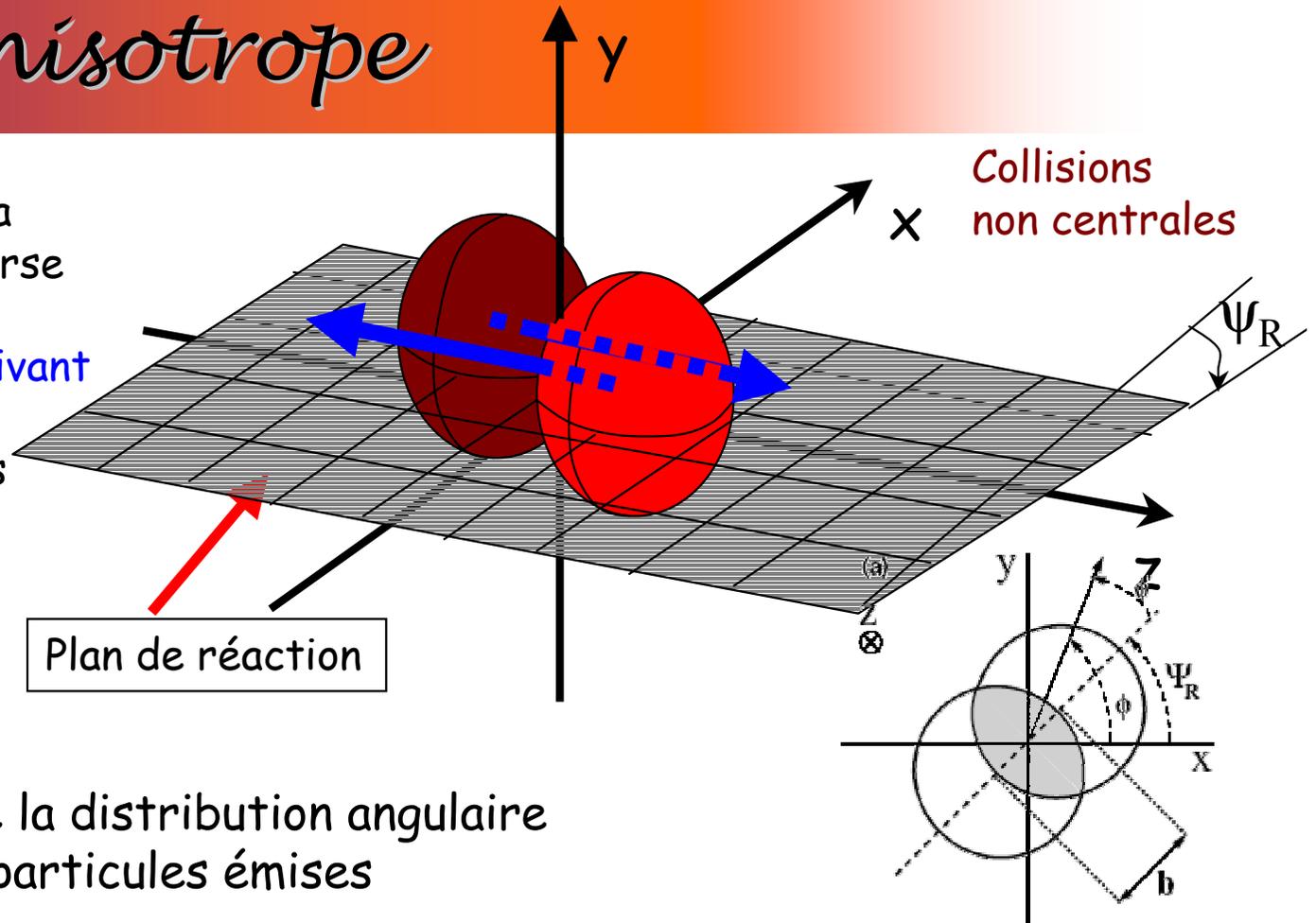


*II - Des observables parlantes de
l'hydrodynamique :
 v_1 , v_2 et harmoniques supérieures*

Flot anisotrope

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



Expansion de Fourier de la distribution angulaire transverse des particules émises

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

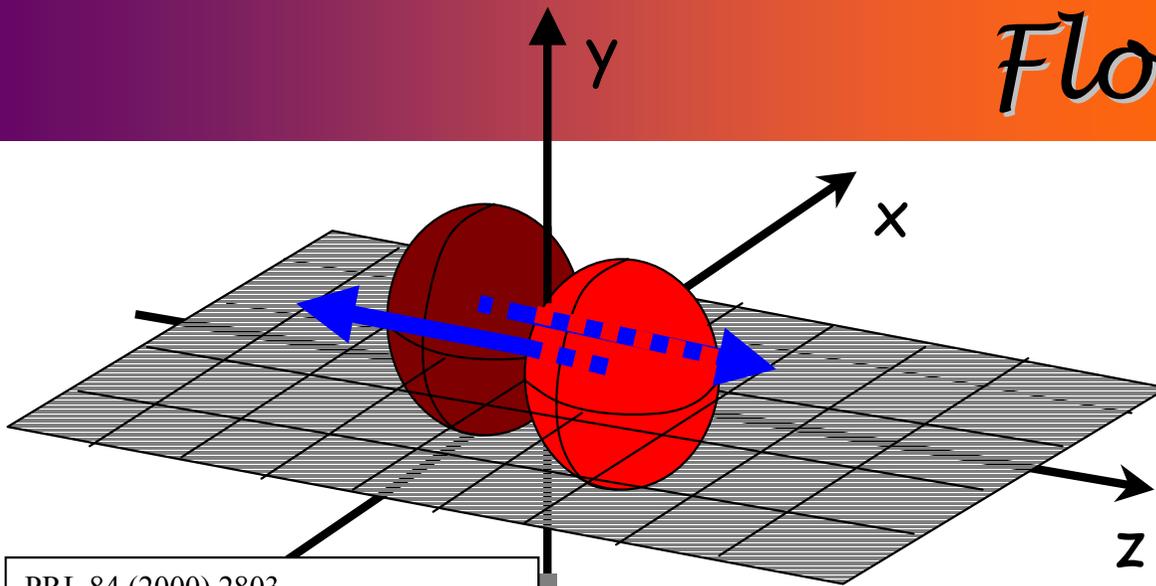
$$p_t = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$$

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

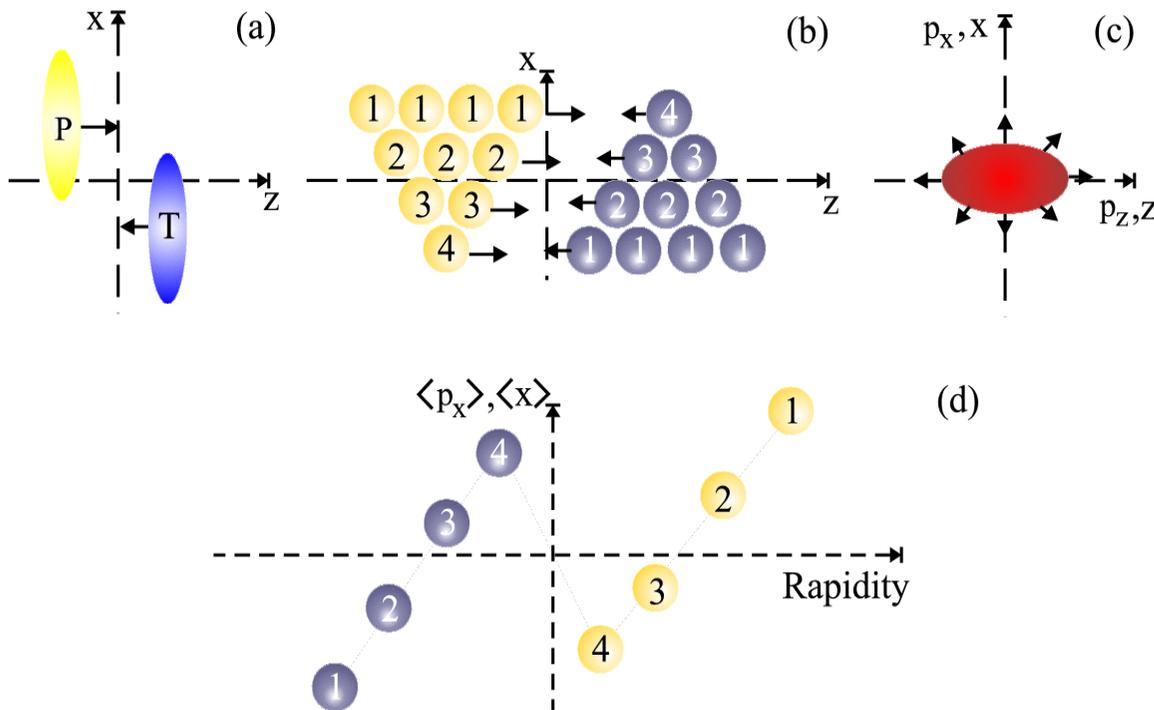
Phys. Rev. D 46, 229 (1992)
J-Y Ollitrault

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 :

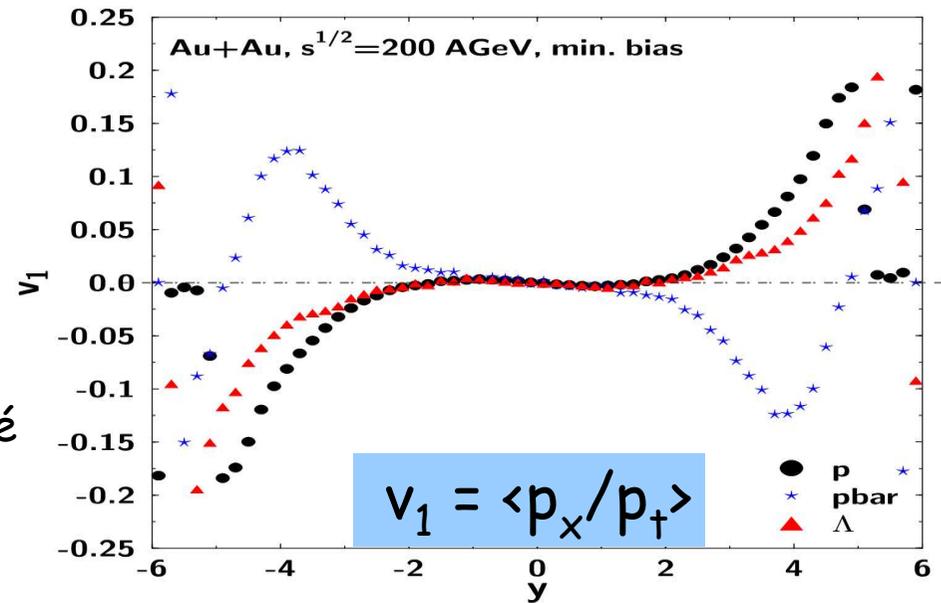
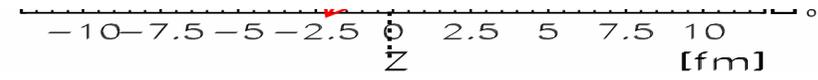
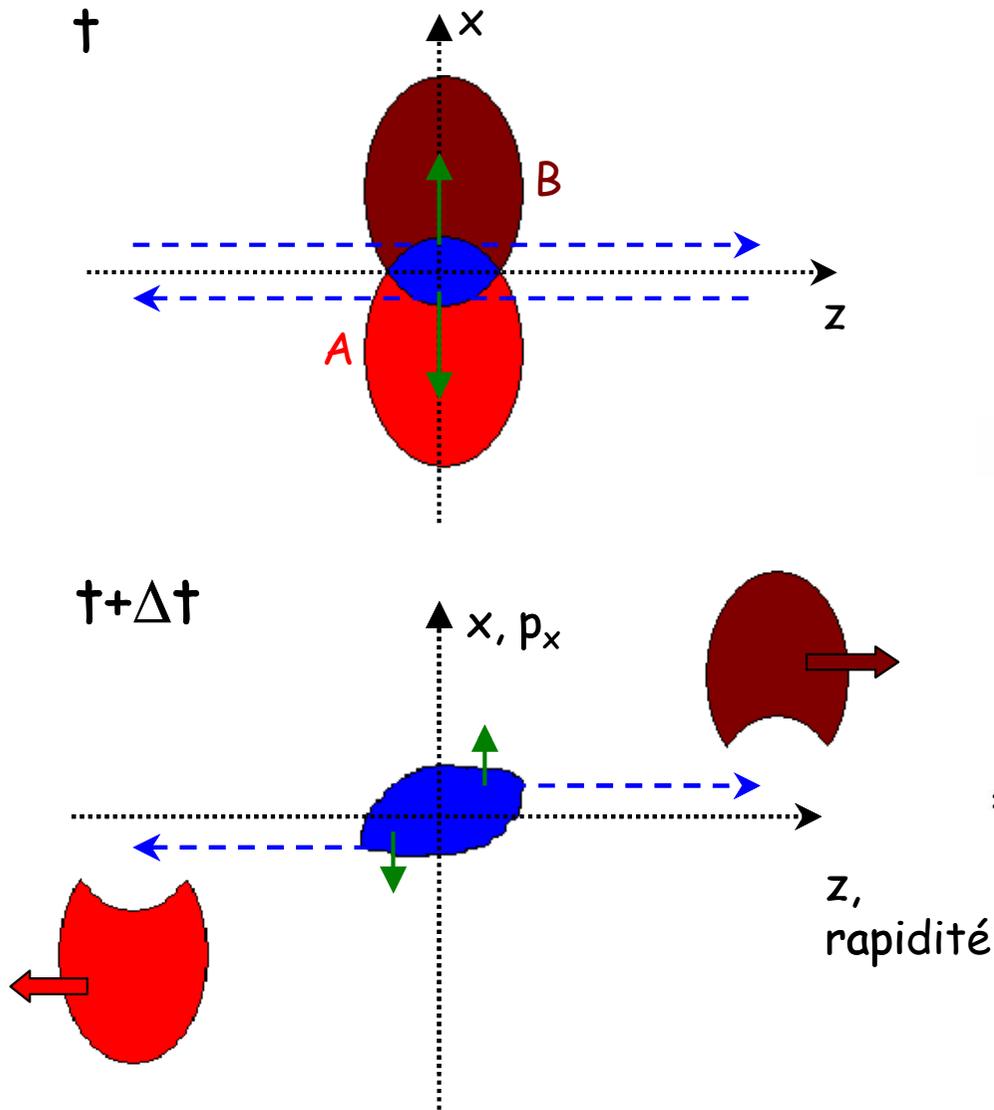
- Impulsion initiale longitudinale
- Anisotropie spatiale donc de matière => gradient de pression transverse p exercé sur la surface transverse A_T
- Pouvoir d'arrêt et effet de shadowing des participants et spectateurs

➤ v_1 renseigne sur :

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

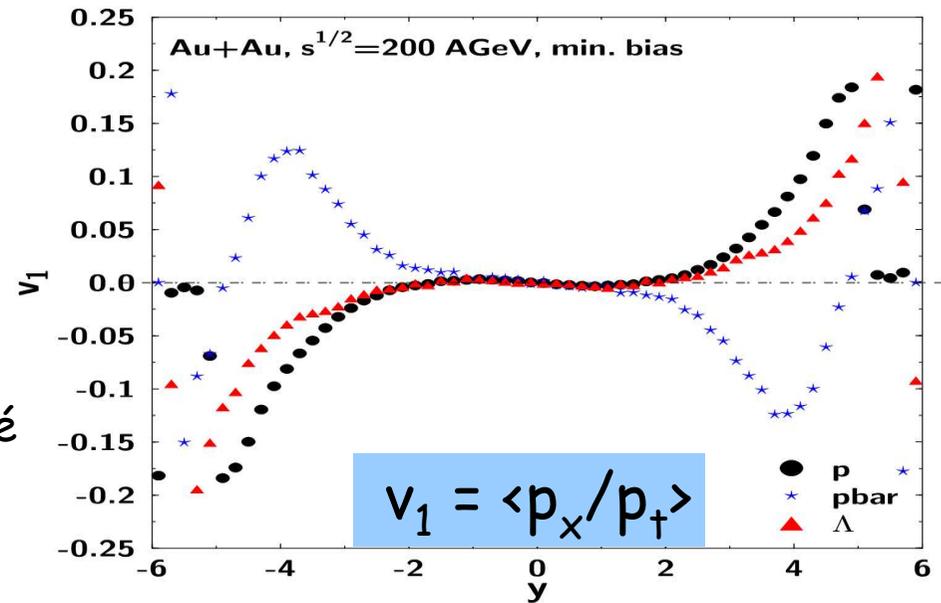
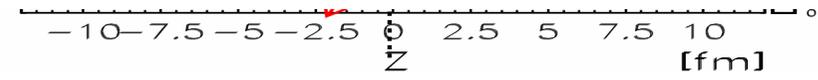
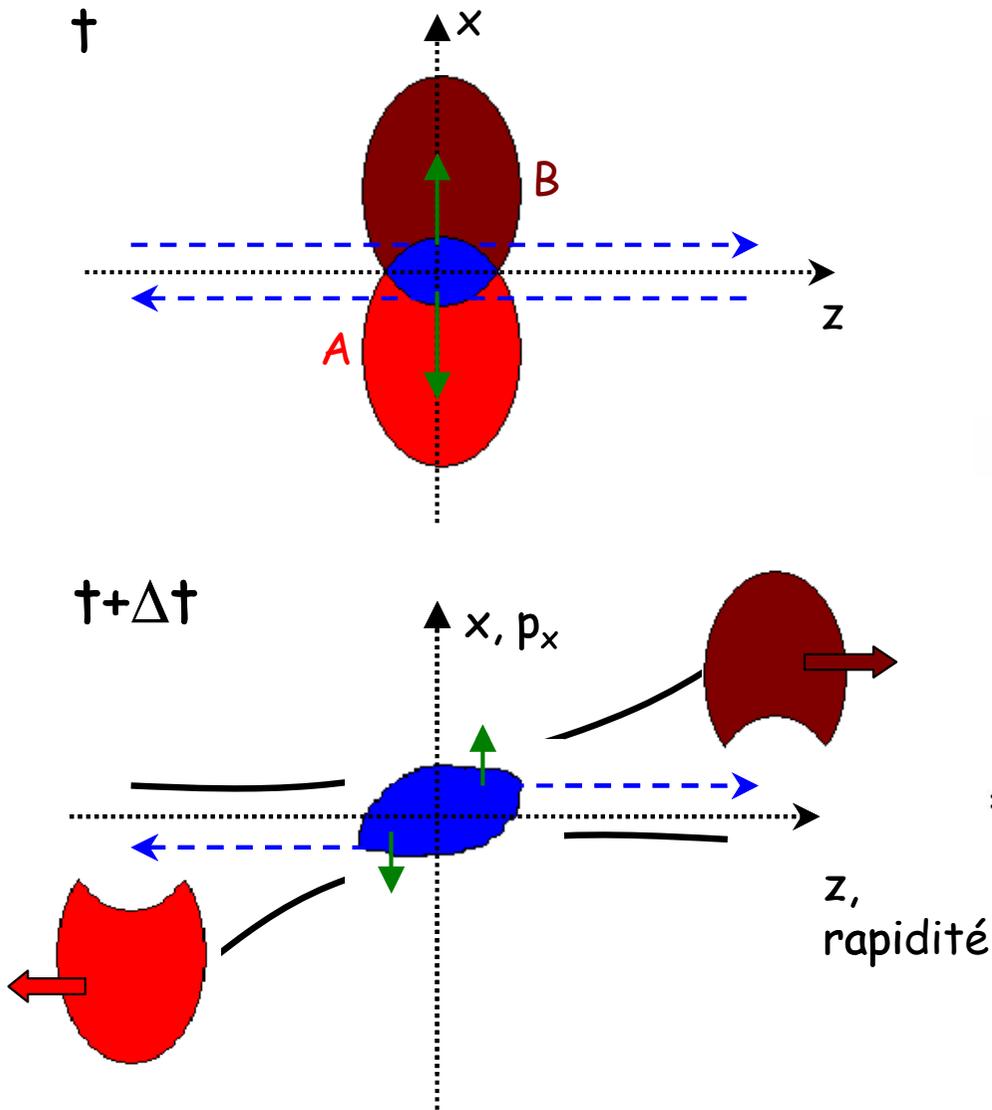
Flot direct v_1

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



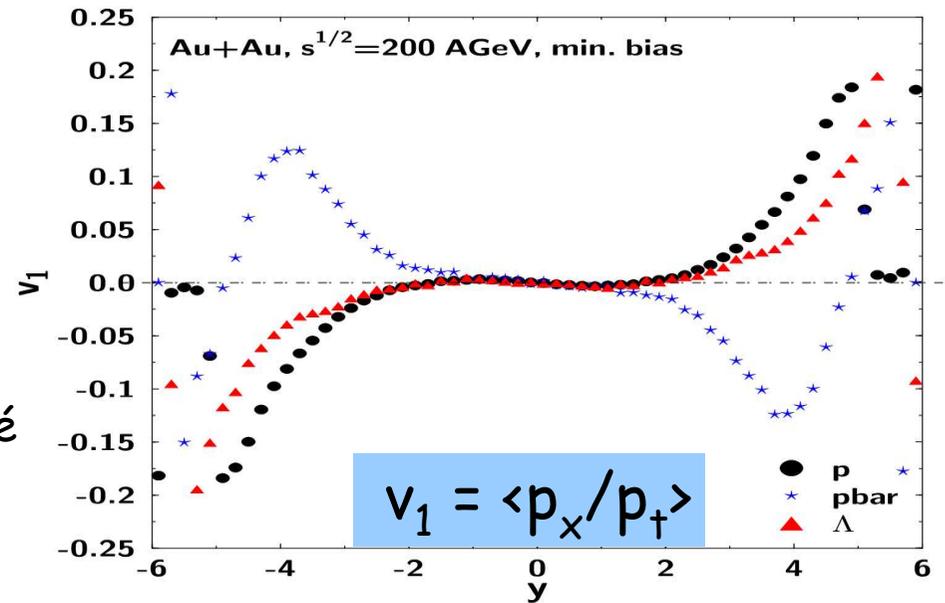
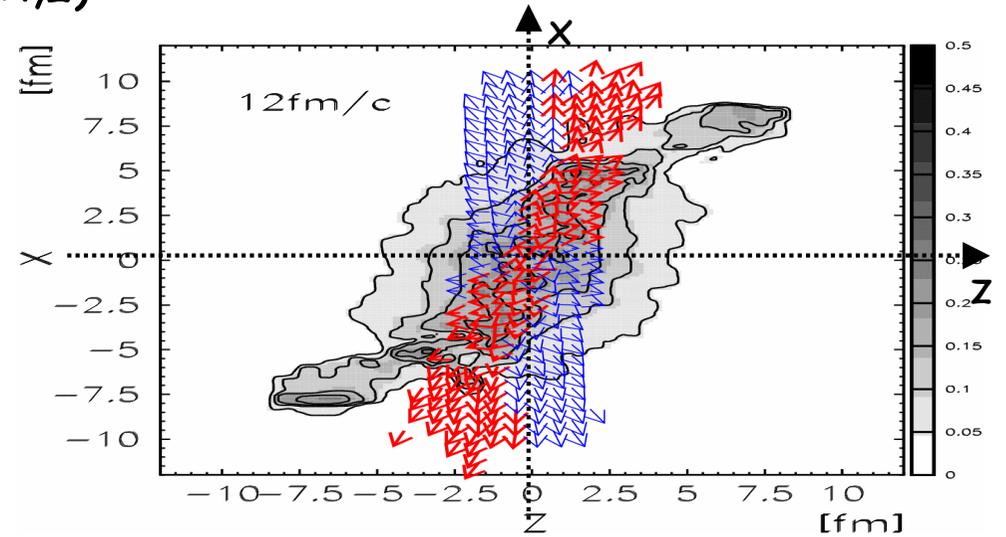
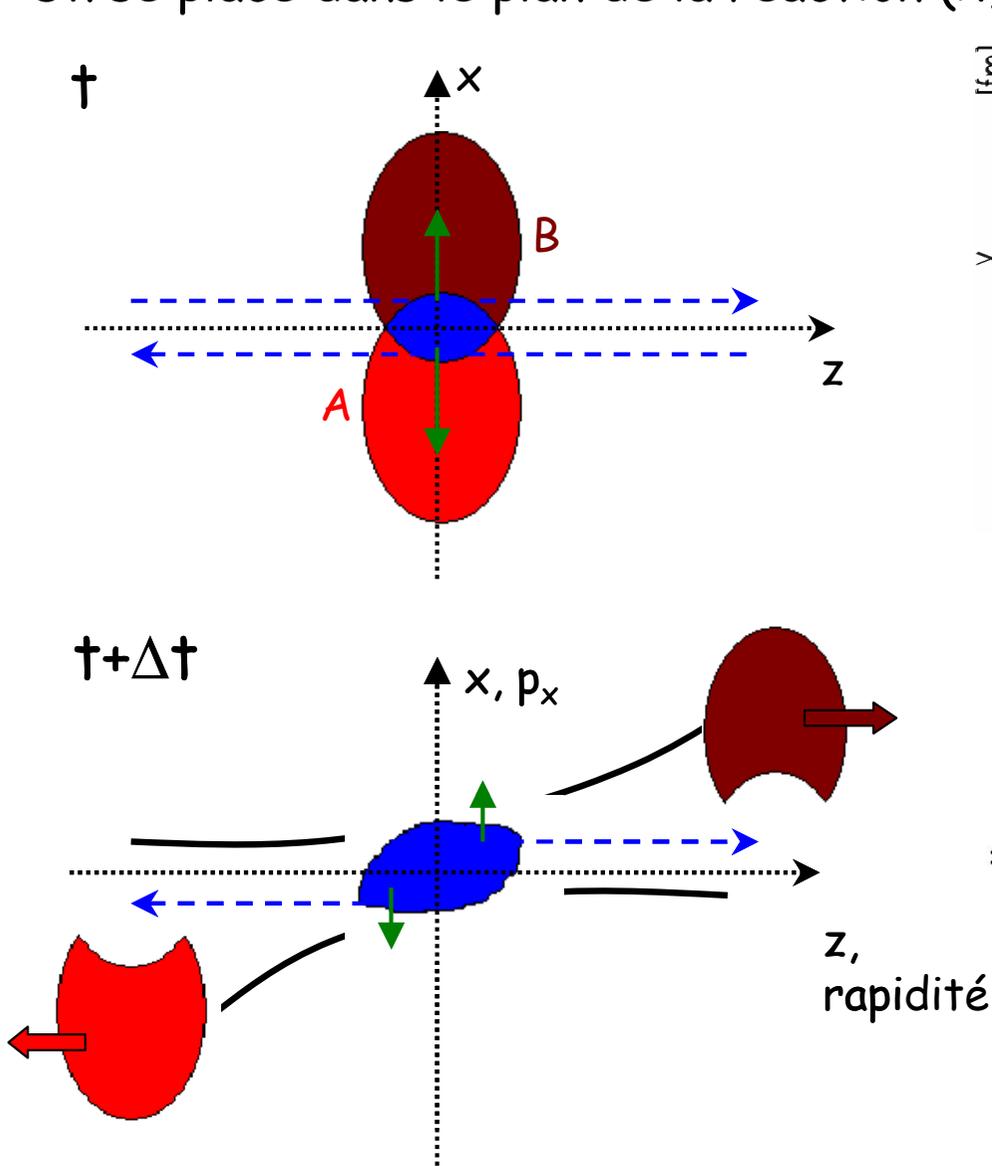
Flot direct v_1

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



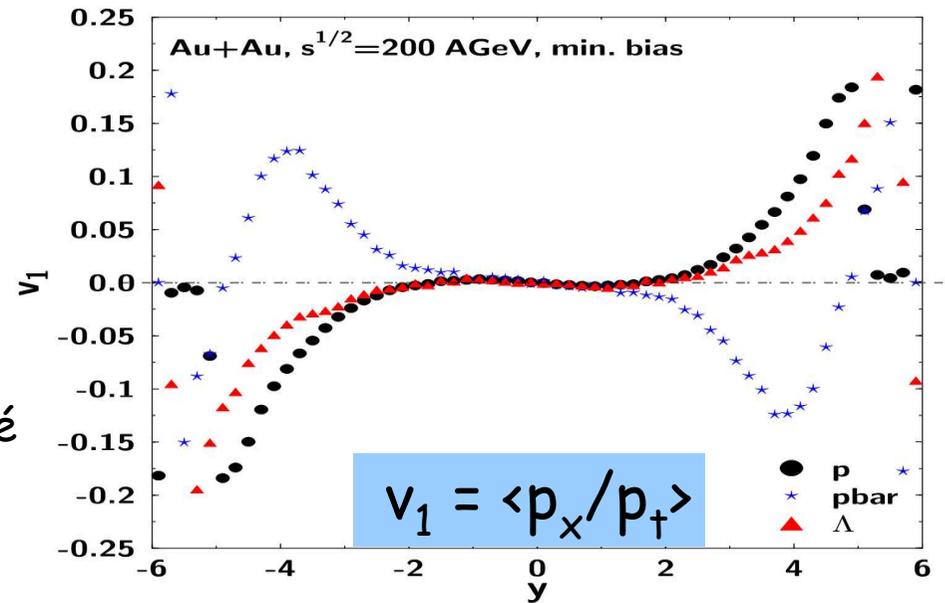
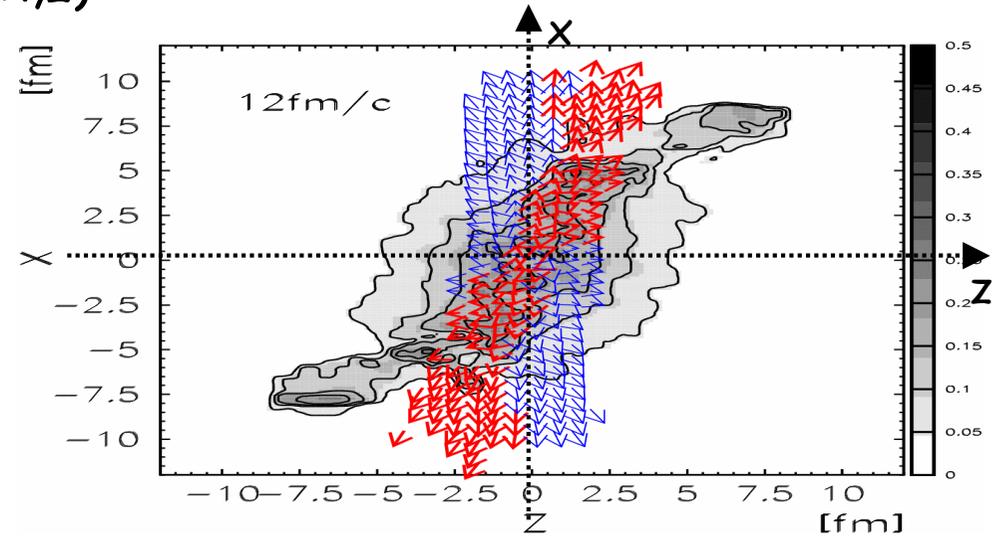
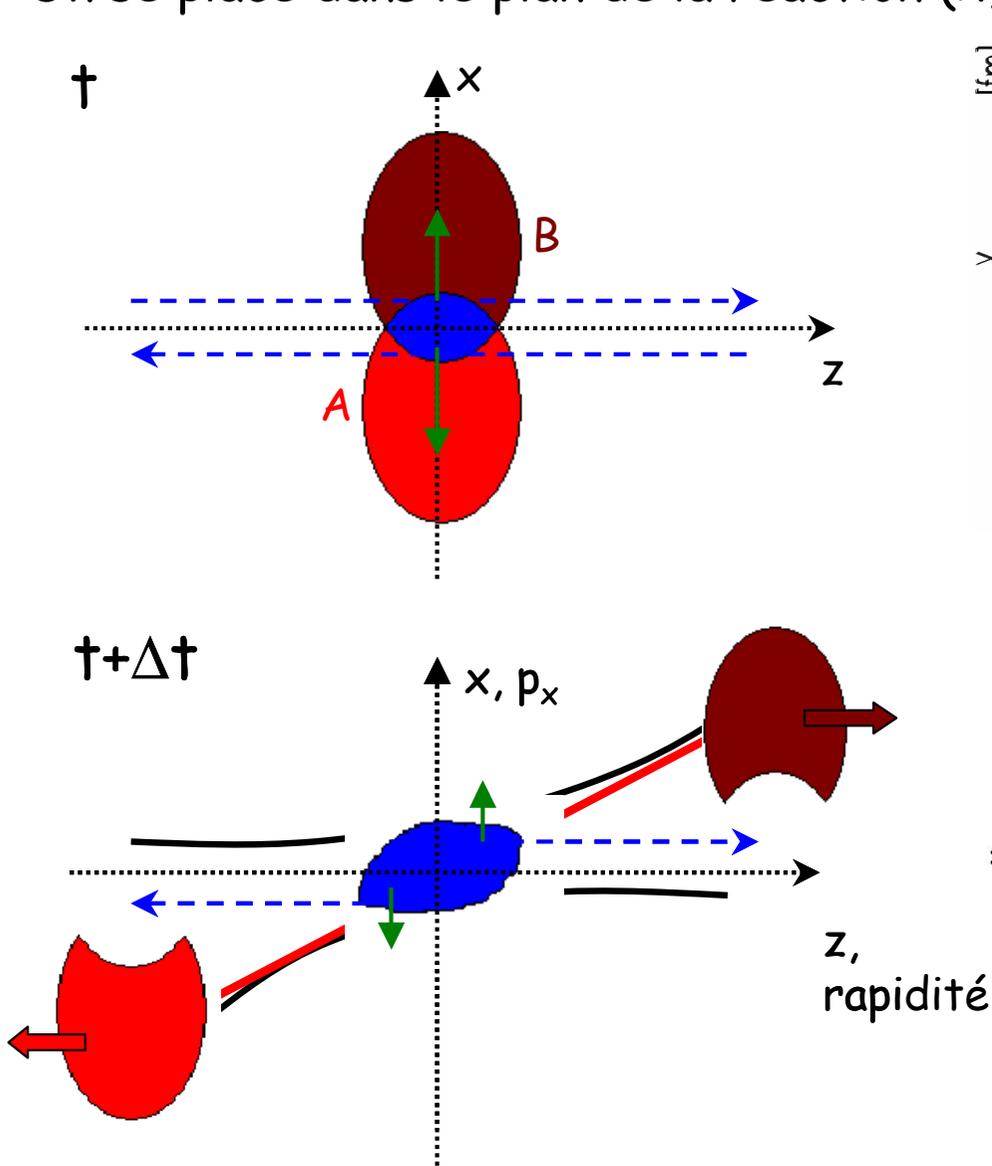
Flot direct v_1

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

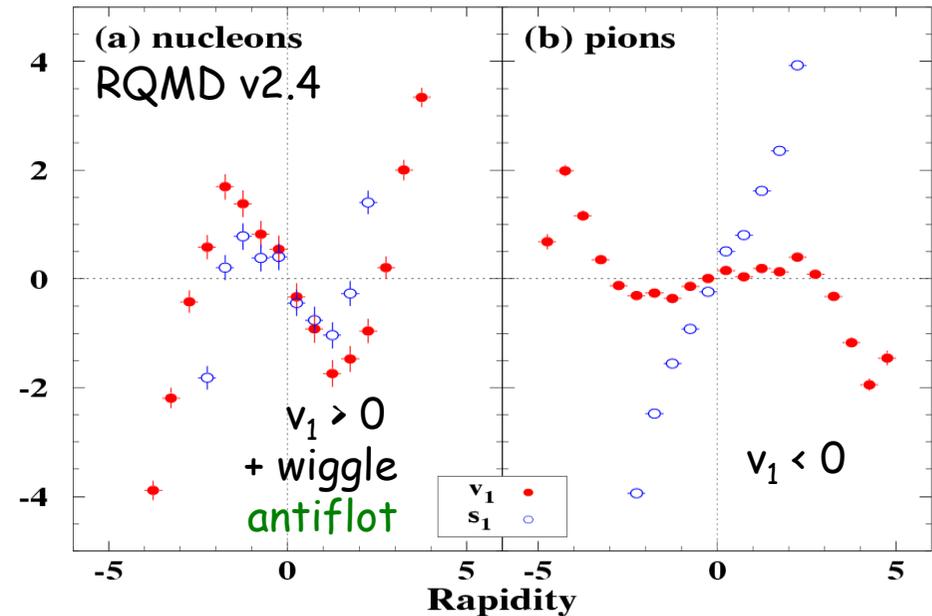
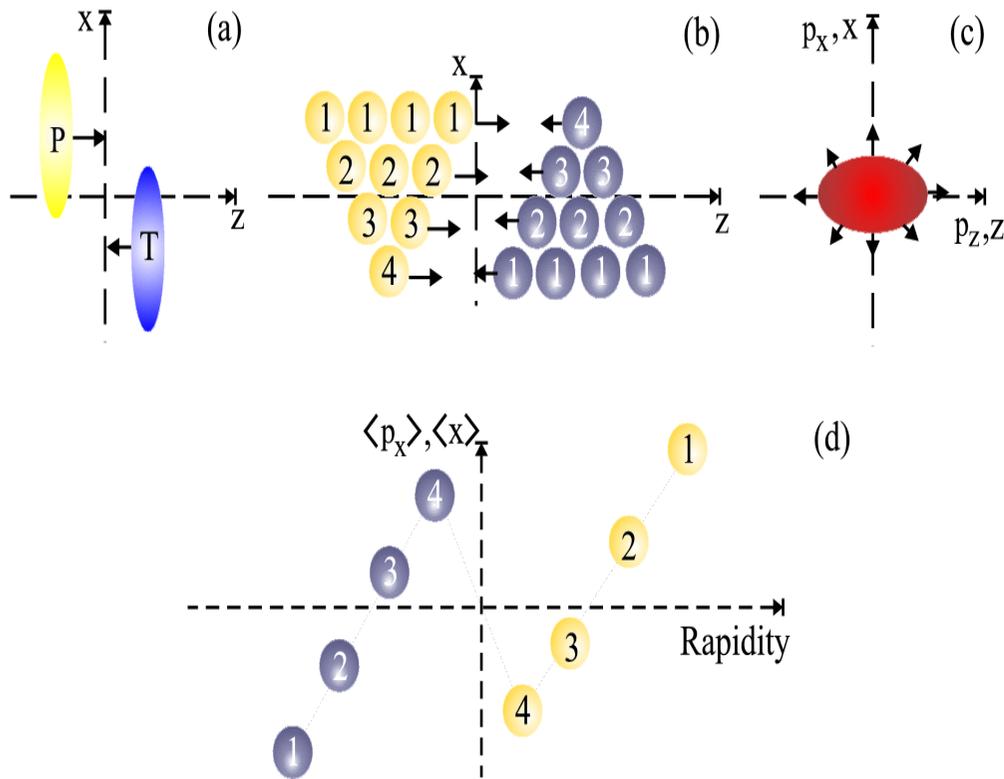


Flot direct v_1

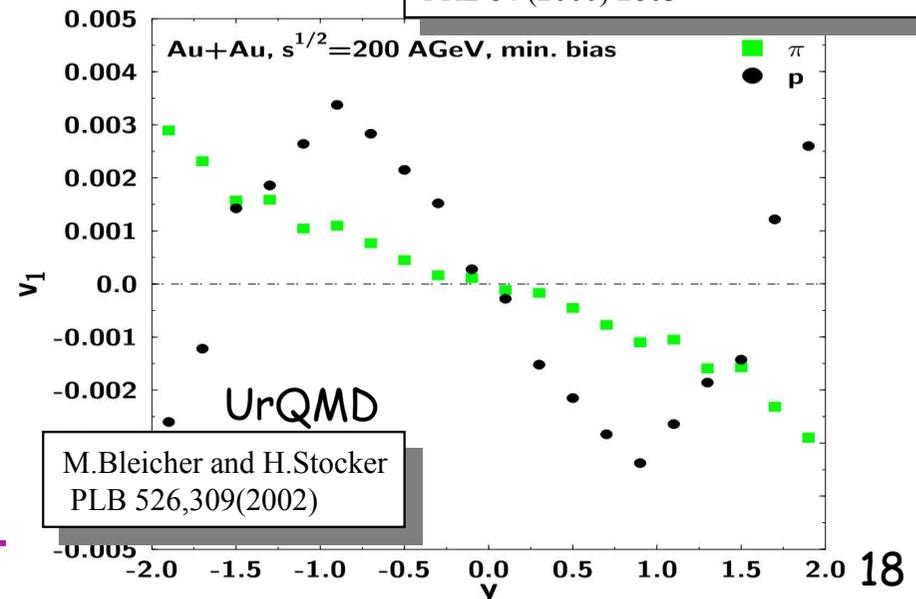
On se place dans le plan de la réaction (x,z)



Flot direct et pouvoir d'arrêt

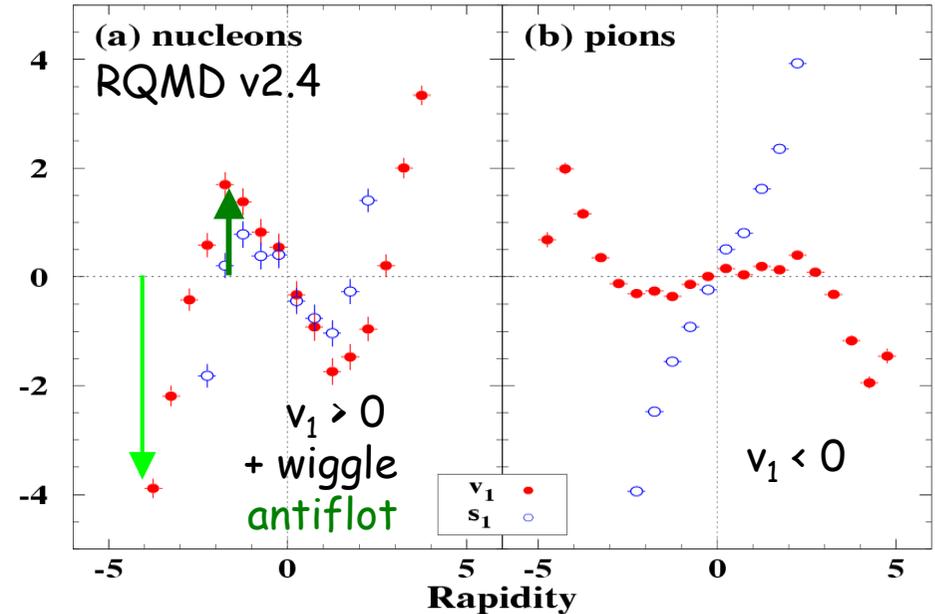
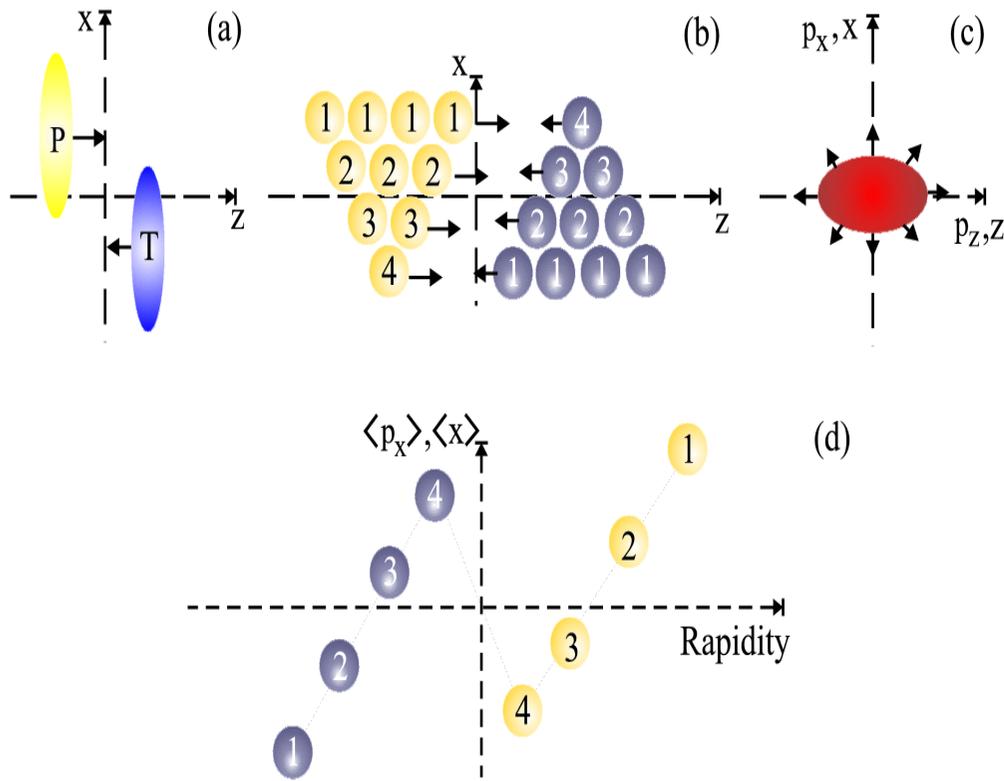


Snellings, Sorge, Voloshin, Wang & Xu
PRL 84 (2000) 2803

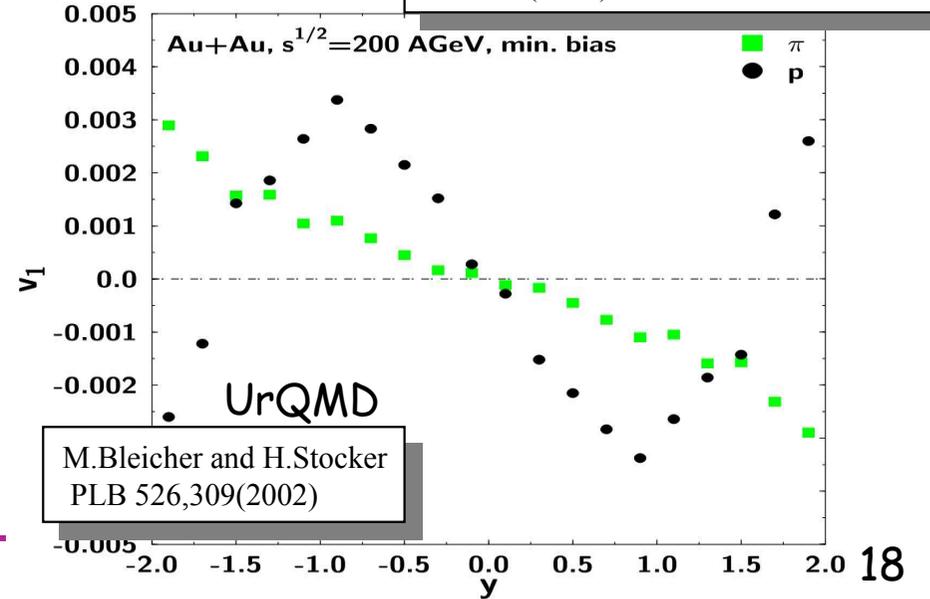


- Les modèles RQMD et UrQMD prédisent v_1 vs rapidité
- Corrélation espace (x,z) / espace des impulsions positive $\rightarrow v_1$ "wiggle".
- PQG non nécessaire pour décrire cette tendance

Flot direct et pouvoir d'arrêt



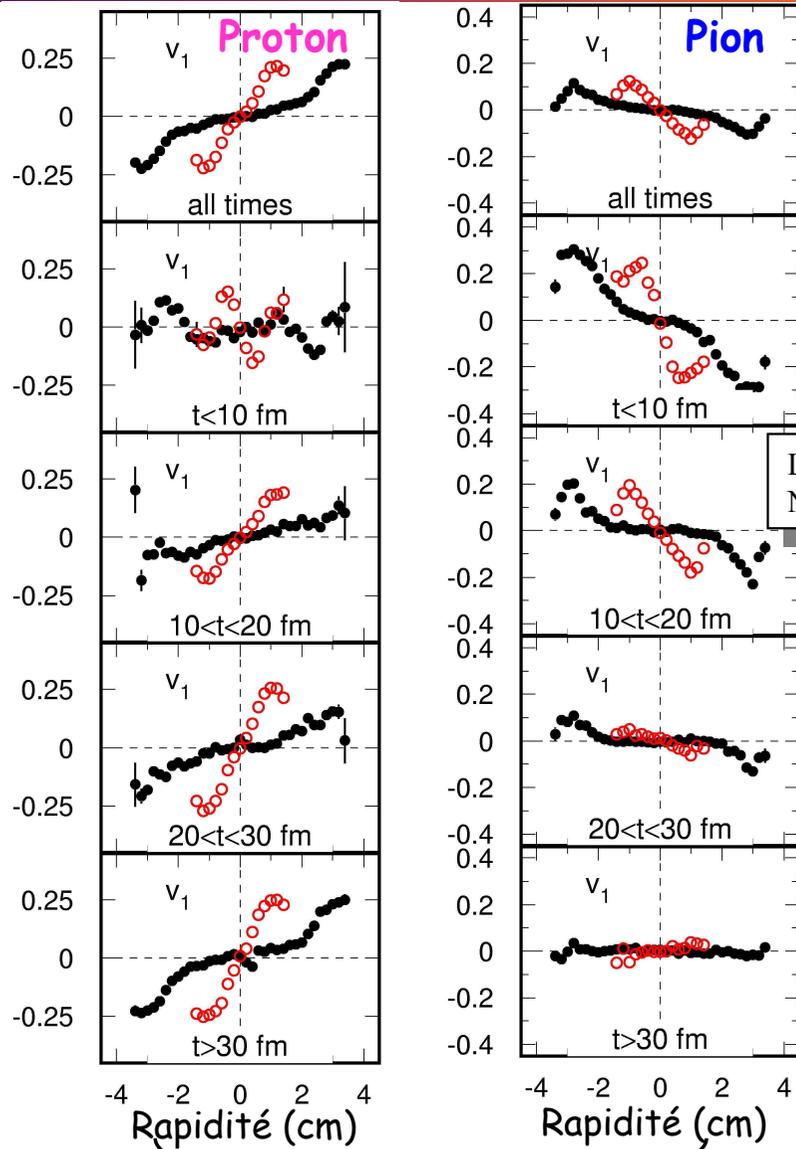
Snellings, Sorge, Voloshin, Wang & Xu
PRL 84 (2000) 2803



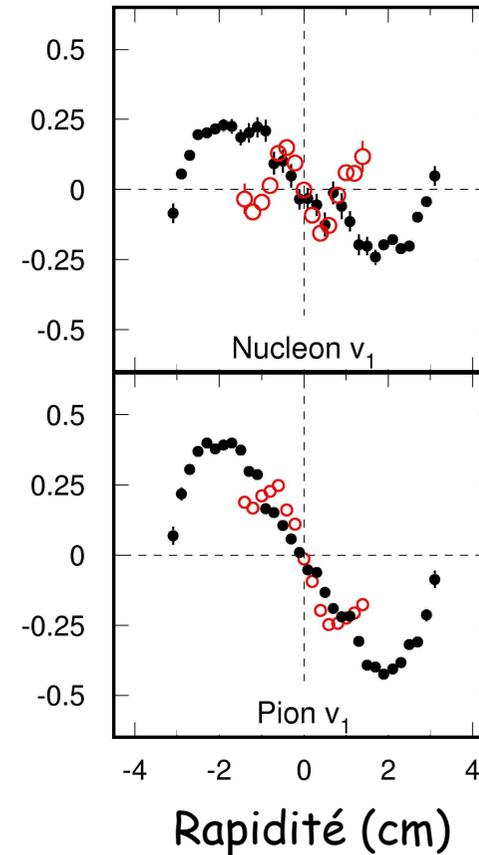
M. Bleicher and H. Stocker
PLB 526,309(2002)

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

Evolution de v_1 avec le temps



0 < τ < 12 fm/c
0 < τ < 2 fm/c

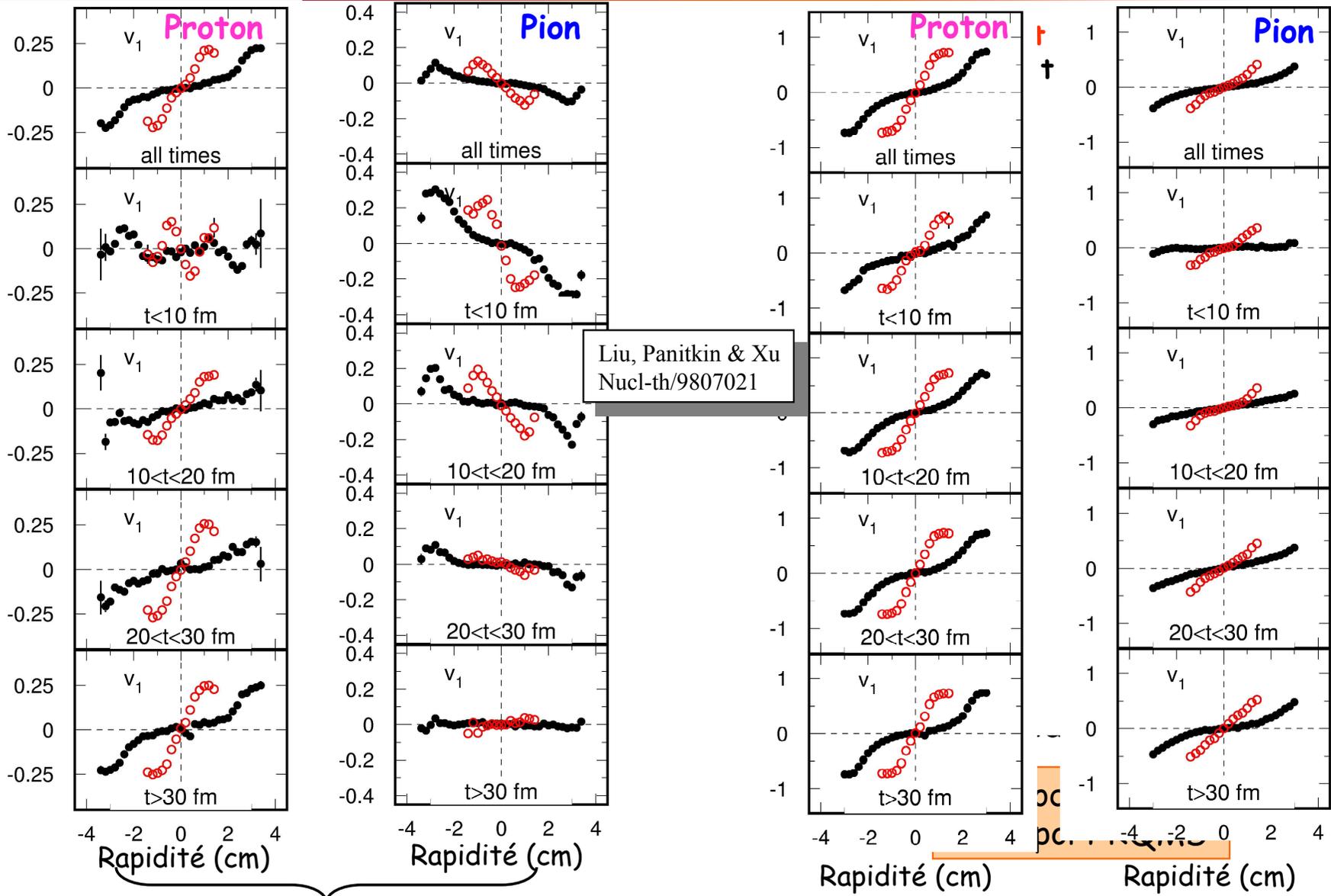


Modèle de transport RQMD

Espace des impulsions

- Pb+Pb@158A GeV
- Au+Au@2A GeV

Evolution de v_1 avec le temps



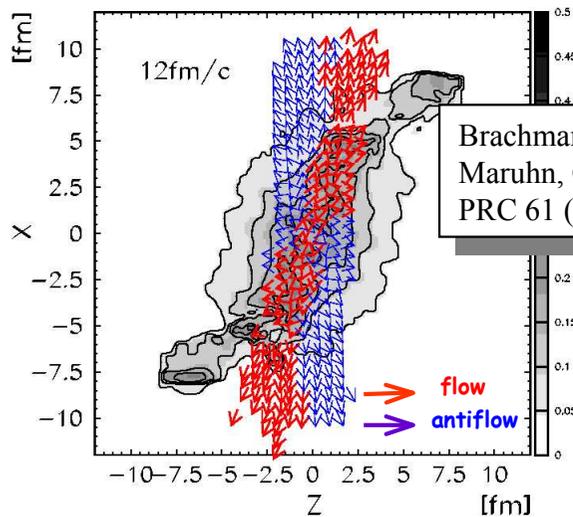
Espace des impulsions

Espace des configurations (x,y,z)

● 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

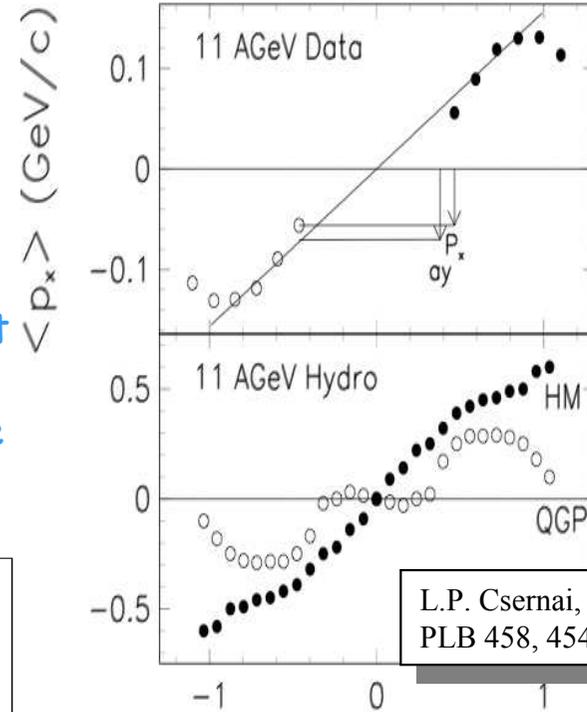
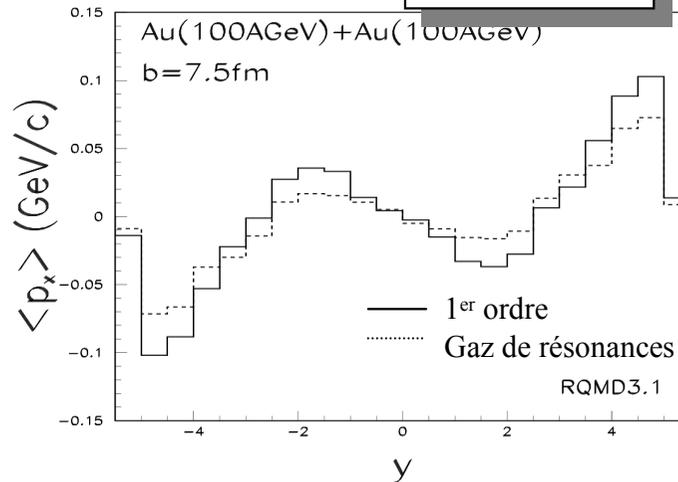


Brachmann, Soff, Dumitru, Stocker, Maruhn, Greiner Bravina, Rischke
PRC 61 (2000) 024909.

-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)

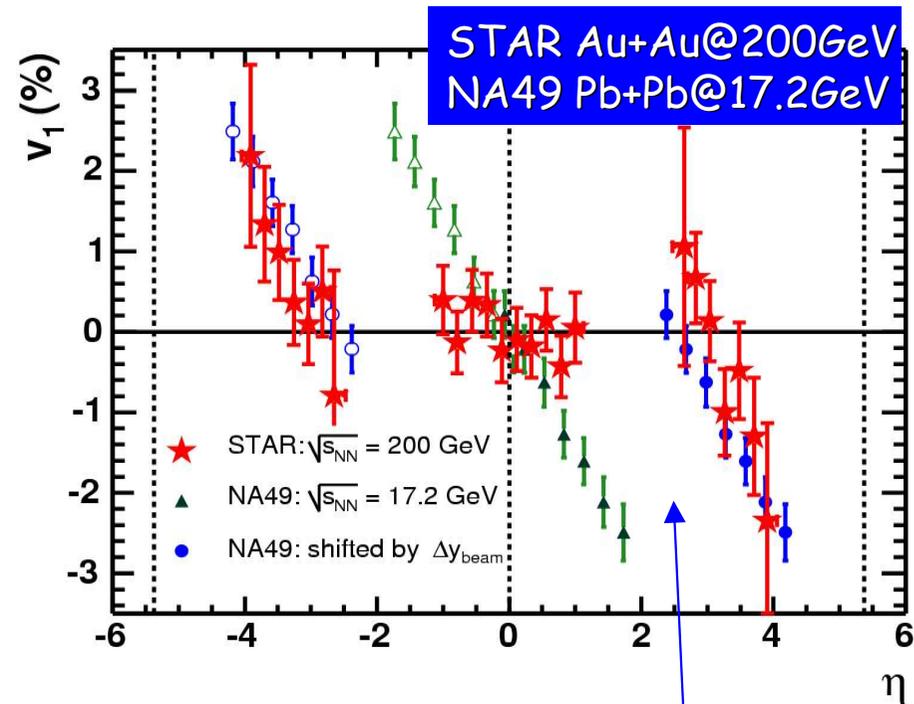
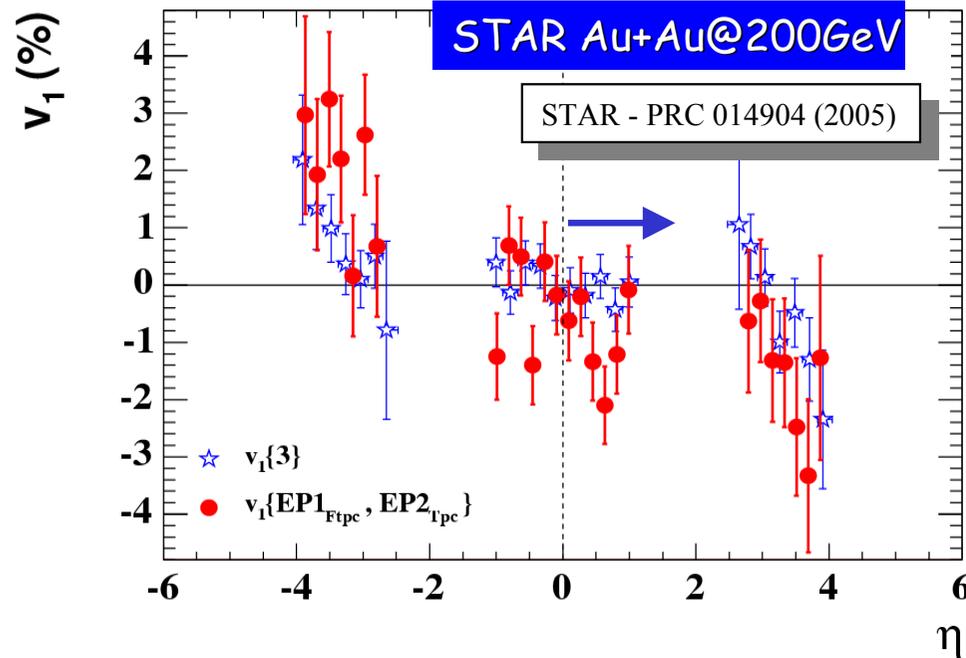
« fluid dynamical calculation with QGP showed a softening of directed flow... »

Flot direct des particules chargées

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

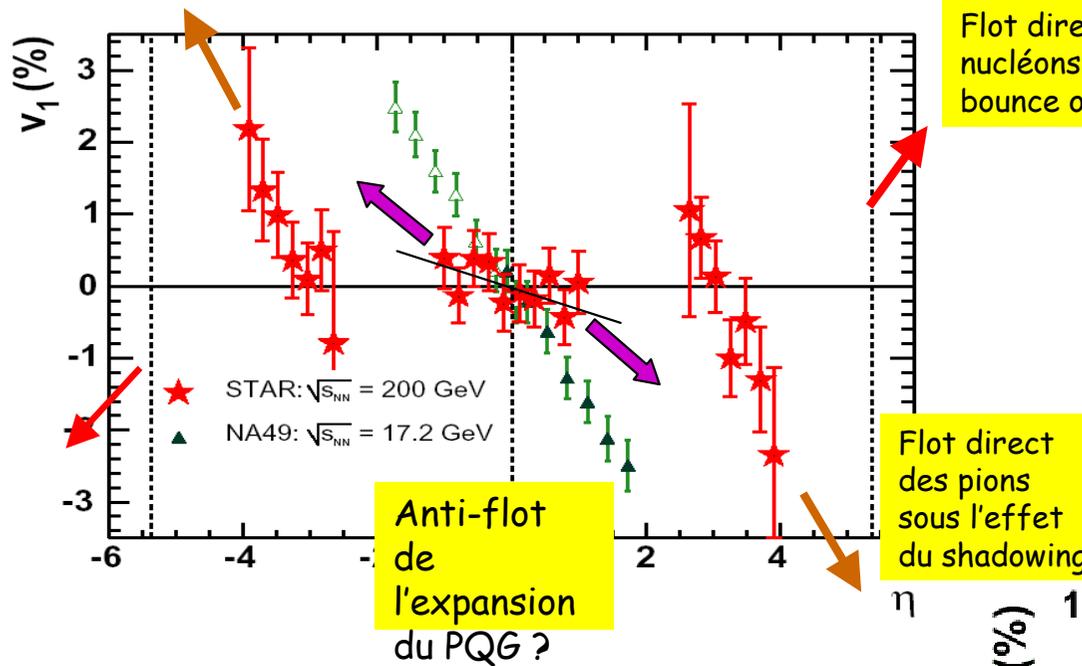
STAR utilise **trois techniques** d'extraction du flot direct :

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



! NA49 décallé de la différence en rapidité des faisceaux

v_1 : distribution en rapidité



STAR - PRC 014904 (2005)

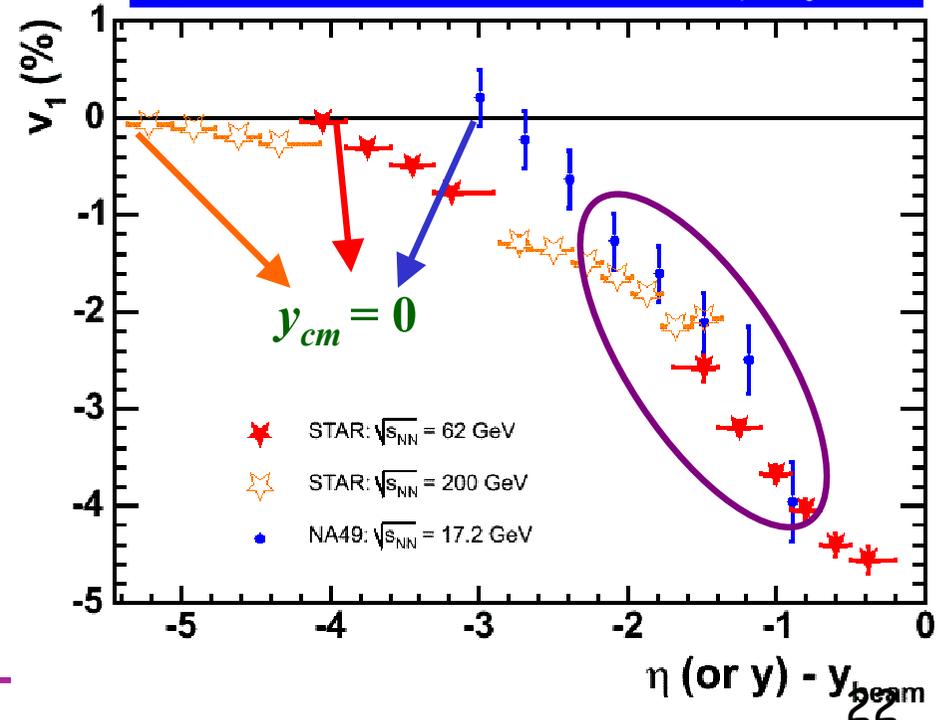
• Limitation en statistique @ 200 GeV => analyse run 4 haute statistique pour conclure sur la forme de v_1 à mi-rapacité

(Seulement 70k événements bons ont été analysés)

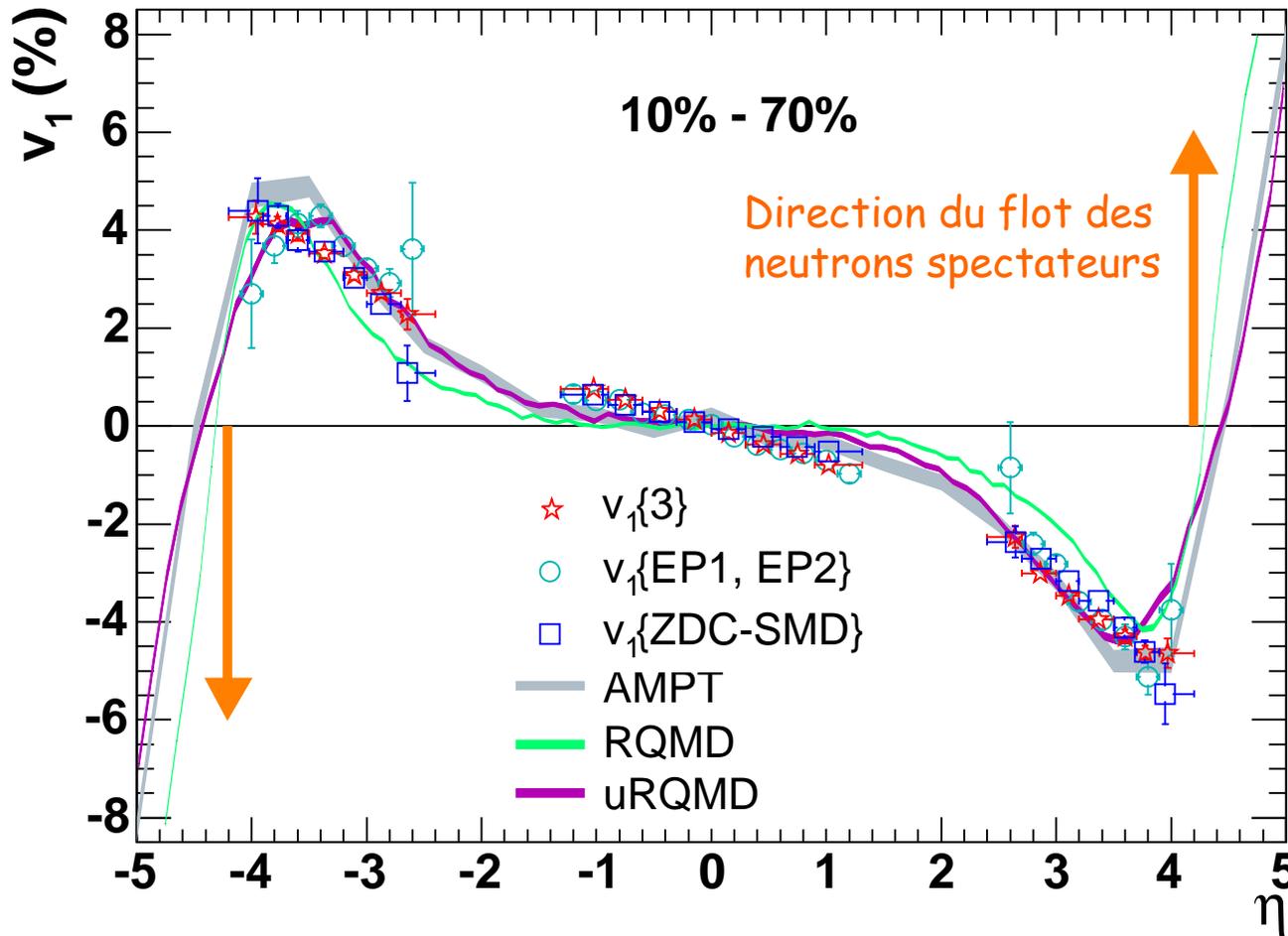
v_1 dans le centre de masse du projectile

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



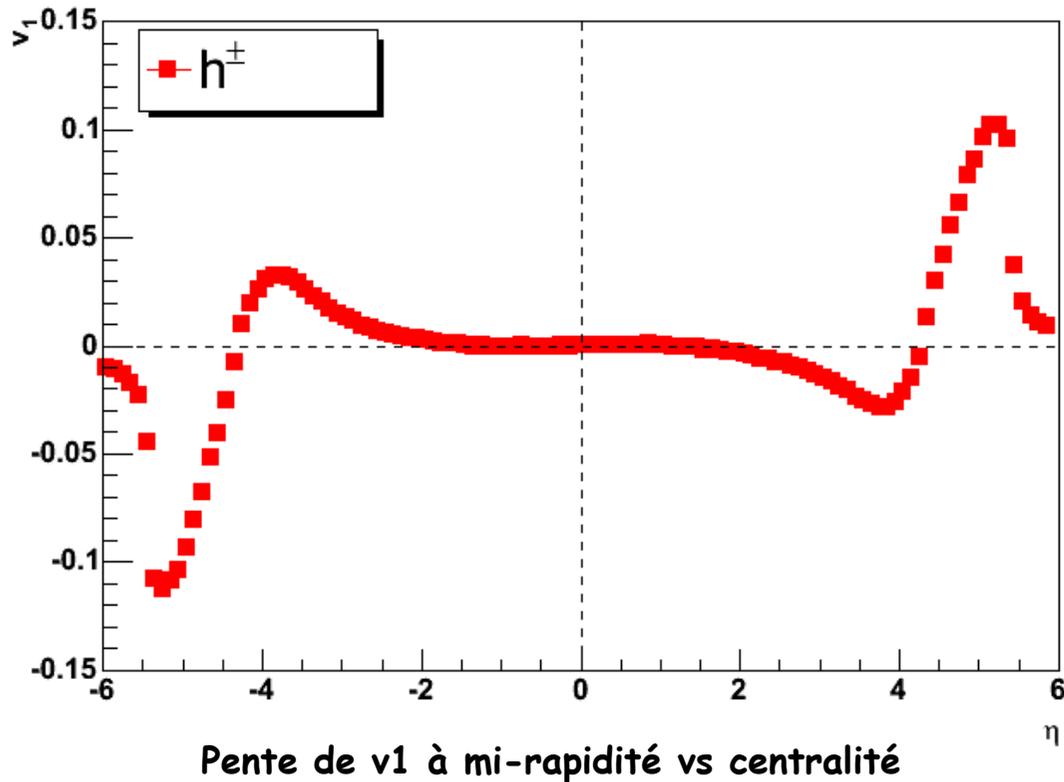
Résultats à 62 GeV - Comparaison à des modèles



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

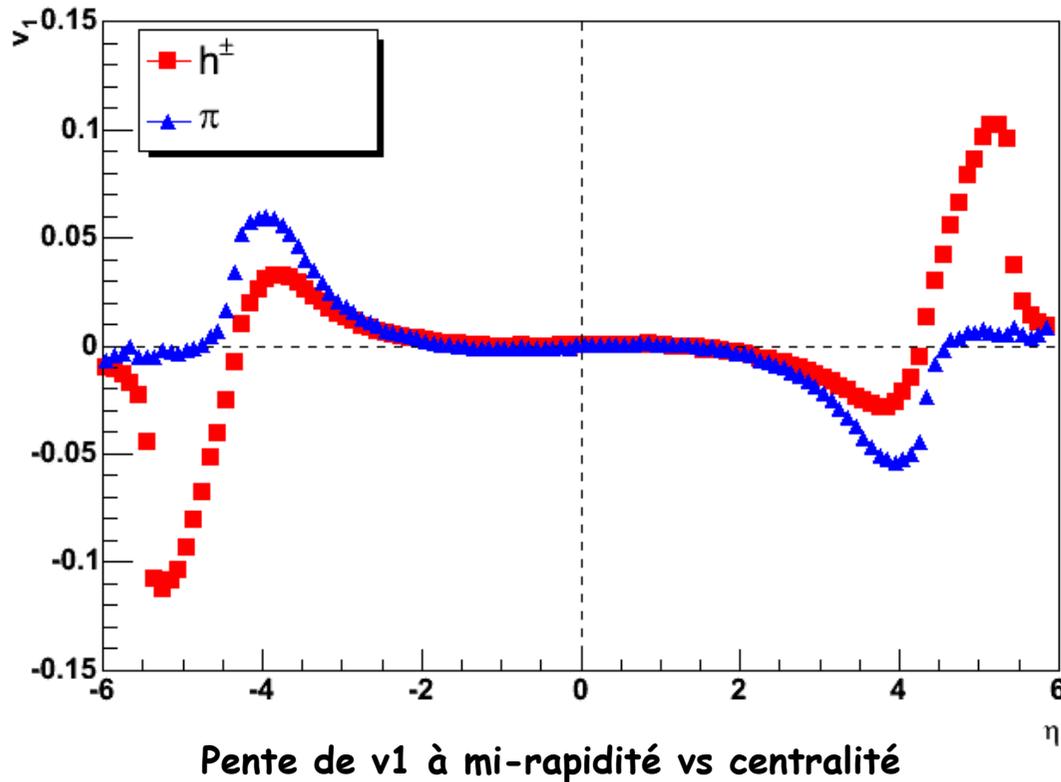
- Pente à mi-rapacité sous prédite par les modèles.
- Très bon accord entre les différents modèles et les données de STAR à plus haute rapidité.
- Dans l'ensemble suggère une origine de v_1 purement géométrique
- Consistant avec les résultats obtenus à plus basse énergie (Stachel et al.)
- Le domaine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

RQMD simulations for 62.4 GeV I



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

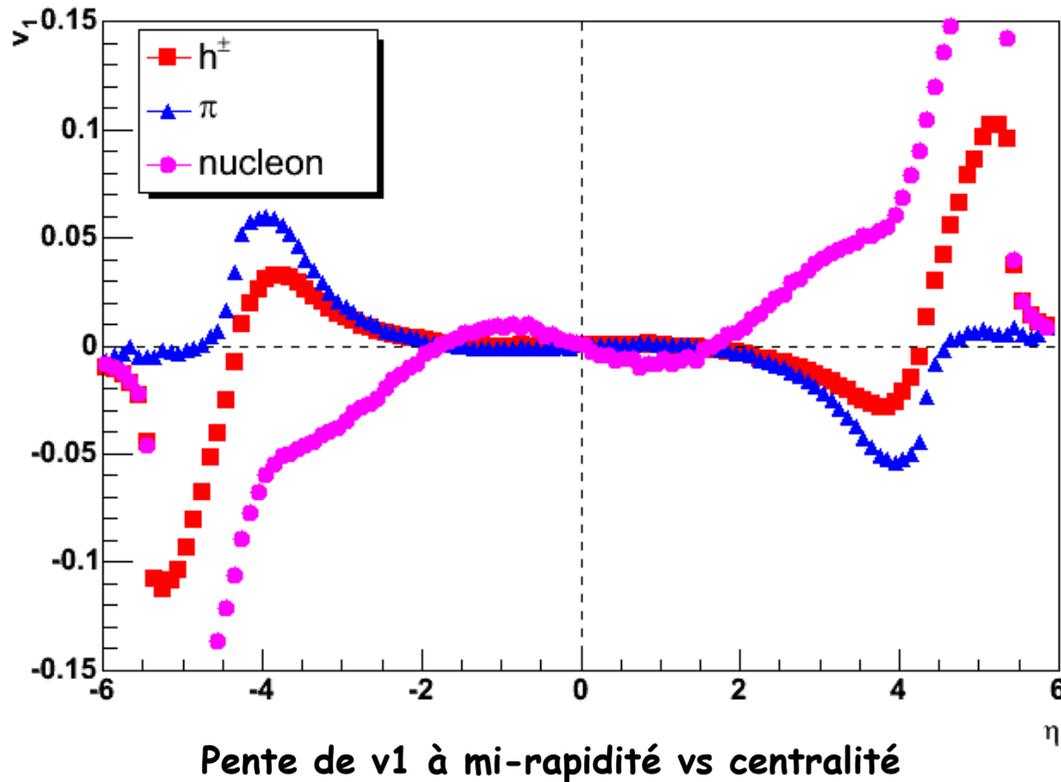
RQMD simulations for 62.4 GeV I



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

- v_1 des pions très plat à mi-rapacité également

RQMD simulations for 62.4 GeV I

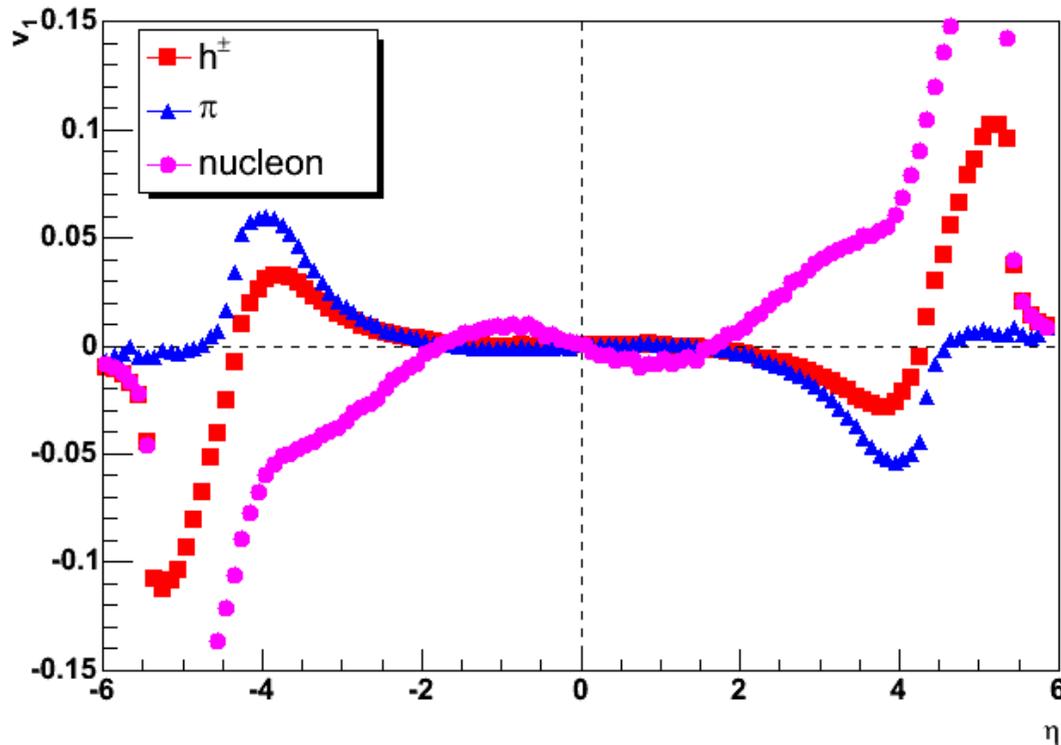


- v_1 des hadrons plat à mi-rapacité (petite pente positive à $\eta=0$)

- 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.

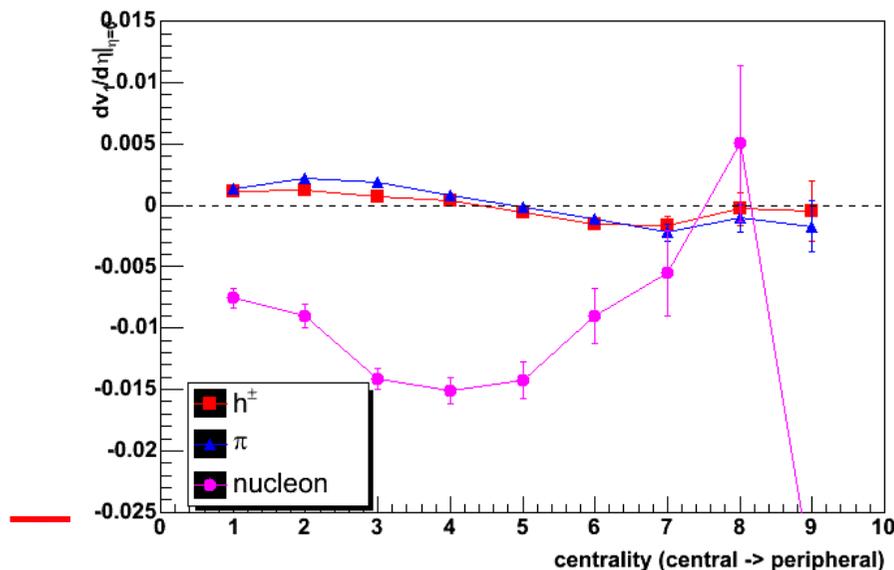
RQMD simulations for 62.4 GeV I



- 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 "wiggly" (double changement de signe de pente) à mi-rapacité.

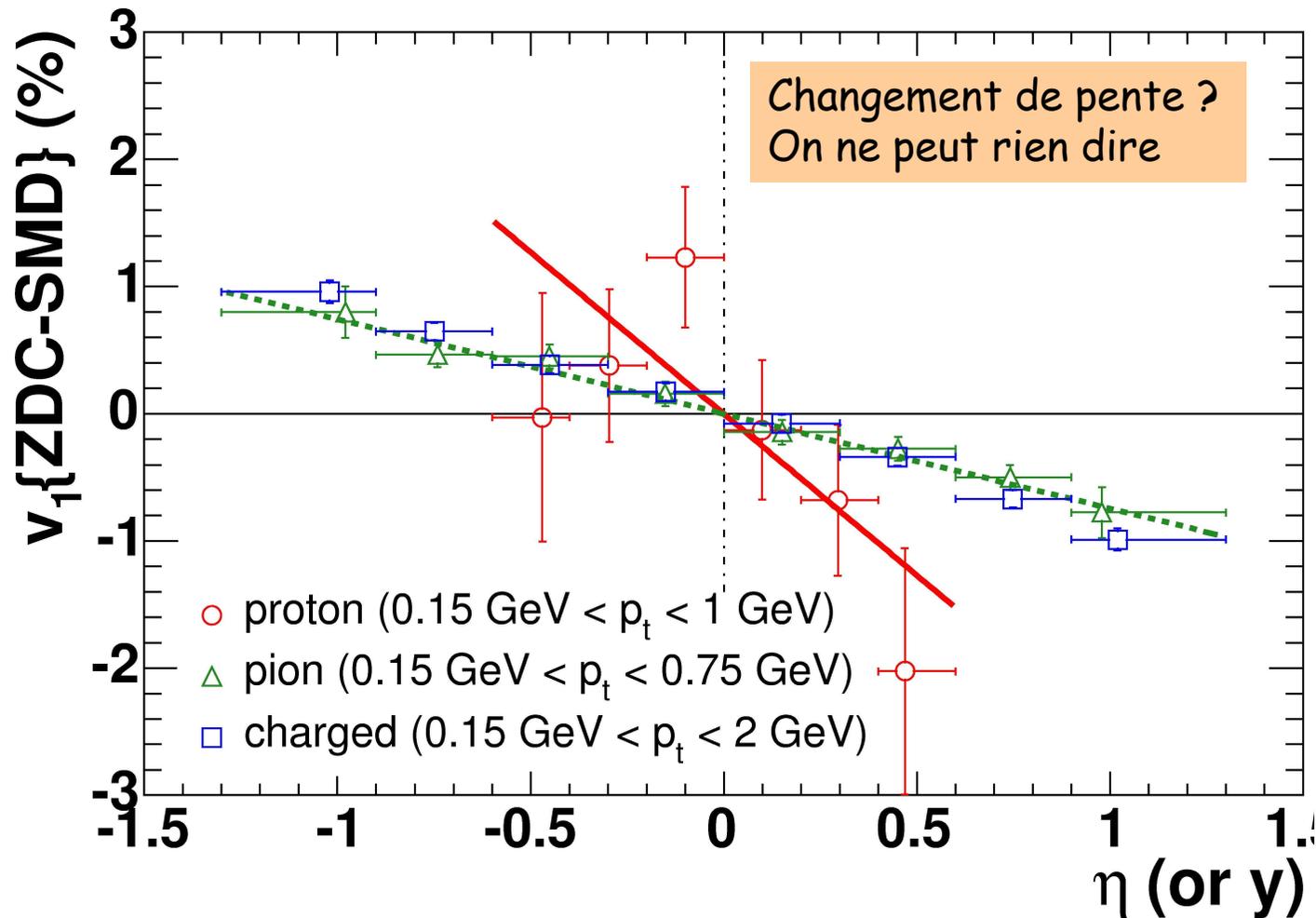


=> Le comportement de v_1 pour l'ensemble (= **hadrons**) est dominé de plus en plus par le comportement du v_1 des **protons** lorsque l'on se déplace à centralité plus périphérique

=> **Pente :**

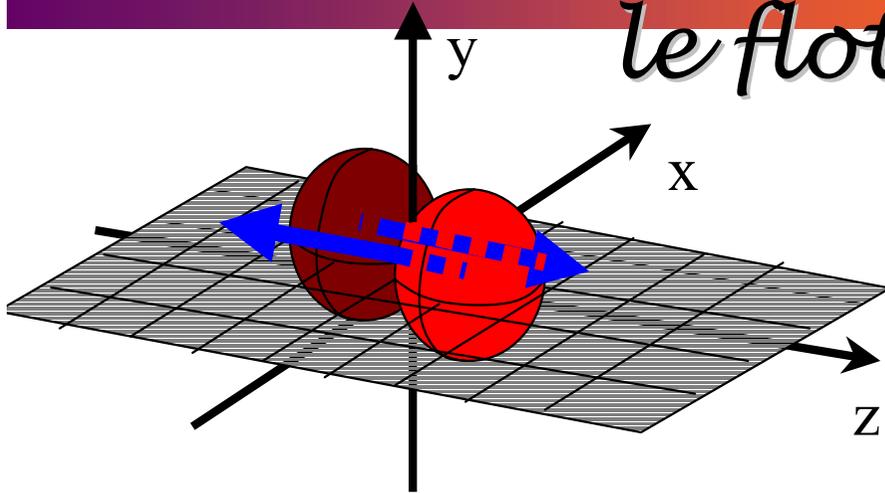
- Pour l'ensemble : très faible et dominée par les pions
- Pente plus large et négative pour les protons

Résultats à 62 GeV pour différentes particules

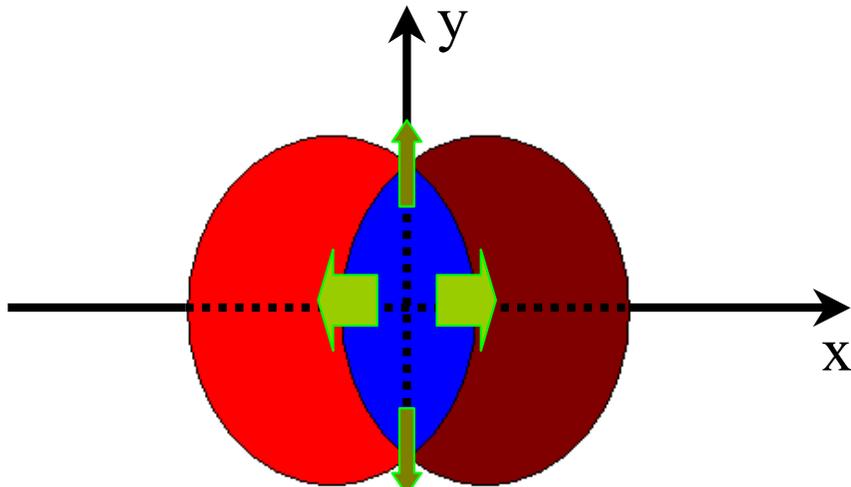


Pas assez de statistique pour extraire un signal clair pour les protons à ce stade.

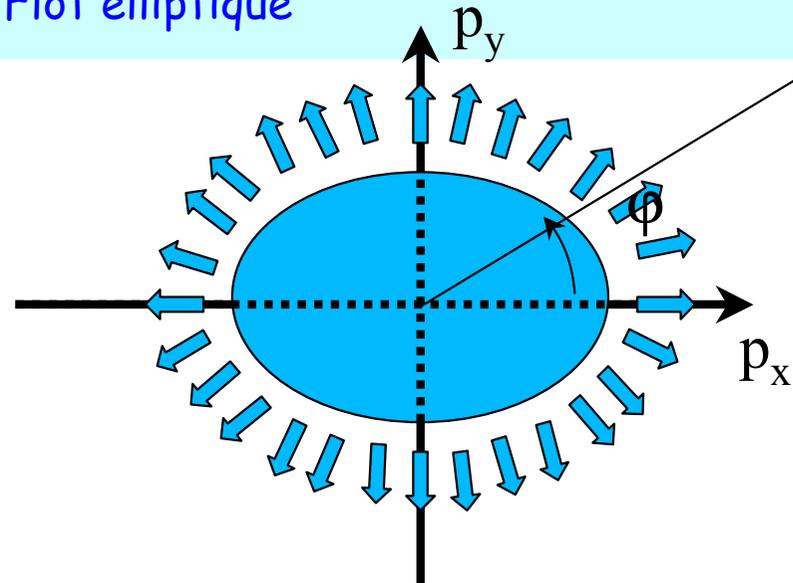
Seconde harmonique dominante : le flot elliptique v_2



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



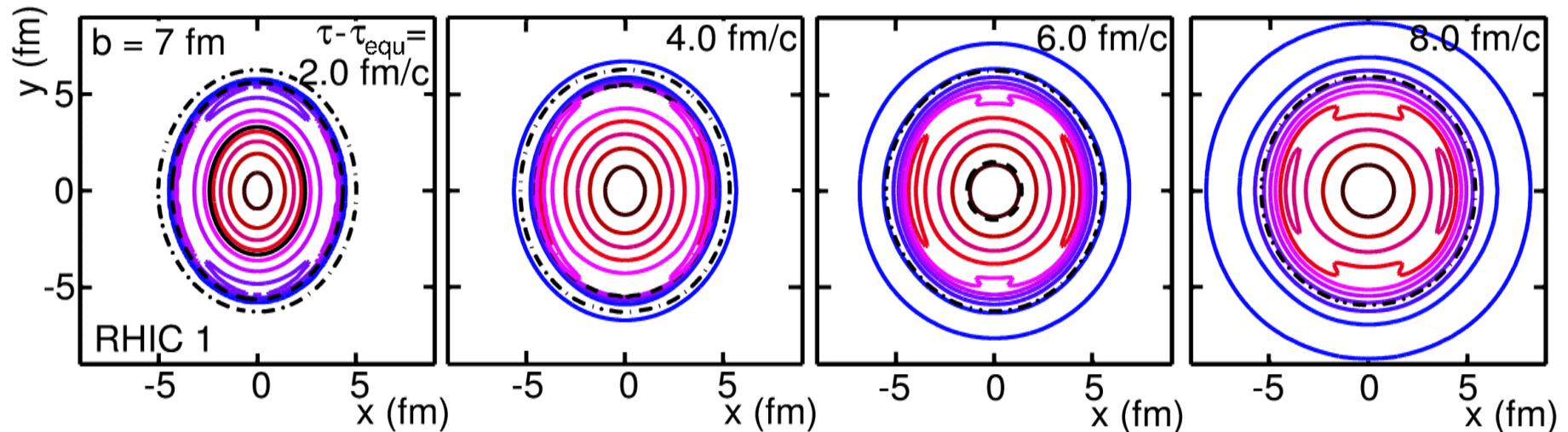
$$\varepsilon = \frac{\langle y^2 - x^2 \rangle}{\langle y^2 + x^2 \rangle}$$



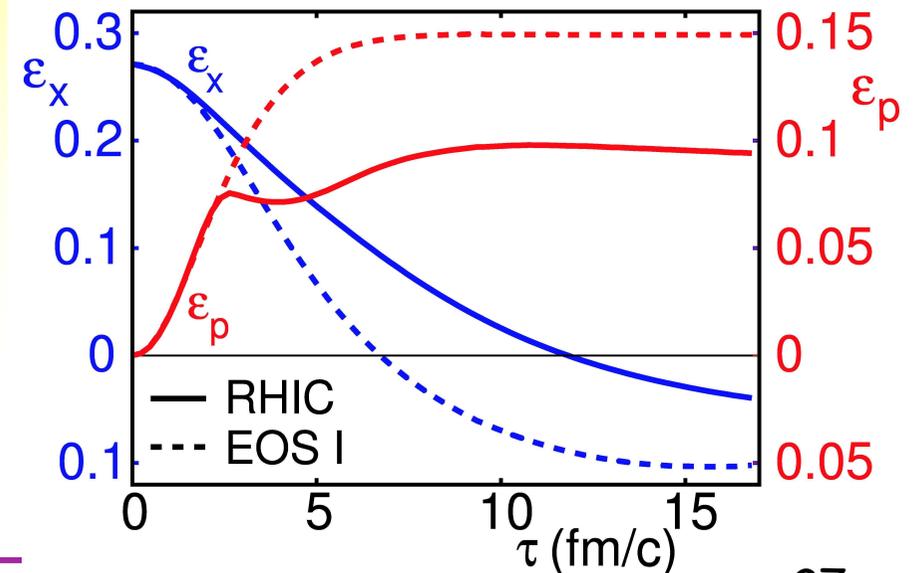
$$v_2 = \langle (p_x^2 - p_y^2) / p_t^2 \rangle$$

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

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).

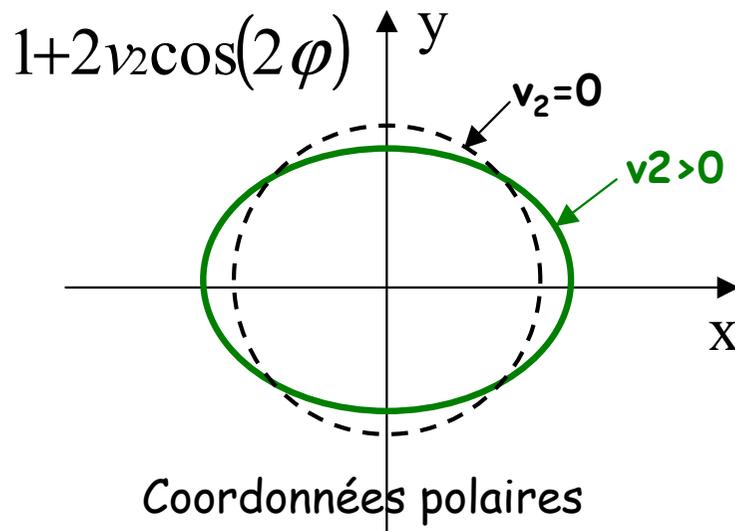


Le signe du flot elliptique

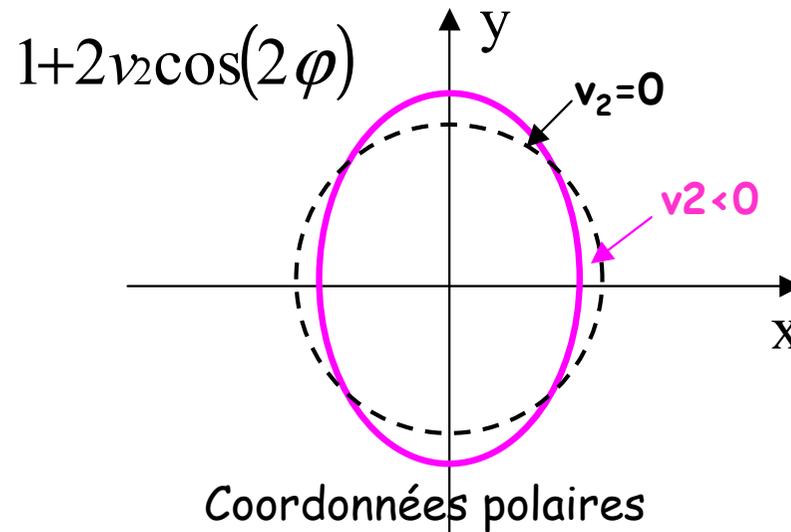
$$\frac{dN}{d\varphi} \approx v_0(1 + 2v_1 \cos(\varphi - \psi_{RP}) + 2v_2 \cos(2(\varphi - \psi_{RP})))$$

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

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



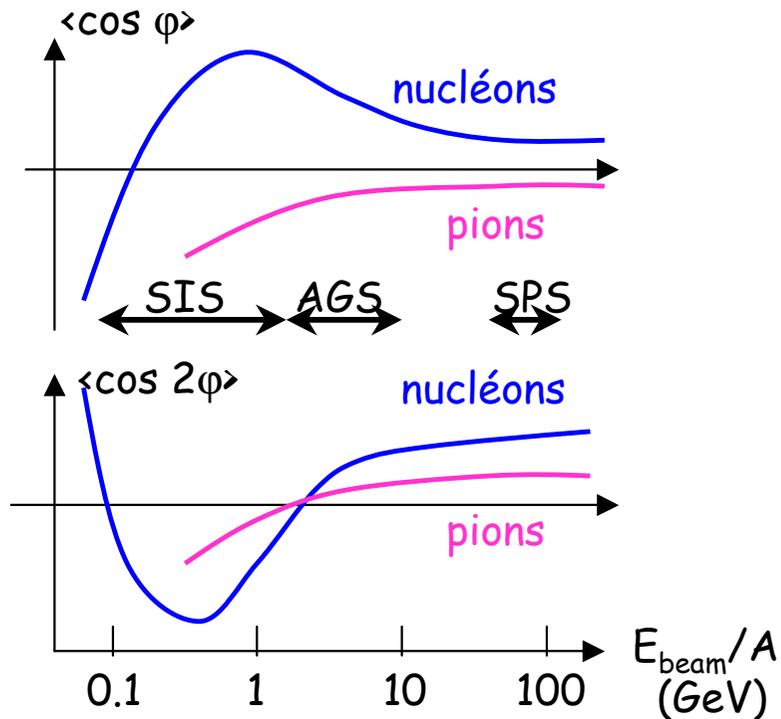
Emission « In-plane »



Emission « Out-of-plane »

Cas du « squeeze-out » à plus basse énergie

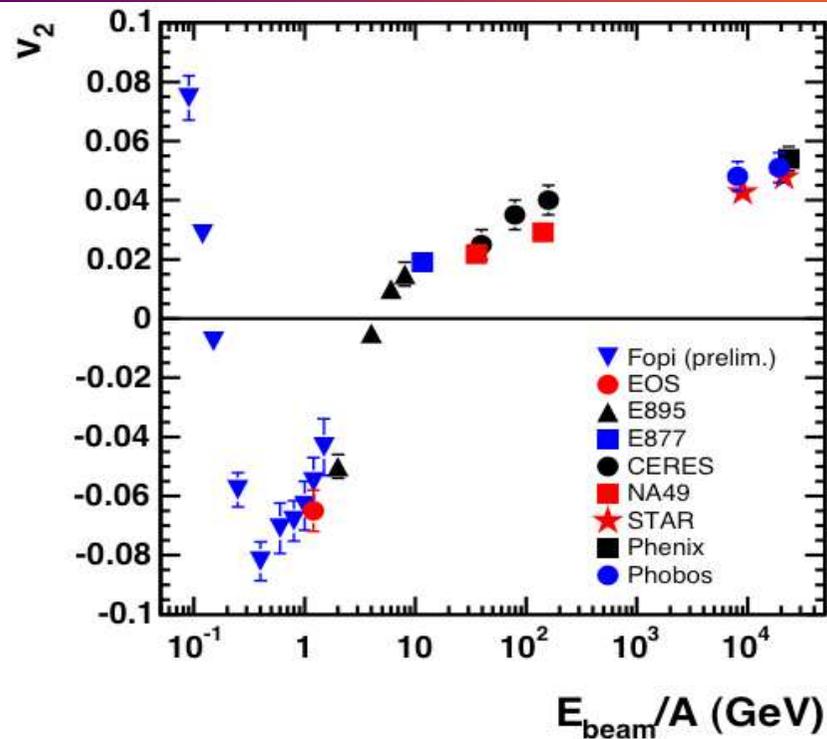
Le signe de v_2 , systématique en énergie



- 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 :

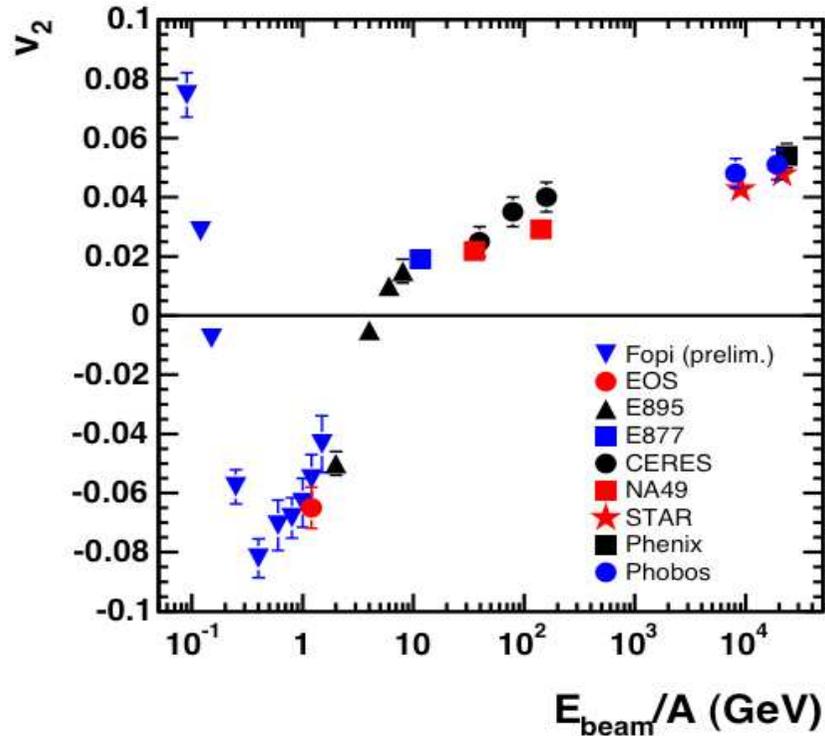
Le signe de v_2 , systématique en énergie



- 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 : $v_2 > 0$

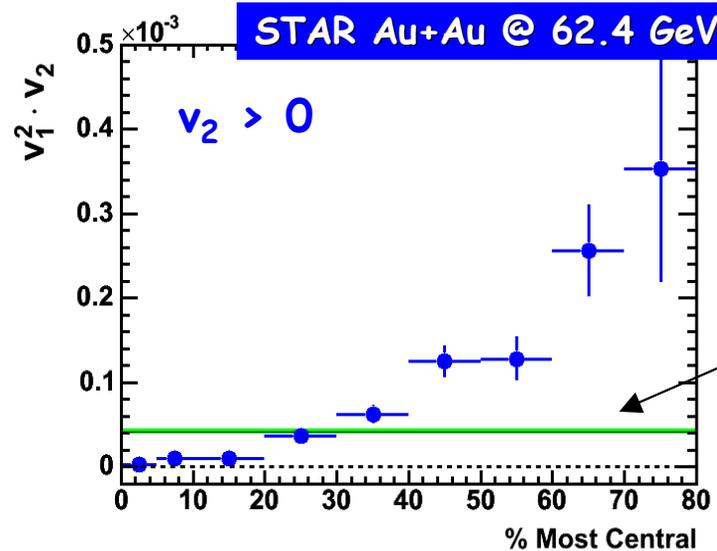
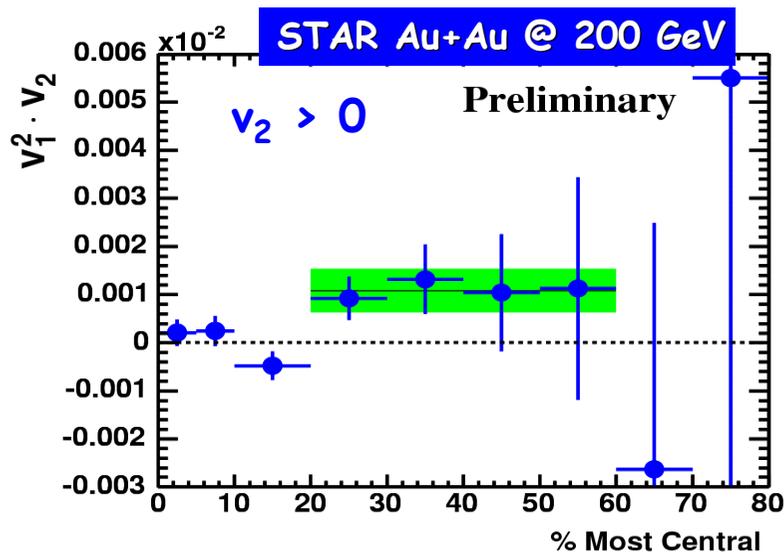
Par exemple, l'étude de v_1 de STAR le montre :

Le signe de v_2 , systématique en énergie



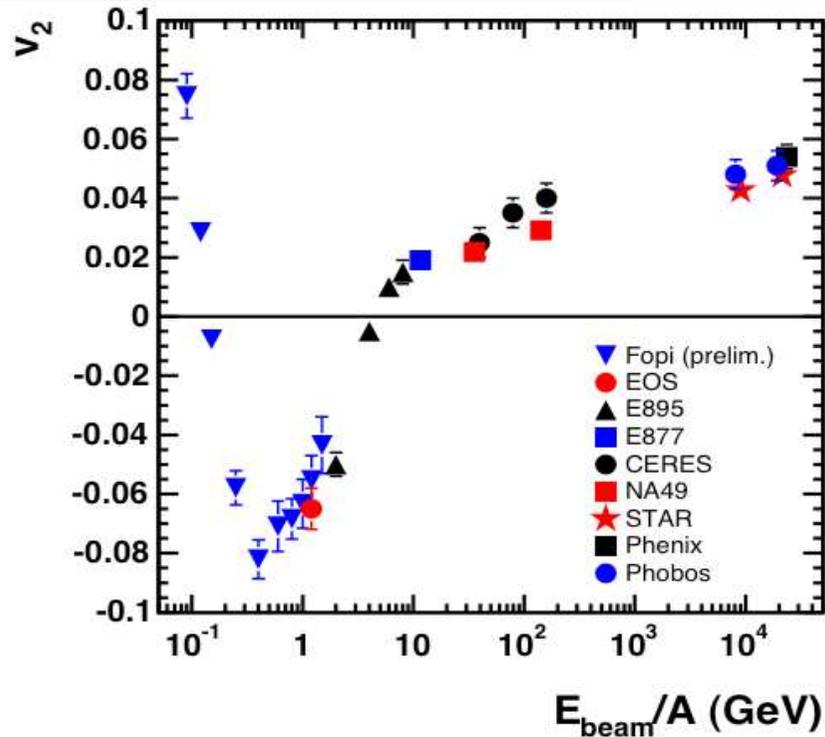
- Du BEVALAC au RHIC
=> Changements du signe de v_1 et v_2
- A plus basse énergie, fort effet du pouvoir d'arrêt du système.
=> Squeeze-out important. Direction privilégiée « out-of-plane » : $v_2 < 0$
- A plus haute énergie, émission dans le plan de réaction privilégiée : $v_2 > 0$

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



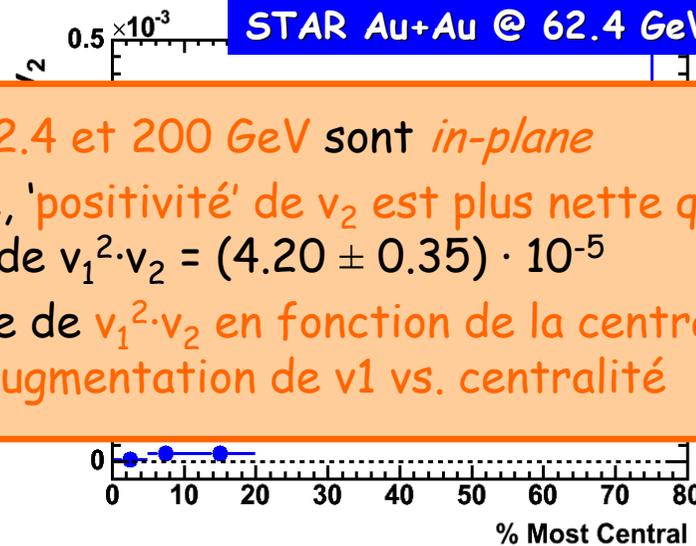
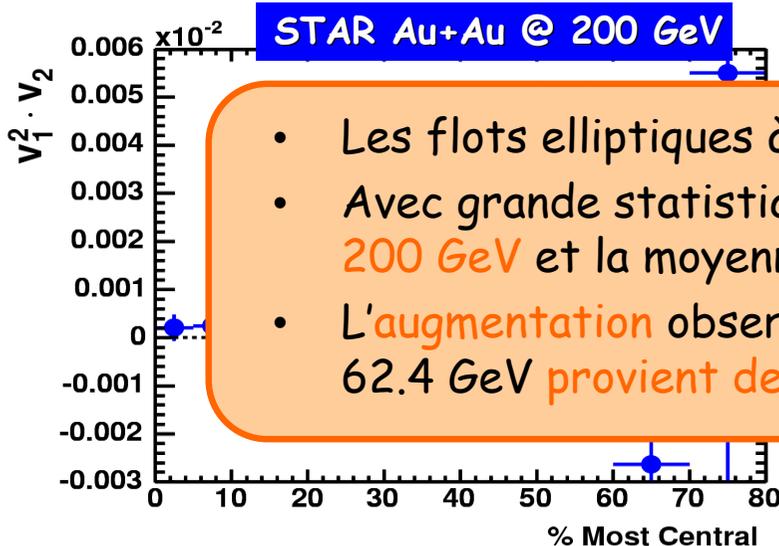
Moyenne sur toutes les centralités avec barre d'erreur

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 : $v_2 > 0$

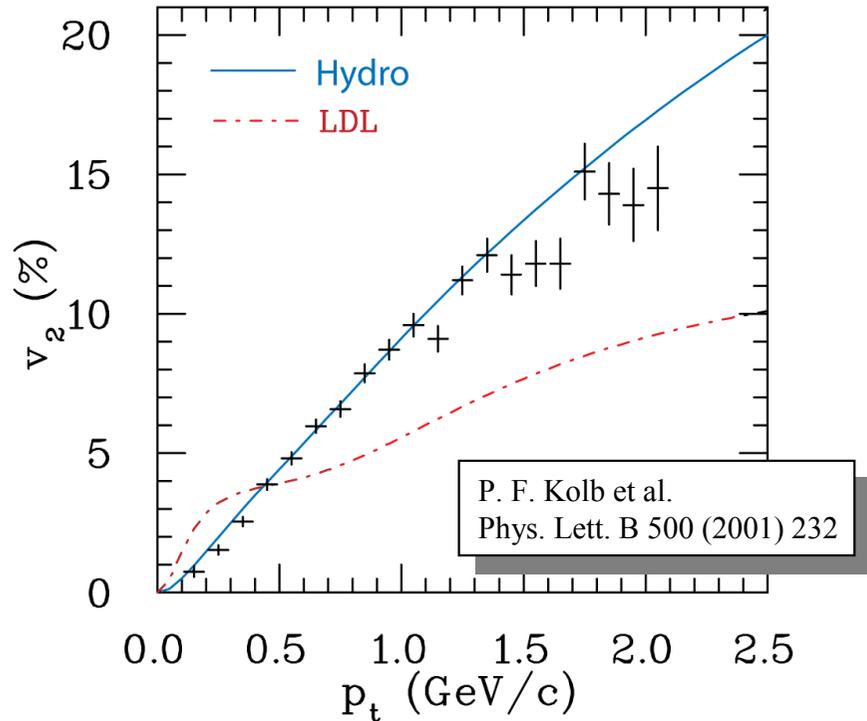
Par exemple, l'étude de v_1 de STAR le montre :



- 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 centralités avec l'erreur

Dépendance en p_T de v_2



- Devrait continuer de croître avec p_T mais **saturation** \Rightarrow déviation / l'hydro

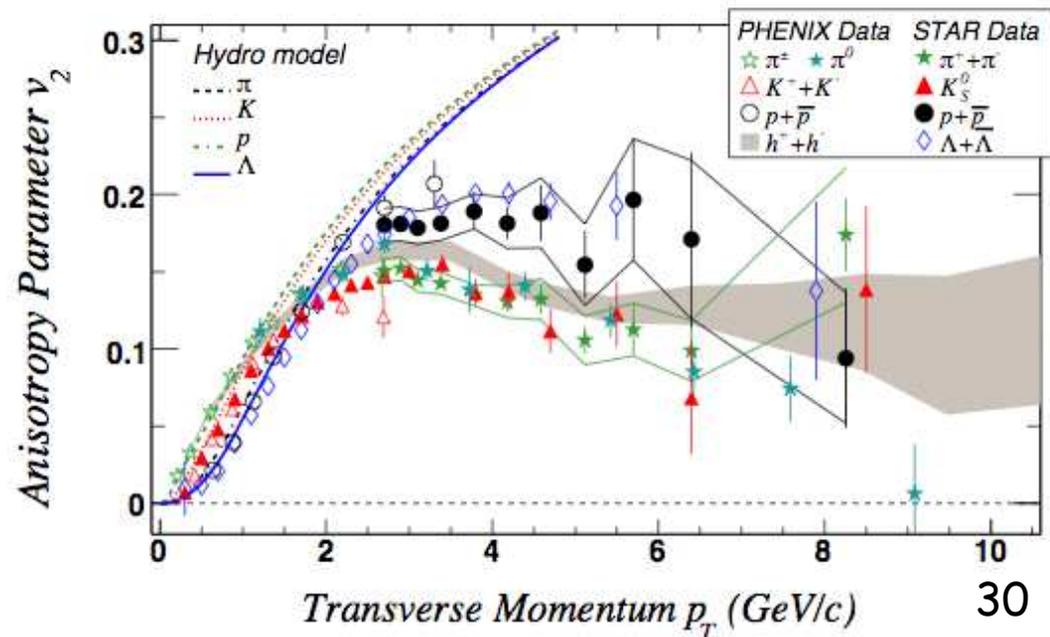
- Domaine de validité de l'hydro :

- 1.5 GeV/c mésons

- 2.5 GeV/c baryons

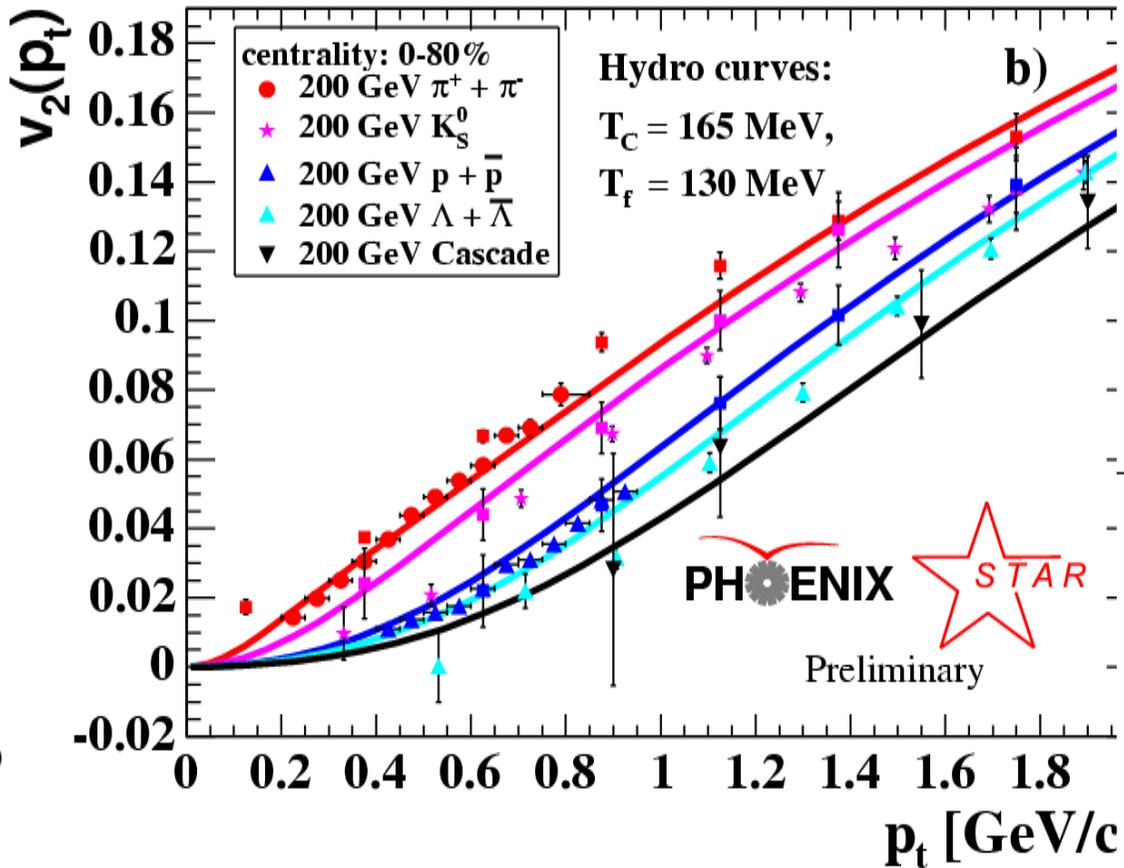
- soit jusqu'à environ 0.7, 0.8 GeV/c et les modèles de coalescence prennent la relève.

- $v_2(p_T)$ 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.

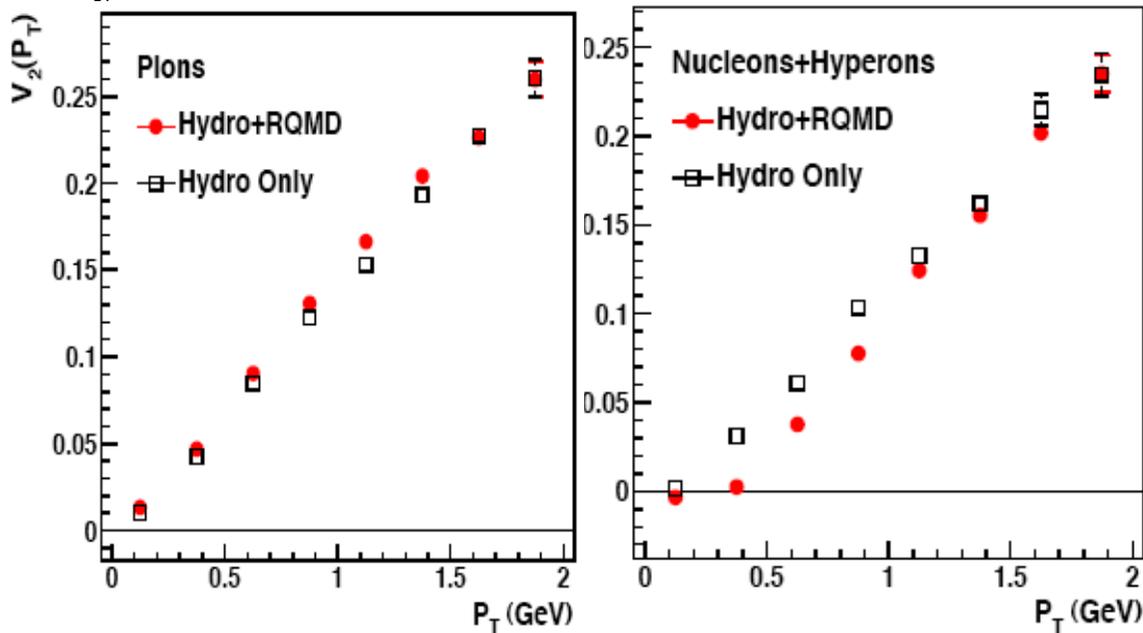
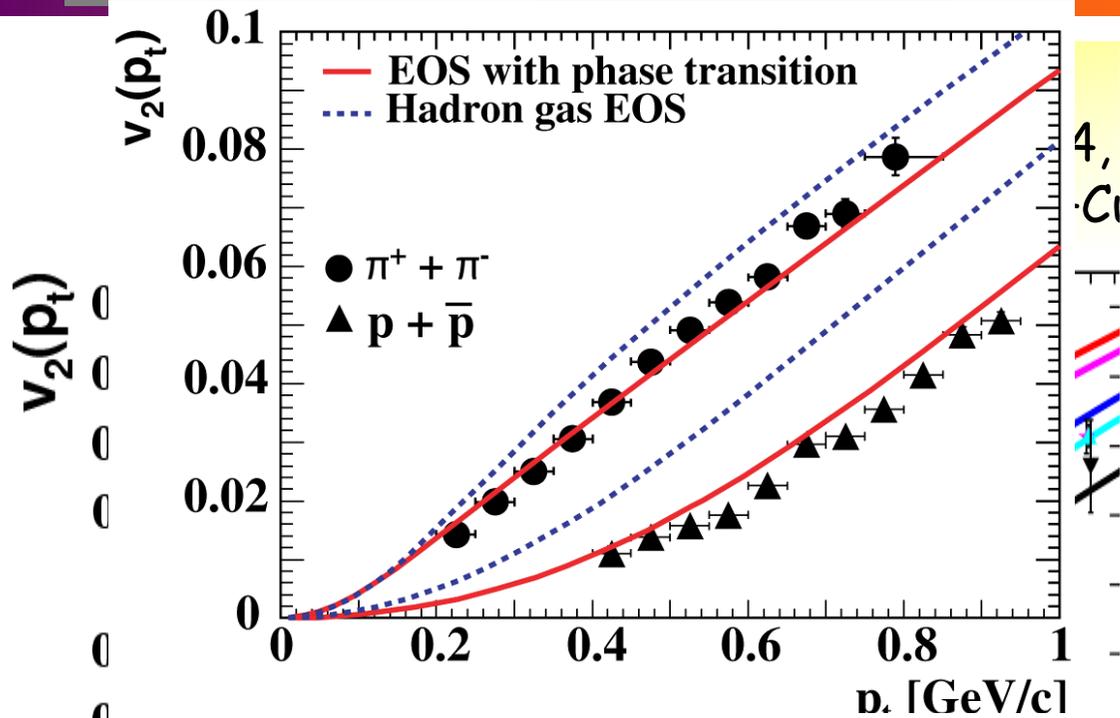
● Cependant pas complètement pour les particules plus massives.

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

● Quelle information sur l'EOS ?

Hydro idéale incomplète ?

Dépendance en masse

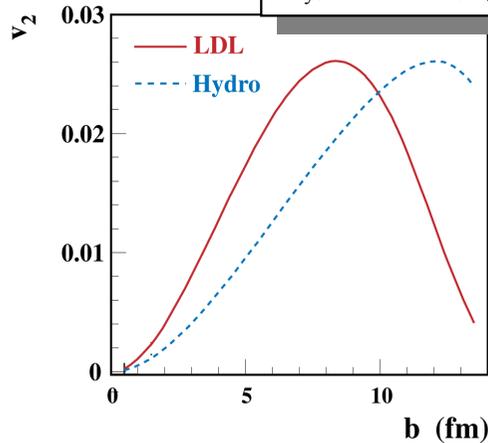


- L'hydro idéale reproduit bien la dépendance en masse.
- Cependant pas complètement pour les particules plus massives.
- Un modèle de cascade dans la phase hadronique semble améliorer les choses...
- Quelle information sur l'EOS ?

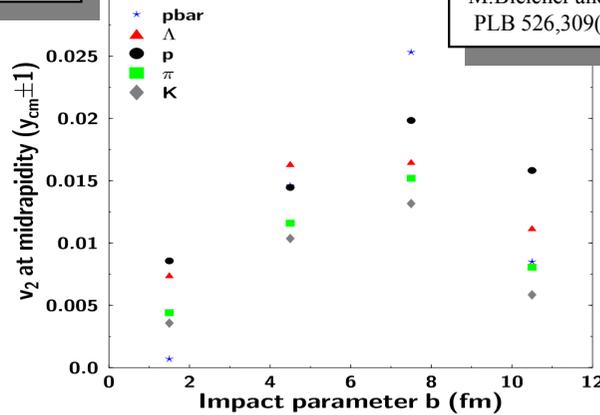
Hydro idéale incomplète ?

Dépendance en centralité I

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

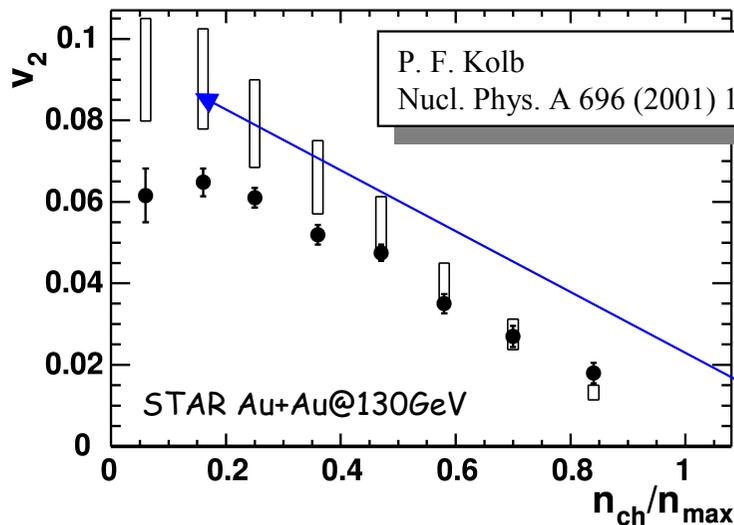
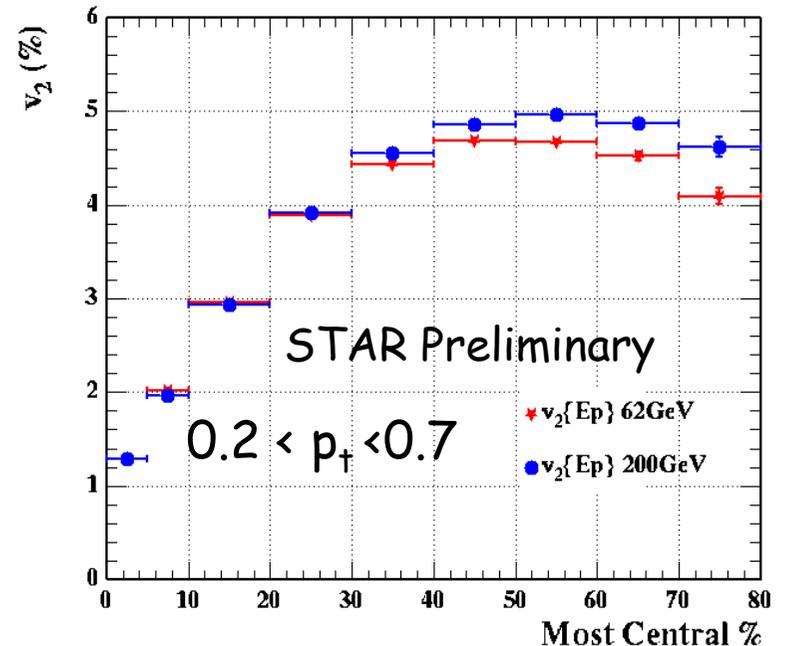


M.Bleicher and H.Stocker
PLB 526,309(2002)



- 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**

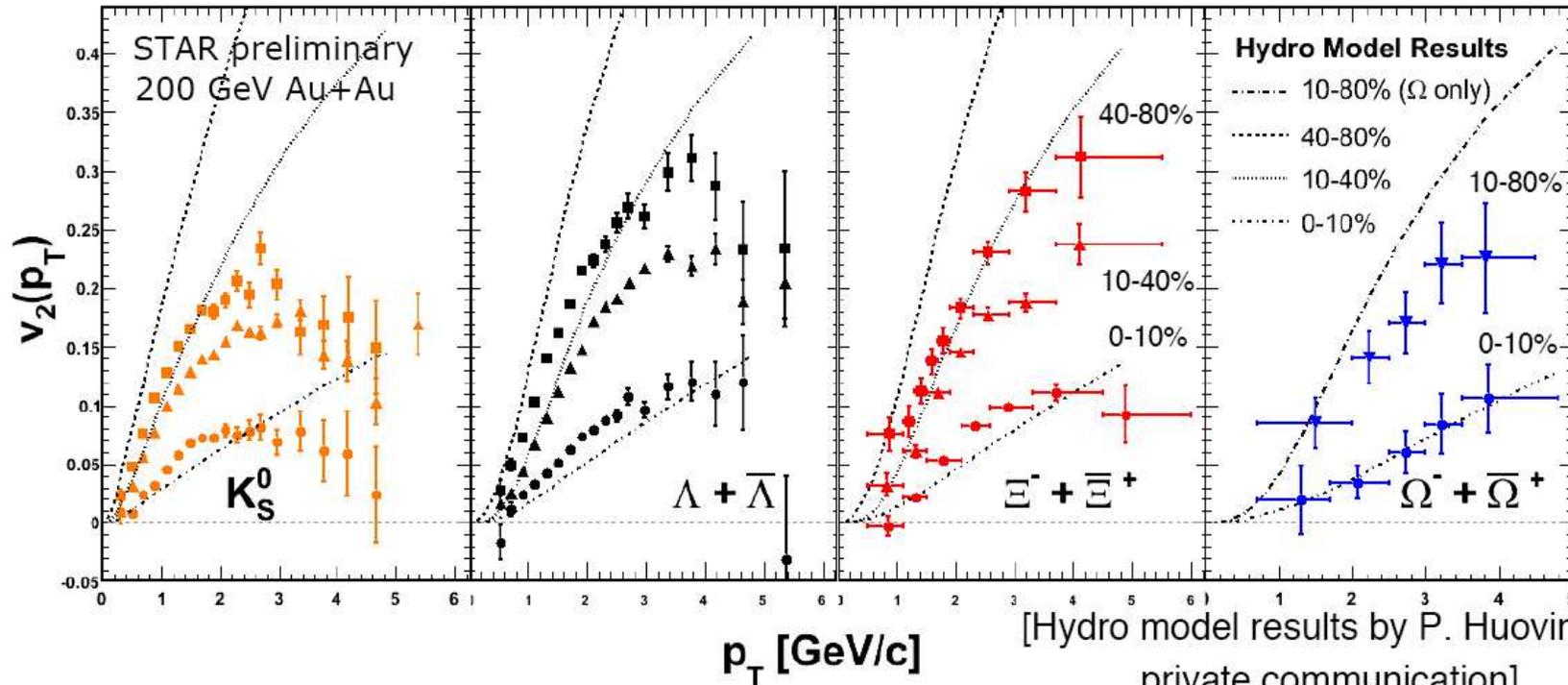
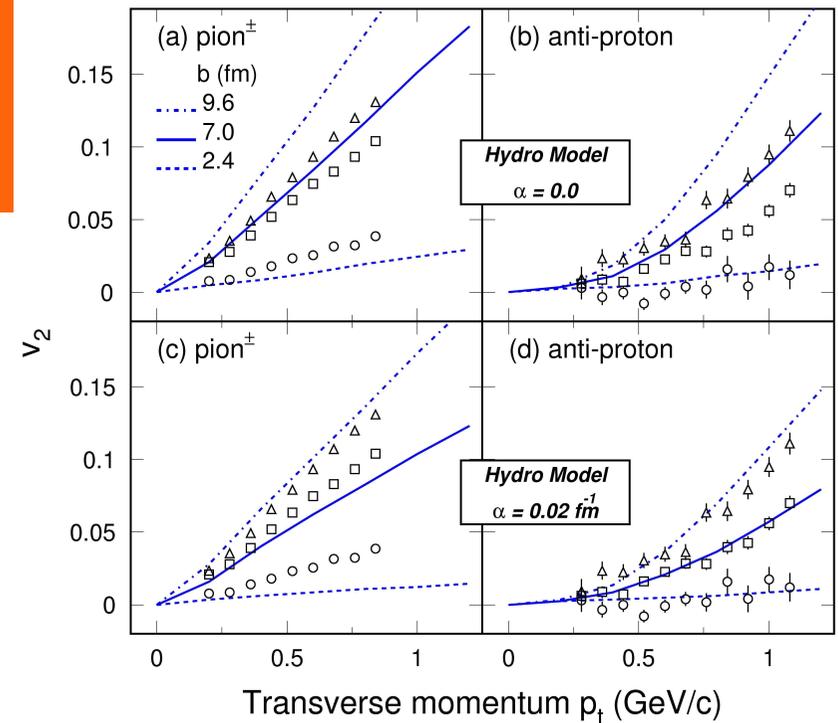


P. F. Kolb
Nucl. Phys. A 696 (2001) 197

Supposer la thermalisation
génère trop de flot

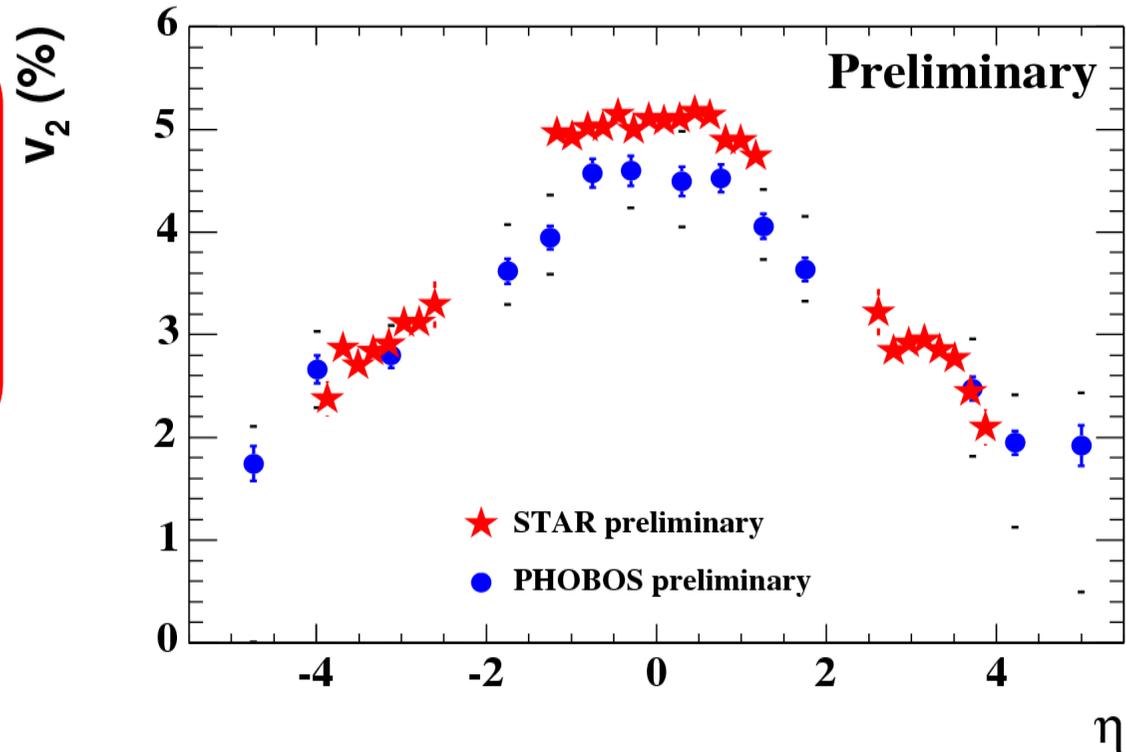
Dépendance en centralité II

- 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

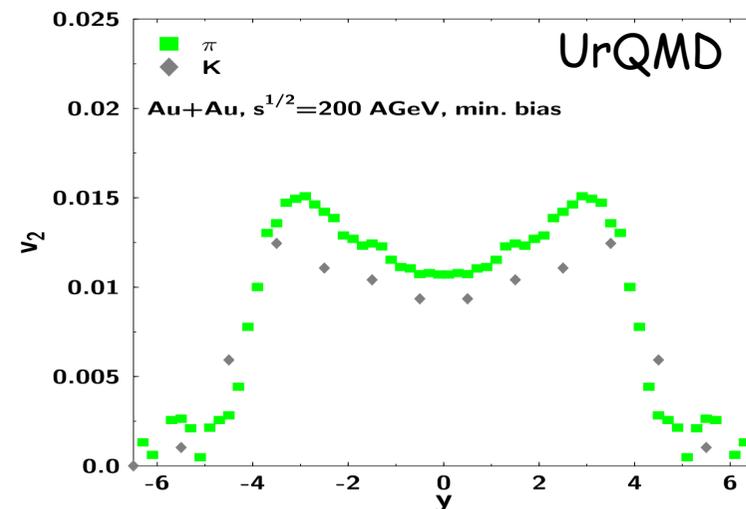
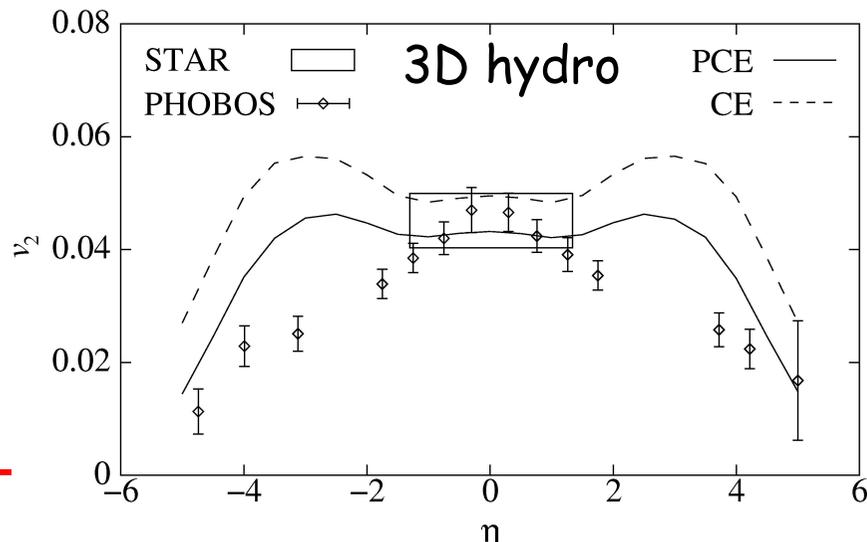
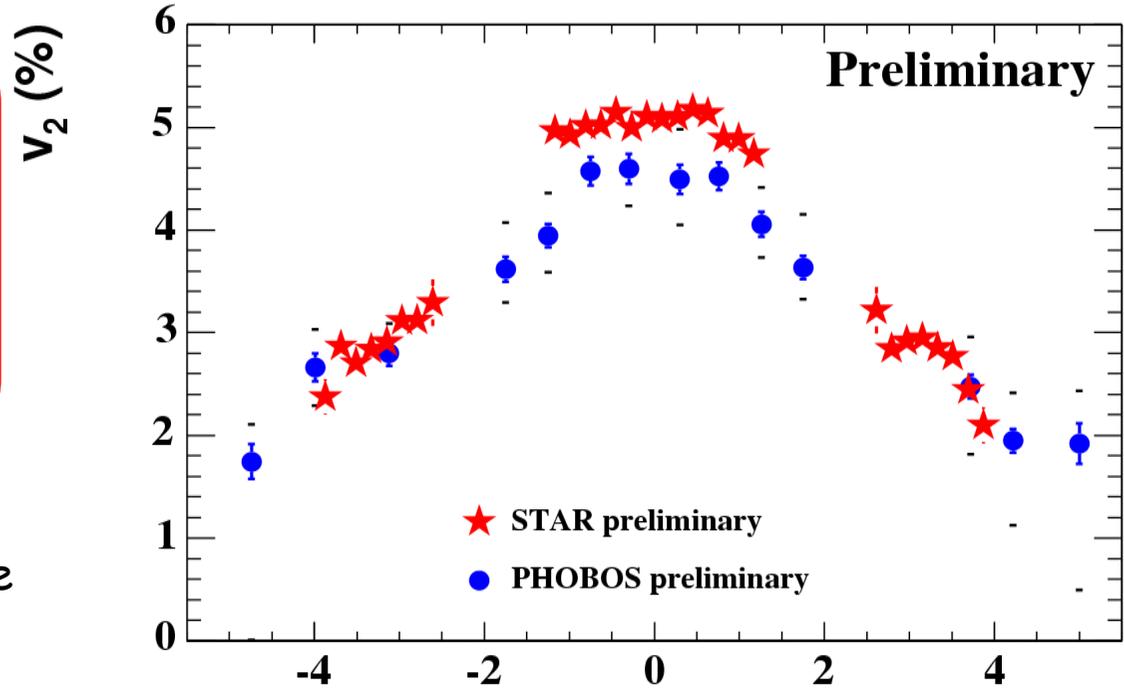
- Détermination du PR dans la TPC
- Le signal de v_2 chute d'un facteur 1.8 de la mi-rapacité à $\eta=3$
- STAR en accord avec les premières mesures de PHOBOS



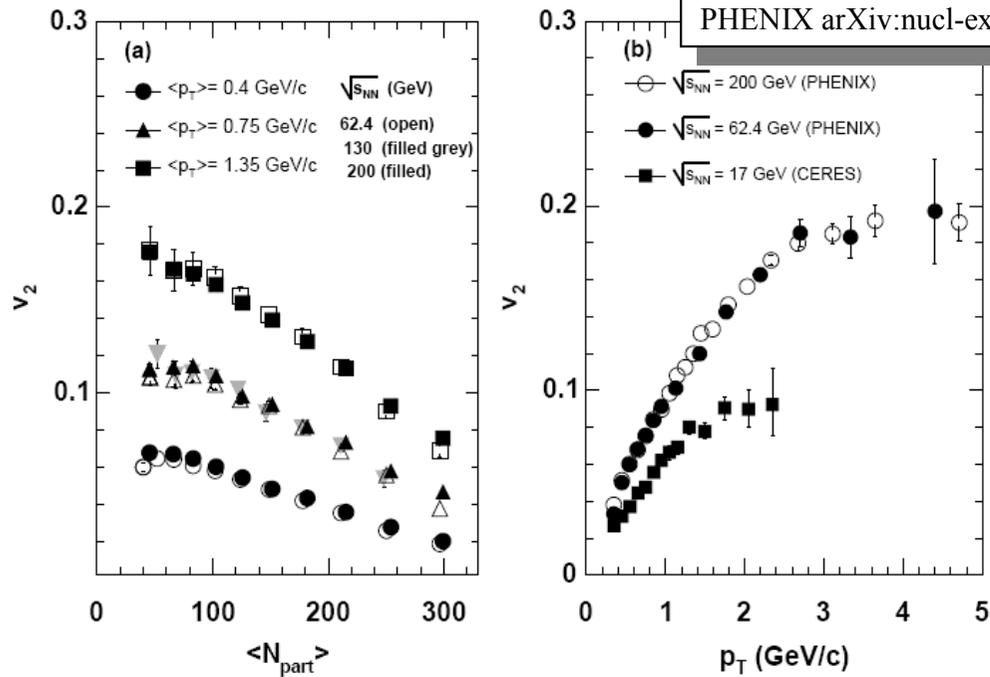
Dépendance en rapidité

- 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



PHENIX arXiv:nucl-ex/0411040

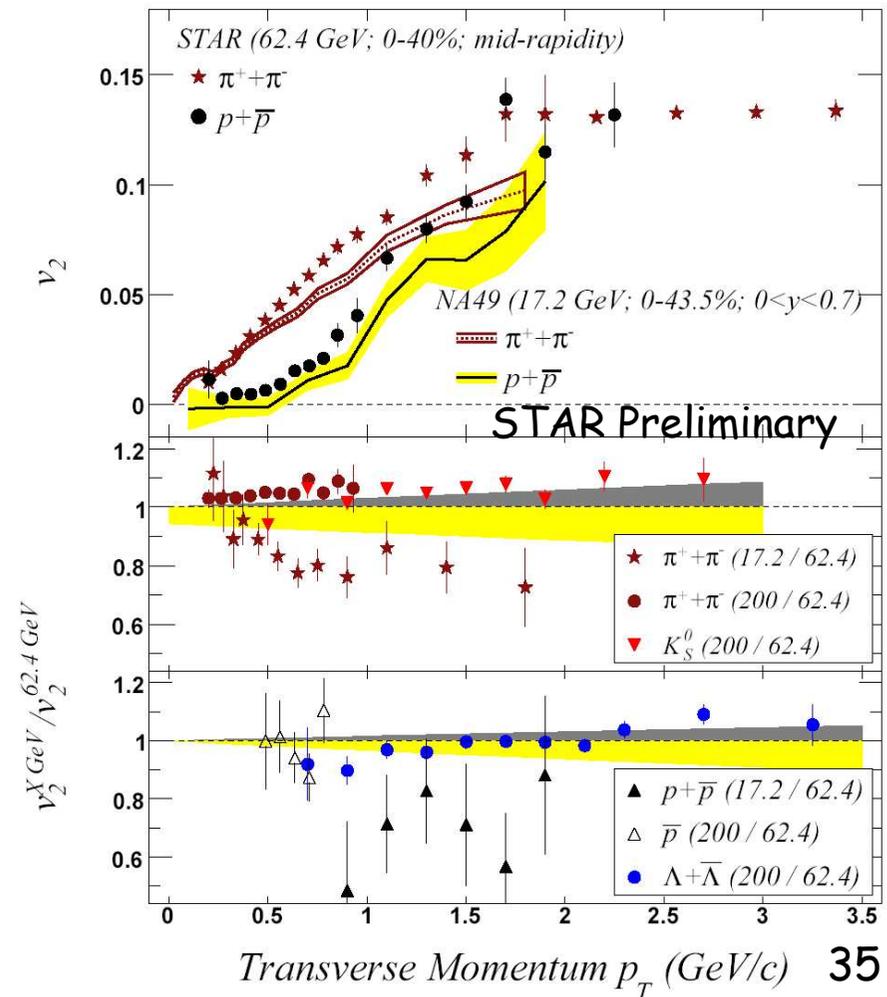
Les mesures de STAR vont dans le même sens

Rapport X GeV/62.4 GeV

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

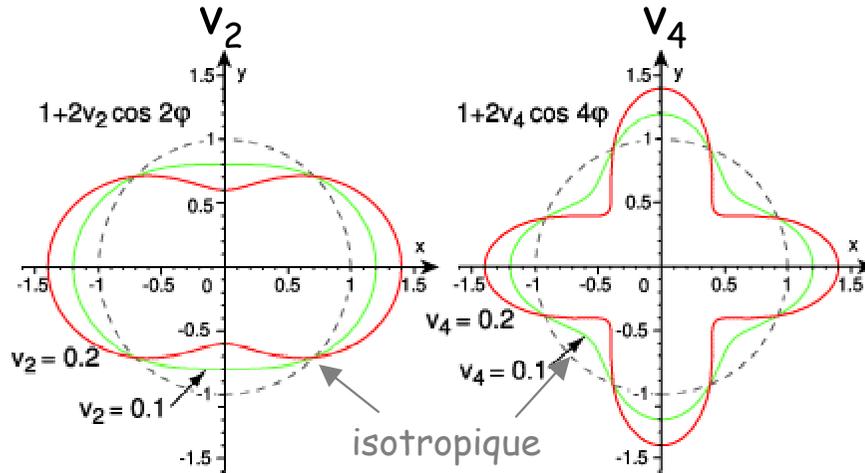
PHENIX : EOS plus douce



Harmoniques supérieures

P. Kolb
PRC 68, 031902(R)

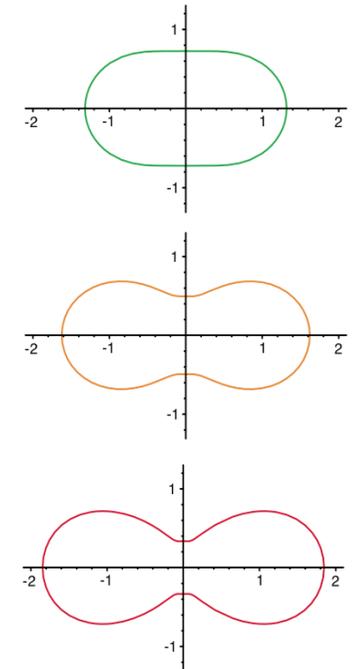
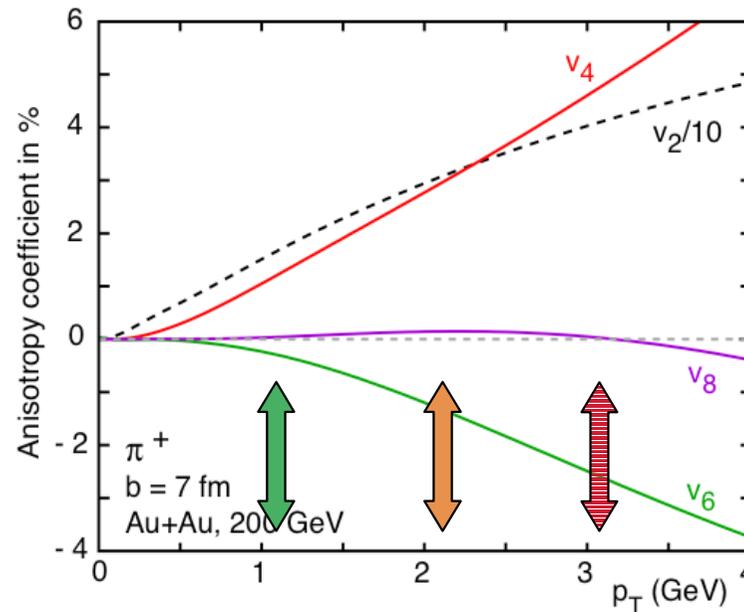
Différentes composantes de $dN/d\phi$:



- 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

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 **négligé**



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)

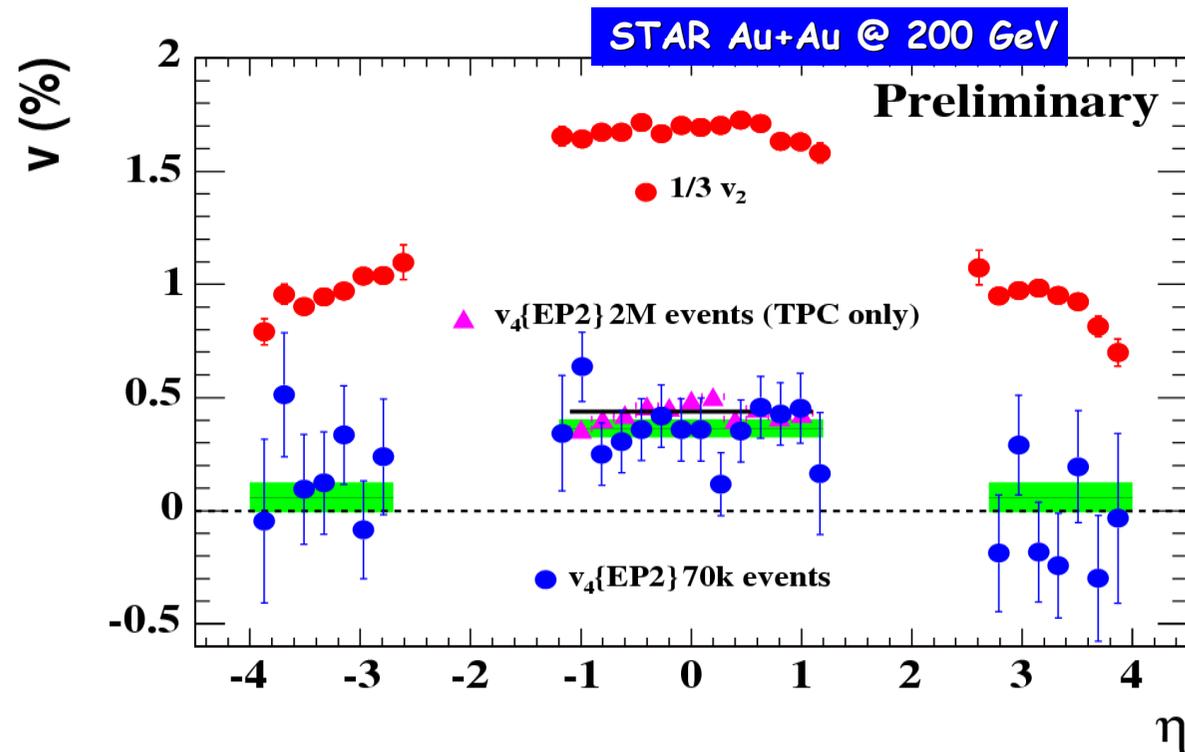
- v_2 chute d'un facteur
1.8 entre $\eta=0$ et $\eta=3$

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

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

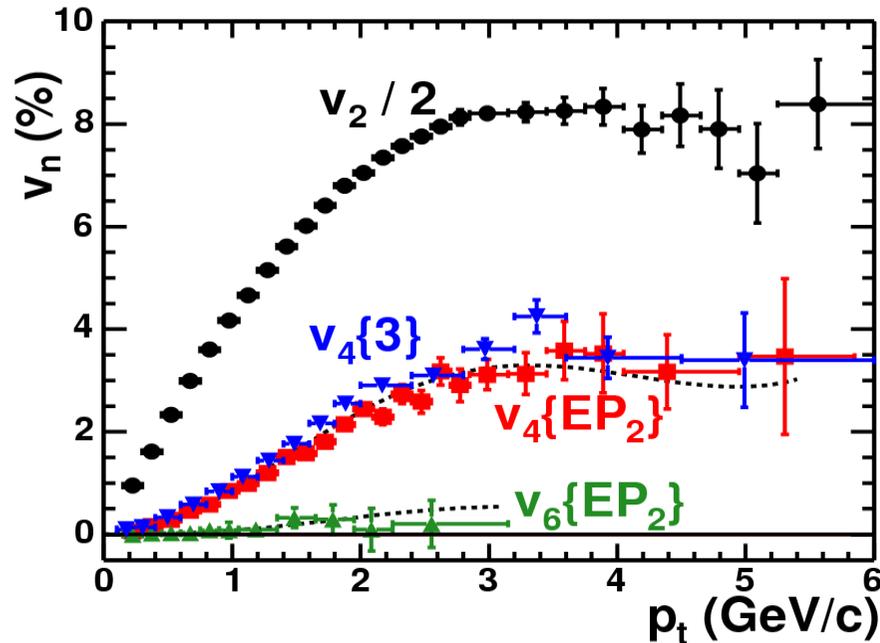
- v_4 chute plus
rapidement que v_2

Consistant
scaling $v_4 \propto v_2^2$

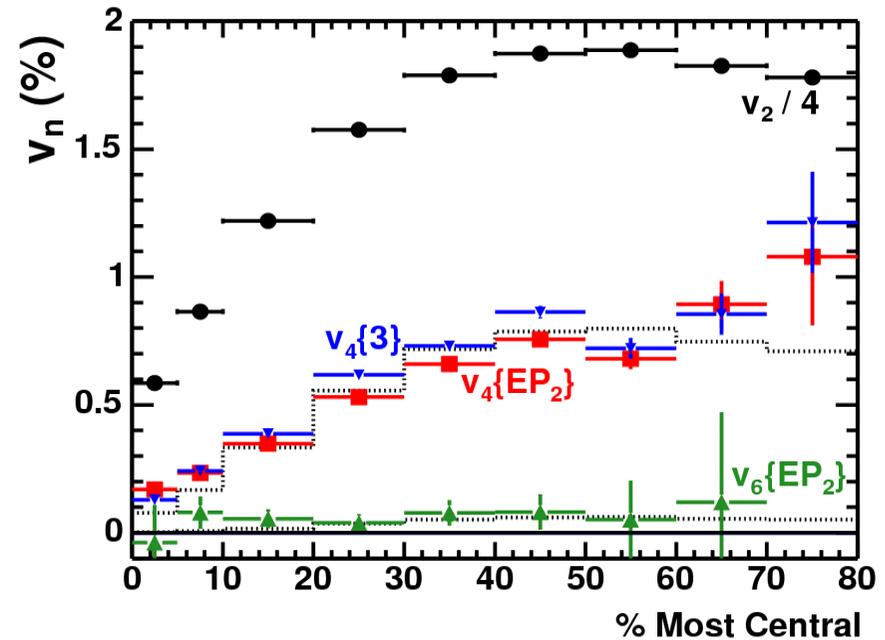


STAR v_4 et v_6

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 :

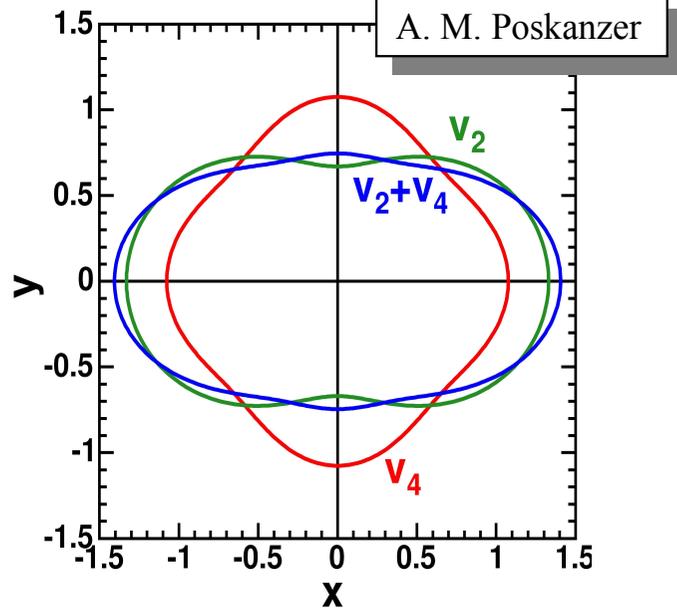
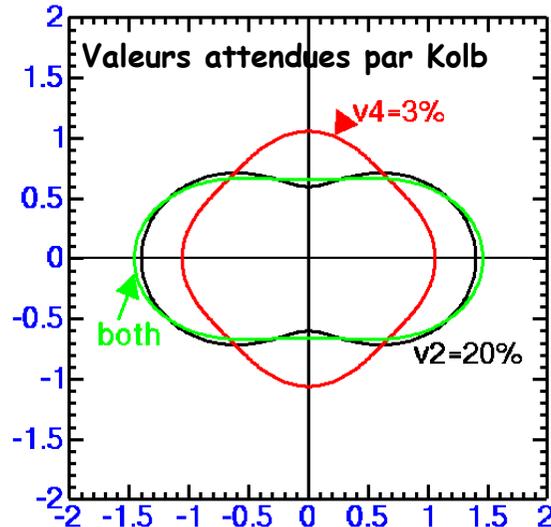
- Intégré, encore plus petit d'un facteur 10 supplémentaire par rapport à v_4
- Scale avec v_2^3

Hydro sensible aux conditions initiales :

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

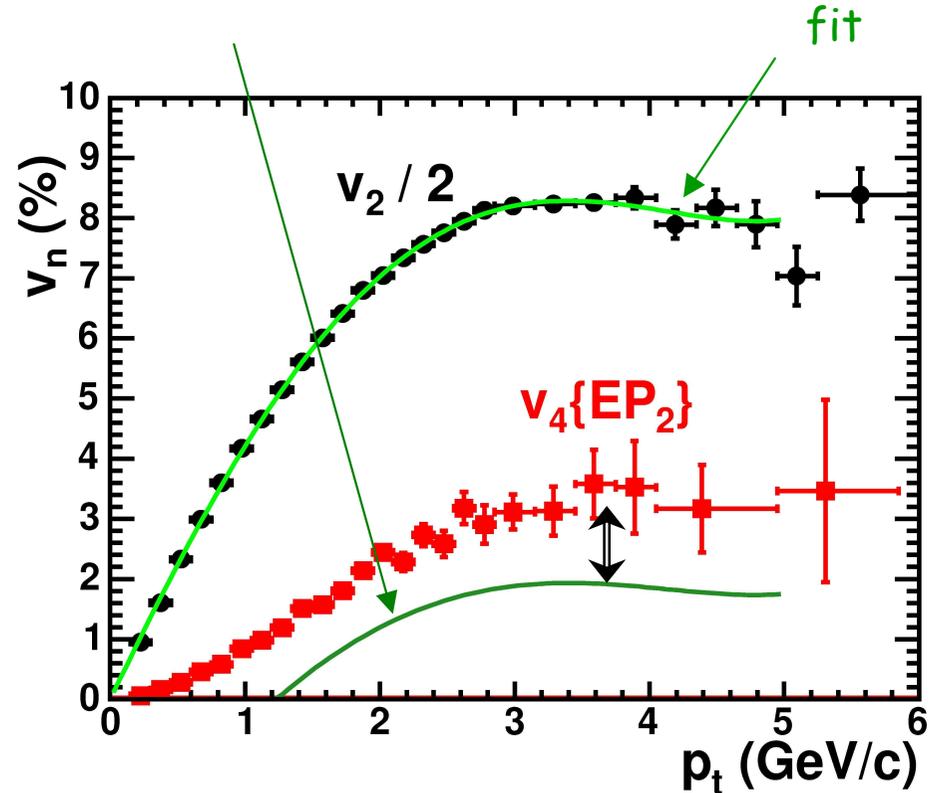
Déformation polaire

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



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