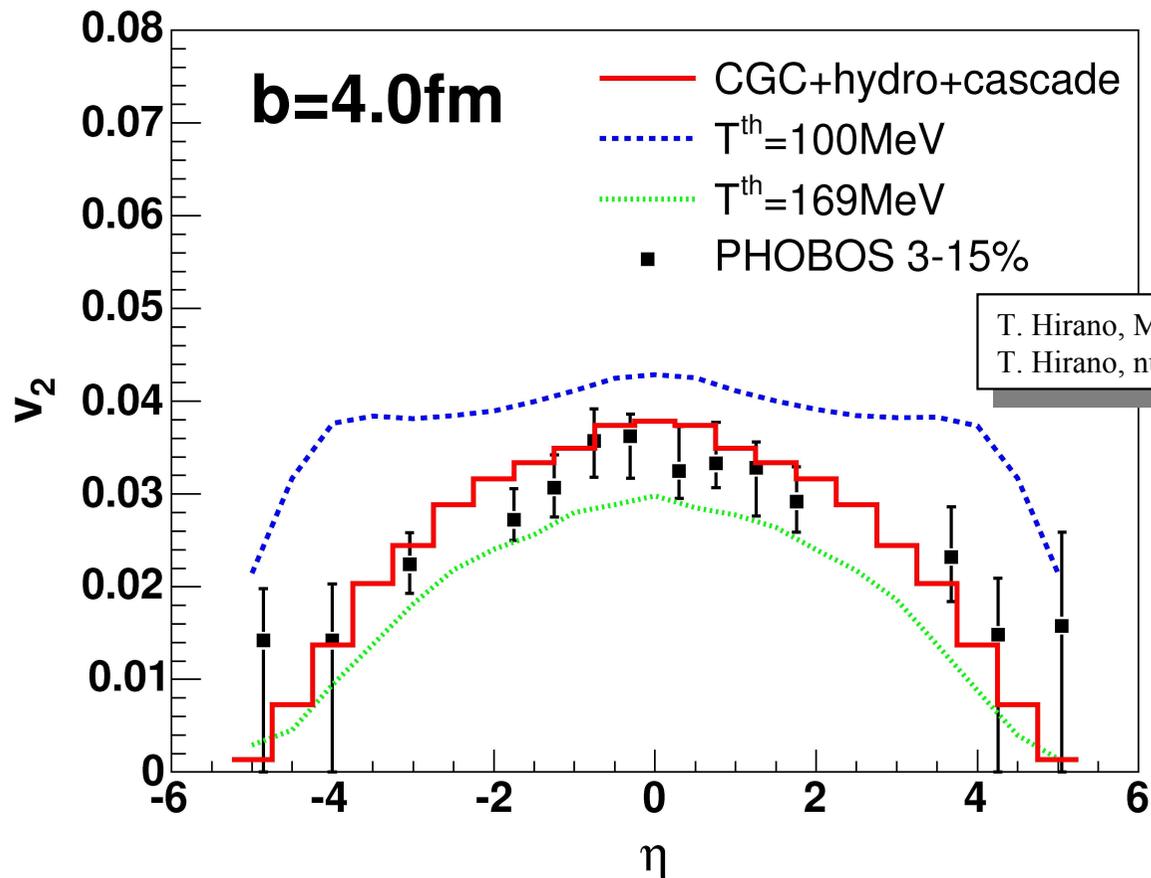
N_p/N_p^{\max}

Au delà de l'hydro idéale...

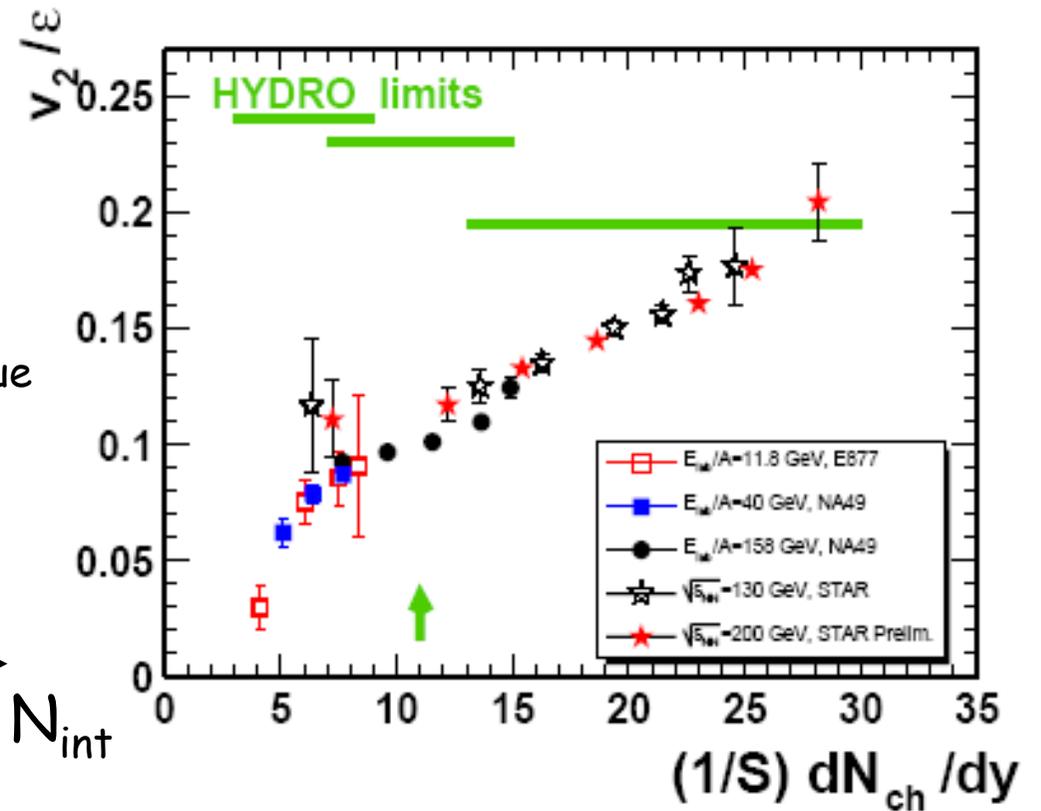
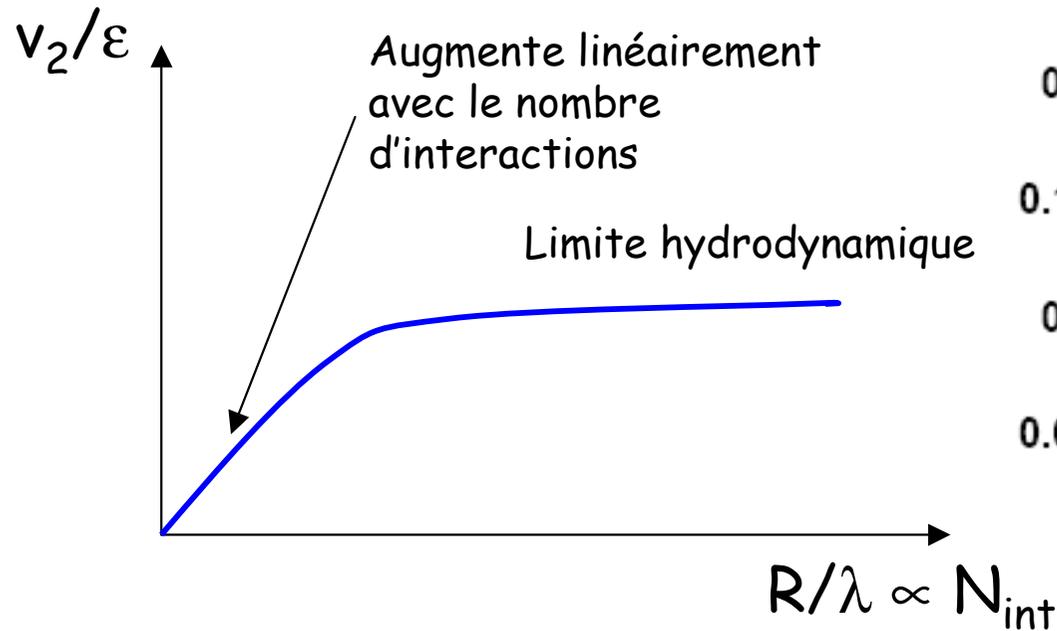
● CGC + Hydro + Cascade

Modéliser une étape de plus de la collision : ces tous premiers instants avant l'étape de thermalisation : CGC

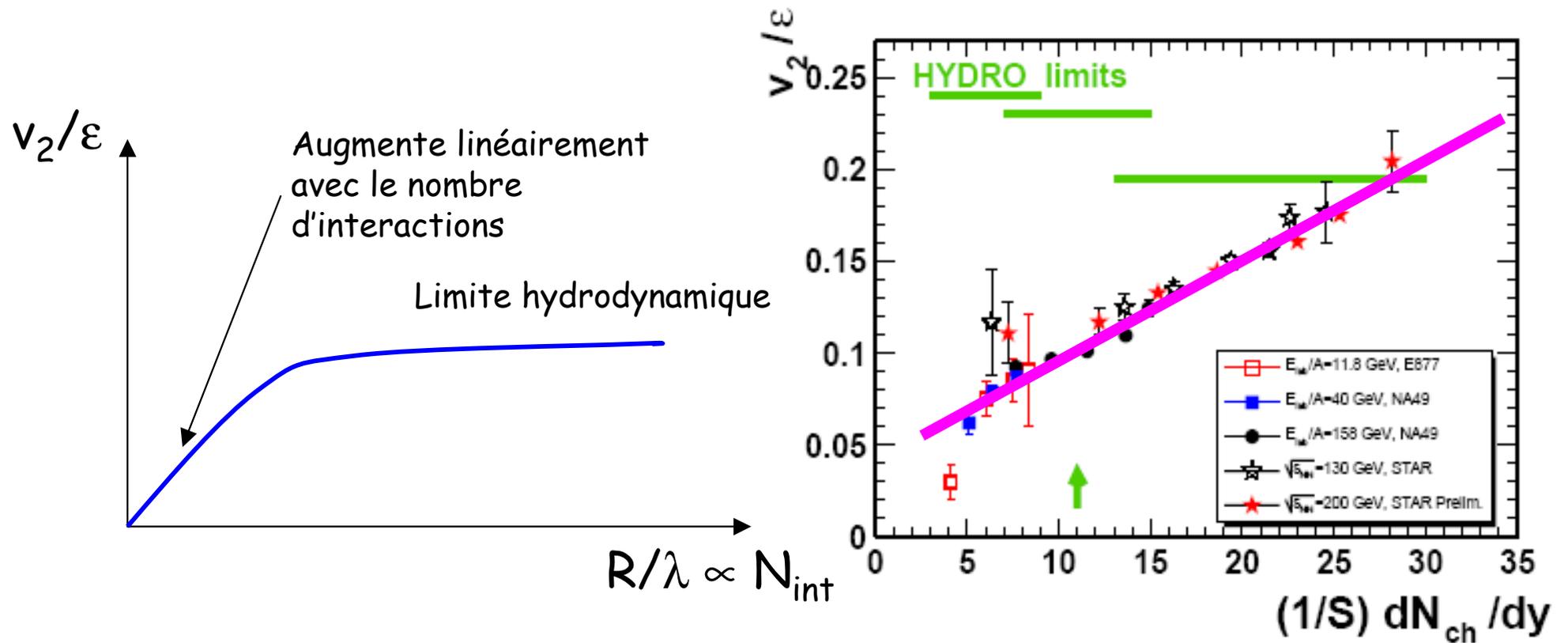
=> Meilleure description de la dépendance en rapidité



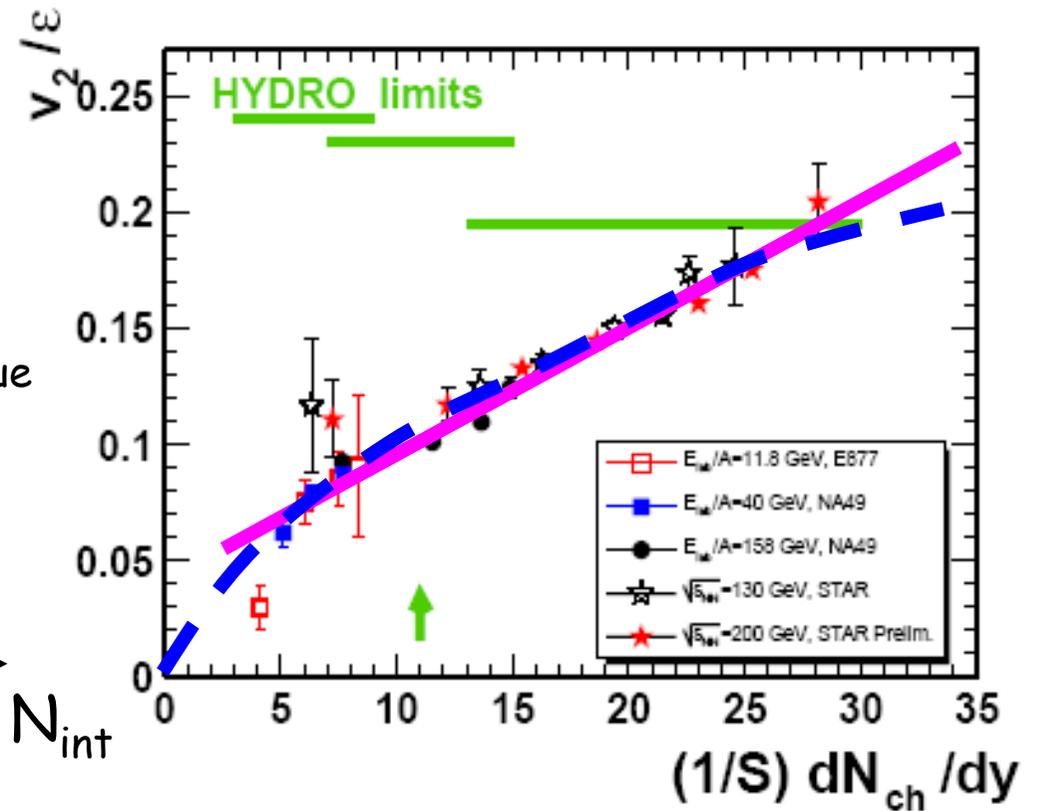
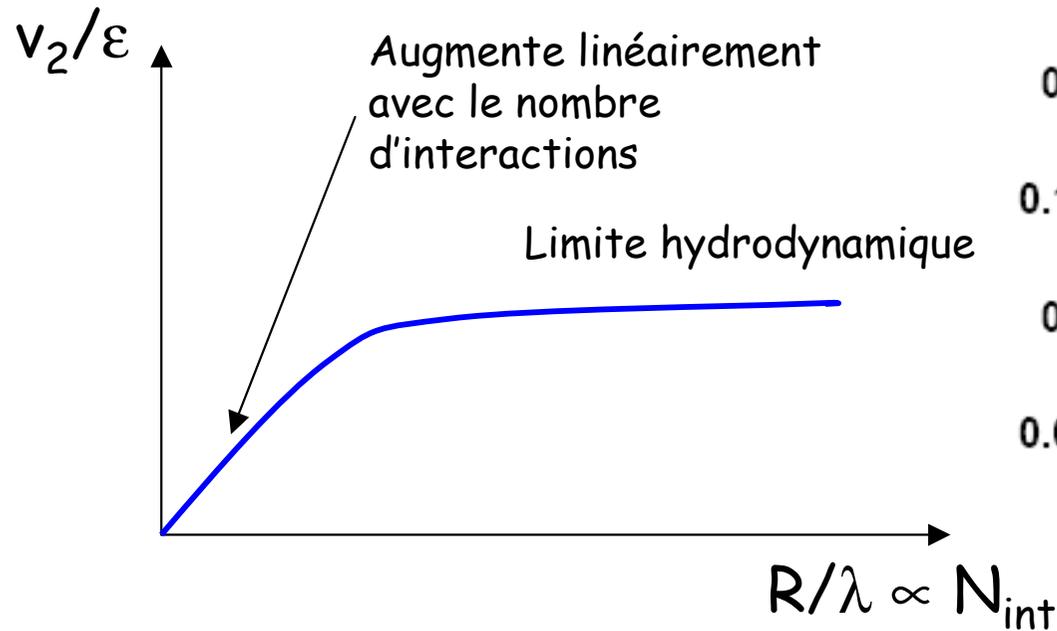
Thermalisation incomplète ?



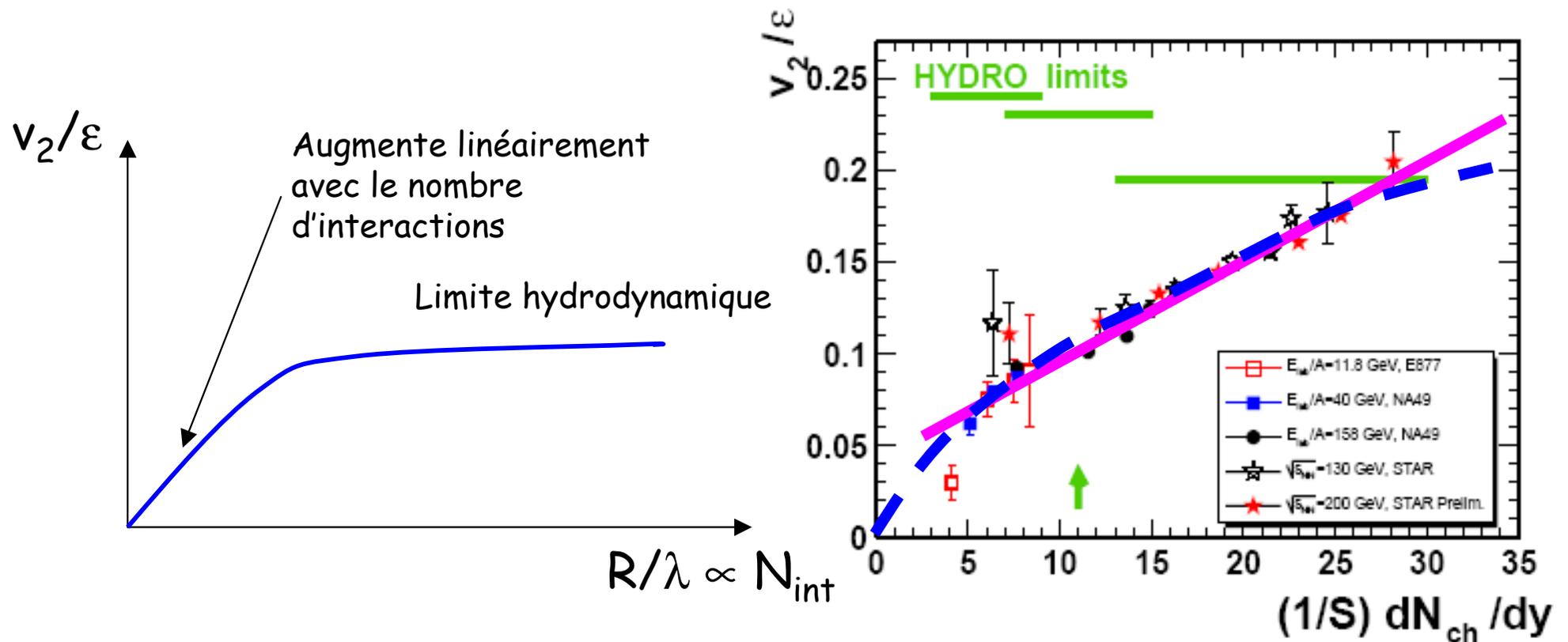
Thermalisation incomplète ?



Thermalisation incomplète ?

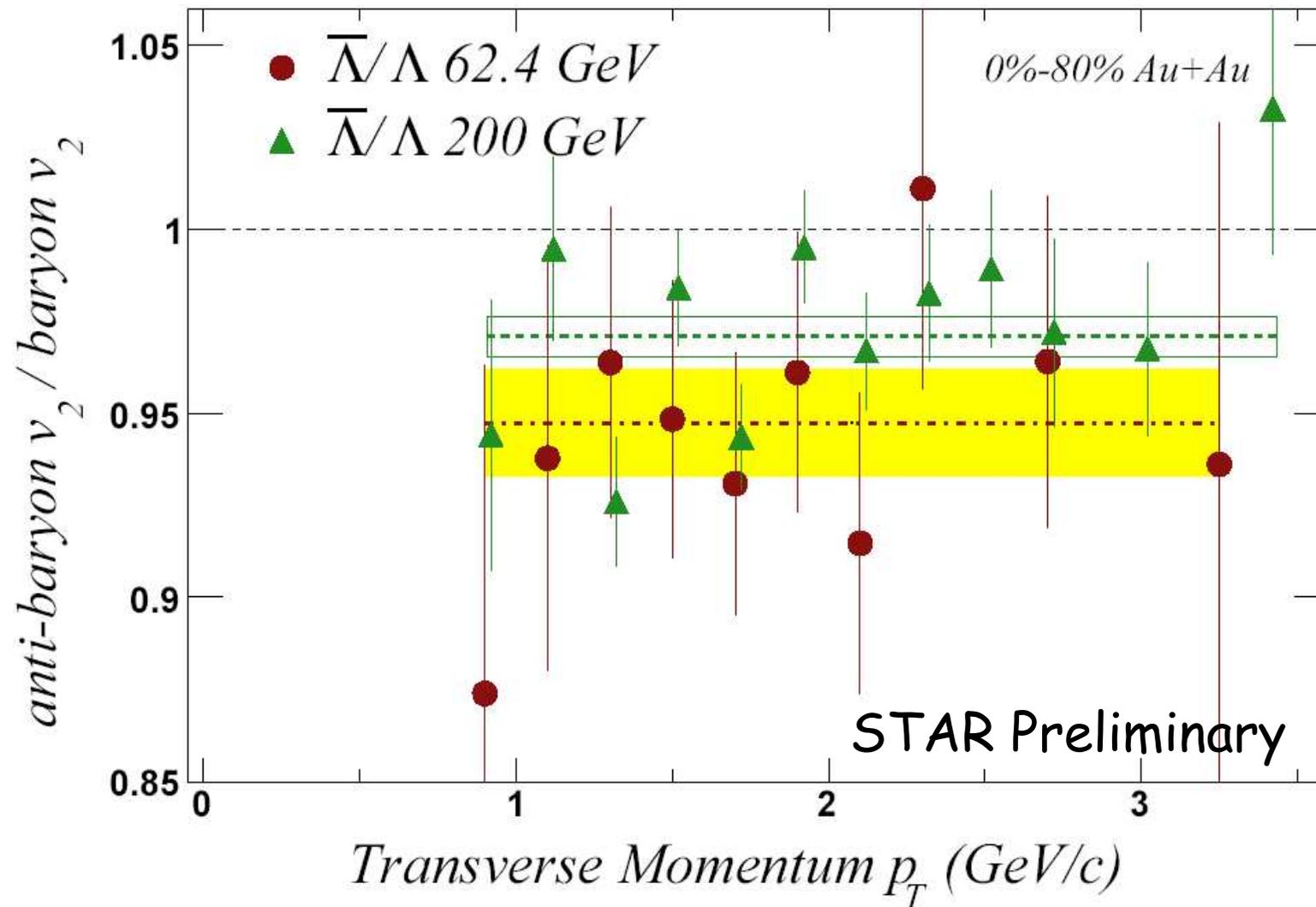


Thermalisation incomplète ?

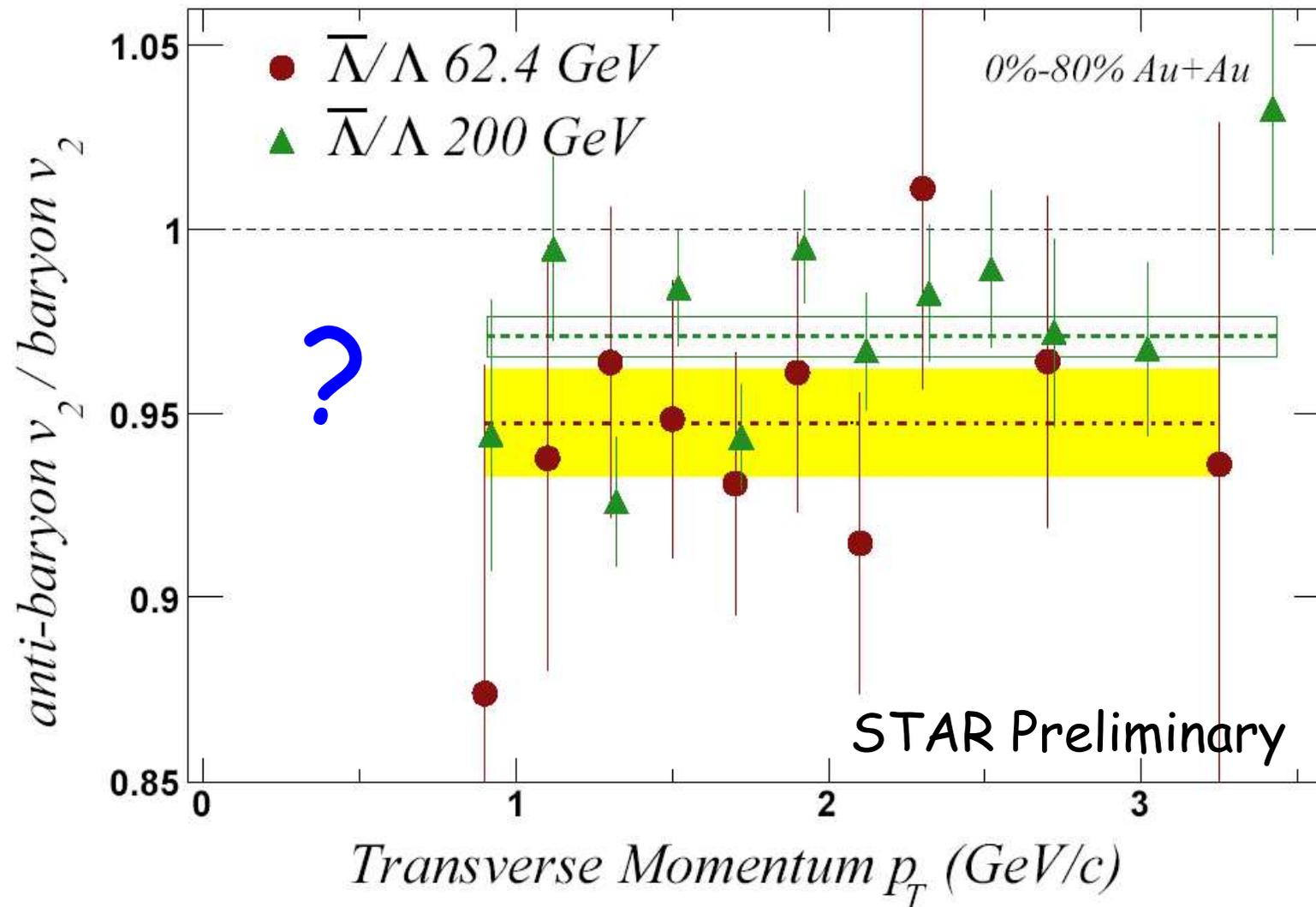


- Où est-on sur cette courbe ?
- Ça conduit plutôt à quelle dépendance avec la taille du système ?
- Si le milieu n'est pas totalement thermalisé, quel est l'effet de la viscosité sur ce dernier ?
- Jean-Yves ?

v_2 anti-baryon / v_2 baryon ?



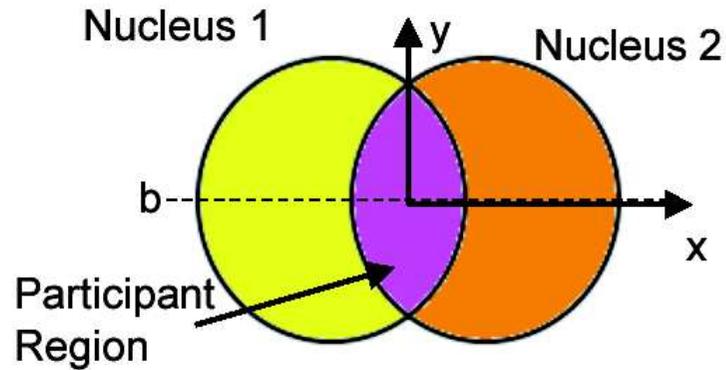
v_2 anti-baryon / v_2 baryon ?



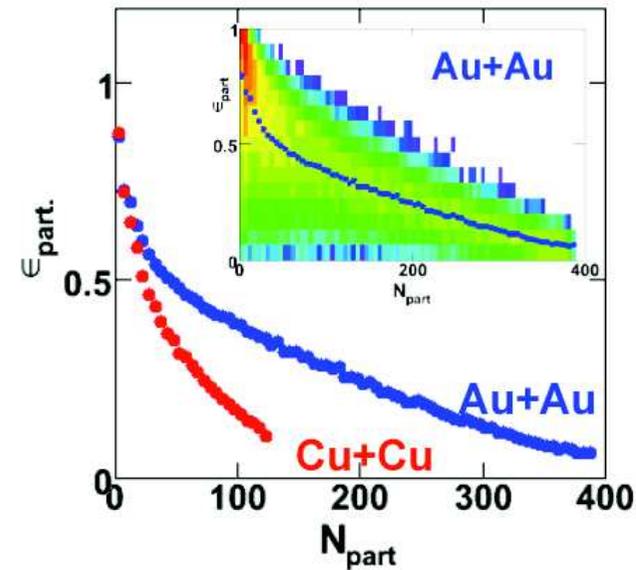
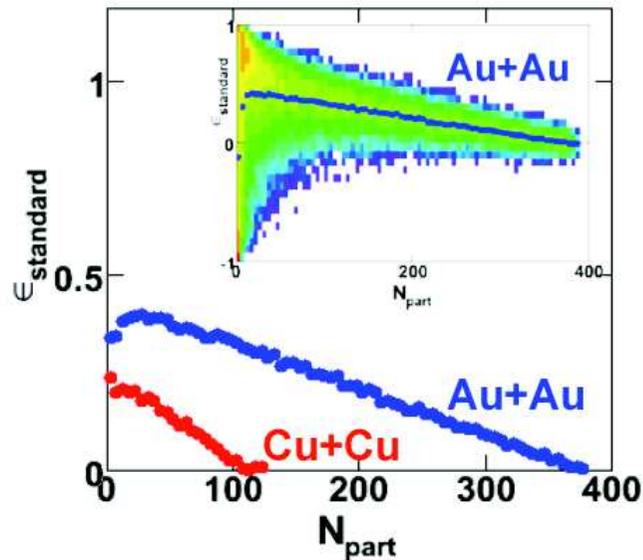
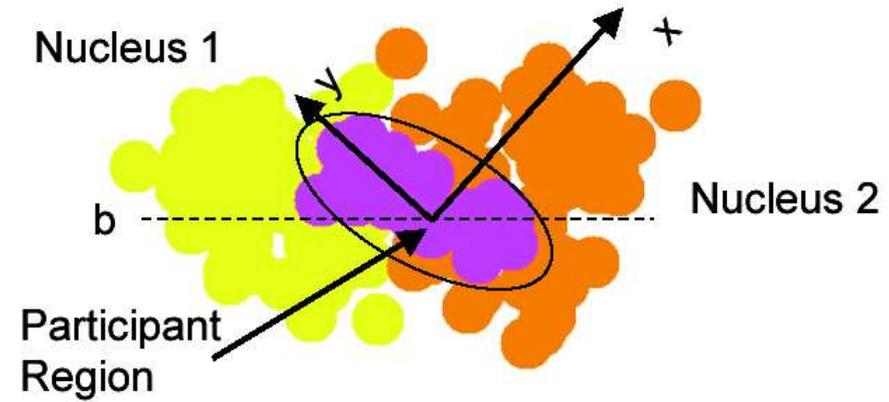
V-Backup

PHOBOS $\epsilon_{part} I$

Standard Eccentricity

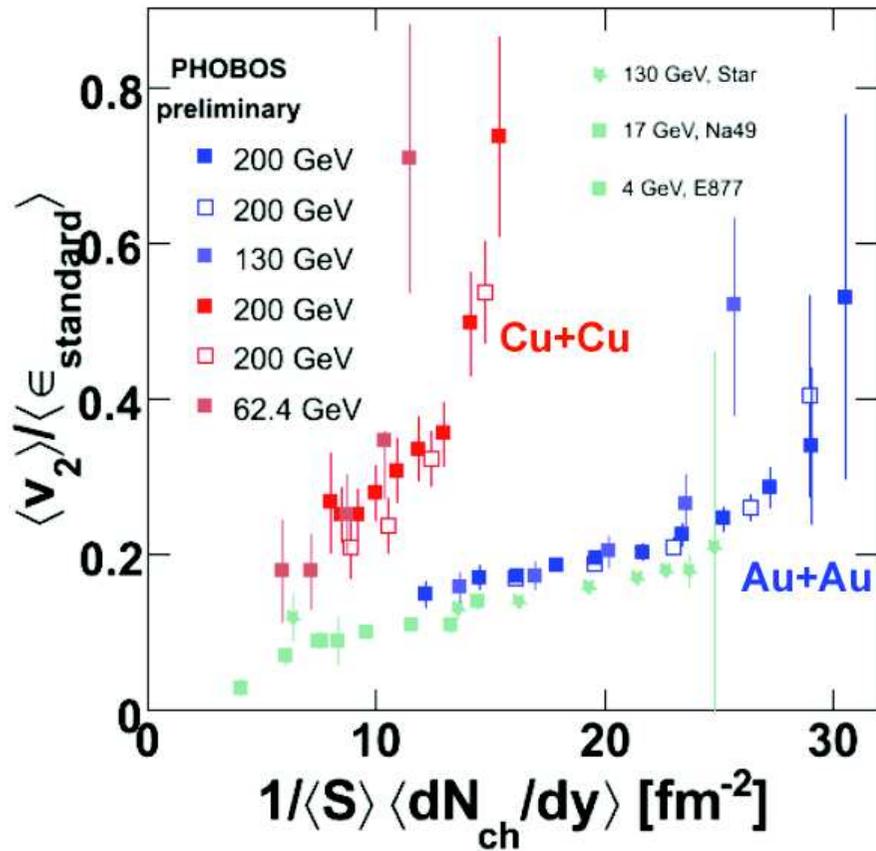


Participant Eccentricity



PHOBOS ϵ_{part} II

Standard Eccentricity



Participant Eccentricity

