

# La thermalisation

Une perspective phénoménologique

Perfect liquid ou **Color Glass Condensate?**

J-Y Ollitrault

Rencontres QGP-France

Etretat, 4 juillet 2006

# Plan

- Rappels: RHIC et le **liquide idéal** (avril 2005)
- Et sinon, qu'est-ce qui changerait ?

*Une modélisation simple des déviations à l'hydro idéale (Clément Gombeaud, stage M1)*

- Que nous disent les données de RHIC?
- Perspectives

# Le liquide idéal

## Ingrédients du modèle hydrodynamique

- Profils de densité initiale
- Equation d'état
- Hypothèse de thermalisation  $\lambda \ll R$

$\lambda =$  distance moyenne parcourue entre 2 collisions

$R =$  taille transverse

## Contraintes expérimentales

- Observables globales: participant scaling
- Spectres en pt
- Le flot elliptique « sature la limite hydro »

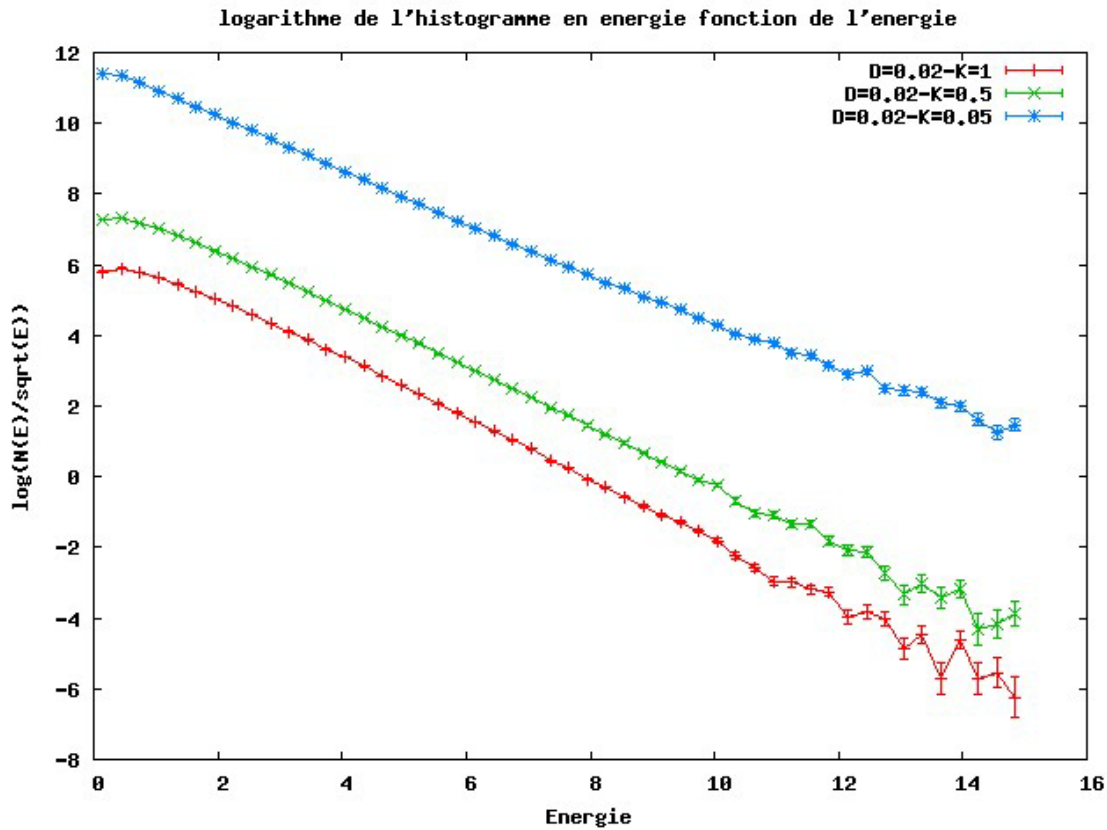
*Où est la faille?*

# Comment modéliser les écarts à la thermalisation?

- Cadre théorique simple : équation de Boltzmann relativiste:  $K=\lambda/R$  prend n'importe quelle valeur.
- **Limitations:** en principe pour un système dilué...
- **Simplifications:** 2+1 dimensions (pas d'expansion longitudinale), particules de masse nulle
- **Algorithme:** méthode de dynamique moléculaire Monte-Carlo (*particules en mouvement rectiligne uniforme entre deux collisions*)

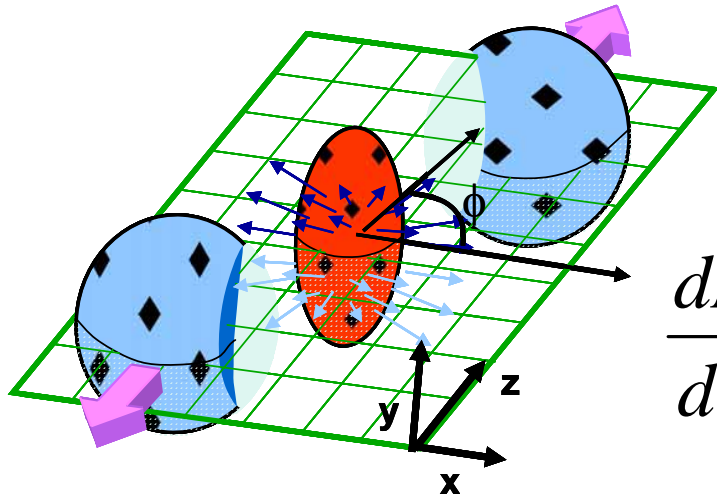
# Spectres en pt

$$\sqrt{p_t} \frac{dN}{d^2 p_t}$$

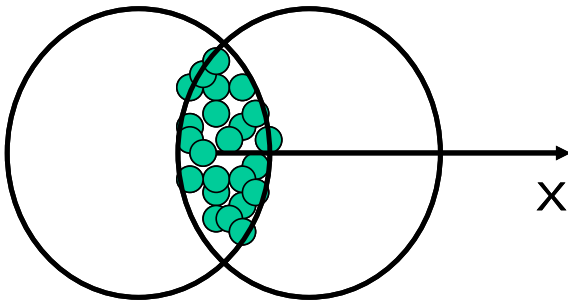


pt

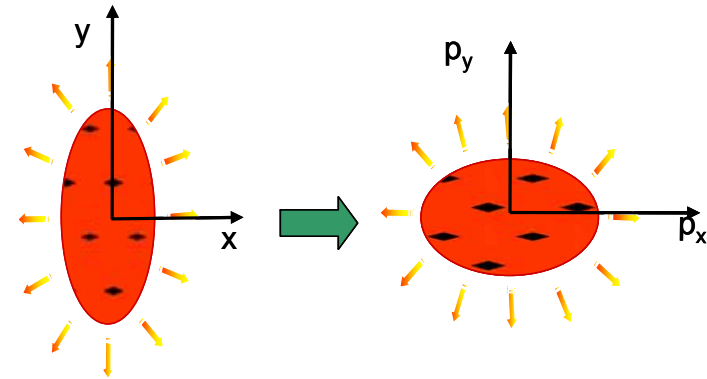
# Flot elliptique: $v_2$



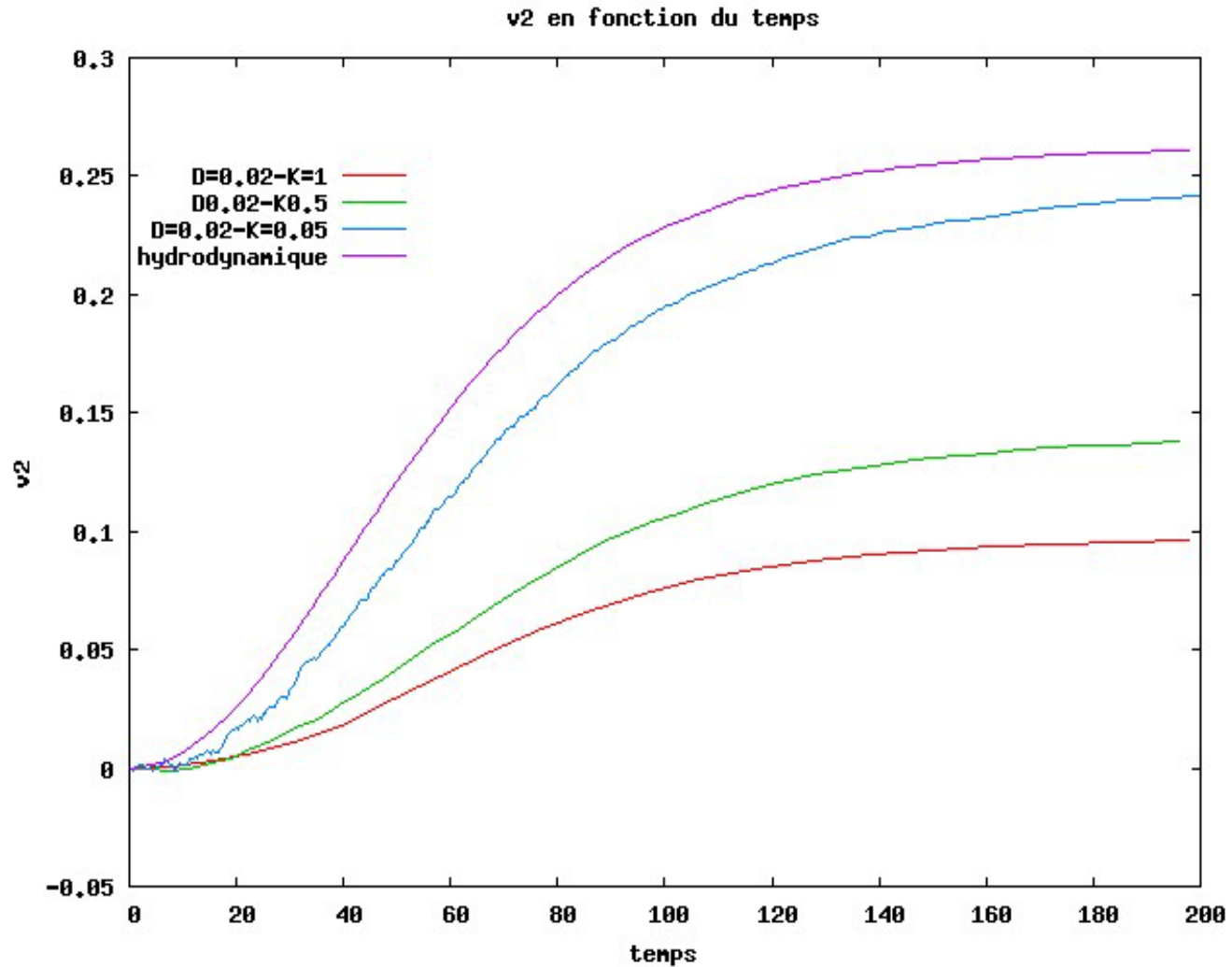
$$\frac{dN}{d\varphi} = \frac{1}{2\pi} (1 + 2v_1 \cos \varphi + 2v_2 \cos 2\varphi + \dots)$$



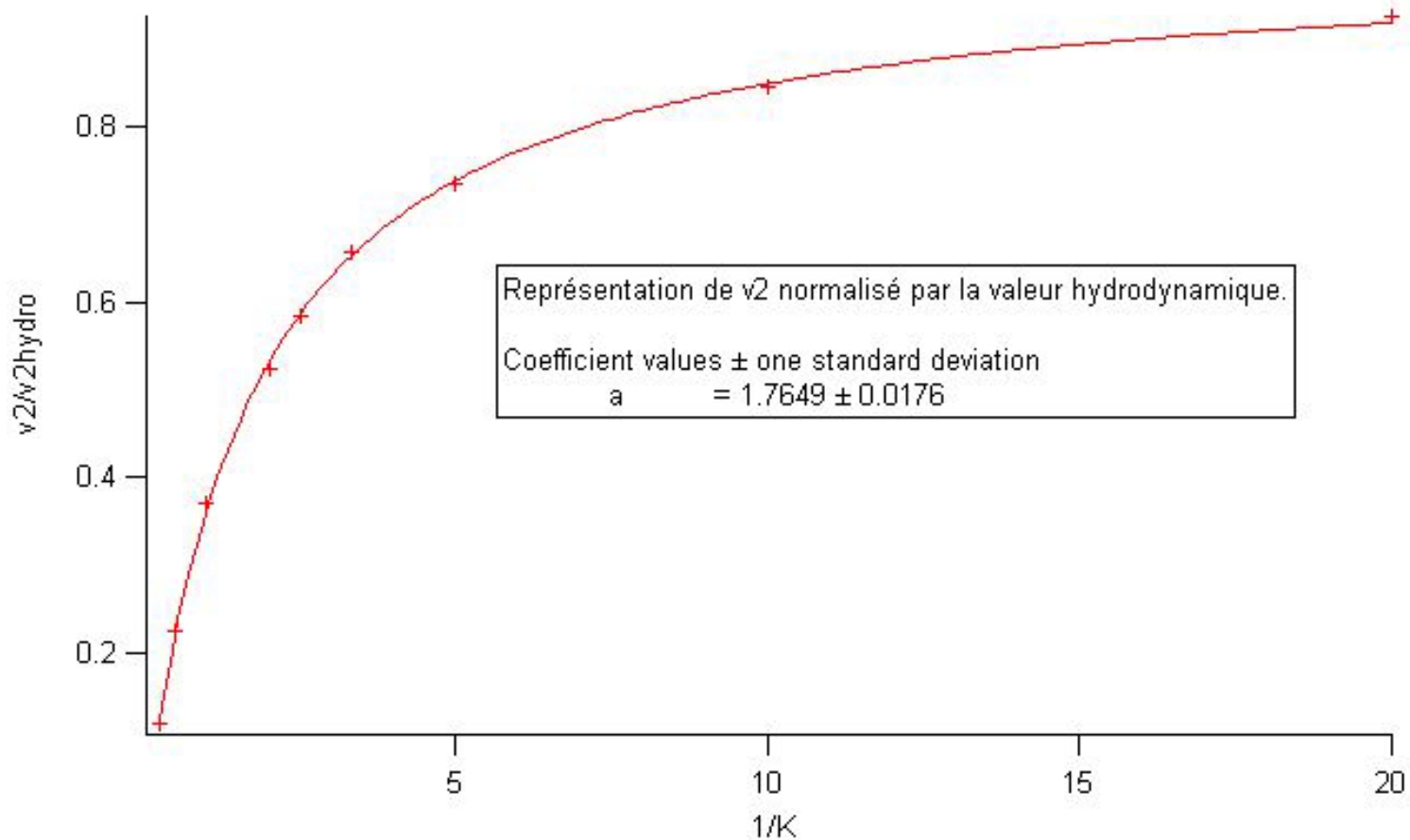
Collisions entre  
les particules:  
 $v_2 > 0$



# Evolution temporelle



# Variation avec $1/K=R/\lambda$ $\sim$ Nb collisions/particule



**Fit:  $v_2 = v_2(\text{hydro}) / (1 + 1.765 K)$**

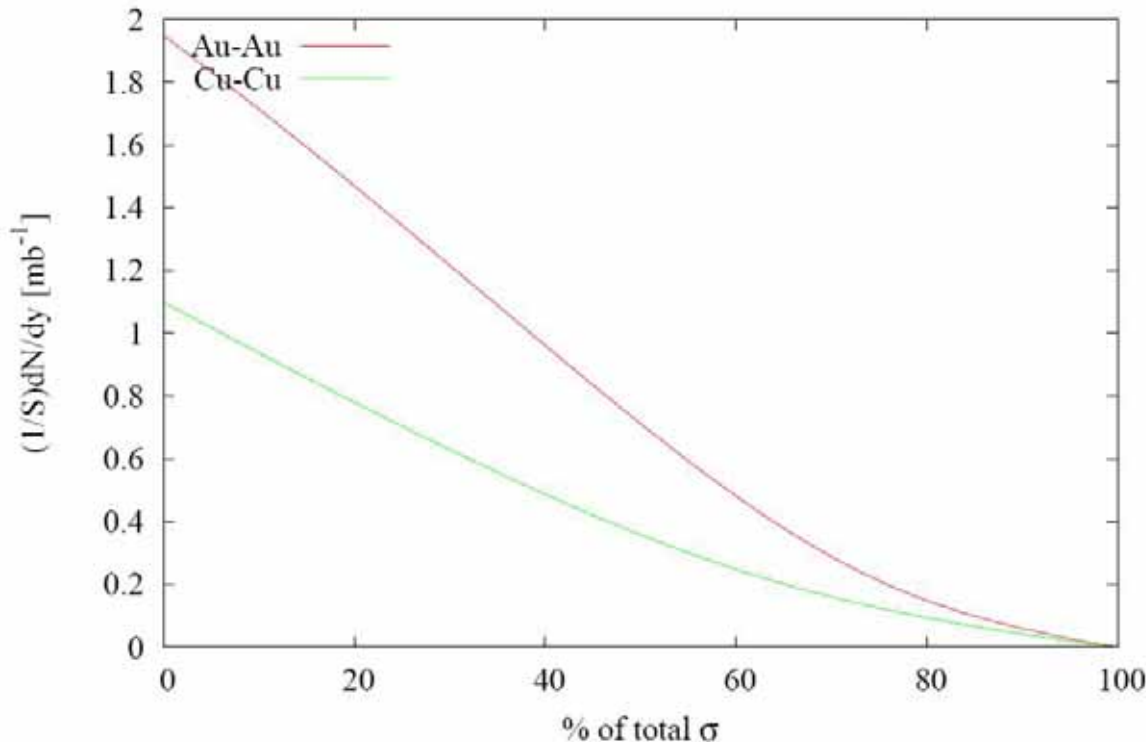


# Mesurer 1/K à RHIC?

1/K est proportionnel à la densité/unité de surface:

$$\frac{1}{K} = R\sigma \frac{dN}{d^3x} \approx \sigma \frac{c_s}{c} \frac{1}{S} \frac{dN}{dy}$$

Variation of  $(1/S)dN/dy$  with centrality



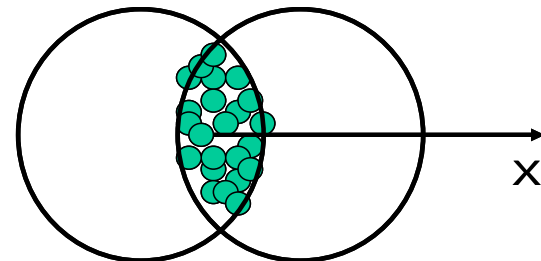
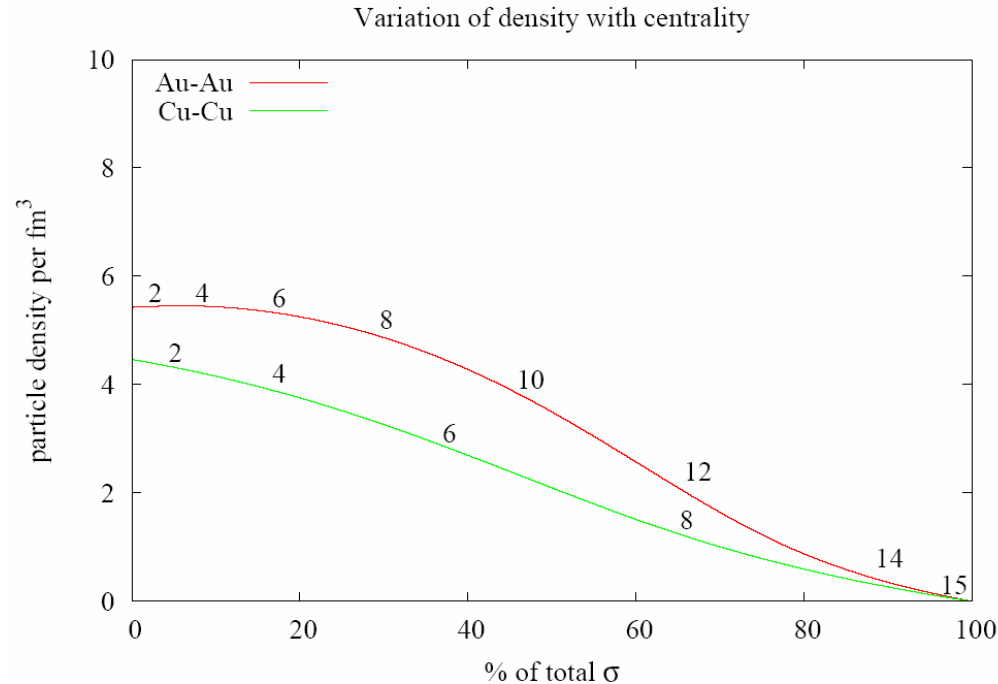
Densité moyenne /surface Au-Au semi-central:  
 $\sim 0.7 \text{ mb}^{-1}$

# Que vaut $v_2$ (hydro)?

Dépend de l'équation d'état (vitesse du son  $c_s$ ), qui dépend elle-même de la densité *volumique* : mieux vaut comparer des systèmes qui ont la même densité

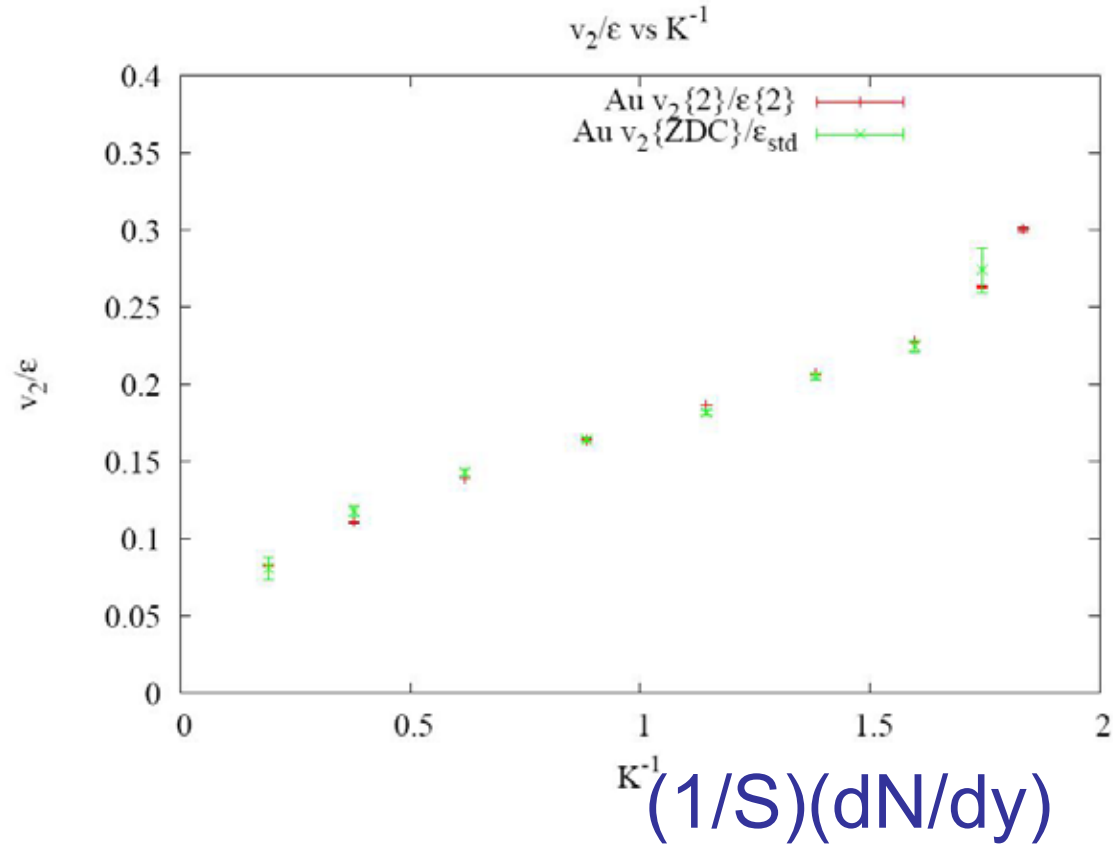
Bhalerao Blaizot Borghini JYO  
Nucl-th/0508009

Proportionnel à l'excentricité initiale  $\epsilon = \langle (y^2 - x^2) / (y^2 + x^2) \rangle$



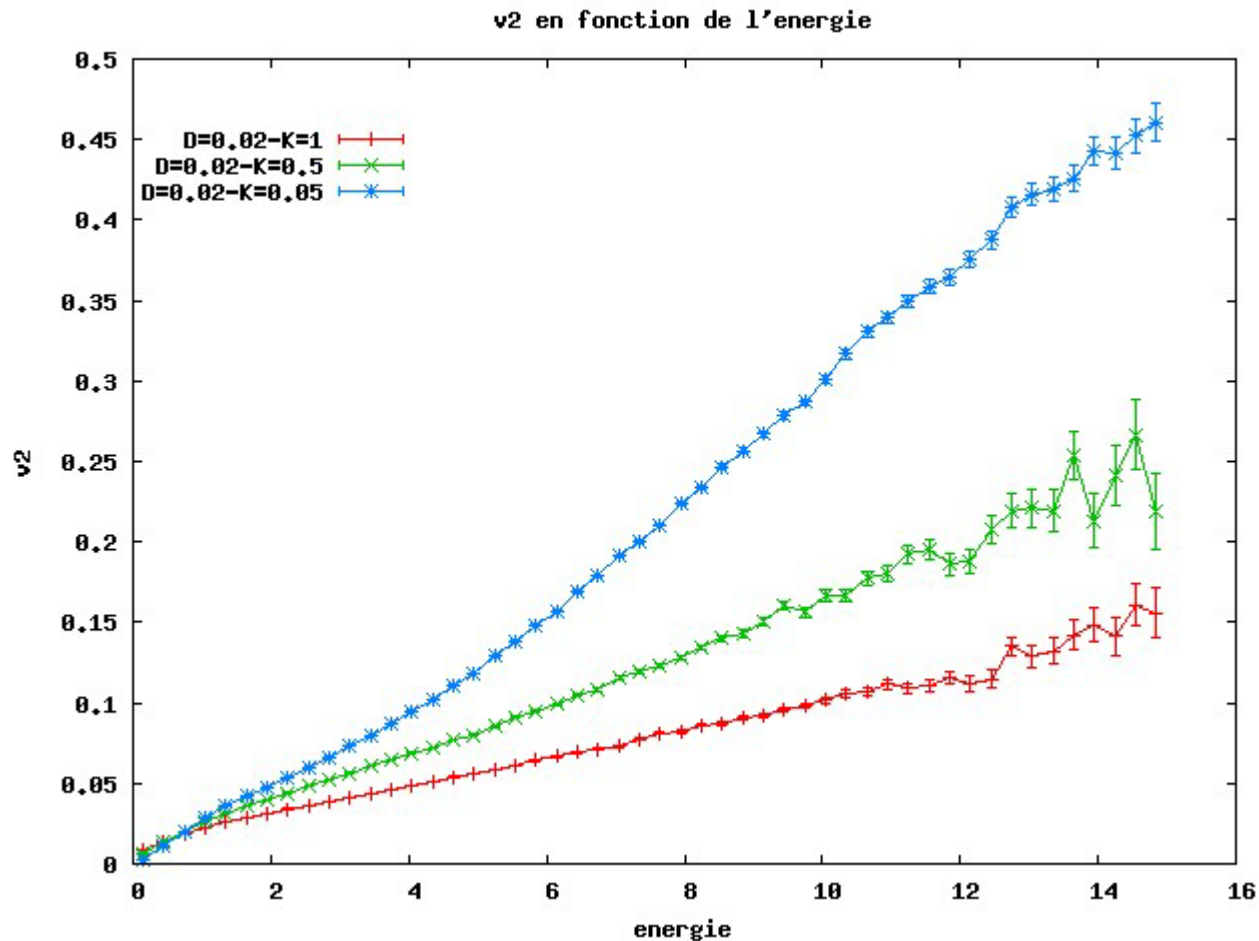
# $v_2/\epsilon$ versus $(1/S)(dN/dy)$

$v_2/\epsilon$

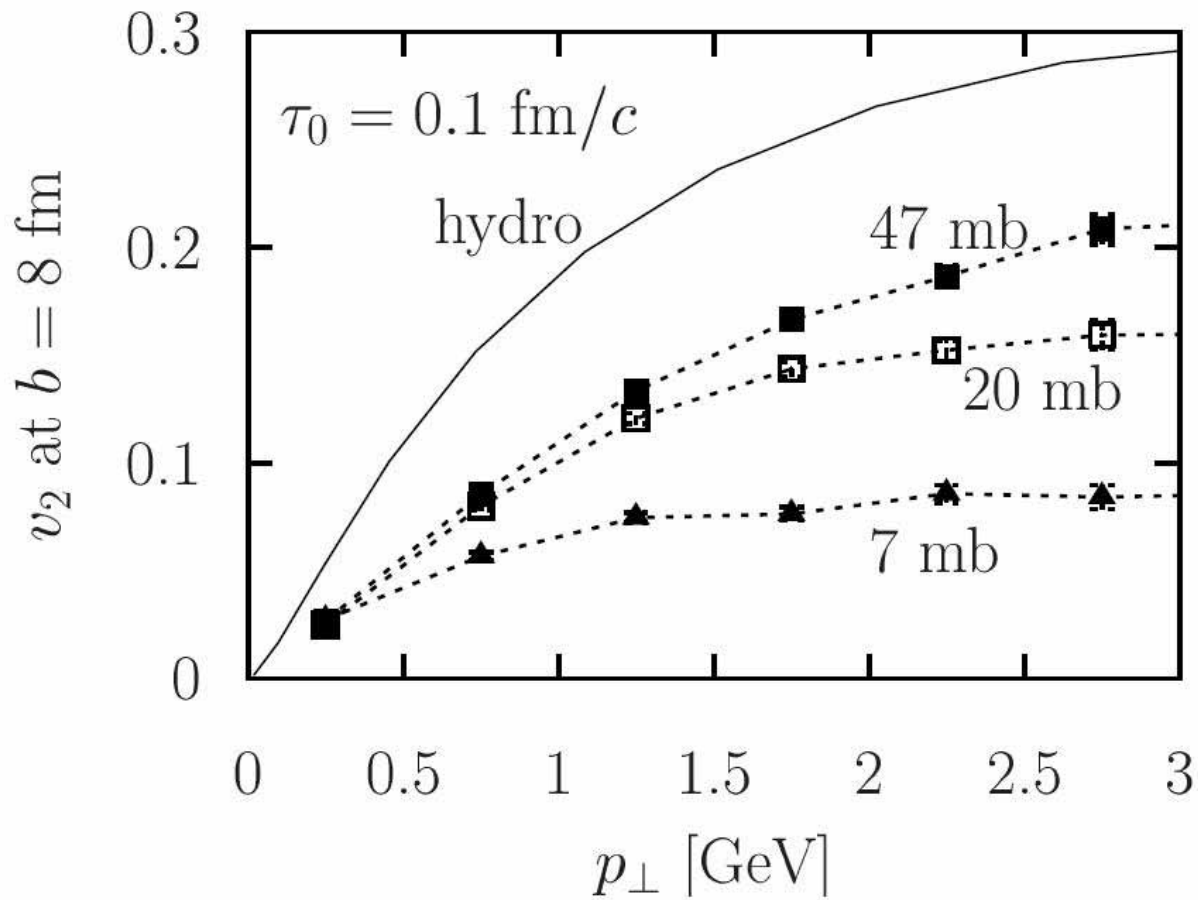


Courbe croissante : non hydro. Estimation grossière  
Environ  $K=0.2$  pour collisions centrales:  $v_2 \sim 0.75 v_2(\text{hydro})$   
Sections efficaces de collision  $\sigma$  : maxi 10 mb

# Variation de $v_2$ avec $p_t$ (flot « différentiel »)



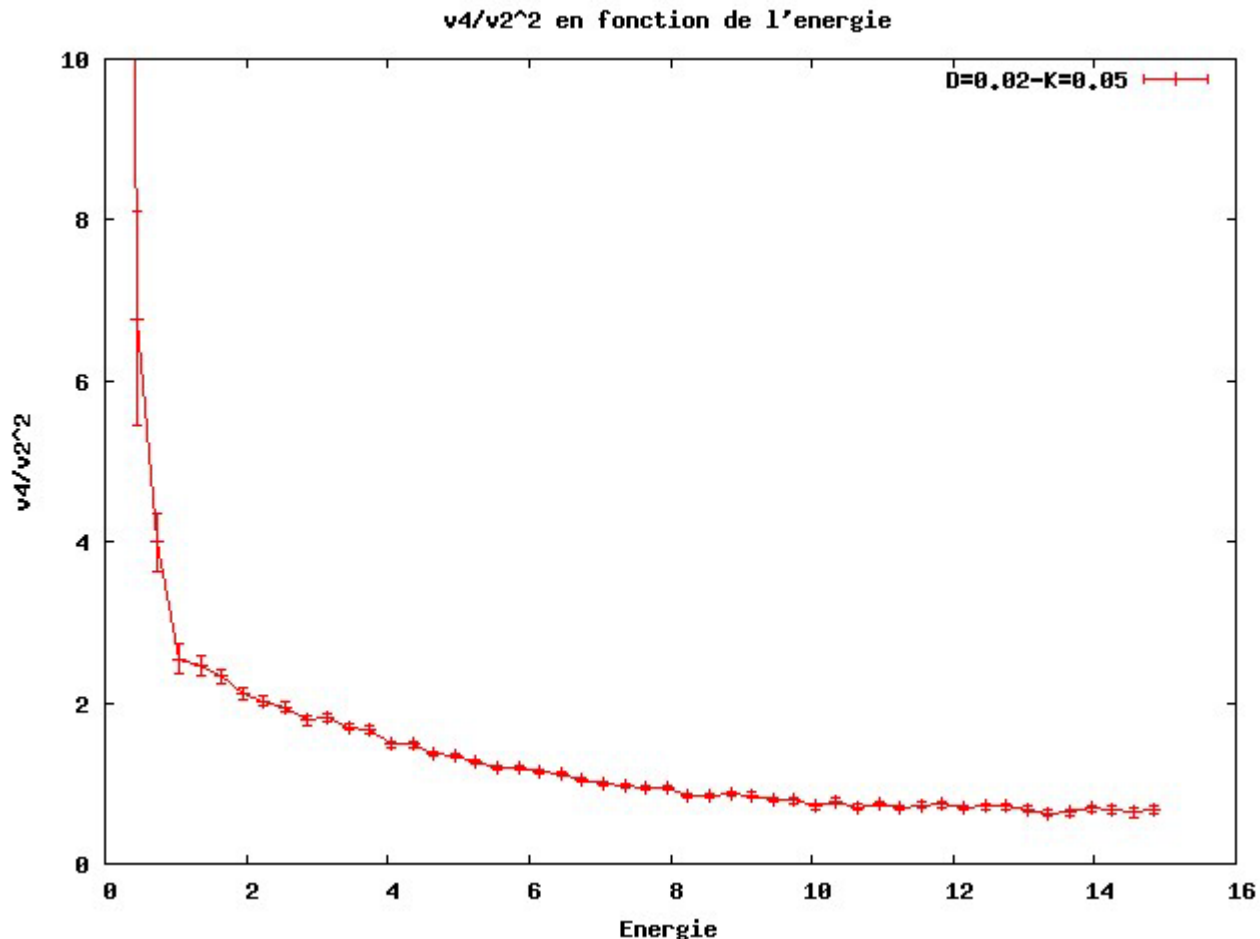
Déviations à l'hydro à haut  $p_t$ , mais pas de saturation



*Molnar, Huovinen, nucl-th/0404065, Phys. Rev. Lett.*

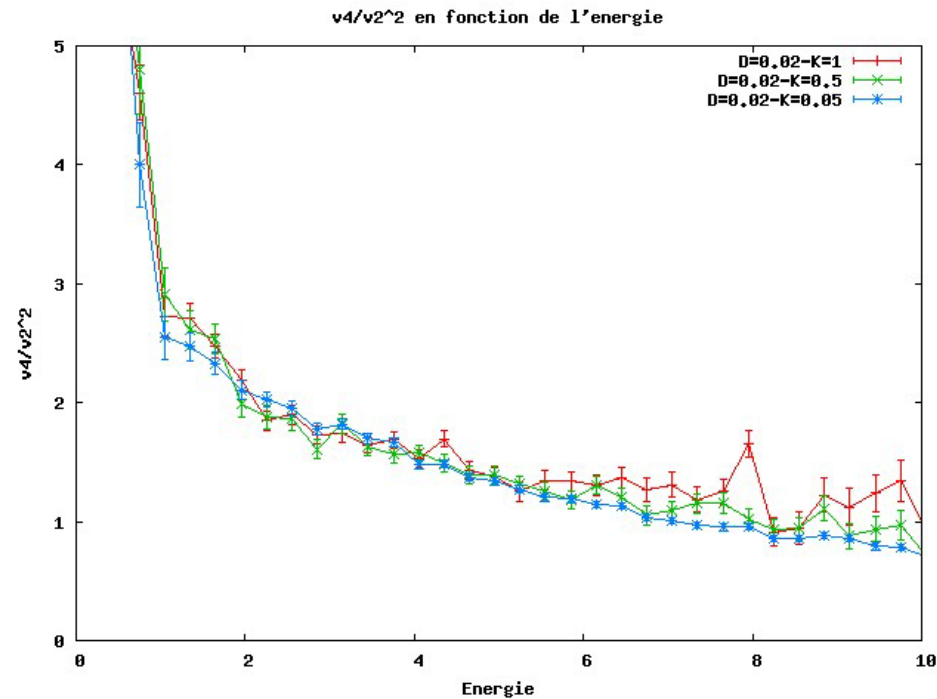
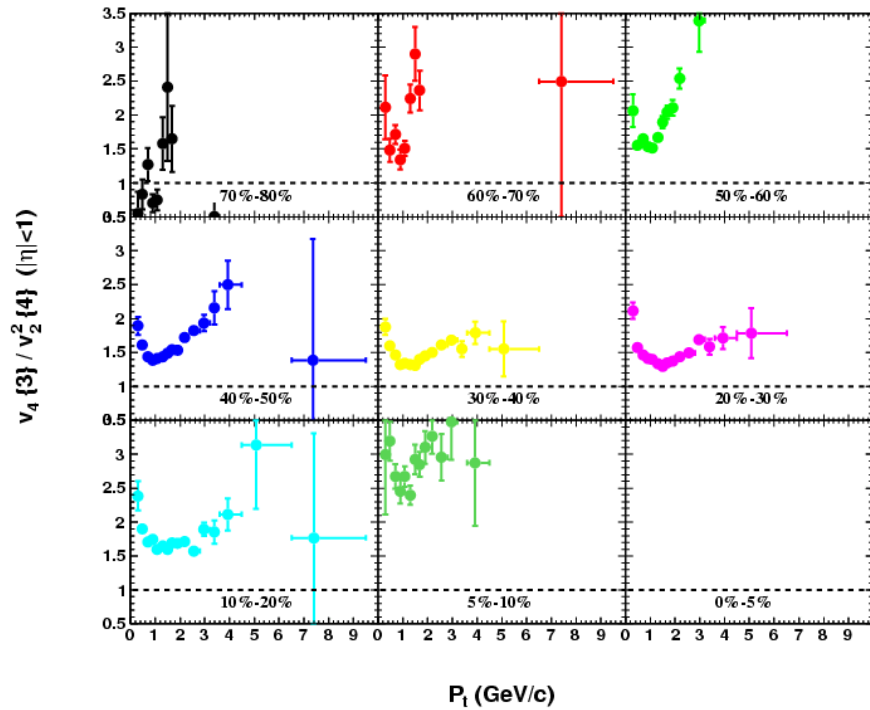
# Flot hexadécupolaire : $v_4$

Hydro idéale : prédiction « universelle »  $v_4=0.5 (v_2)^2$   
à grand  $p_t$  . Confirmé par le calcul de transport



# $v_4$ : données vs théorie

Données > hydro



# Conclusions, perspectives

- Premier calcul de transport compatible avec l'hydrodynamique ( $\neq$  Molnar, Gyulassy)
- Sections efficaces « partoniques »  $\sigma$  à revoir à la baisse
- Quel problème avec le fluide idéal ?  
L'excentricité initiale pourrait être sous-estimée

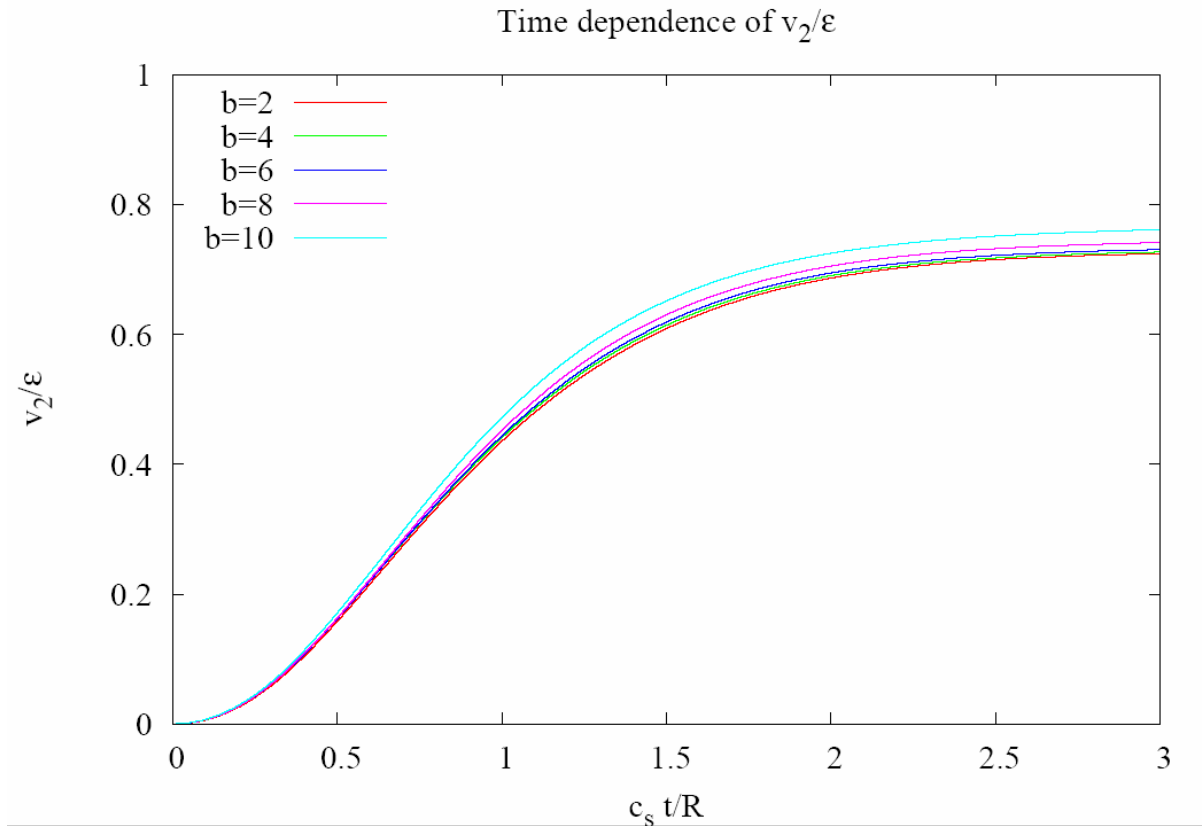
Drescher Dumitru Hayashigaki Nara nucl-th/0605012

Le flot elliptique: une signature du CGC??



# When does elliptic flow build up?

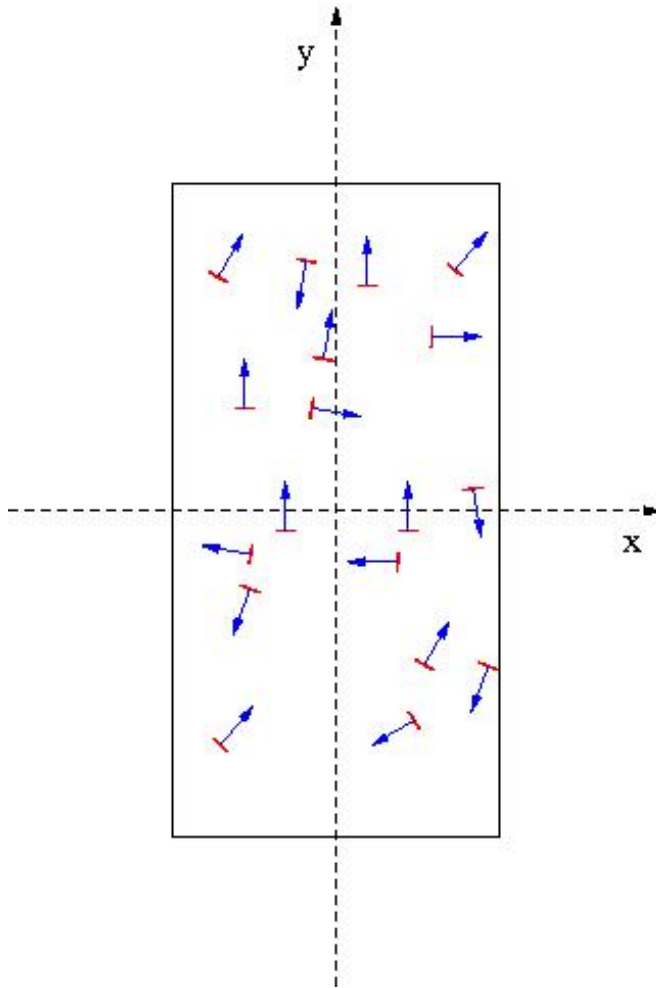
*In hydro, at a time of order  $R/c_s$  where  $R$  = transverse size  
 $c_s$  = sound velocity*



*For a given equation of state,  $v_2$  scales roughly like the initial eccentricity  $\varepsilon$*

# Our approach to the Boltzmann equation

(C. Gombeaud & JYO)

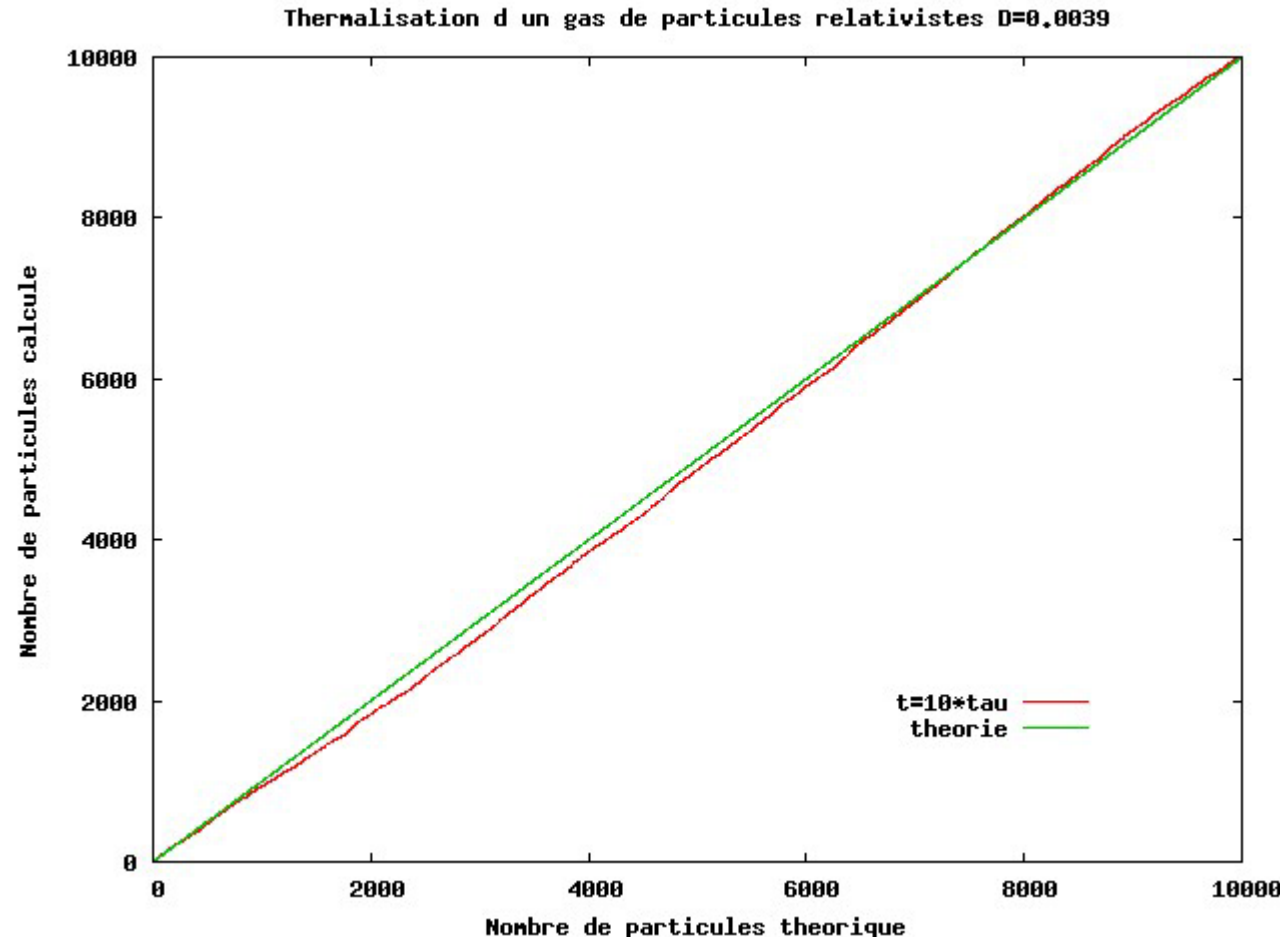


- Two-dimensions (three later)
- Massless particles (mass later)
- Billiard-ball-type calculation, but with Lorentz contraction taken into account: this ensures Lorentz invariance of the number of collisions.
- $N$  particles of size  $r$  in a box of surface  $S$ : Dilute system if  $r \ll \sqrt{S/N}$

# Test of the algorithm: thermalisation in a static system

Initial conditions:  
monoenergetic particles.  
Relaxation time = mean  
free path=  
 $\tau = S / (Nr)$

# particles with energy  $< E$   
in the gas **versus**  
# particles with energy  $< E$   
in thermal equilibrium



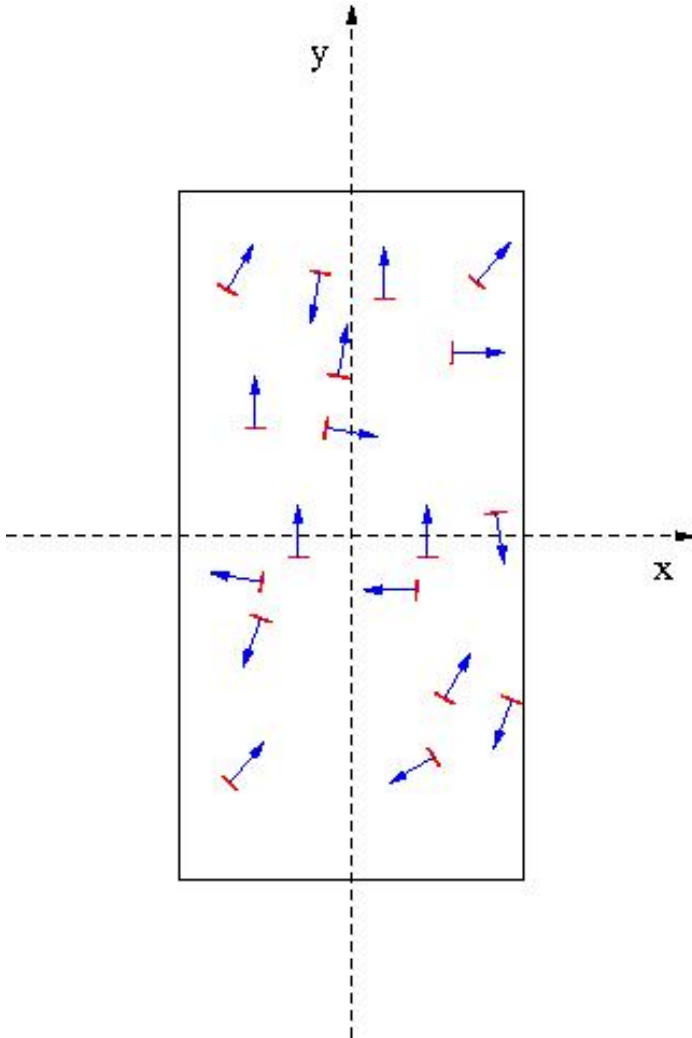
# Elliptic flow: preliminary results

Initial conditions: homogeneous density inside a rectangular box. Particle then escape freely from the box.

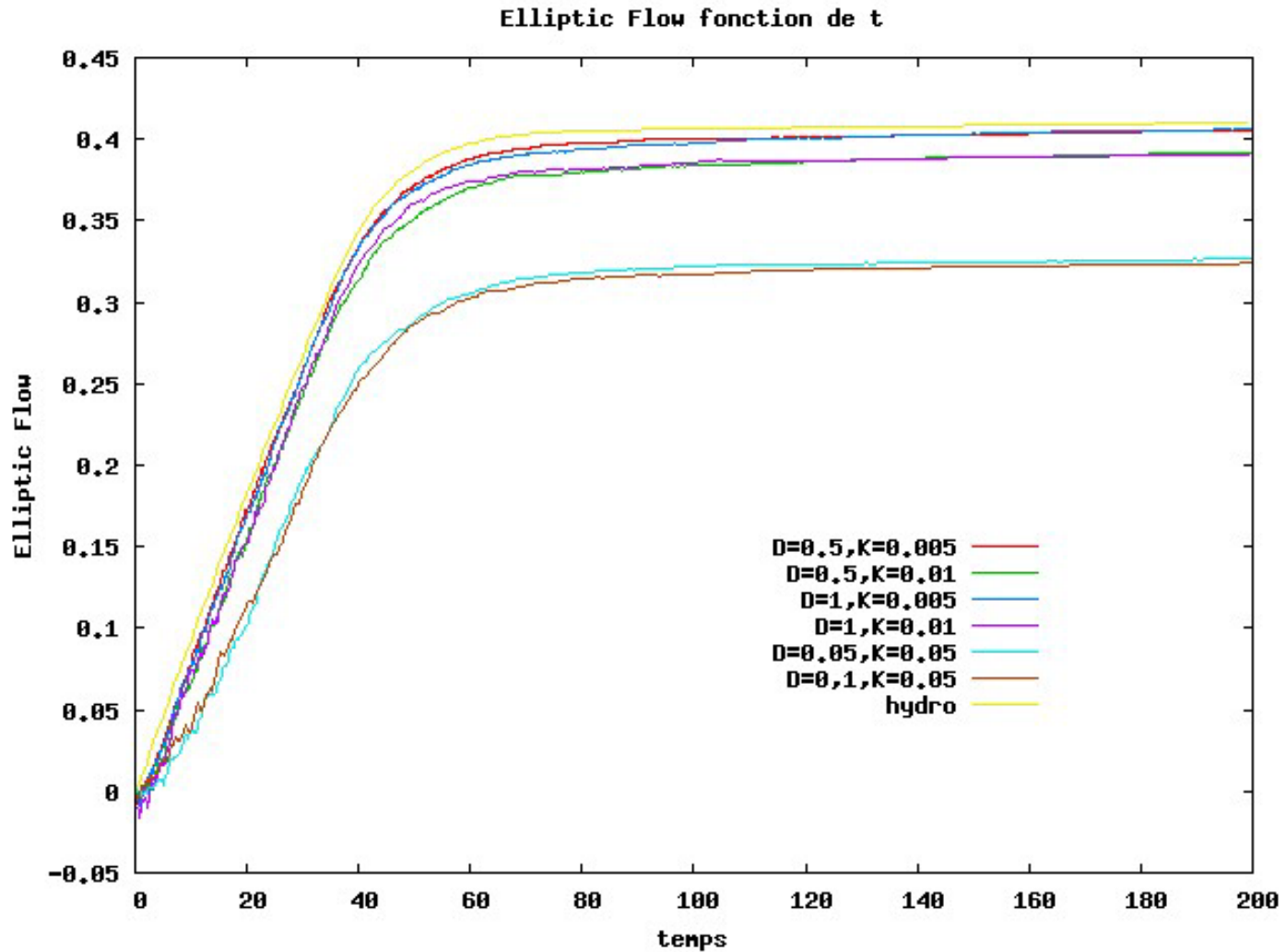
Two dimensionless parameters

$$D = r \sqrt{N/S}$$

$$K = \lambda/R \sim \sqrt{S}/(N r)$$



# Time dependence of elliptic flow



# Perspectives

- Study the pt-dependence (saturation of  $v_2$ )
- Hexadecupole flow  $v_4$
- Generalize to three dimensions with longitudinal expansion
- Obtain the value of  $K$  by comparing the shape of the curve with exp. data