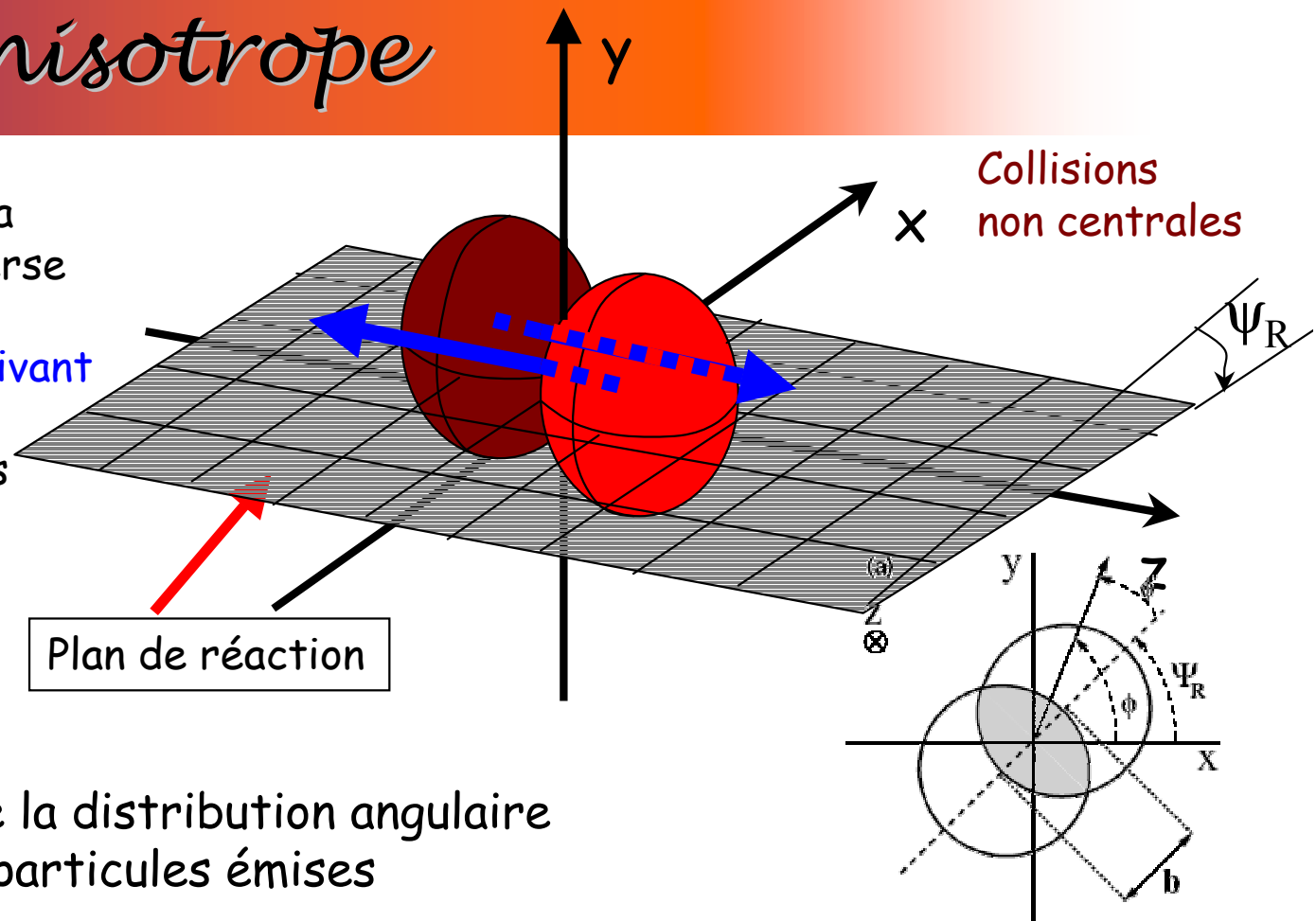


*II - Des observables parlantes de
l'hydrodynamique :
 v_1 , v_2 et harmoniques supérieures*

Flot anisotrope

- 1 - Anisotropie initiale de la source dans le plan transverse
- 2 - Gradient de pression anisotrope \Rightarrow plus grand suivant le paramètre d'impact b
- 3 - Emission anisotrope des particules :
 \Rightarrow Flot collectif anisotrope



Expansion de Fourier de la distribution angulaire transverse des particules émises

$$\frac{dN}{p_t dp_t dy d\varphi} = \frac{1}{2\pi} \frac{dN}{p_t dp_t dy} \left[1 + \sum_{i=1} 2v_i \cos(i(\varphi - \Phi_R)) \right]$$

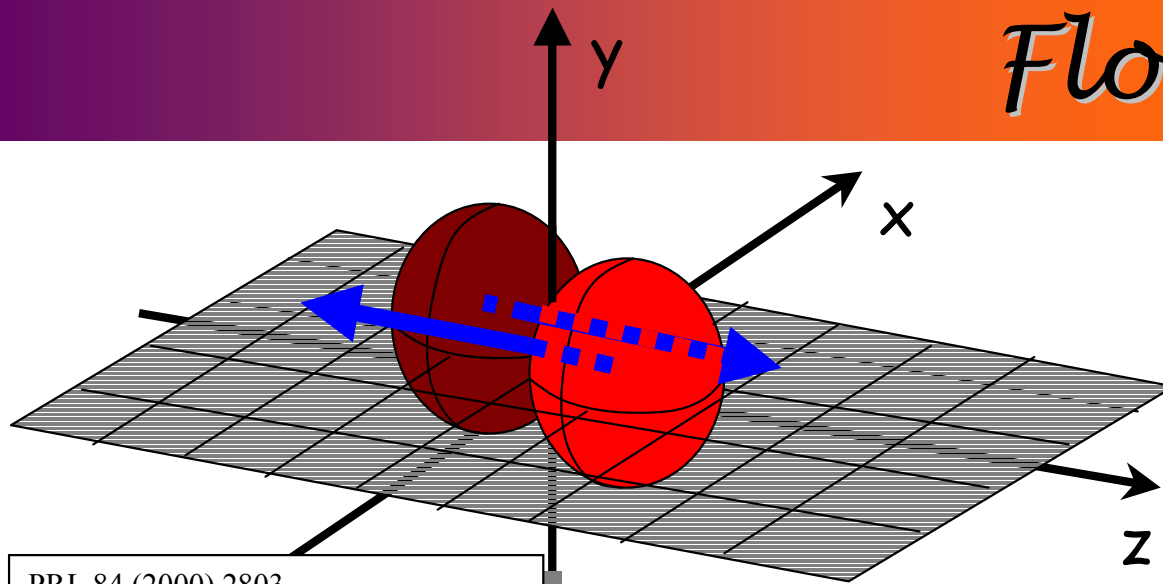
$$p_t = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$$

$$v_n = \langle \cos(n(\varphi - \Psi_R)) \rangle$$

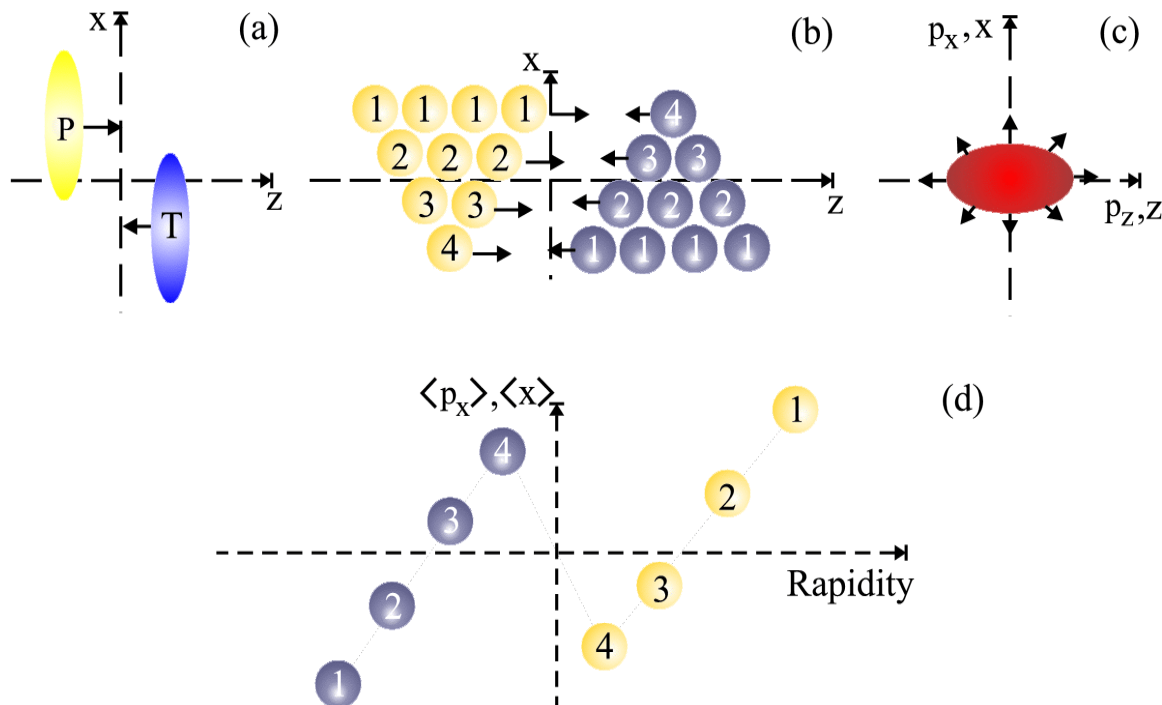
Phys. Rev. D 46, 229 (1992)
J-Y Ollitrault

3 types de flot :
 v_0 - flot radial
 v_1 - flot direct
 v_2 - flot elliptique
 + harmoniques supérieures

Flot direct v_1



PRL 84 (2000) 2803
Snellings, Sorge, Voloshin, Wang & Xu



$$p_x \approx \int P(\rho, S) A_T dt$$

$$v_1 = \left\langle \frac{p_x}{p_T} \right\rangle$$

➤ Plusieurs effets entrent en jeu dans le développement de v_1 :

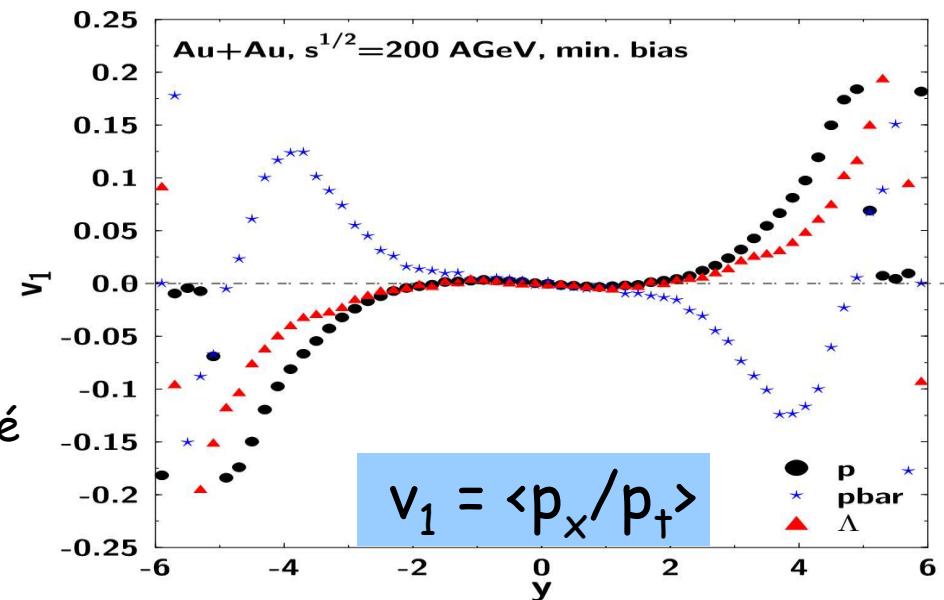
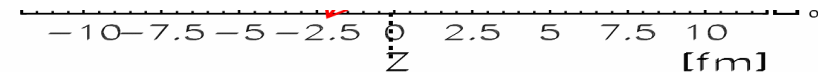
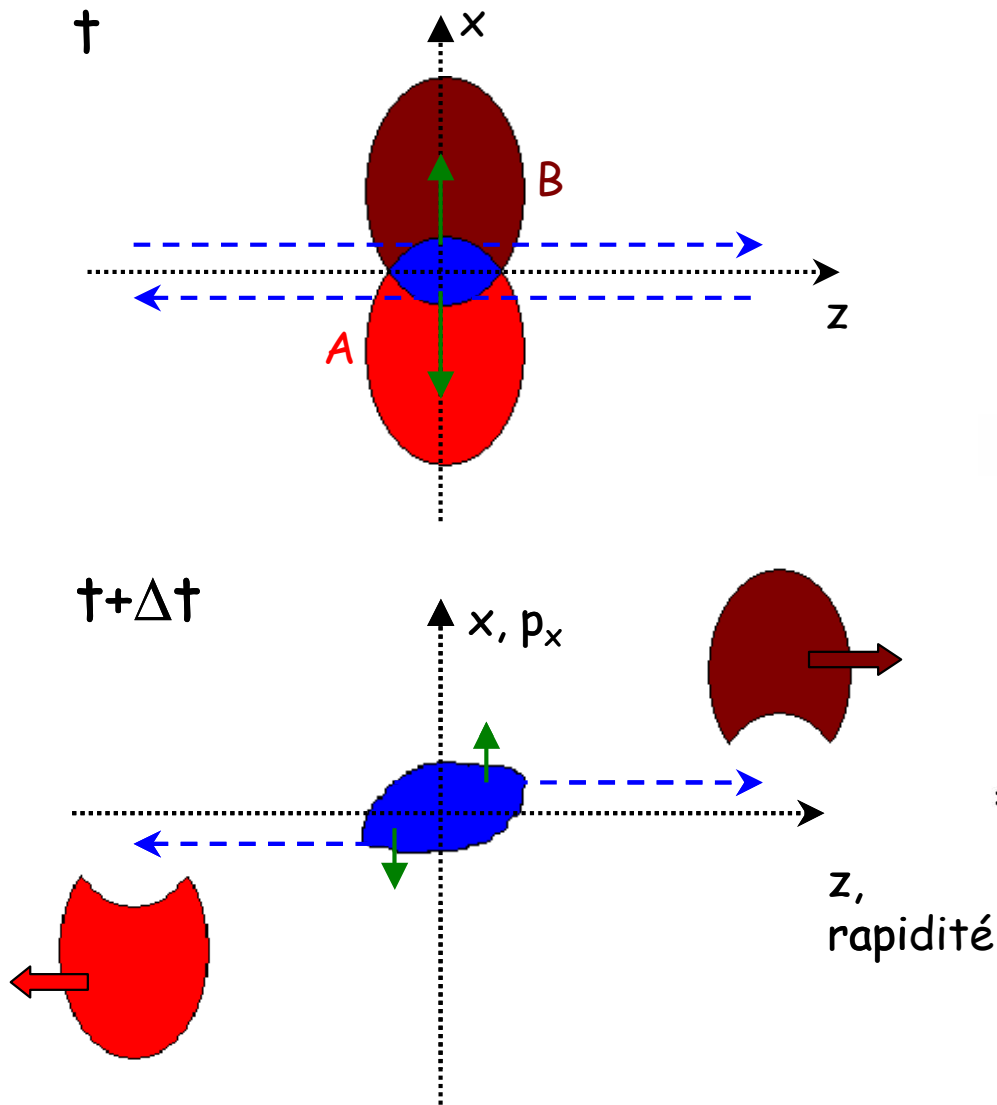
- Impulsion initiale longitudinale
- Anisotropie spatiale donc de matière \Rightarrow gradient de pression transverse p exercé sur la surface transverse A_T
- Pouvoir d'arrêt et effet de shadowing des participants et spectateurs

➤ v_1 renseigne sur :

- degré de stopping
- équation d'état de la matière hadronique
- QGP ? Certains modèles incluent une transition vers un plasma

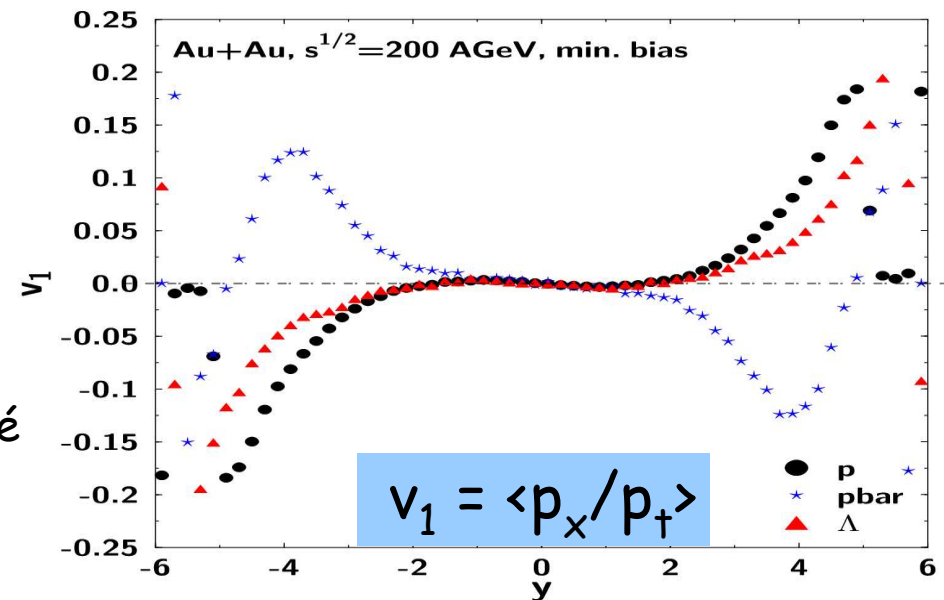
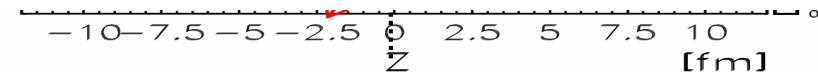
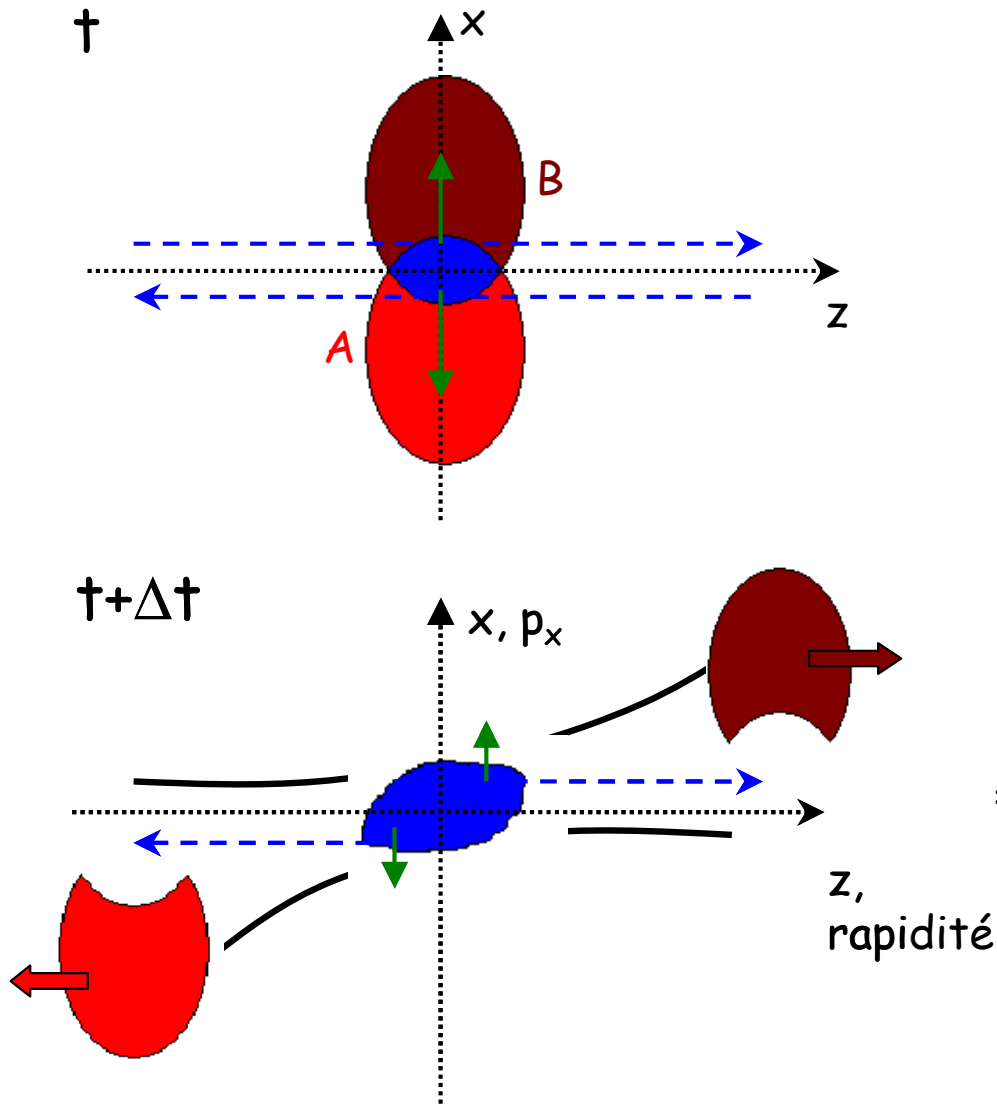
Flot direct v_1

On se place dans le plan de la réaction (x,z)



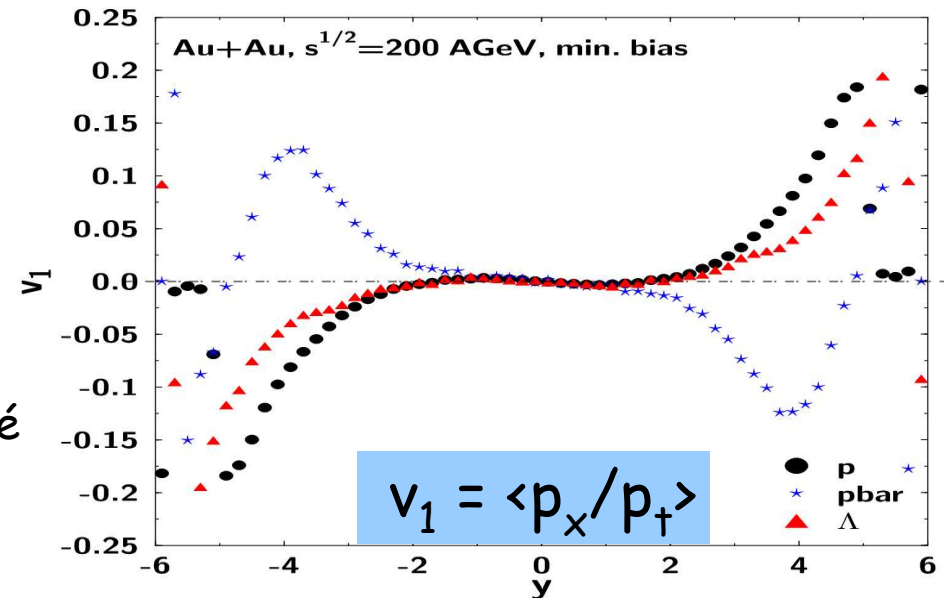
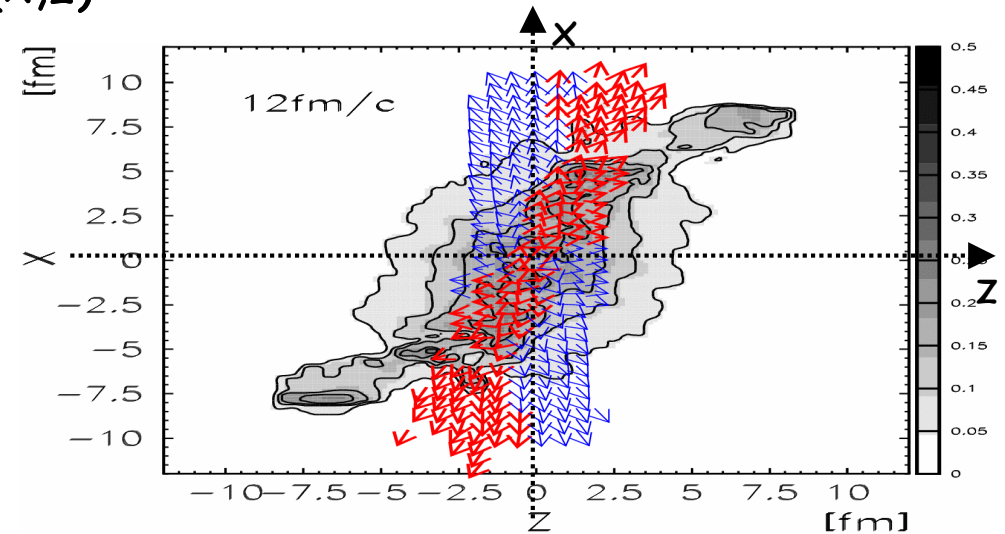
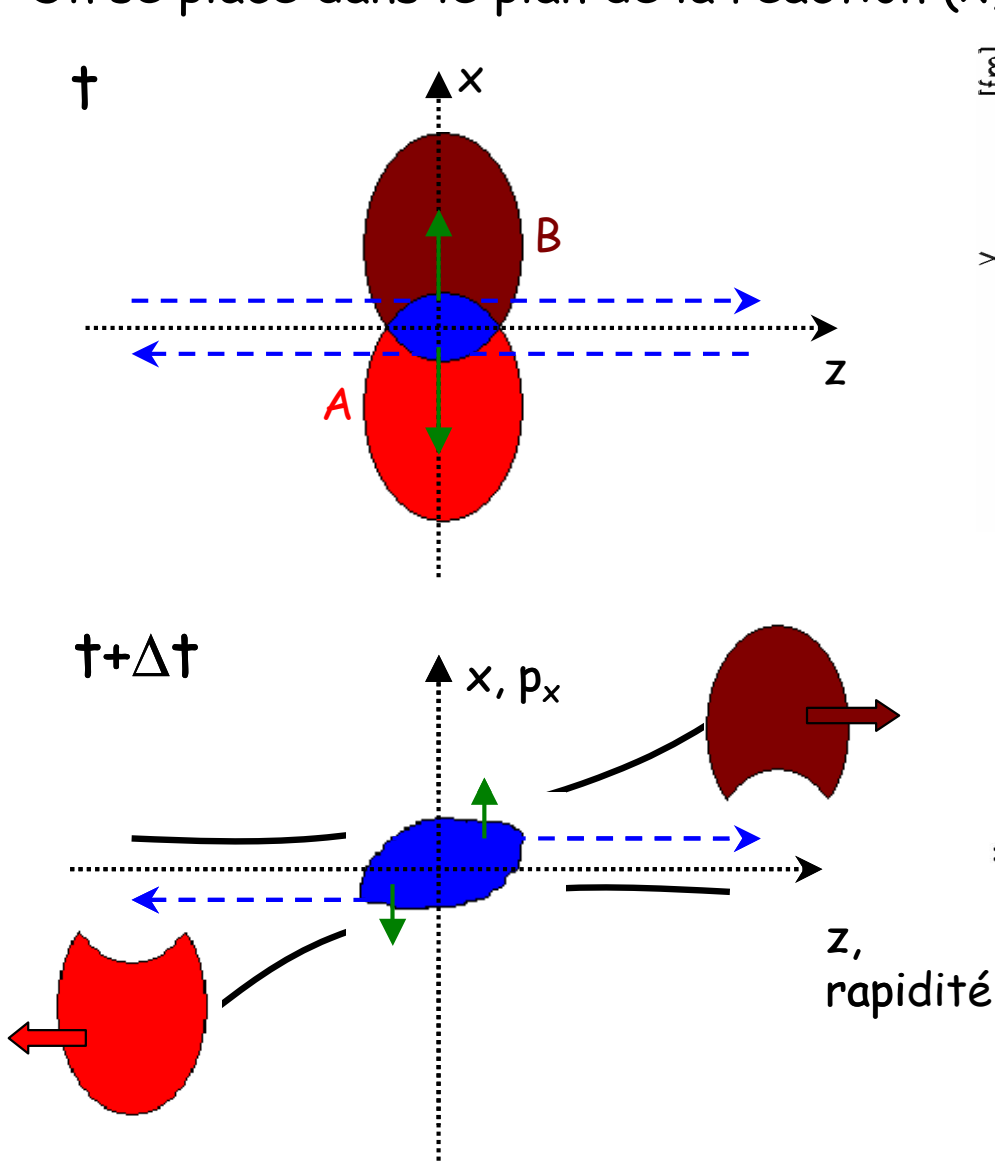
Flot direct v_1

On se place dans le plan de la réaction (x,z)



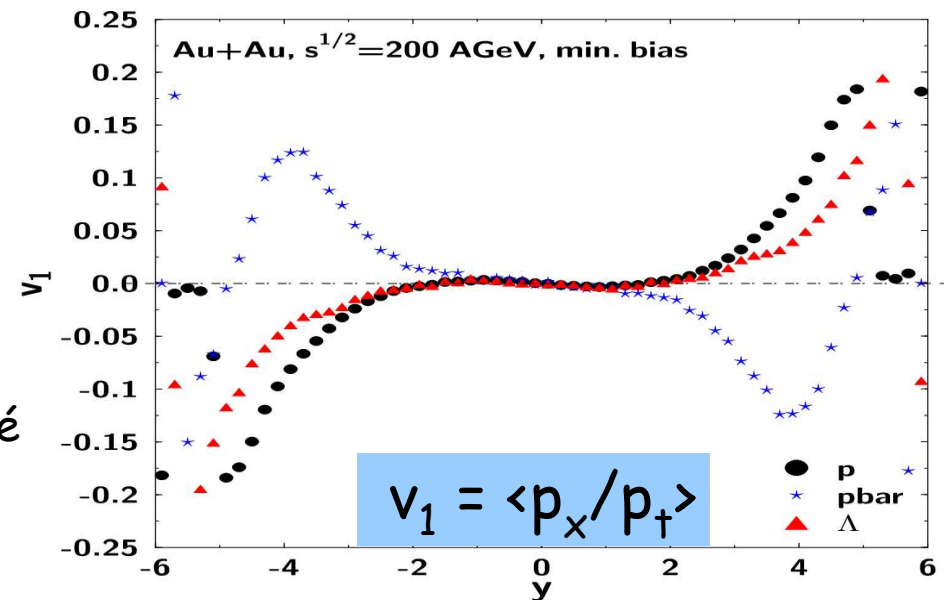
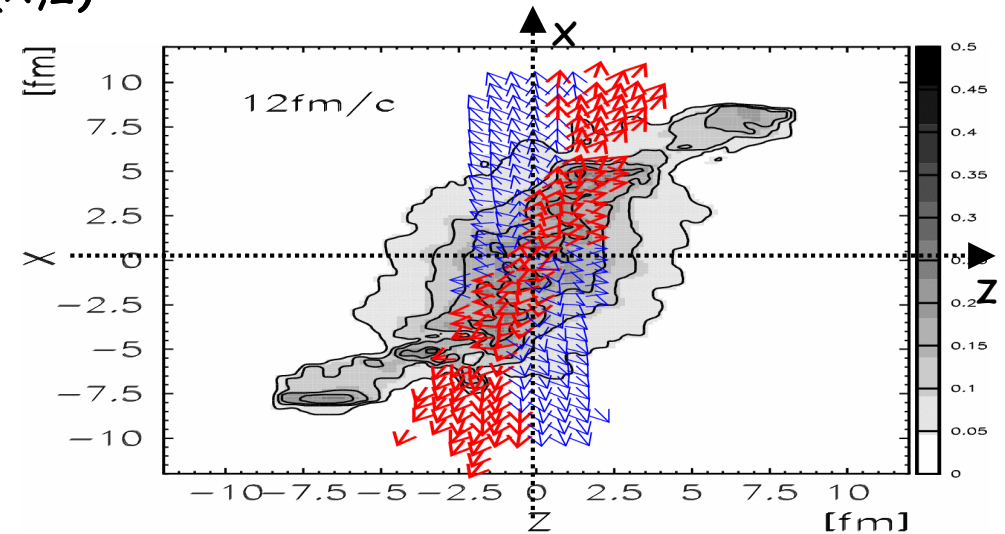
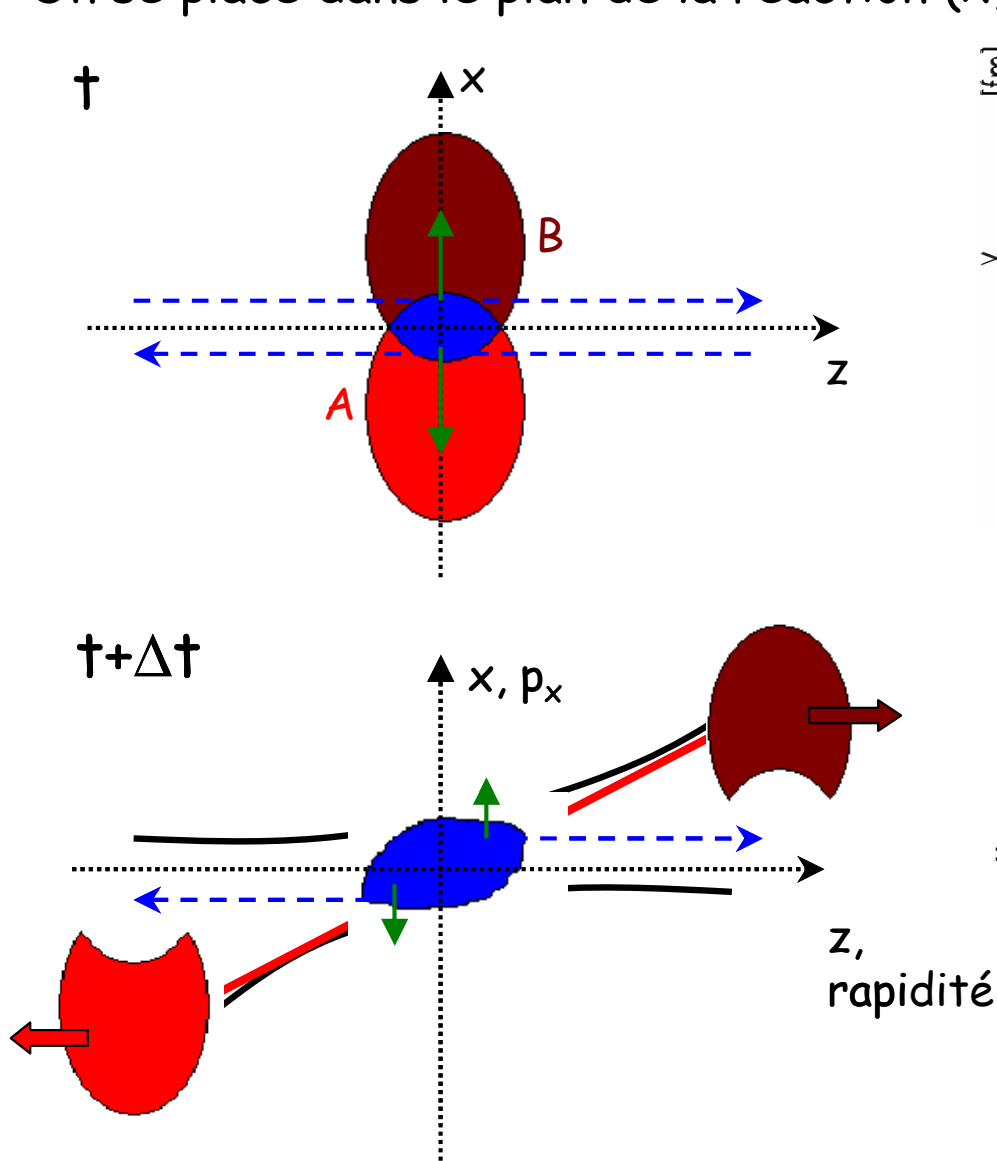
Flot direct v_1

On se place dans le plan de la réaction (x,z)

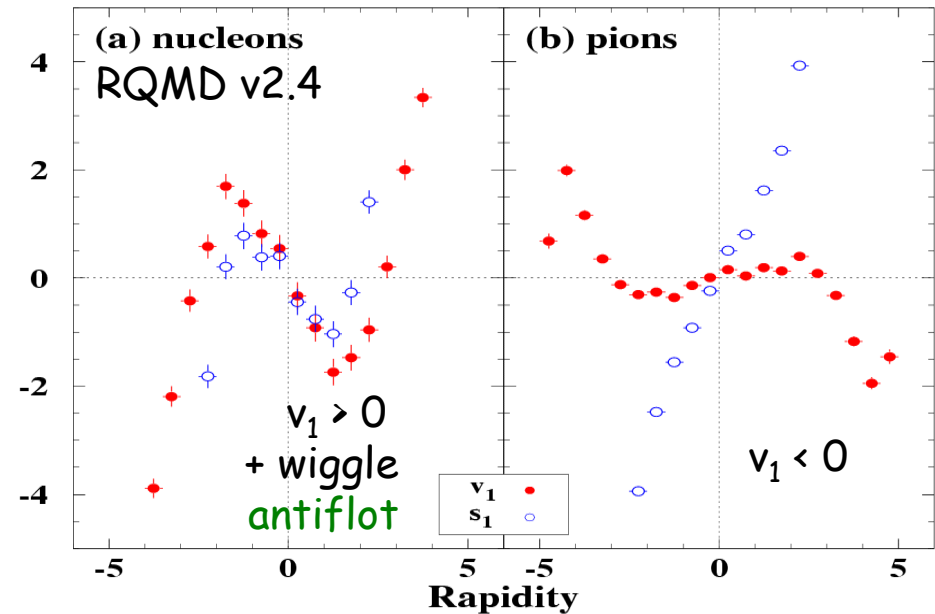
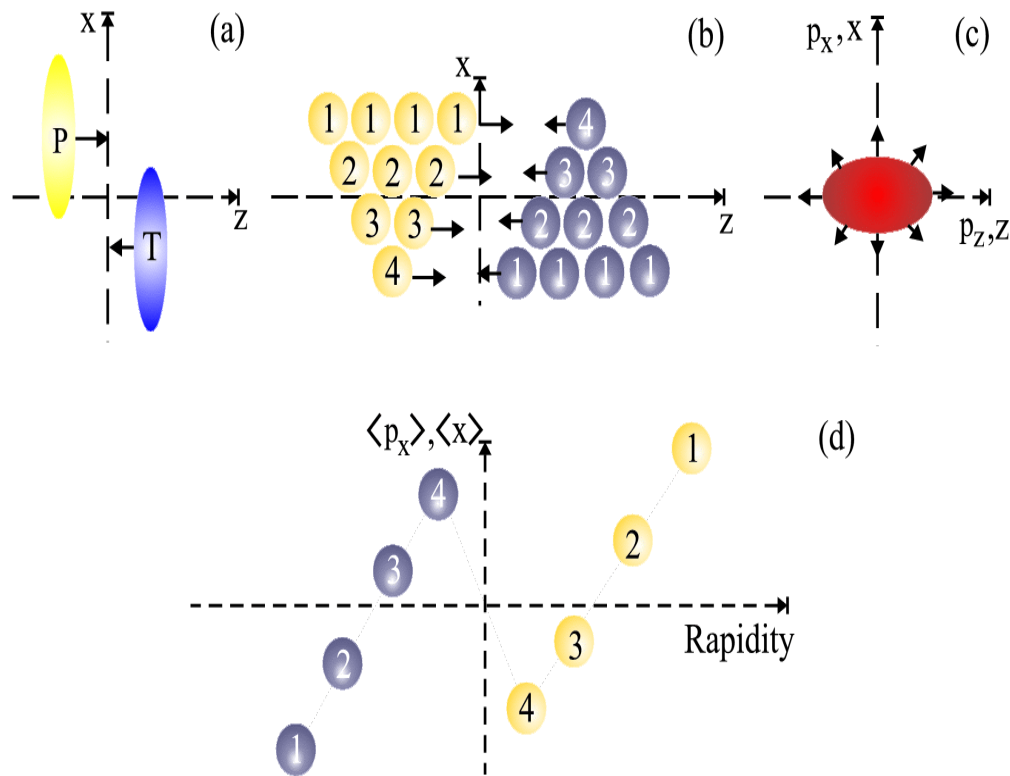


Flot direct v_1

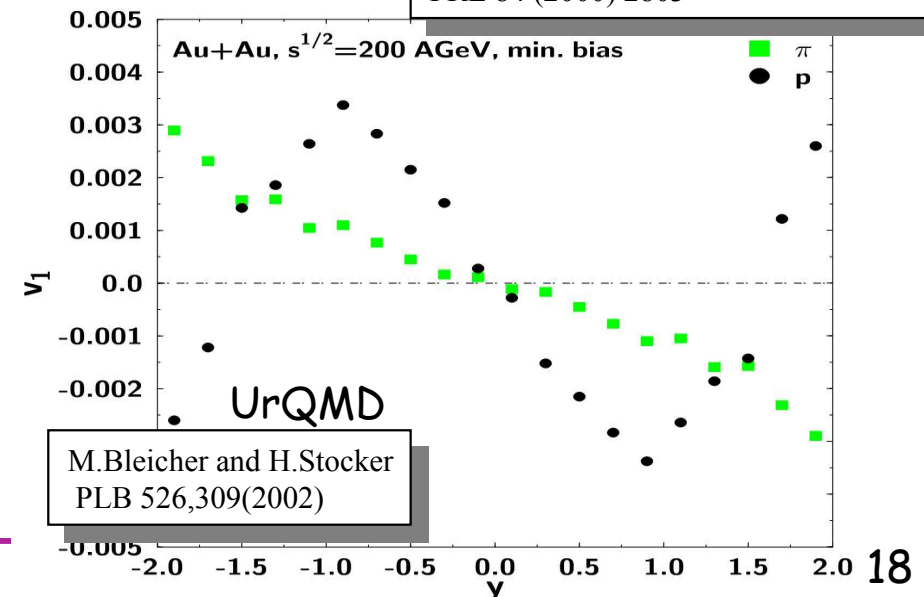
On se place dans le plan de la réaction (x,z)



Flot direct et pouvoir d'arrêt

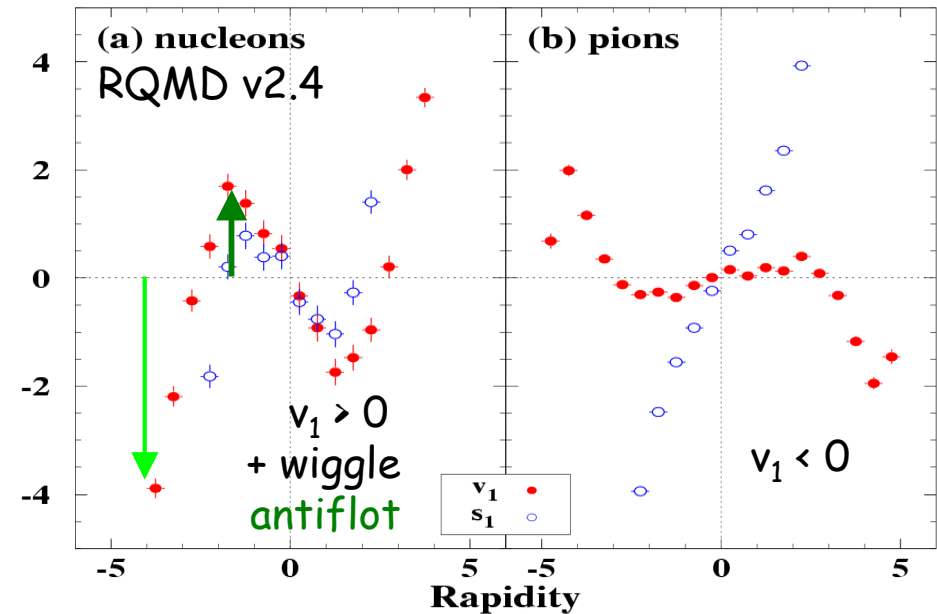
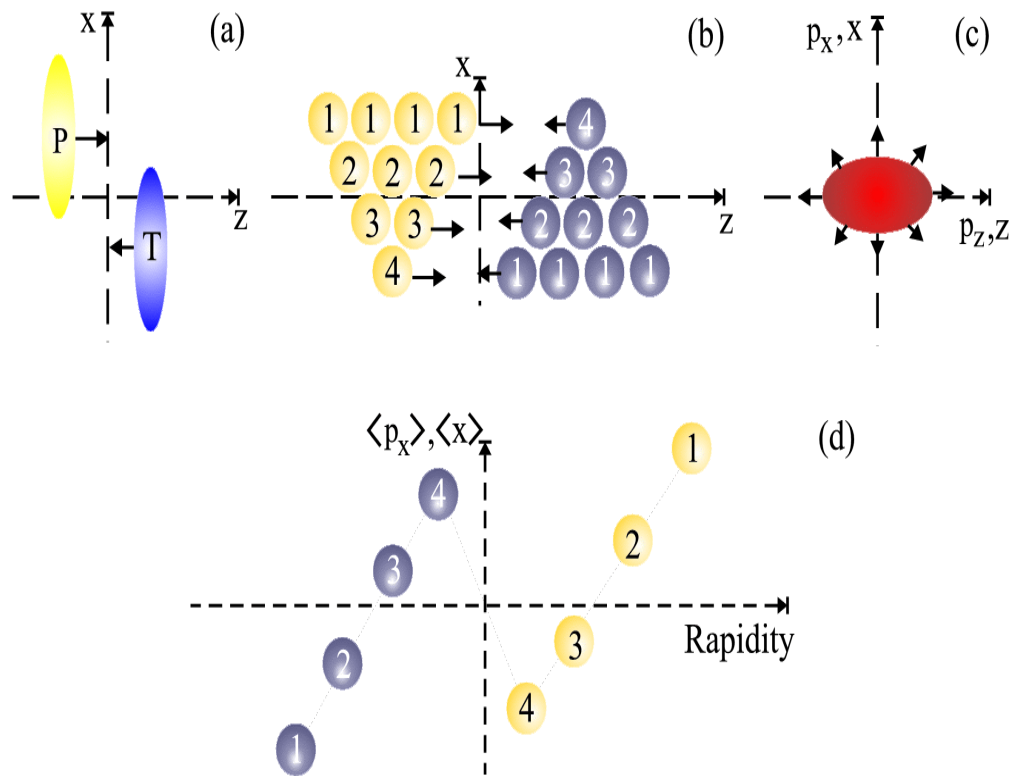


Snellings, Sorge, Voloshin, Wang & Xu
PRL 84 (2000) 2803

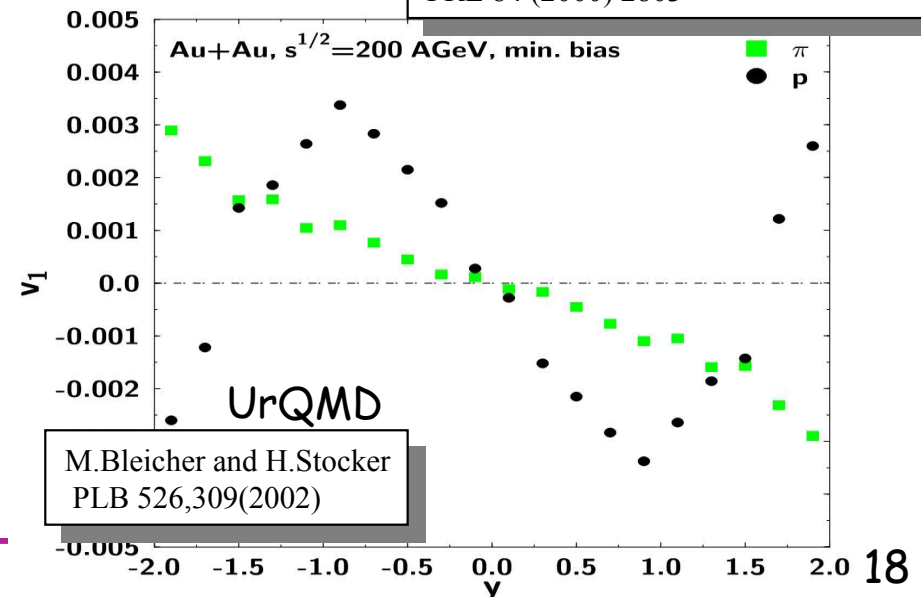


- Les modèles RQMD et UrQMD prédisent v_1 vs rapidité
- Corrélation espace (x,z) / espace des impulsions positive $\rightarrow v_1$ "wiggle".
- PQG non nécessaire pour décrire cette tendance

Flot direct et pouvoir d'arrêt



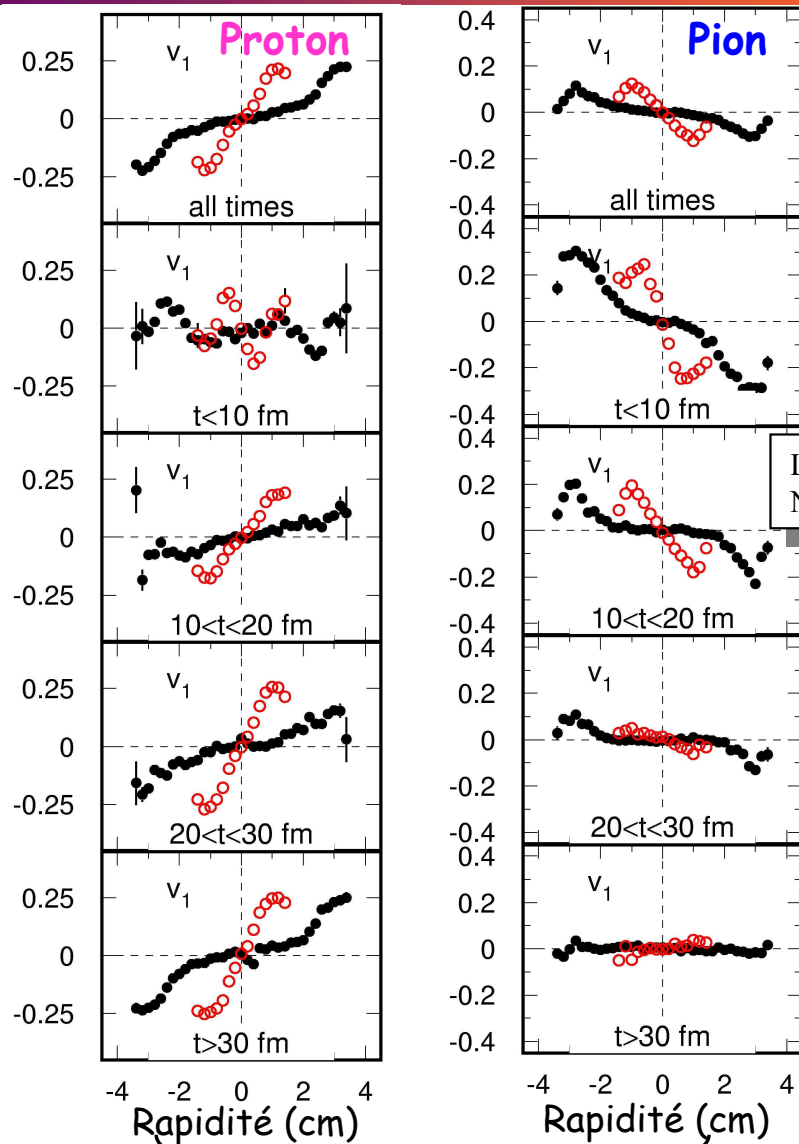
Snellings, Sorge, Voloshin, Wang & Xu
PRL 84 (2000) 2803



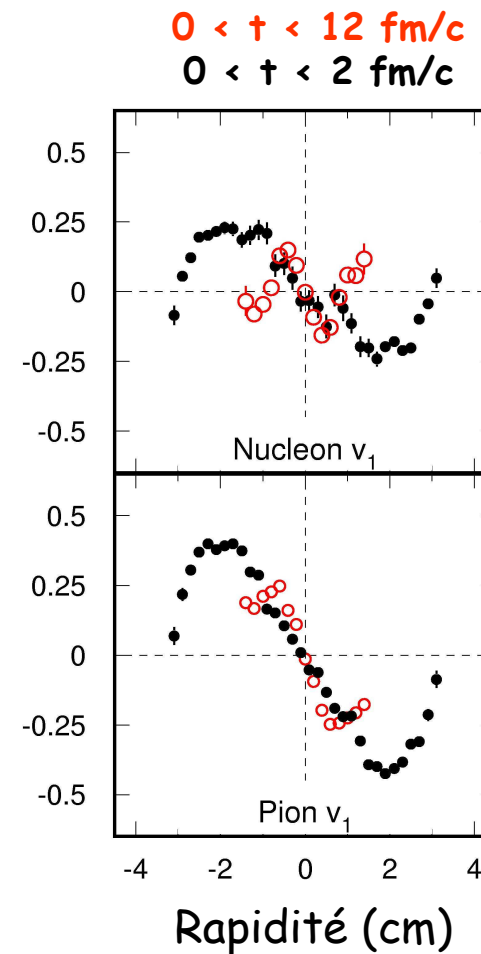
M. Bleicher and H. Stöcker
PLB 526,309(2002)

- Les modèles RQMD et UrQMD prédisent v_1 vs rapidité
- Corrélation espace (x,z) / espace des impulsions positive $\rightarrow v_1$ "wiggle".
- PQG non nécessaire pour décrire cette tendance

Evolution de v_1 avec le temps



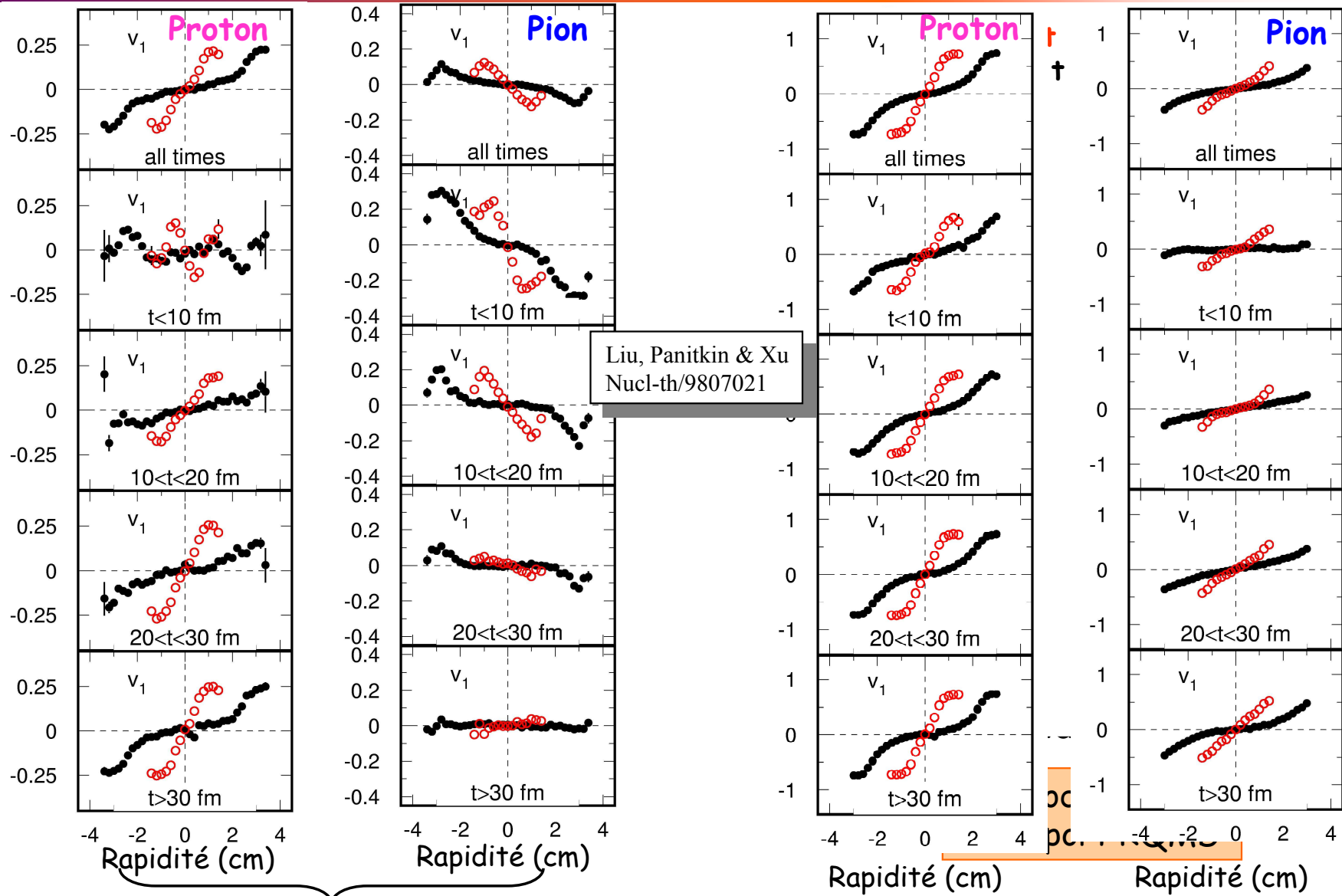
Liu, Panitkin & Xu
Nucl-th/9807021



Modèle de
transport RQMD

Espace des impulsions

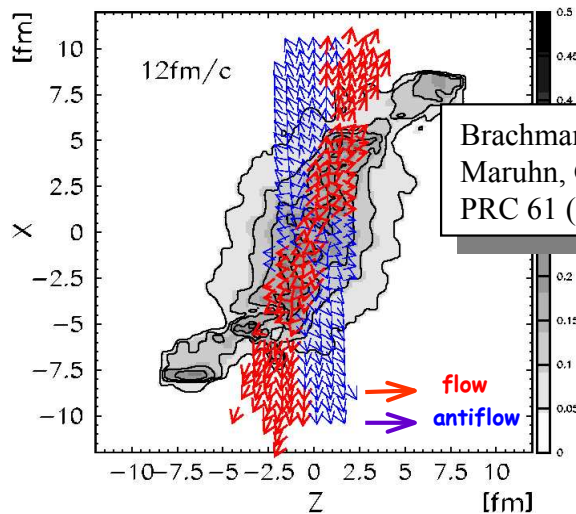
Evolution de v_1 avec le temps



● Pb+Pb@158A GeV ○ Au+Au@2A GeV

v_1 sensible à la transition de phase et EOS

- Anti-flot/3^{ème} composante du flot
- Transition de phase avec PQG : augmentation degrés de liberté, augmentation de l'entropie => diminution de la pression => v_1 plat à mi-rapacité (voire petite pente) ou wiggle (double changement de pente).
- Equation d'état plus douce

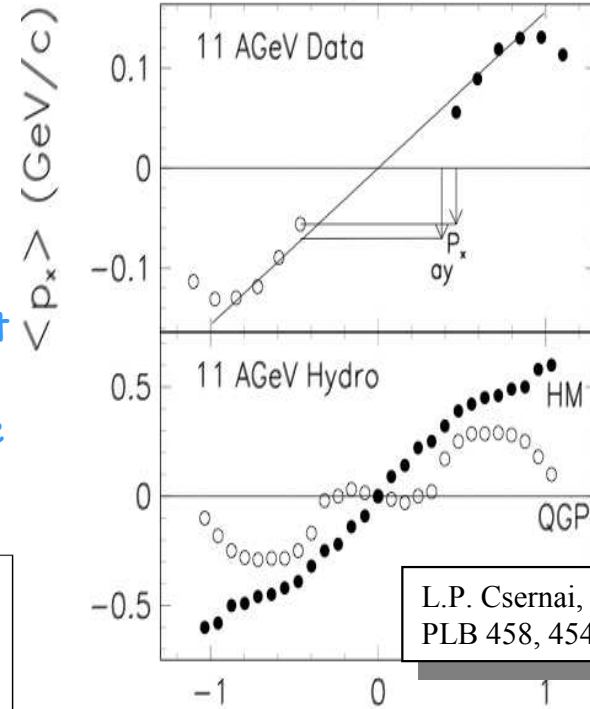
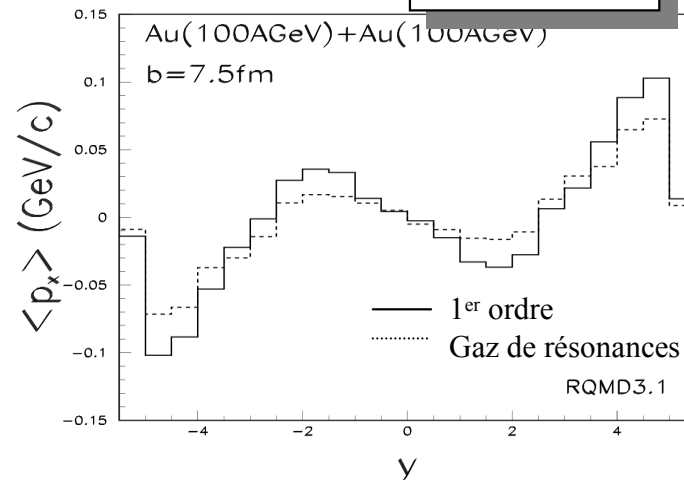


Brachmann, Soff, Dumitru, Stocker, Maruhn, Greiner Bravina, Rischke
PRC 61 (2000) 024909.

-1 and 3 fluid dynamics
- macro and micro transport models
- RQMD avec EOS qui varie

H. Sorge
Nucl-th/9905008

« v_1 sensitive to the EOS in the transition region between hadronic and quark matter... » (Sorge)



L.P. Csernai, D. Roehrich
PLB 458, 454 (1999)

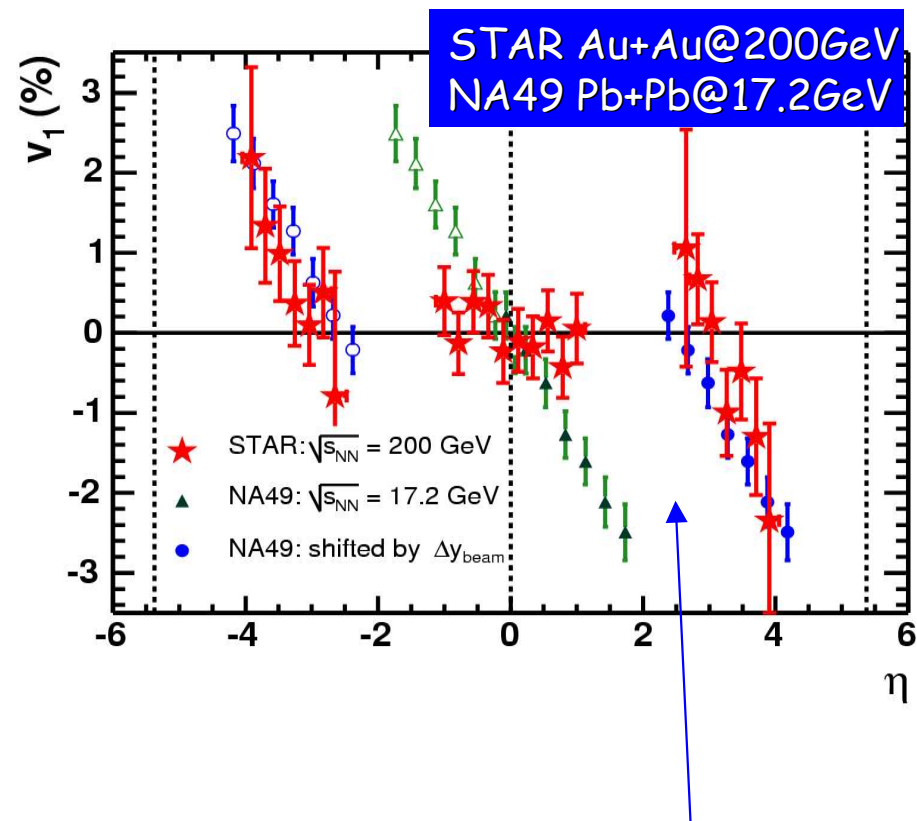
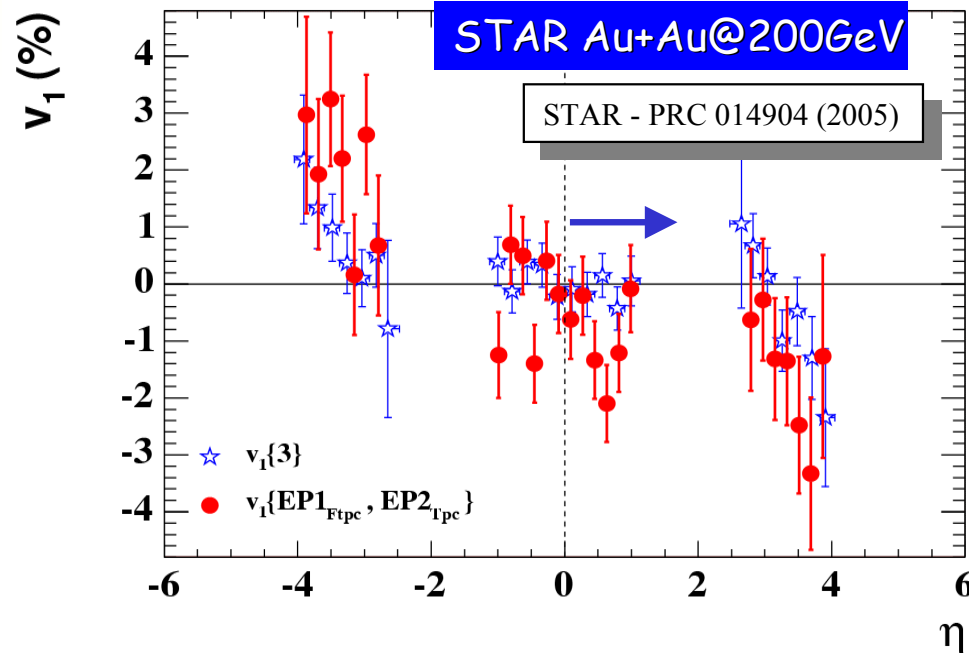
« fluid dynamical calculation with QGP showed a softening of directed flow... »

Flot direct des particules chargées

N.Borghini, P.M.Dihn, J-Y.Ollitrault

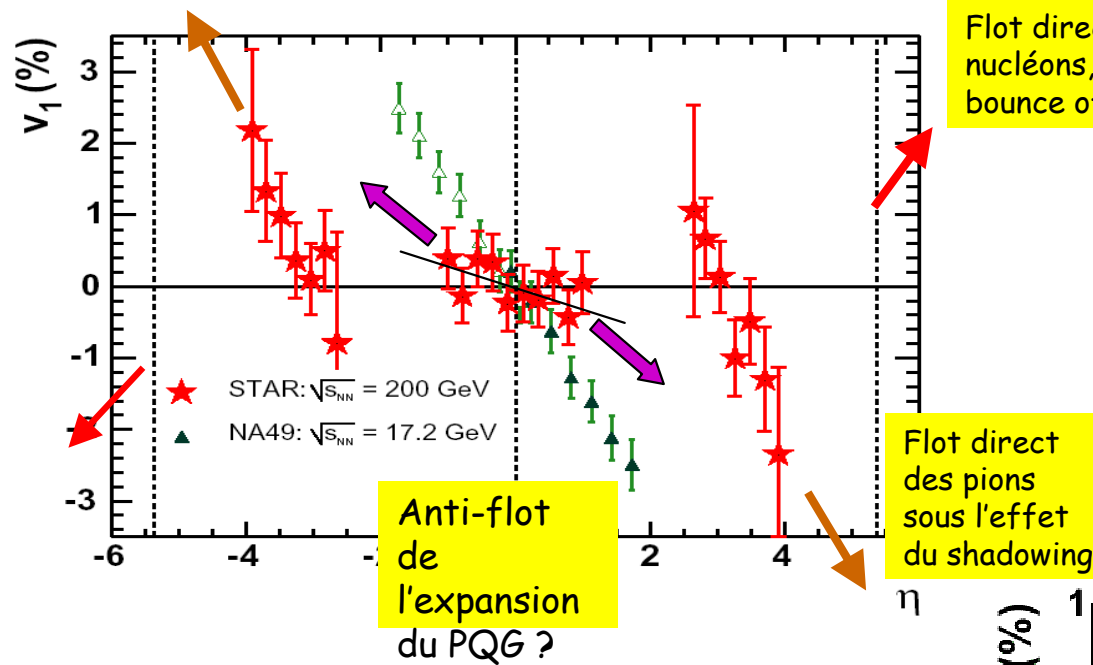
STAR utilise **trois techniques** d'extraction du flot direct :

- Mixed harmonics event plane method $v_1\{\text{EP1}, \text{EP2}\}$
- Three particle cumulants $v_1\{3\}$: $V_1 a V_1 b V_2$
- Méthode standard améliorée $v_1\{\text{ZDC-SMD}\}$



! NA49 décallé de la différence en rapidité des faisceaux

v_1 : distribution en rapidité



STAR - PRC 014904 (2005)

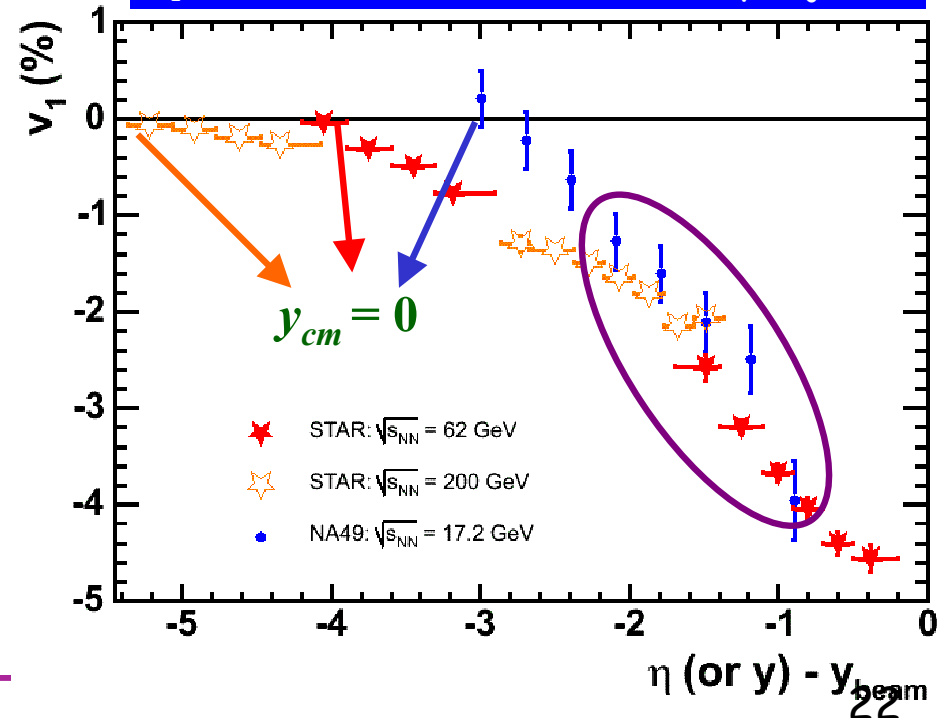
• Limitation en statistique @ 200 GeV => analyse run 4 haute statistique pour conclure sur la forme de v_1 à mi-rapacité

(Seulement 70k événements bons ont été analysés)

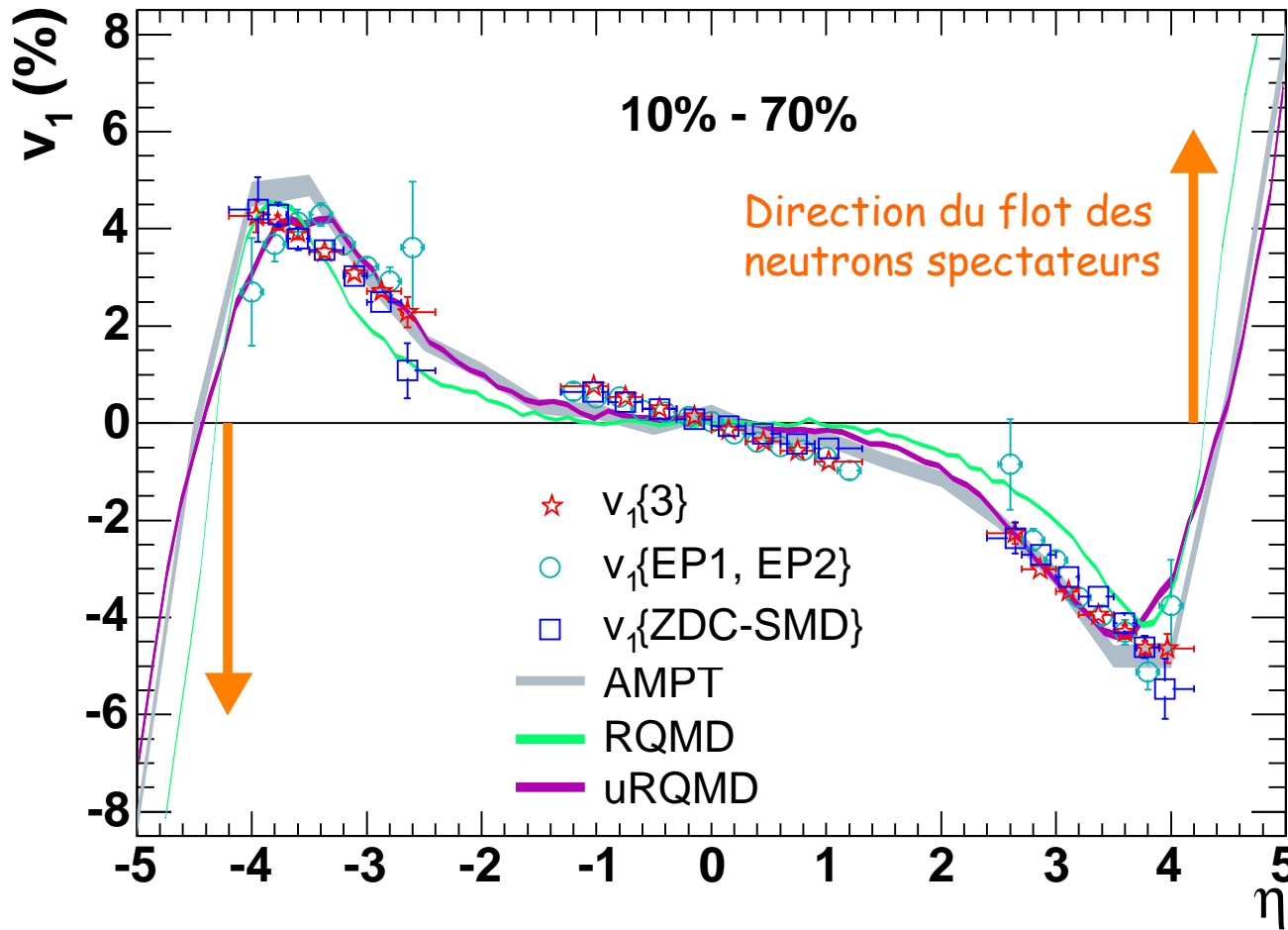
v_1 dans le centre de masse du projectile

Données de STAR à 200 GeV représentées avec les données de NA49 à 17.2 GeV décalées de la différence en rapidité des faisceaux ainsi qu'avec les données de STAR à 62.4 GeV également décalées de Δy_{beam} :

- Pas de « wiggle » à mi-rapacité
- Consistant avec l'hypothèse de fragmentation limitée à haute rapidité
- Cependant désaccord probable autour de $\eta=2$



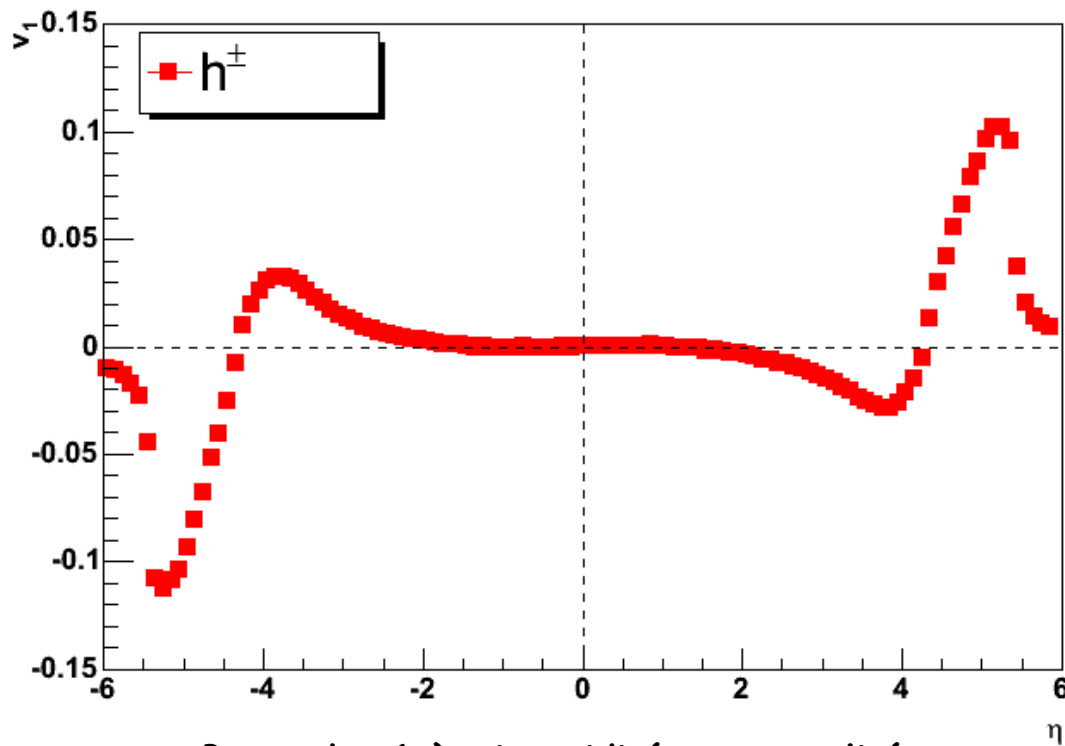
Résultats à 62 GeV - Comparaison à des modèles



v_1 @ 62 GeV très bien décrit par des scénarios de collision purement géométriques

- Pente à **mi-rapacité sous prédite** par les modèles.
- **Très bon accord** entre les différents modèles et les données de STAR à plus **haute rapidité**.
- Dans l'ensemble suggère une **origine de v_1 purement géométrique**
- Consistant avec les résultats obtenus à plus basse énergie (Stachel et al.)
- Le domaine à mi-rapacité **doit être exploré avec plus de détails** (pente et comparaison à des modèles)

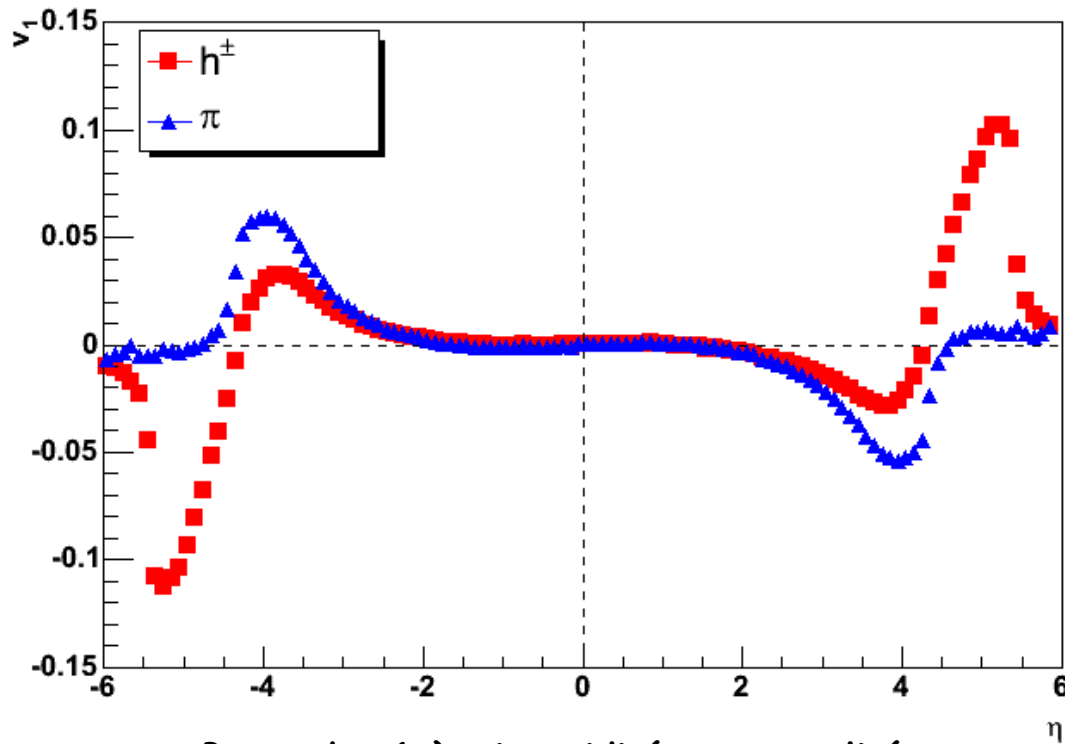
RQMD simulations for 62.4 GeV I



Pente de v_1 à mi-rapacité vs centralité

- v_1 des hadrons plat à mi-rapacité (petite pente positive à $\eta=0$)

RQMD simulations for 62.4 GeV I

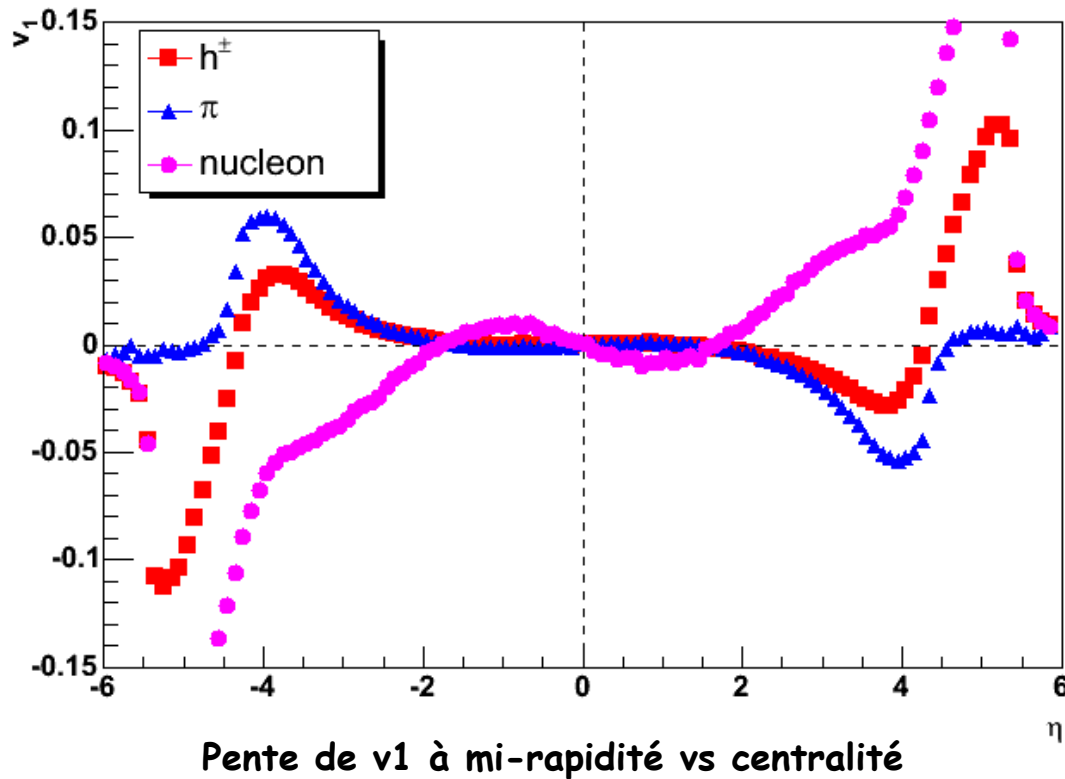


Pente de v_1 à mi-rapacité vs centralité

- v_1 des hadrons plat à mi-rapacité (petite pente positive à $\eta=0$)

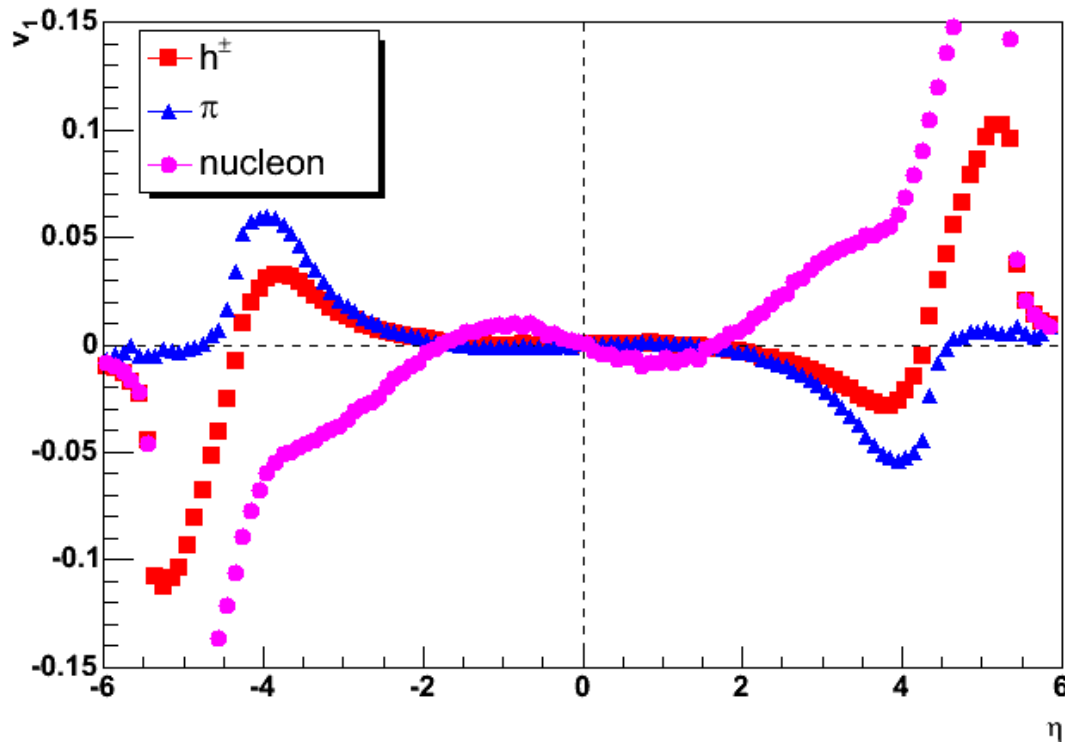
- v_1 des pions très plat à mi-rapacité également

RQMD simulations for 62.4 GeV I



- v_1 des hadrons plat à mi-rapacité (petite pente positive à $\eta=0$)
- v_1 des pions très plat à mi-rapacité également
- v_1 des protons montre une structure claire de type "wiggles" (double changement de signe de pente) à mi-rapacité.

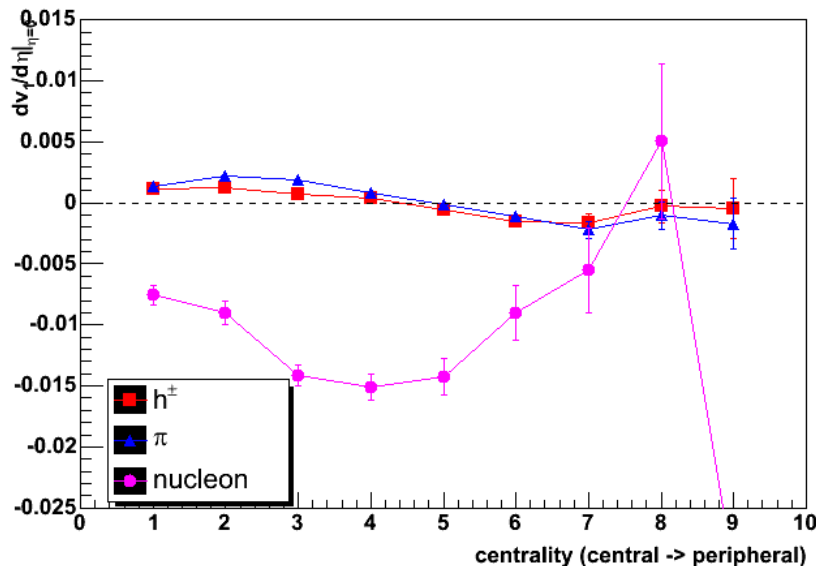
RQMD simulations for 62.4 GeV I



• v_1 des hadrons plat à mi-rapacité (petite pente positive à $\eta=0$)

• v_1 des pions très plat à mi-rapacité également

• v_1 des protons montre une structure claire de type "wiggle" (double changement de signe de pente) à mi-rapacité.

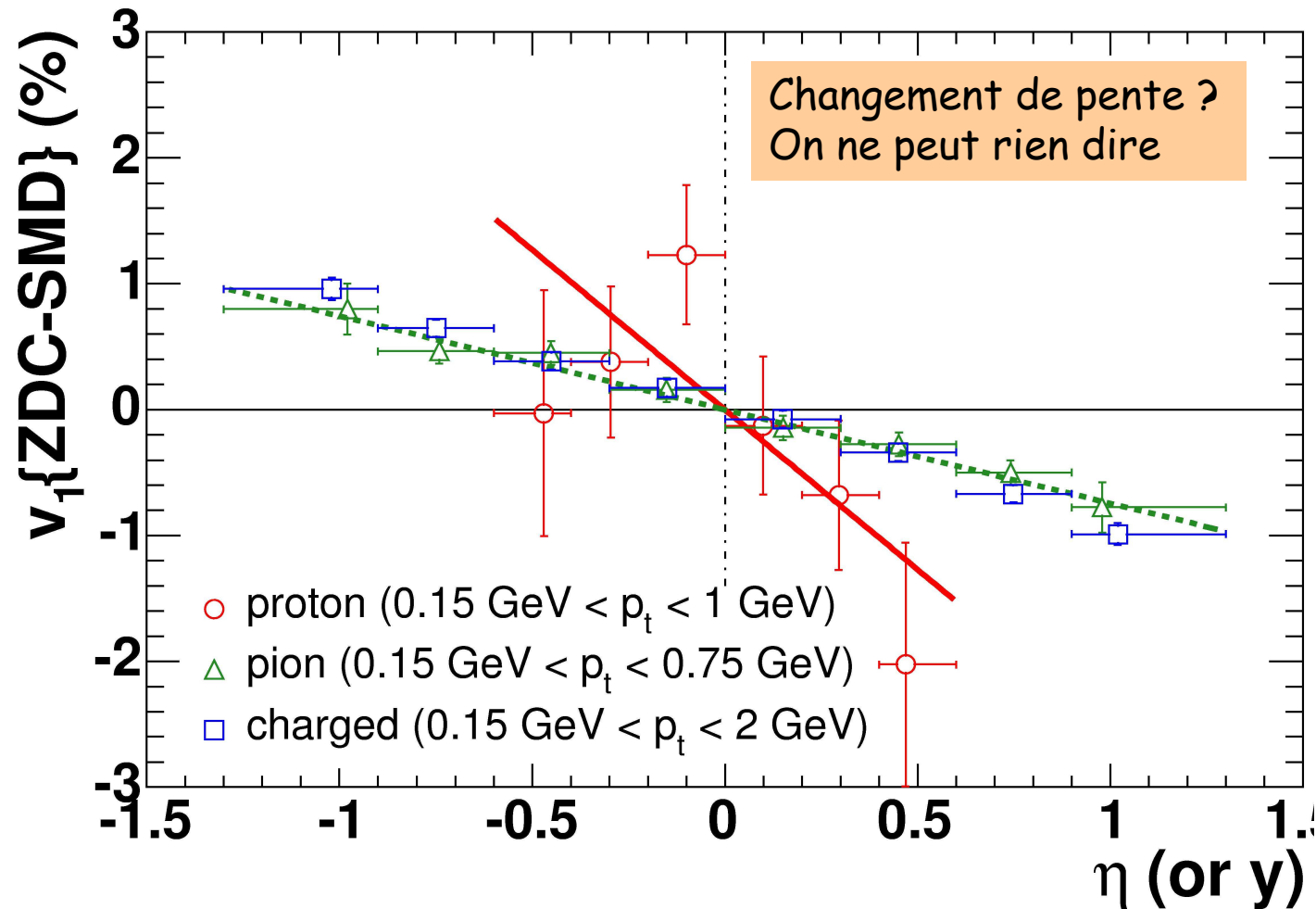


=> Le comportement de v_1 pour l'ensemble (= **hadrons**) est dominé de plus en plus par le comportement du v_1 des **protons** lorsque l'on se déplace à centralité plus périphérique

=> **Pente :**

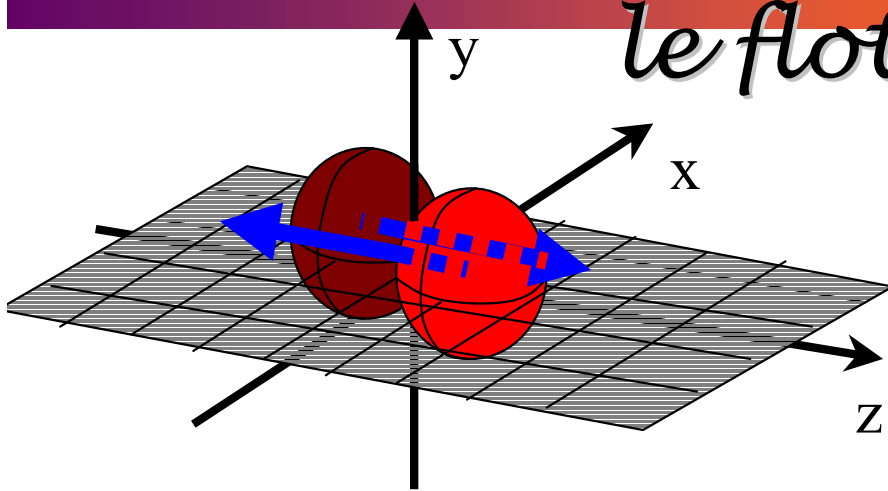
- Pour l'ensemble : très faible et dominée par les pions
- Pente plus large et négative pour les protons

Résultats à 62 GeV pour différentes particules

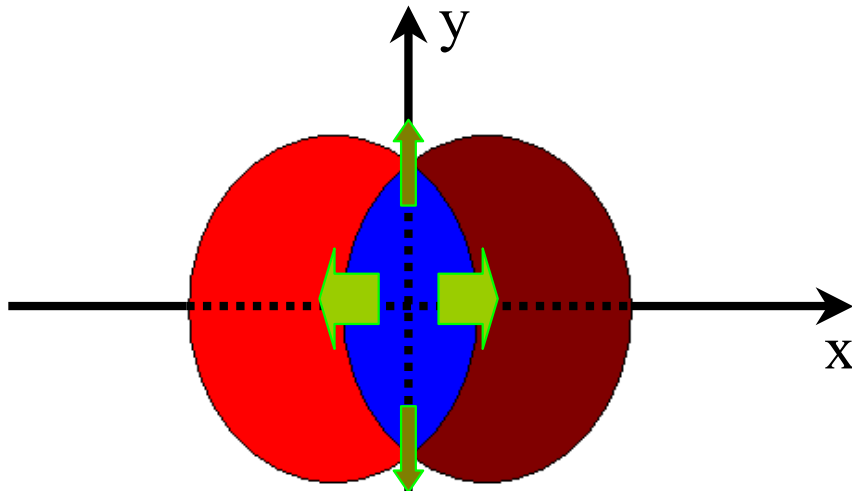


Pas assez de statistique pour extraire un signal clair pour les protons à ce stade.

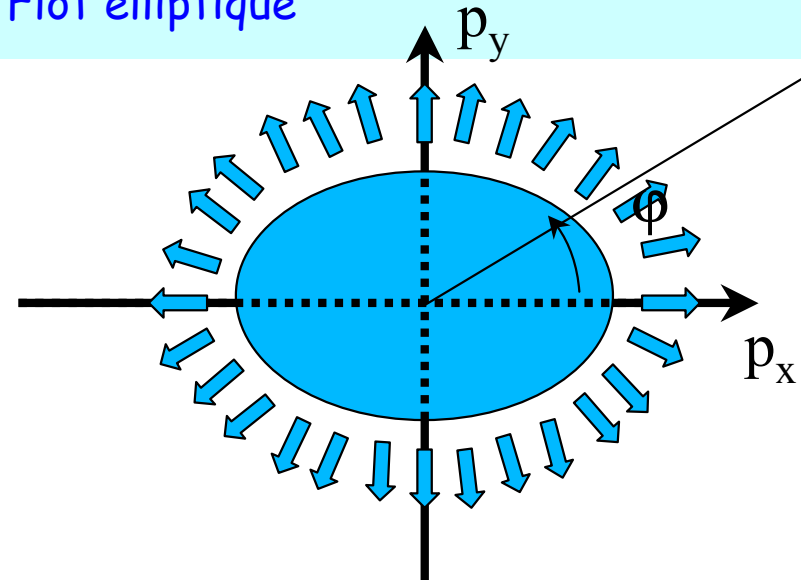
Seconde harmonique dominante : le flot elliptique v_2



- 1 - Anisotropie initiale de la source dans le plan transverse
- 2 - Gradient de pression anisotrope \Rightarrow plus grand suivant le paramètre d'impact b
- 3 - Plus grande impulsion des particules suivants p_x que suivant p_y
 \Rightarrow Flot elliptique



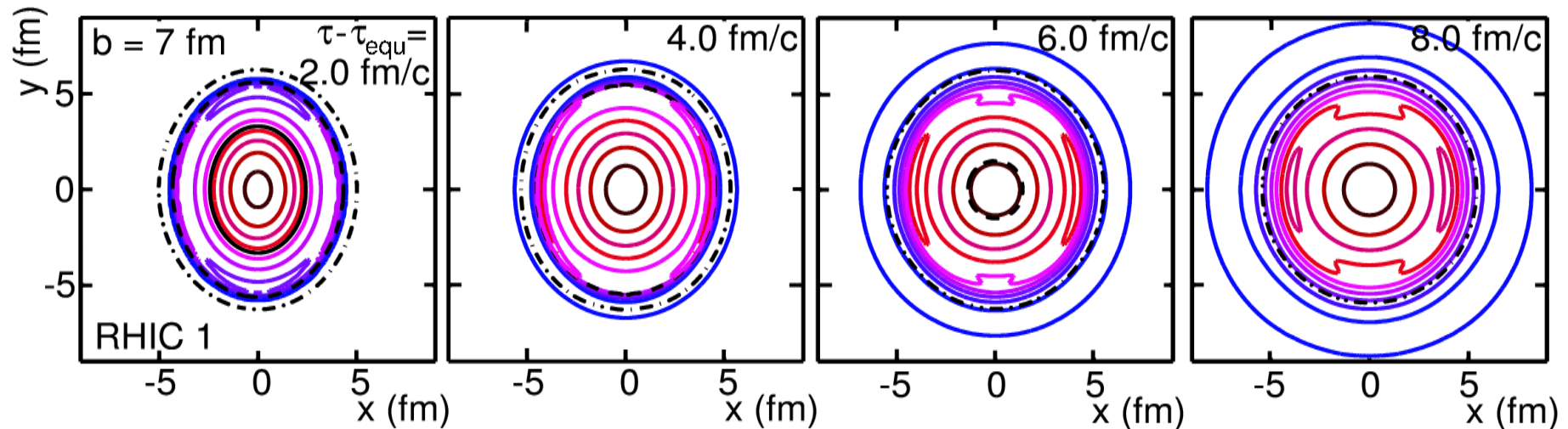
$$\varepsilon = \frac{\langle y^2 - x^2 \rangle}{\langle y^2 + x^2 \rangle}$$



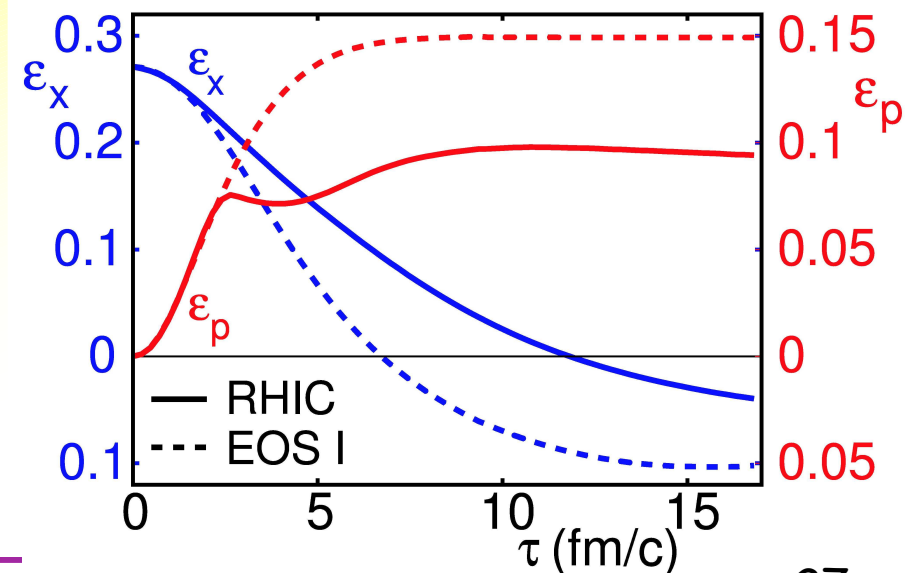
$$v_2 = \langle (p_x^2 - p_y^2) / p_{\perp}^2 \rangle$$

$$v_2 = \langle \cos(2\phi) \rangle, \phi = \tan^{-1}(p_y/p_x)$$

Une sonde développée tôt dans la collision



- v_2 développé aux premiers instants de la collision $\Rightarrow \epsilon_x$ diminue avec t
- Pour être plus juste, v_2 intégré est sensible aux premiers instants \Rightarrow auto quenching
- v_2 différentiel peut-être sensible à la phase hadronique (contribution moindre).

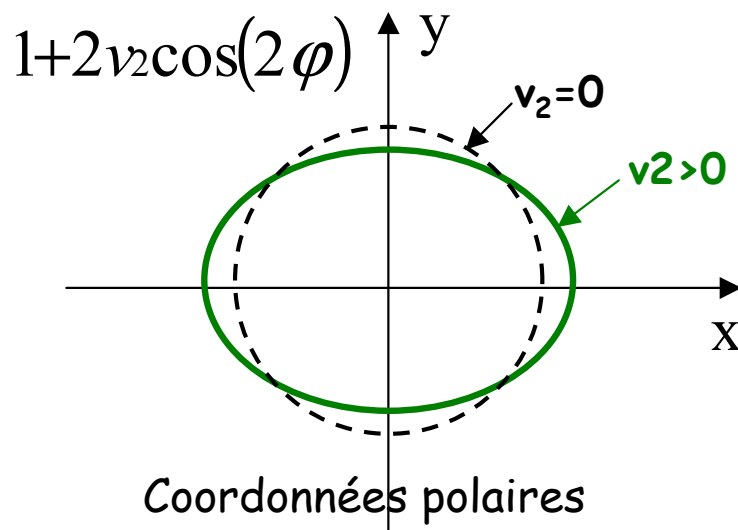


Le signe du flot elliptique

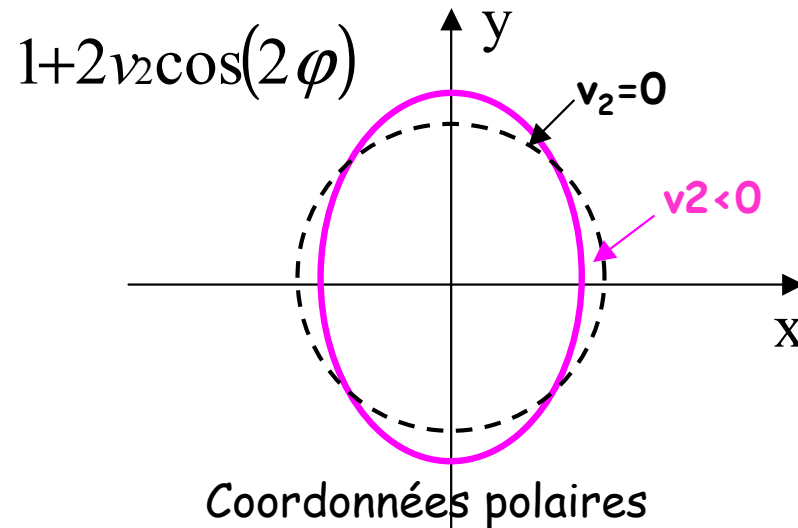
$$\frac{dN}{d\varphi} \approx v_0(1 + 2v_1 \cos(\varphi - \psi_{RP}) + 2v_2 \cos(2(\varphi - \psi_{RP})))$$

A mi-rapacité, $v_1 \sim 0$ et on suppose plan de réaction = (x,z)

$$\frac{dN}{d\varphi} \approx v_0(1 + 2v_2 \cos(2(\varphi - \psi_{RP})))$$



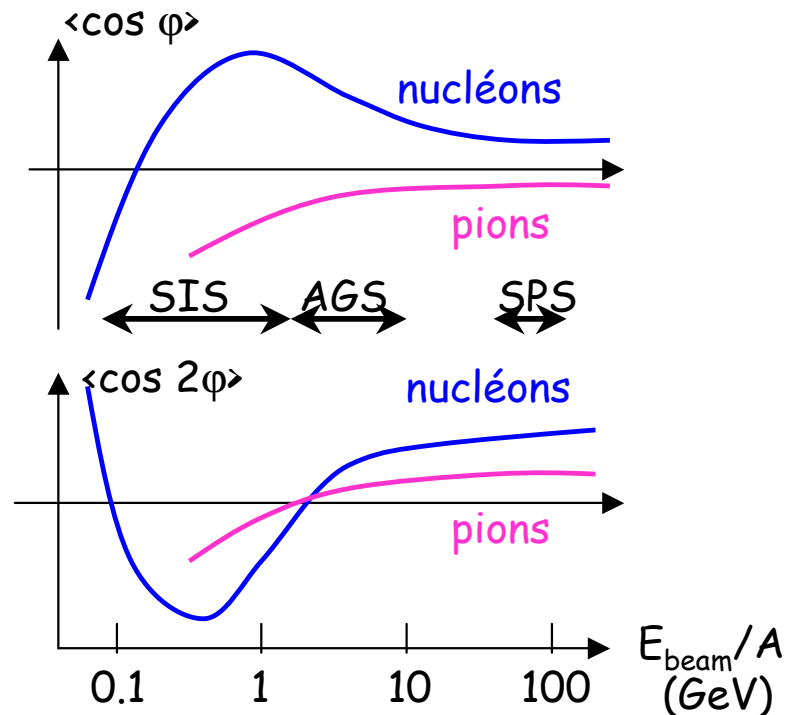
Emission « In-plane »



Emission « Out-of-plane »

Cas du « squeeze-out » à plus basse énergie

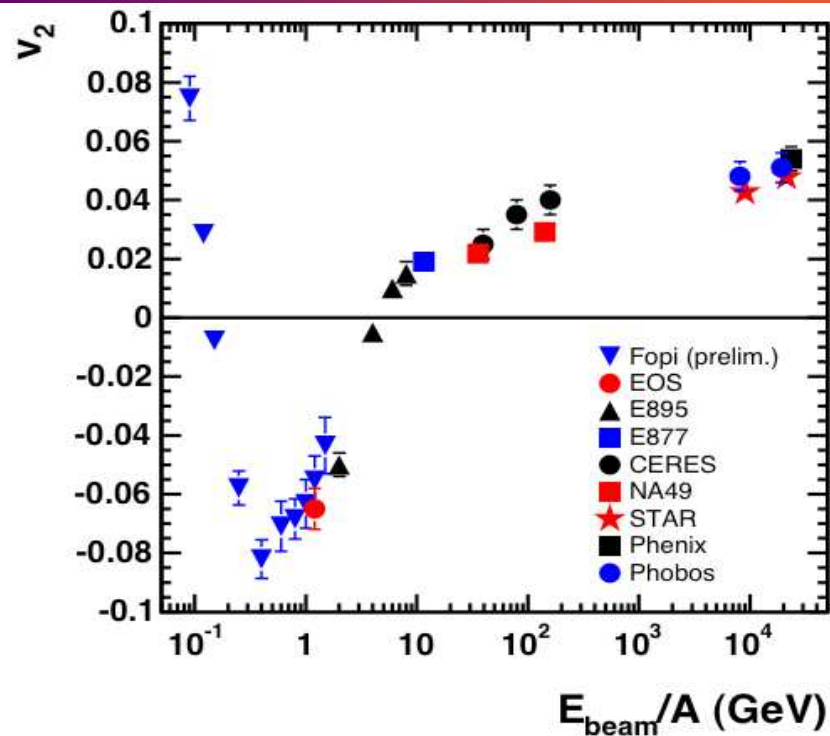
Le signe de v_2 , systématique en énergie



- Du BEVALAC au RHIC
=> Changements du signe de v_1 et v_2
- A plus basse énergie, fort effet du pouvoir d'arrêt du système.
=> Squeeze-out important. Direction privilégiée « out-of-plane » : $v_2 < 0$
- A plus haute énergie, émission dans le plan de réaction privilégiée : $v_2 > 0$

Par exemple, l'étude de v_1 de STAR le montre :

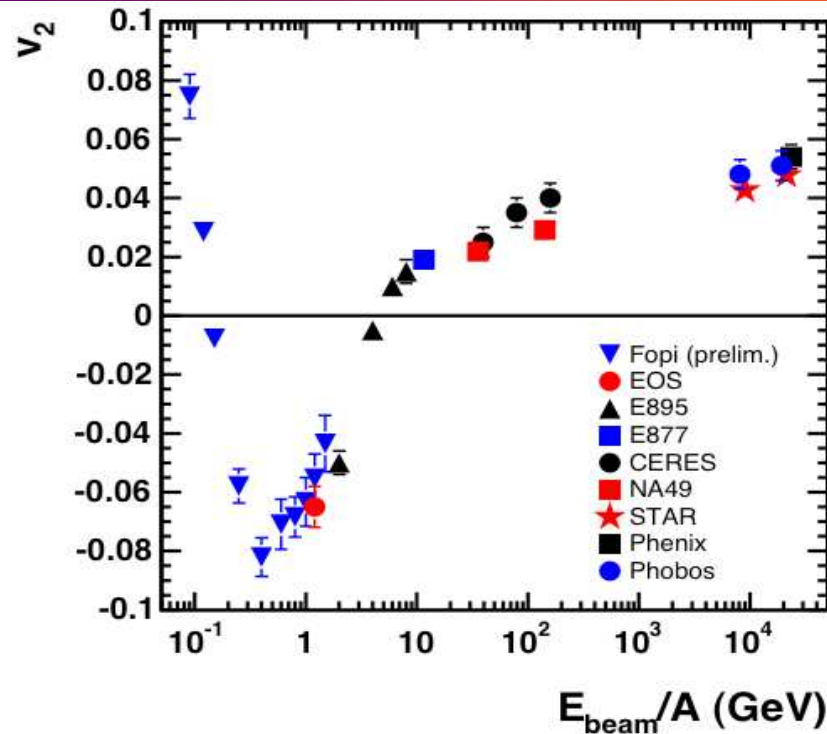
Le signe de v_2 , systématique en énergie



- Du BEVALAC au RHIC
=> Changements du signe de v_1 et v_2
- A plus basse énergie, fort effet du pouvoir d'arrêt du système.
=> Squeeze-out important. Direction privilégiée « out-of-plane » : $v_2 < 0$
- A plus haute énergie, émission dans le plan de réaction privilégiée : $v_2 > 0$

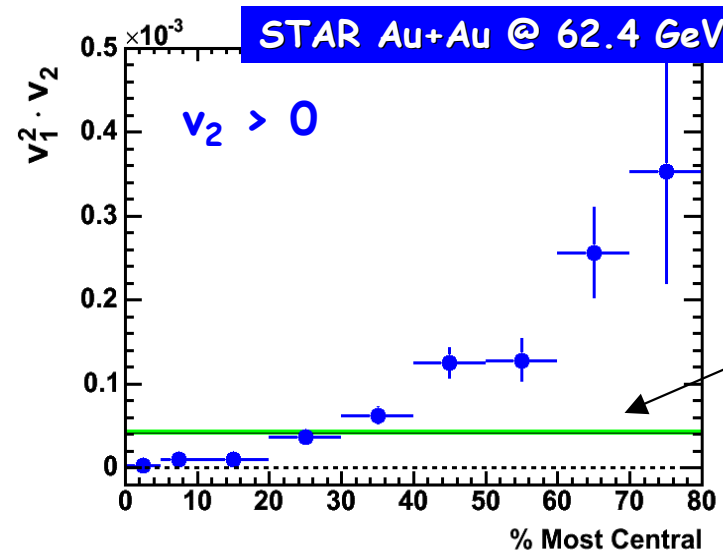
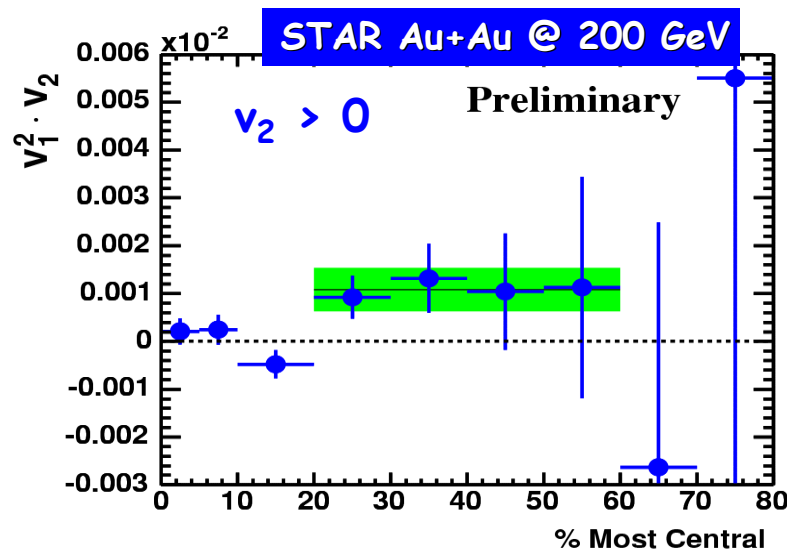
Par exemple, l'étude de v_1 de STAR le montre :

Le signe de v_2 , systématique en énergie



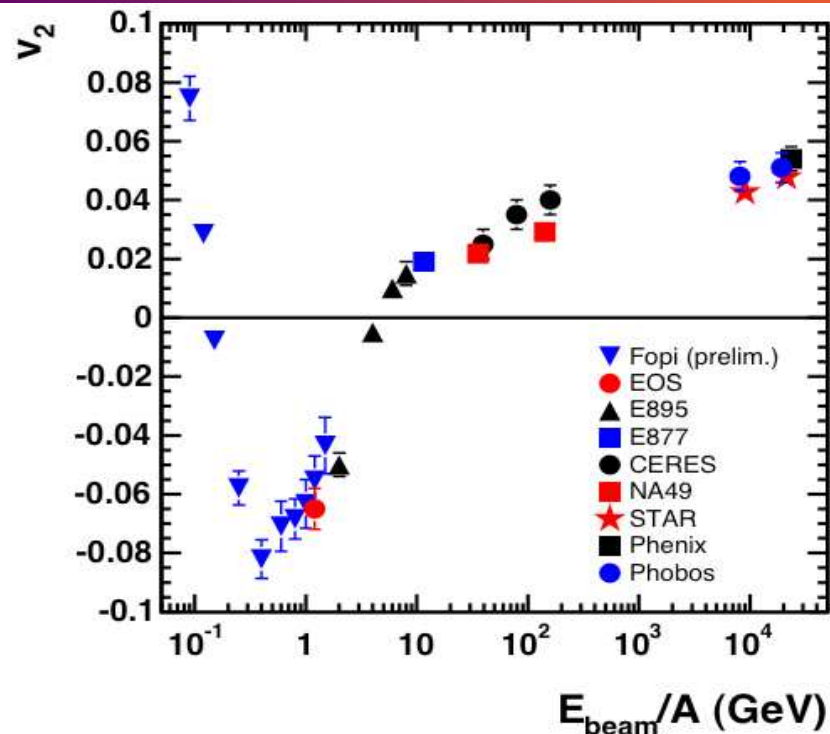
- Du BEVALAC au RHIC
=> Changements du signe de v_1 et v_2
- A plus basse énergie, fort effet du pouvoir d'arrêt du système.
=> Squeeze-out important. Direction privilégiée « out-of-plane » : $v_2 < 0$
- A plus haute énergie, émission dans le plan de réaction privilégiée : $v_2 > 0$

Par exemple, l'étude de v_1 de STAR le montre :



Moyenne sur toutes les centralités avec barre d'erreur

Le signe de v_2 , systématique en énergie



➤ Du BEVALAC au RHIC

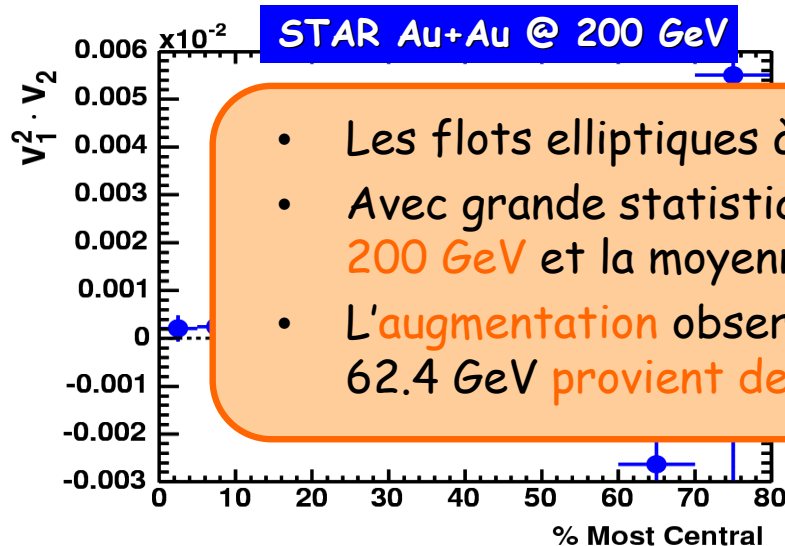
=> Changements du signe de v_1 et v_2

➤ A plus basse énergie, fort effet du pouvoir d'arrêt du système.

=> Squeeze-out important. Direction privilégiée « out-of-plane » : $v_2 < 0$

➤ A plus haute énergie, émission dans le plan de réaction privilégiée : $v_2 > 0$

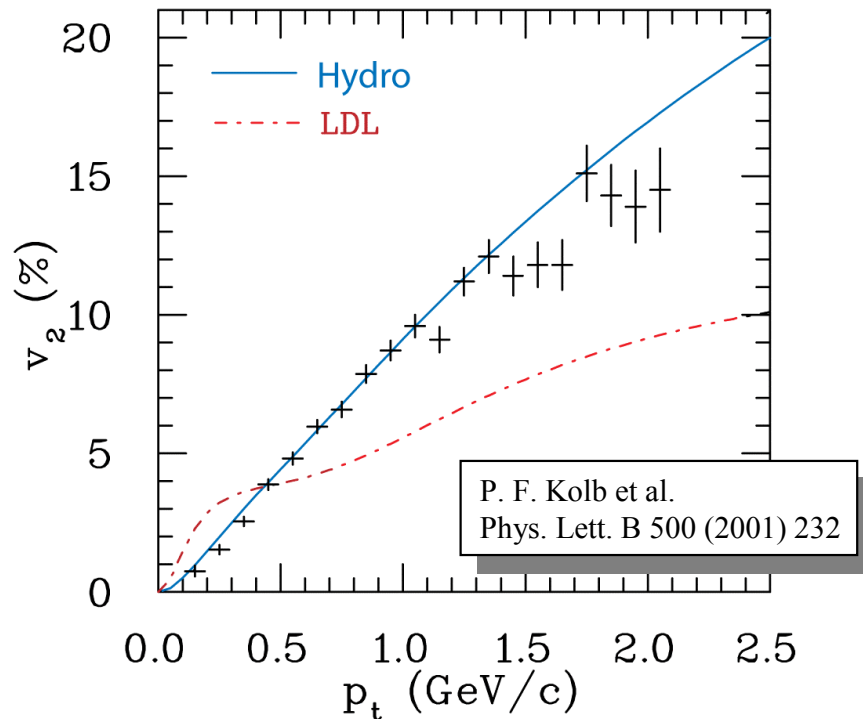
Par exemple, l'étude de v_1 de STAR le montre :



- Les flots elliptiques à 62.4 et 200 GeV sont *in-plane*
- Avec grande statistique, 'positivité' de v_2 est plus nette qu'à 200 GeV et la moyenne de $v_1^2 \cdot v_2 = (4.20 \pm 0.35) \cdot 10^{-5}$
- L'augmentation observée de $v_1^2 \cdot v_2$ en fonction de la centralité @ 62.4 GeV provient de l'augmentation de v_1 vs. centralité

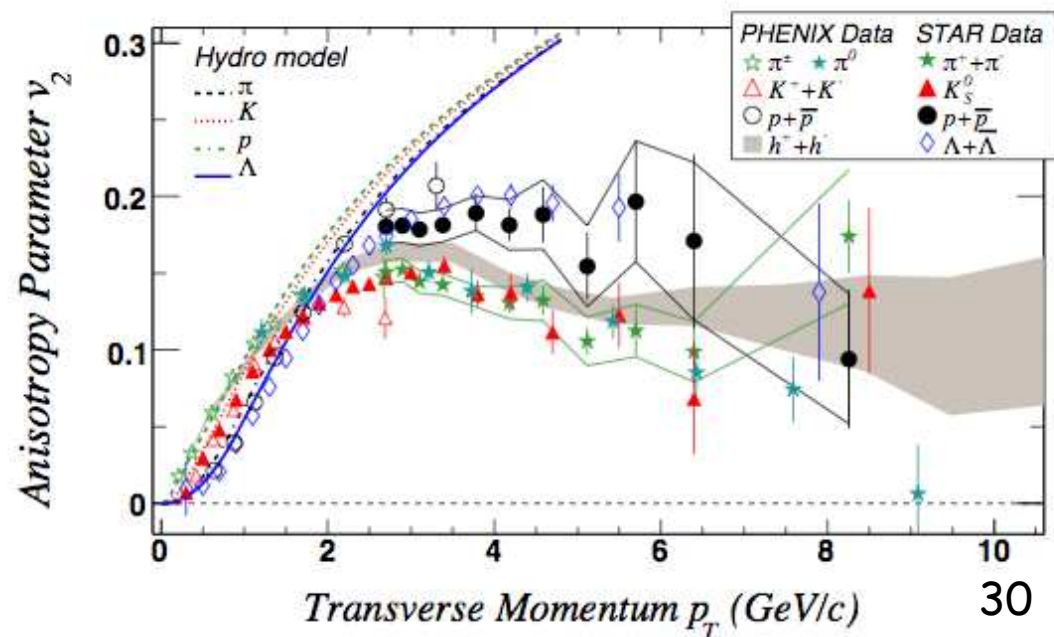
sur toutes
ralités avec
l'erreur

Dépendance en p_T de v_2



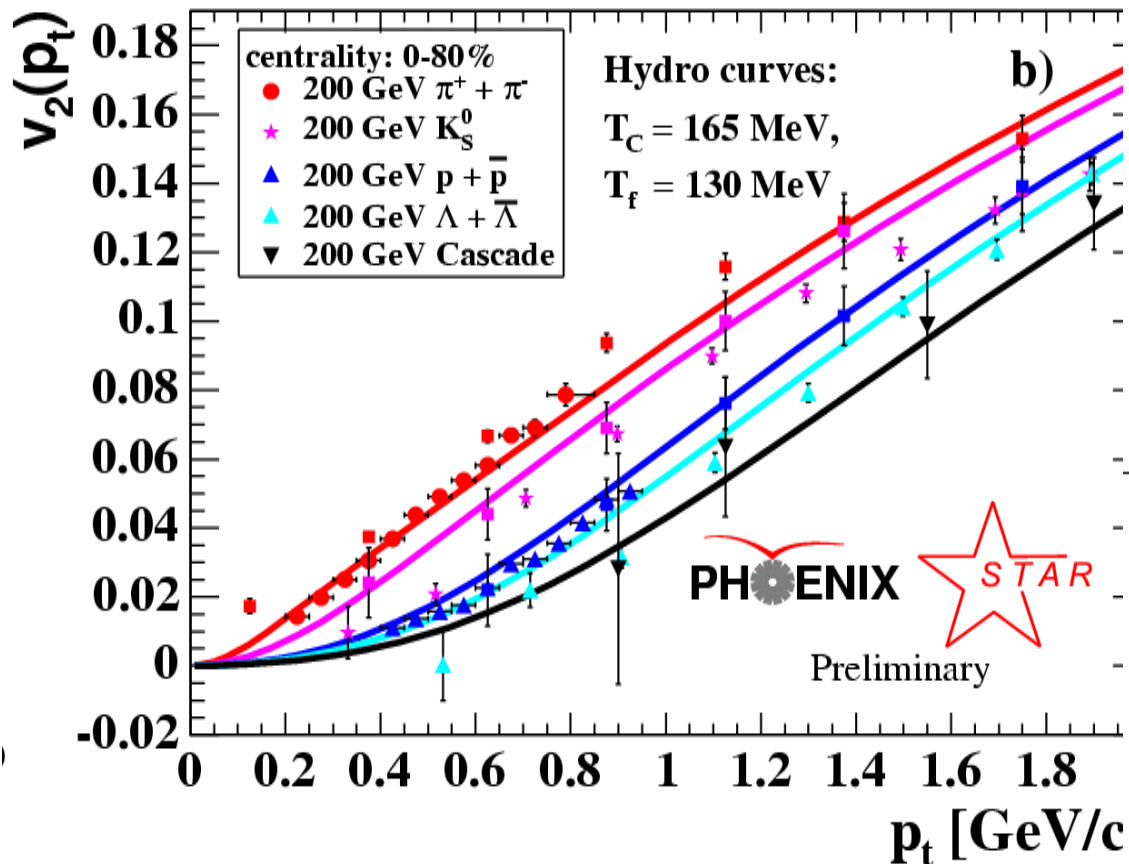
- Devrait continuer de croître avec p_T mais **sature** \Rightarrow déviation / l'hydro
- Domaine de validité de l'hydro :
 - 1.5 GeV/c mésons
 - 2.5 GeV/c baryons
 - soit jusqu'à environ 0.7, 0.8 GeV/c et les modèles de coalescence prennent la relève.

- $v_2(p_T)$ aux hautes énergie du RHIC est en désaccord avec la Low Density Limut (LDL) et est **en accord avec l'hydrodynamique** jusqu'à environ 2 GeV/c
- A plus **basse énergie**, la dépendance en p_T est également **mal reproduite** par la LDL.
- Modèle de transport : **trop grosse section efficace** pour reproduire v_2 ...



Dépendance en masse

- Grand nombre de particules
- A plusieurs énergie (17.2), 62.4,
- Plusieurs systèmes Au+Au, Cu+Cu



L'hydro idéale reproduit bien la dépendance en masse.

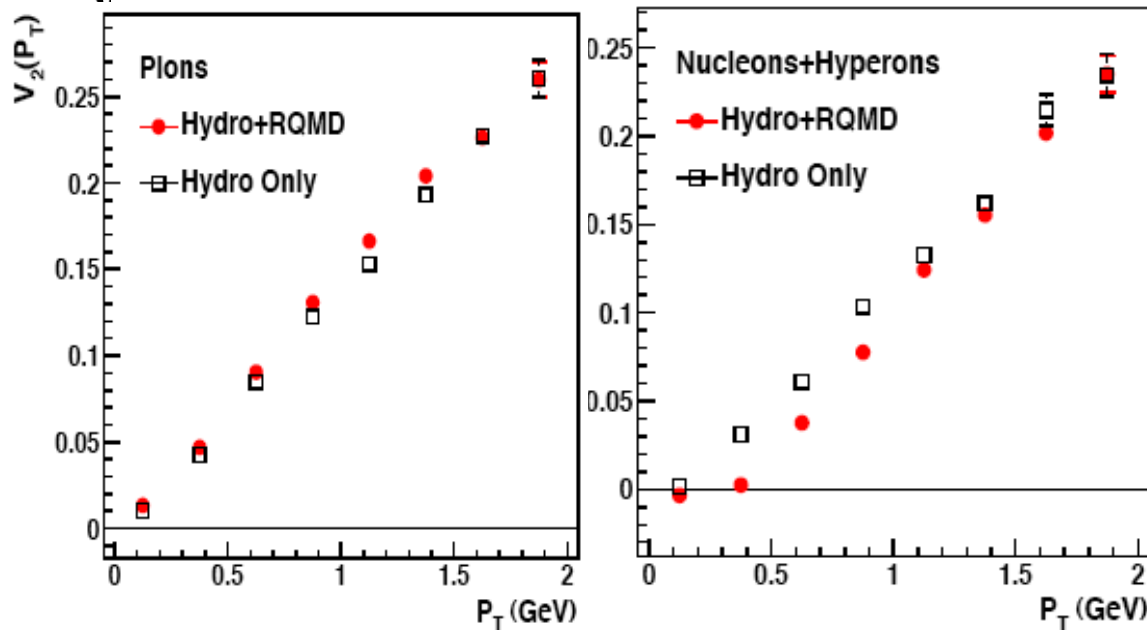
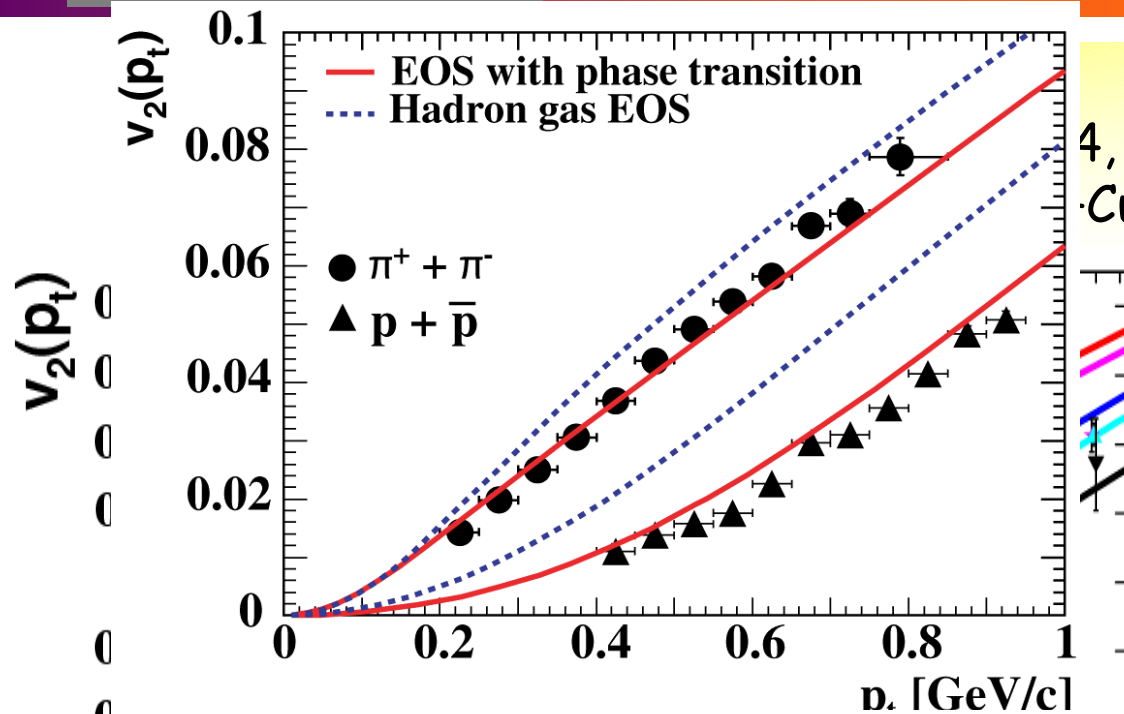
Cependant pas complètement pour les particules plus massives.

Un modèle de cascade dans la phase hadronique semble améliorer les choses...

Quelle information sur l'EOS ?

Hydro idéale incomplète ?

Dépendance en masse

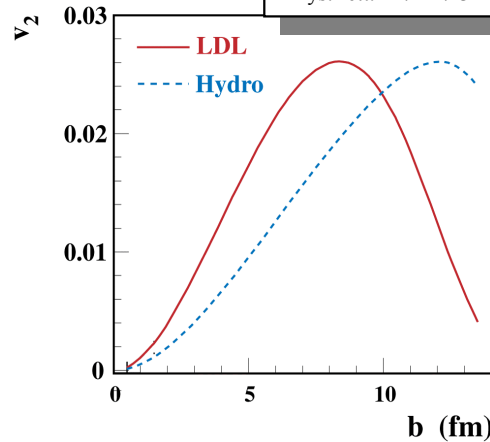


- L'hydro idéale reproduit bien la dépendance en masse.
- Cependant pas complètement pour les particules plus massives.
- Un modèle de cascade dans la phase hadronique semble améliorer les choses...
- Quelle information sur l'EoS ?

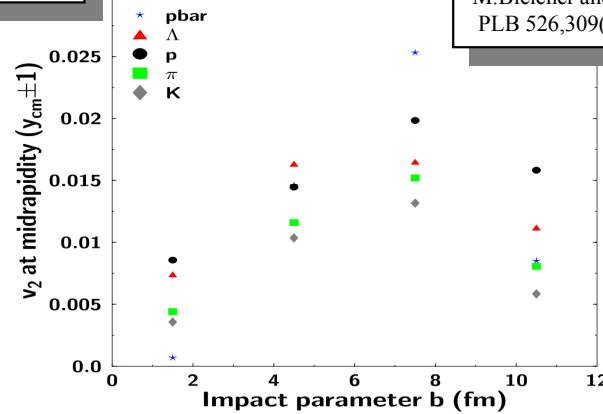
Hydro idéale incomplète ?

Dépendance en centralité I

S.A. Voloshin and A.M. Poskanzer,
Phys.Lett.B474 27-32 (2000) 9906075

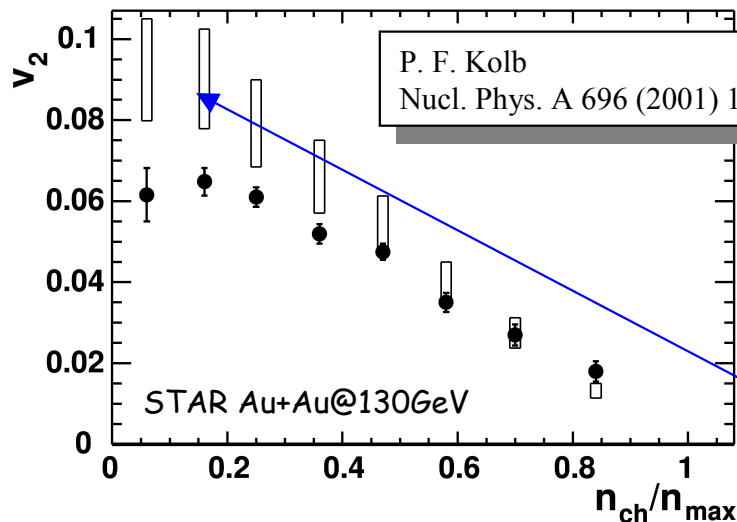


M.Bleicher and H.Stocker
PLB 526,309(2002)

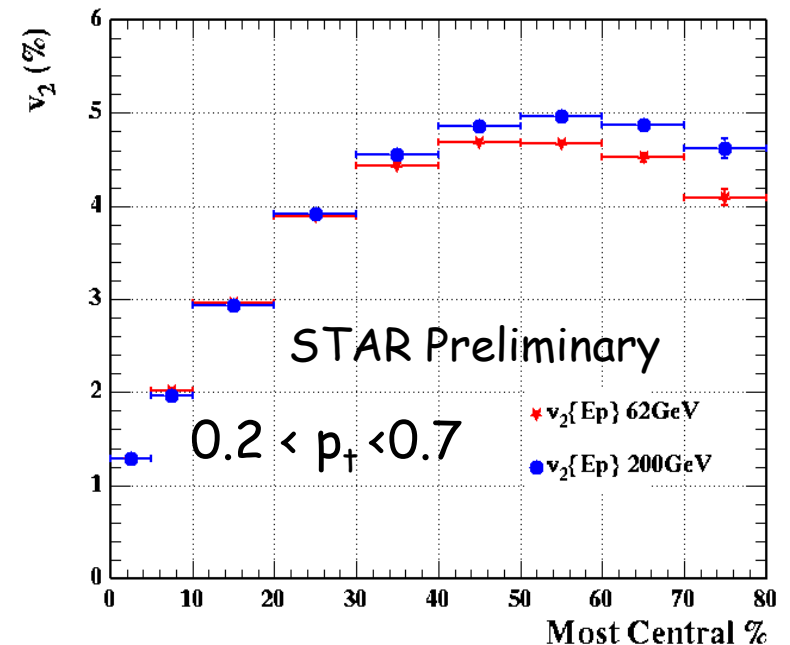


- Dépendance en centralité différente entre hydro (piqué autour de $b=12$ fm) et la Low Density Limit (piqué à $b=8$ fm)
- RQMD v_2 piqué à 8 fm

- Les données passent par un maximum autour de $b=10$ fm entre les prédictions de hydro et LDL.
- Léger shift à droite entre 200 et 62 GeV.
- Ecart théorie expérience pour les collisions plus périphériques

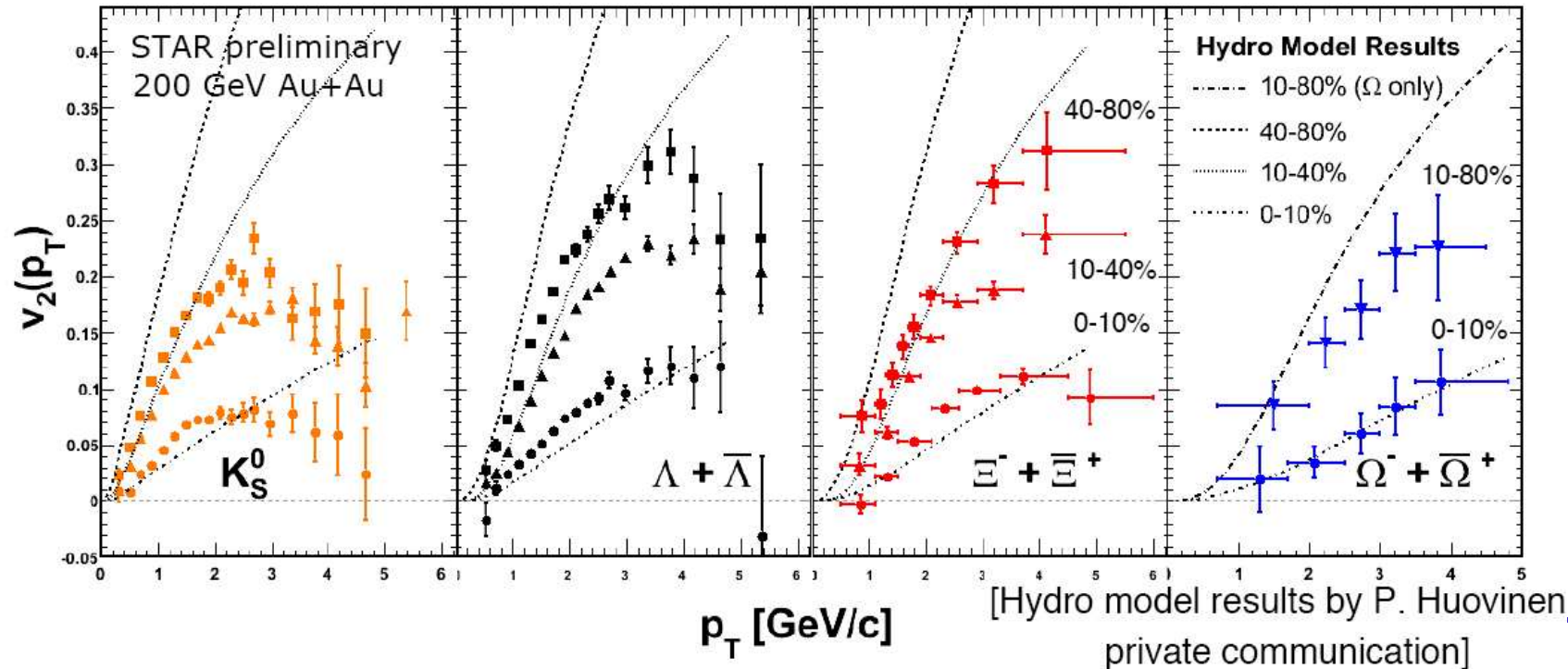
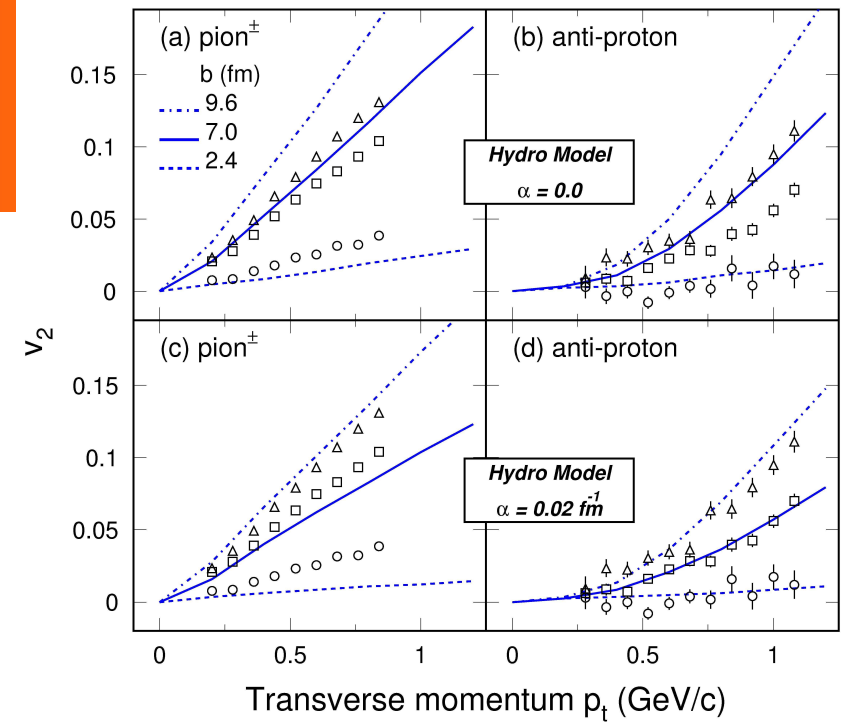


Supposer la thermalisation
génère trop de flot



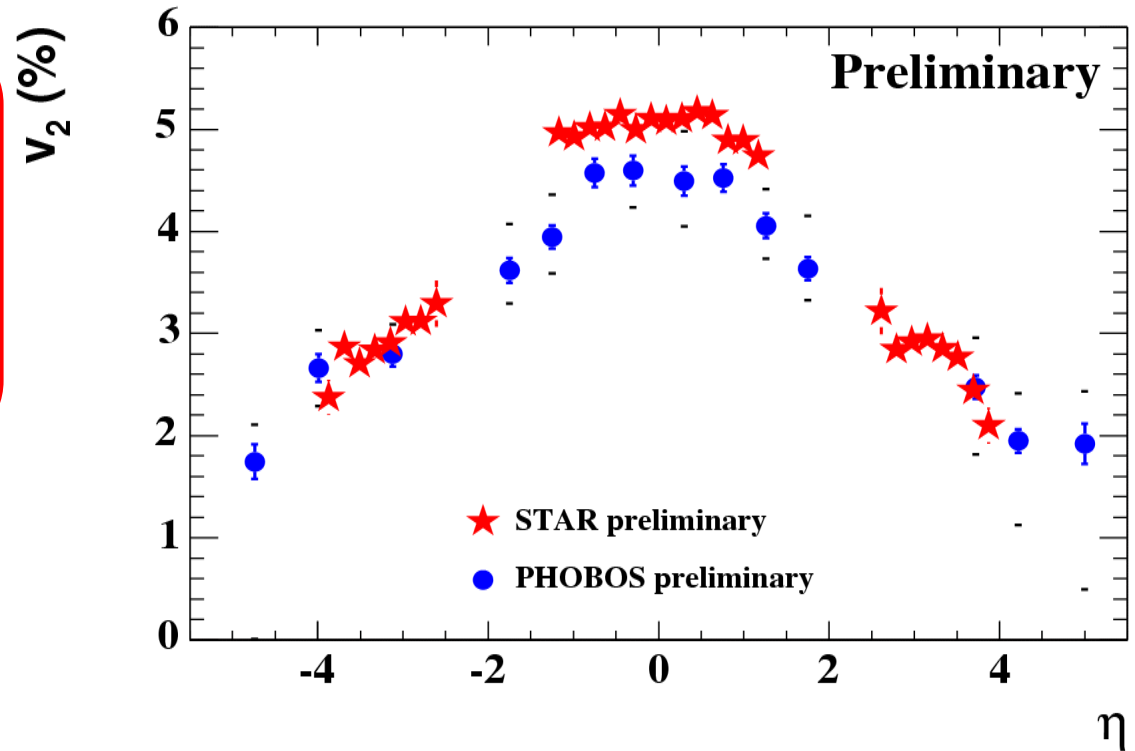
Dépendance en centralité II

- Comparaison à un modèle hydrodynamique idéal (Huovinen)
- Dans l'ensemble, bon accord
- Plus la collision est périphérique, plus les prédictions s'éloignent des données



Dépendance en rapidité

- Détermination du PR dans la TPC
- Le signal de v_2 chute d'un facteur 1.8 de la mi-rapacité à $\eta=3$
- STAR en accord avec les premières mesures de PHOBOS

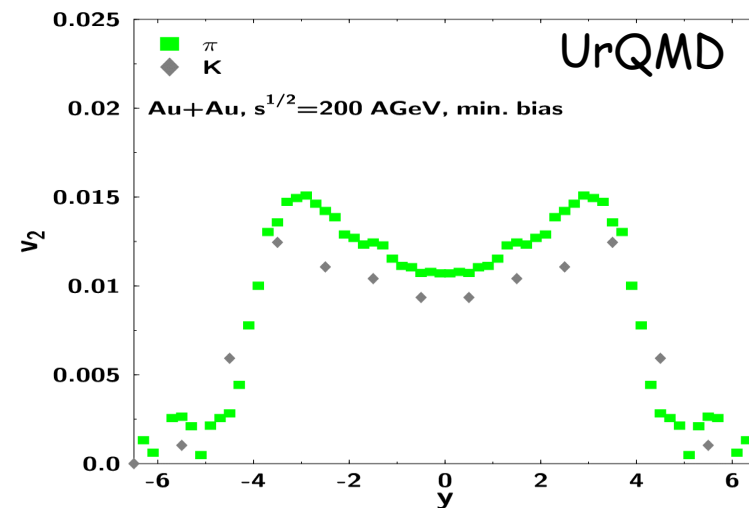
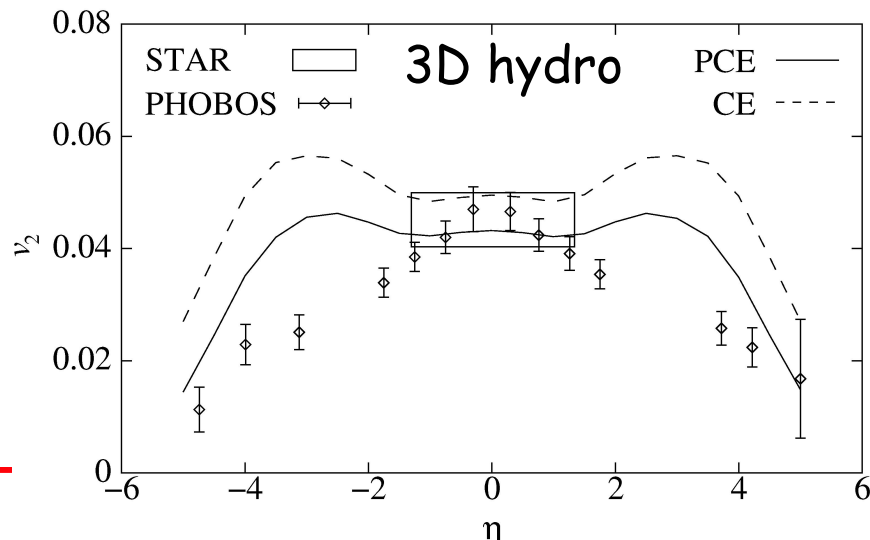
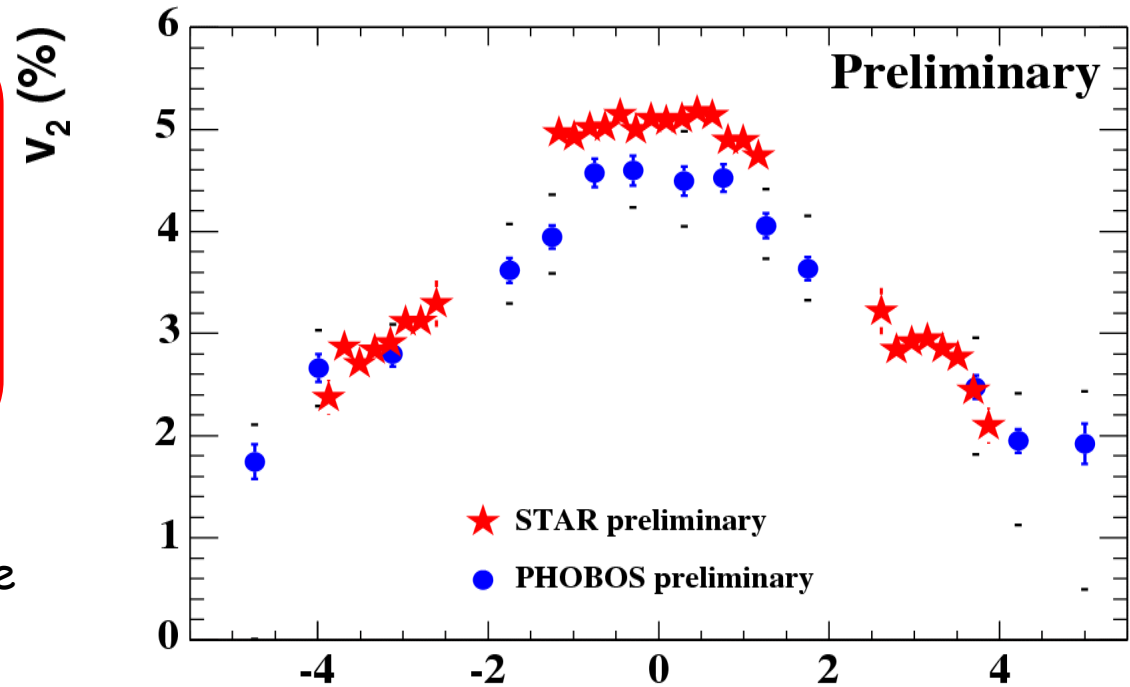


Dépendance en rapidité

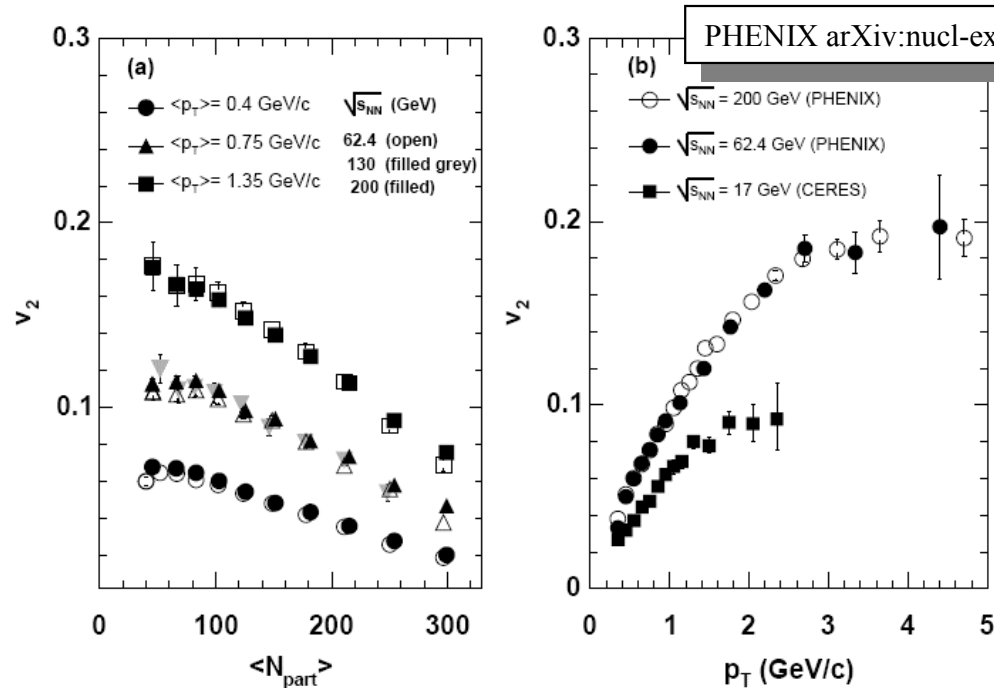
- Détermination du PR dans la TPC
- Le signal de v_2 **chute d'un facteur 1.8** de la mi-rapacité à $\eta=3$
- **STAR** en accord avec les premières mesures de **PHOBOS**

Modèles : en désaccord à plus haute rapidité car supposent l'invariance de Lorentz suivant z

=> **Nécessité de travailler en 3D**



Dépendance en énergie



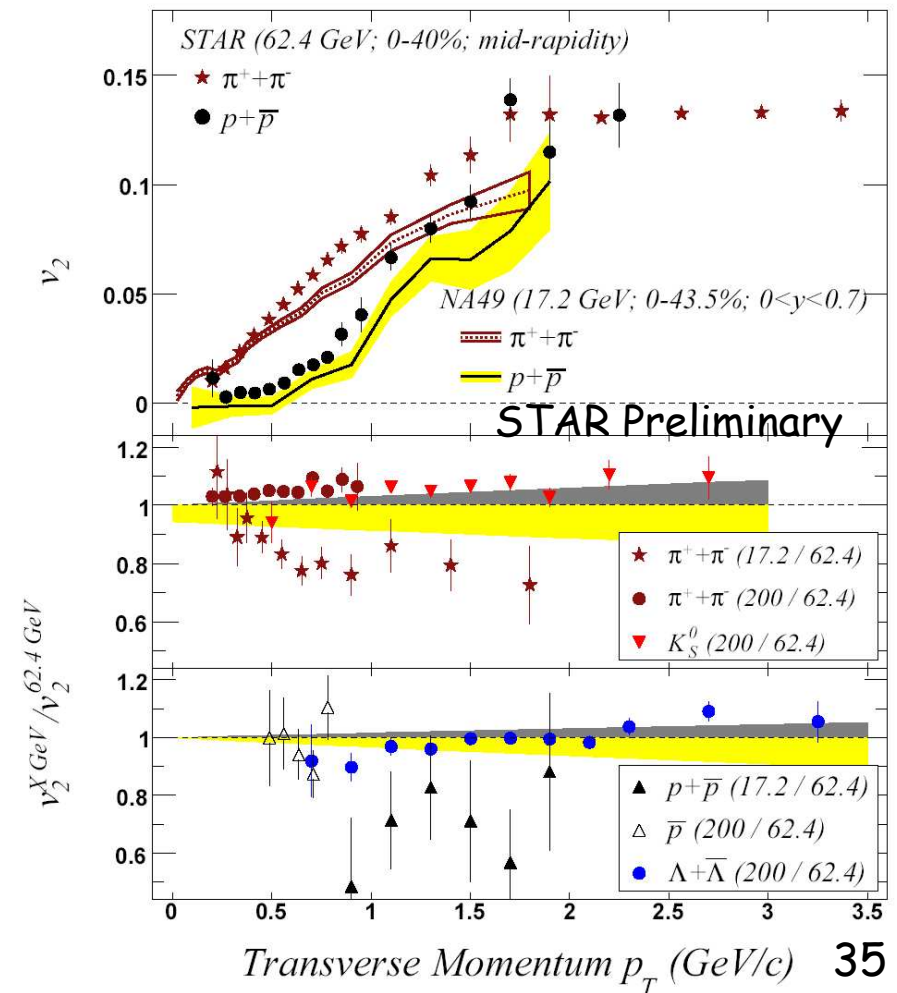
● Différence d'environ 5% dans les collisions plus périphériques

● PHENIX observe un $v_2(p_T)$ quasi similaire entre 62, 130 et 200 GeV par rapport au SPS

● PHENIX : EOS plus douce

● Les mesures de STAR vont dans le même sens

Rapport X GeV/62.4 GeV

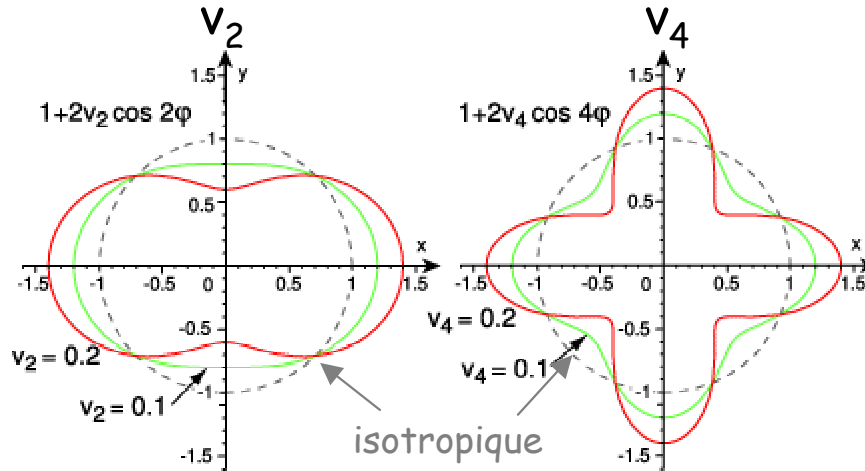


Harmoniques supérieures

P. Kolb

PRC 68, 031902(R)

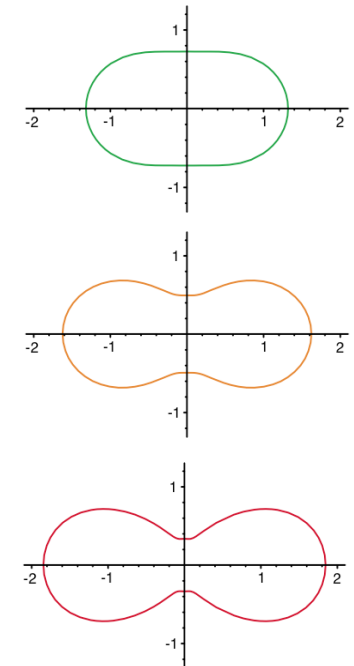
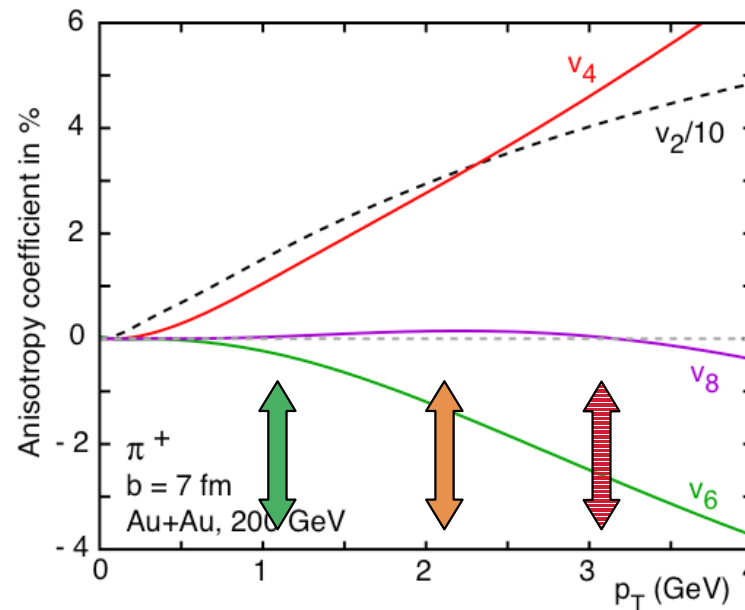
Différentes composantes de $dN/d\phi$:



Espace des impulsions, coordonnées polaires.

- Non équilibre chimique hadronique inclus dans hydro
- Intérêt plus fort pour v_4 , même si faible, important pour le QGP ?
- La forme des v_n change avec p_T . L'hydro prévoit une forme de cacahouète à haut p_T
- v_6 trop faible pour dire quoique ce soit mais négatif

- les conditions initiales de l'hydro influence l'amplitude et également le signe de v_n
- v_4 est également sensible à la dynamique du système
- v_4 a un fort potentiel pour contraindre les calculs du modèle hydro



Mesure de v_2 et v_4 vs η par STAR

Corrélation à 3 particules et méthode des cumulants avec harmoniques mixées :

Poskanzer and Voloshin, Phys. Rev. C 58, 1671 (1998)

N. Borghini, P.M. Dinh, and J.-Y. Ollitrault, Phys. Rev. C 64, 054901 (2001)

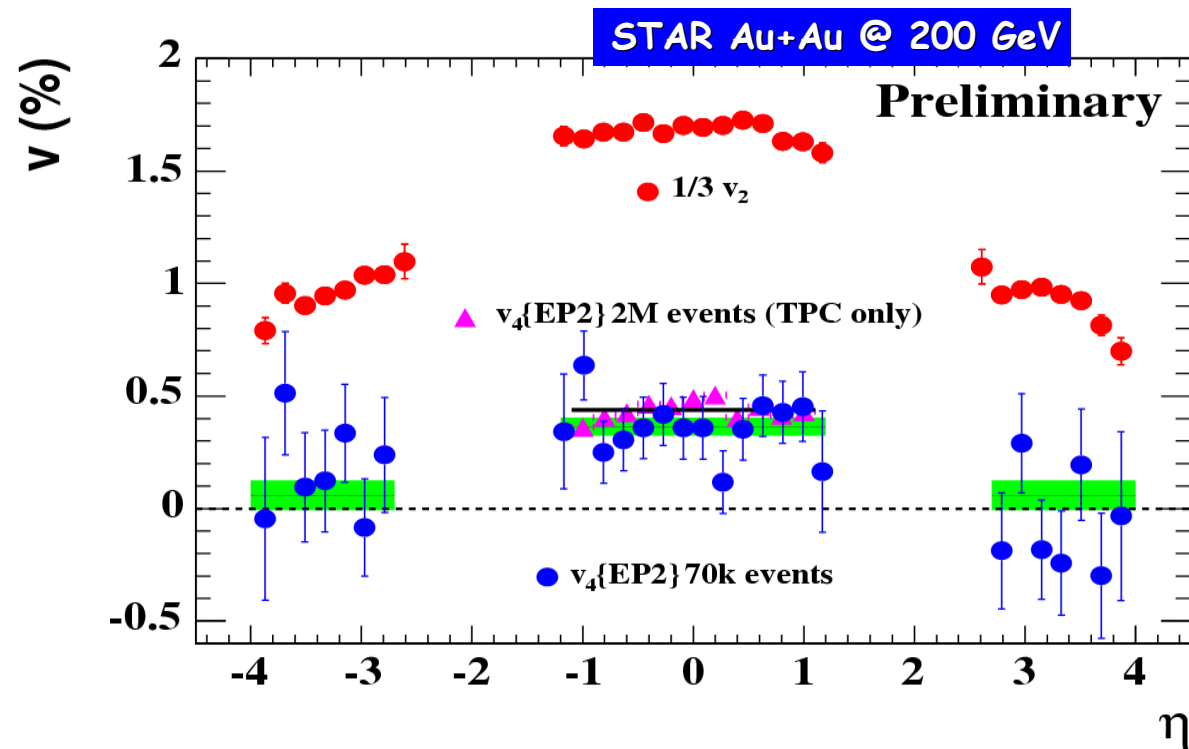
- v_2 chute d'un facteur
1.8 entre $\eta=0$ et $\eta=3$

- $v_4(|\eta| < 1.2) = (0.4 \pm 0.1)\%$

- $v_4 = (0.06 \pm 0.07)\% \sim 0$
à rapidité à l'avant et à
l'arrière

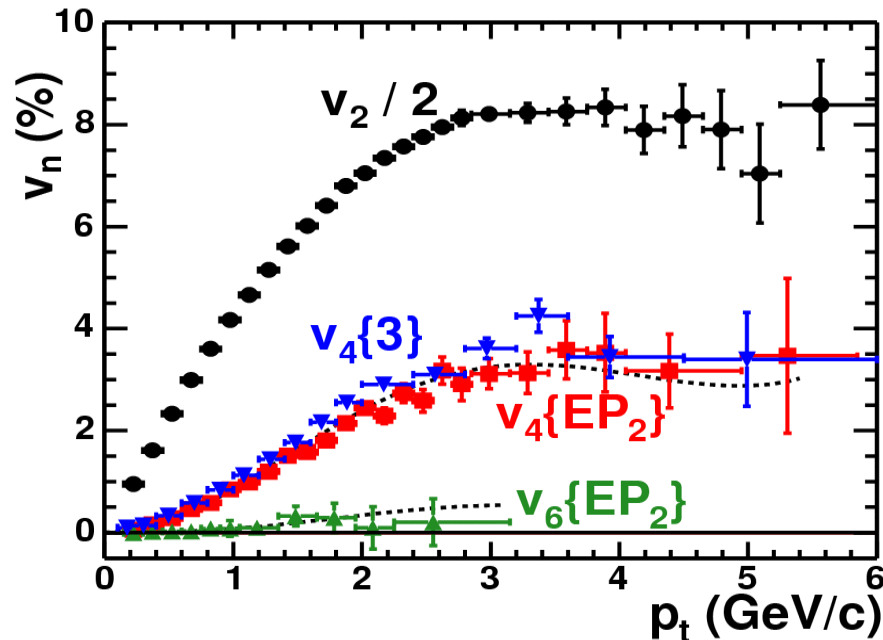
- v_4 chute plus
rapidement que v_2

Consistant
scaling $v_4 \propto v_2^2$

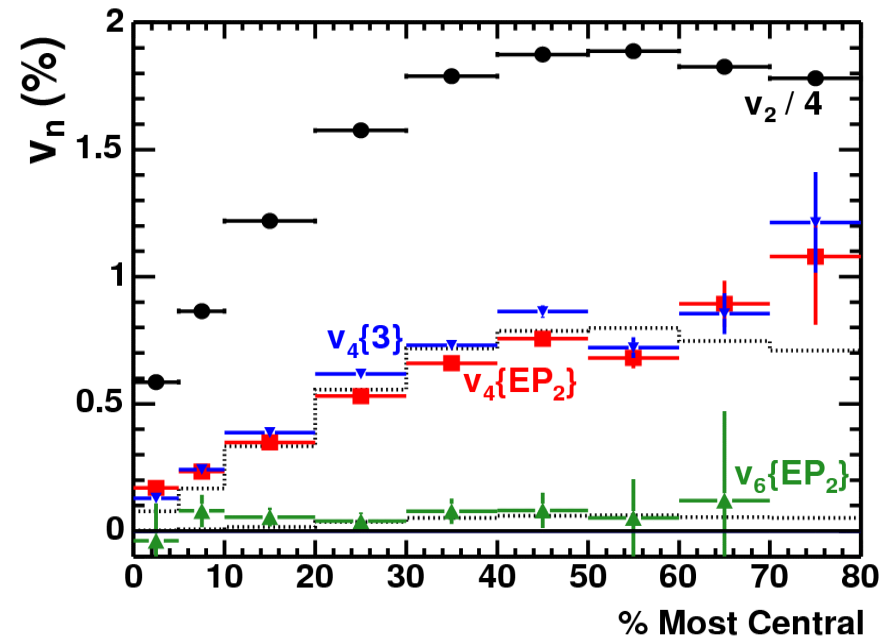


STAR v_4 et v_6

Dépendance en p_T



Dépendance en centralité



v_4 comparé à v_2 :

- Intégré, plus petit d'un facteur 12
- v_4 de taille non négligeable ($v_{4\max} \sim 3\%$)
- Scale avec v_2^2

v_6 comparé à v_2 :

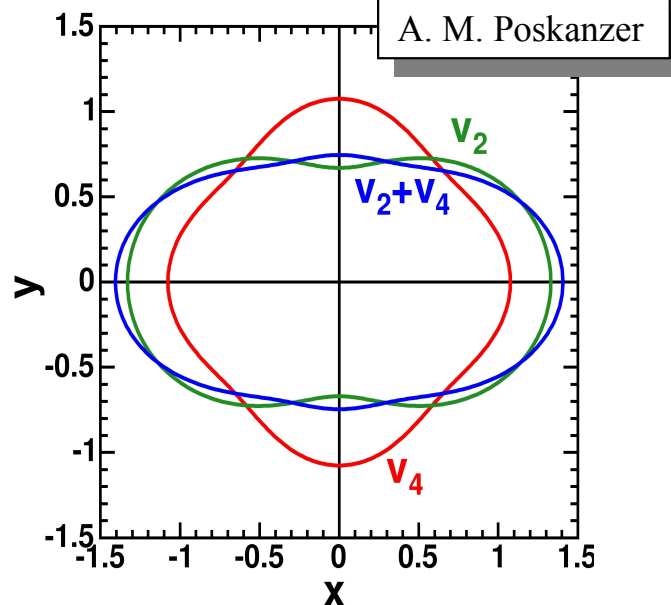
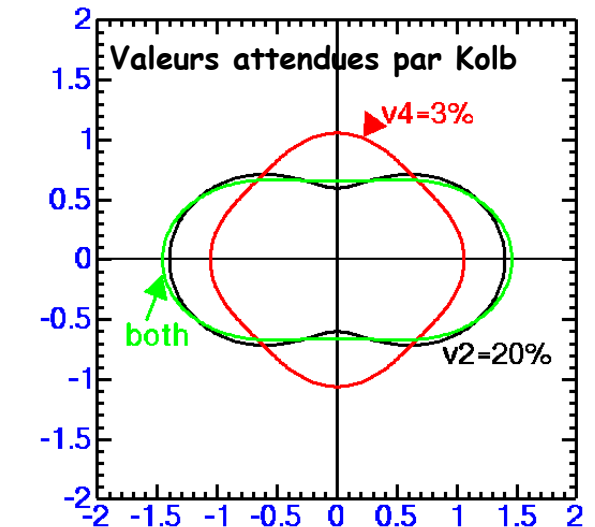
- Intégré, encore plus petit d'un facteur 10 supplémentaire par rapport à v_4
- Scale avec v_2^3

Hydro sensible aux conditions initiales :

- v_4 en très bon accord avec hydro
- $v_6 \sim 0$ et non négatif \Rightarrow désaccord avec hydro

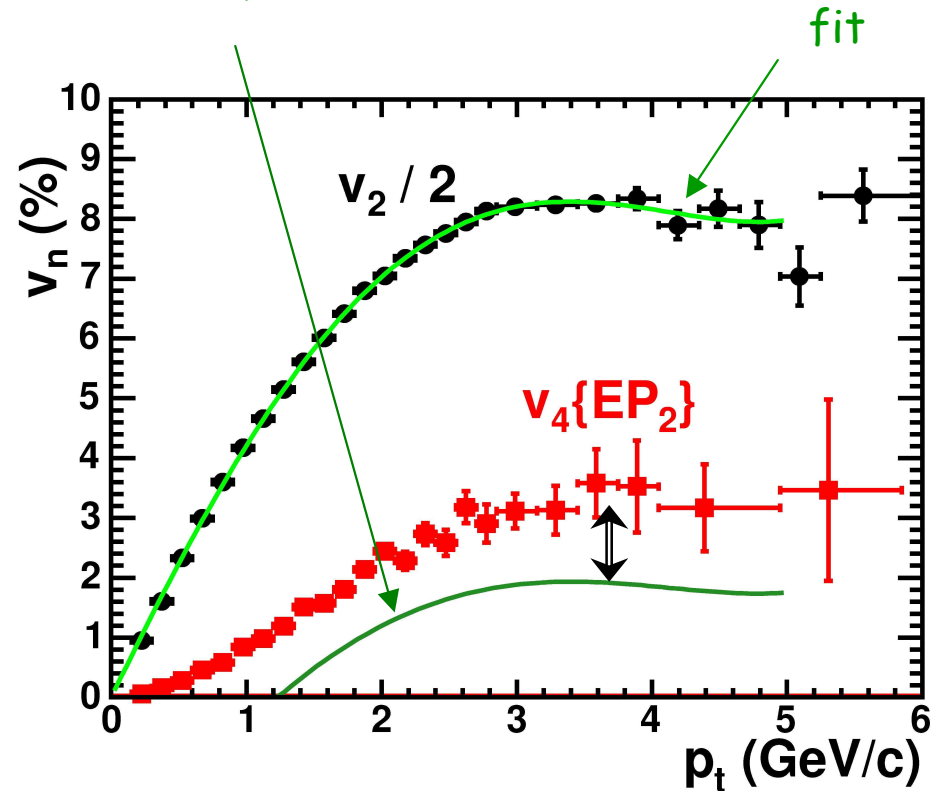
Déformation polaire

$$1 + 2v_2 \cos(2\phi) + 2v_4 \cos(4\phi)$$



Pour ne pas avoir de déformation avec la somme $v_2 + v_4$, Kolb prévoit :

$$v_4 = (10 * v_2 - 1) / 34$$



v_4 est **trop grand** par rapport à la valeur qu'il faudrait qu'il ait pour récupérer une forme **elliptique**