

# Spectres, flow (étranges) et application de l'hydrodynamique aux énergies du RHIC

- Hydrodynamique idéale
- Comparaison aux données de RHIC (STAR) : Au+Au 62 GeV et 200 GeV
  - Spectres
  - Flow elliptique
- Extensions par rapport à l'hydrodynamique idéale
- Sommaire

---

**Jeff Speltz**

Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien, Strasbourg

- Quelles **informations** voulons/pouvons-nous obtenir sur le système?
  - Thermalisation locale, rapide ?
  - QGP ? (via l'équation d'état : EoS)
  - Les conditions de **découplage** du système ?
- Quelles sont les **entrées** nécessaires?
  - Conditions **initiales** :
    - L'instant à partir duquel l'hypothèse de thermalisation est valide ( $\tau_0$ )
  - **Évolution** spatio-temporelle du système :
    - EoS :  $p = p(e,n)$
  - Conditions **finales** :
    - L'instant à partir duquel l'hypothèse de thermalisation n'est plus valide ( $T_{dec}$ )

- (2+1) Hydro (+ équilibre chimique partiel :  $T_{\text{ch}} \approx 164 \text{ MeV}$ ) :

P.F. Kolb, J. Sollfrank and U.Heinz, Phys. Rev. C **62** (2000) 054909

P.F. Kolb and R. Rapp, Phys. Rev. C **67** (2003) 044903

P.F. Kolb and U.Heinz, nucl-th/0305084

P. Huovinen *et al.*, Phys. Lett. B **503** (2001) 58

...

- 3D Hydro (+ cascade) :

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

D. Teaney *et al.*, nucl-th/0110037

T. Hirano and M. Gyulassy, nucl-th/0506049

...

- Résultats à 62 GeV :

- Modèle de P. Kolb et U. Heinz adapté

<http://nt3.phys.columbia.edu/OSCAR/models/list.html#AZHYDRO>

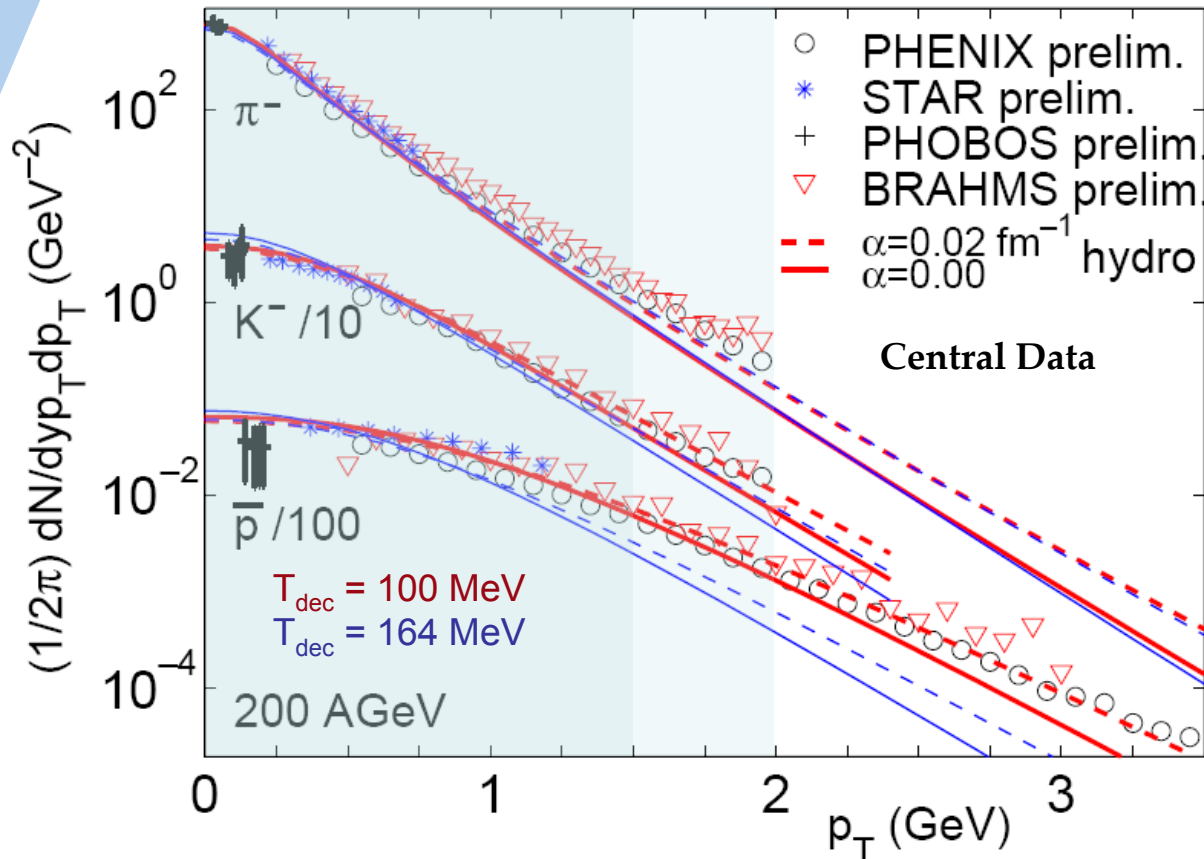
E. Frodermann and U. Heinz, private communication (2005)

R. Rapp, private communication (2006)

- $\tau_0$  (62 GeV) =  $\tau_0$  (200 GeV) = 0,6 fm/c
- $s_0$  (62 GeV) = 80 fm<sup>-3</sup> <  $s_0$  (200 GeV) = 110 fm<sup>-3</sup>
- $n_0$  (62 GeV) = 0,8 fm<sup>-3</sup> >  $n_0$  (200 GeV) = 0,44 fm<sup>-3</sup>
- 62 GeV et 200 GeV : EoS avec transition de phase de 1<sup>er</sup> ordre à  $T_c = 165 \text{ MeV}$

# Spectres centraux à 200 GeV : $\pi^-$ , $K^-$ , $\bar{p}$

Au+Au,  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV

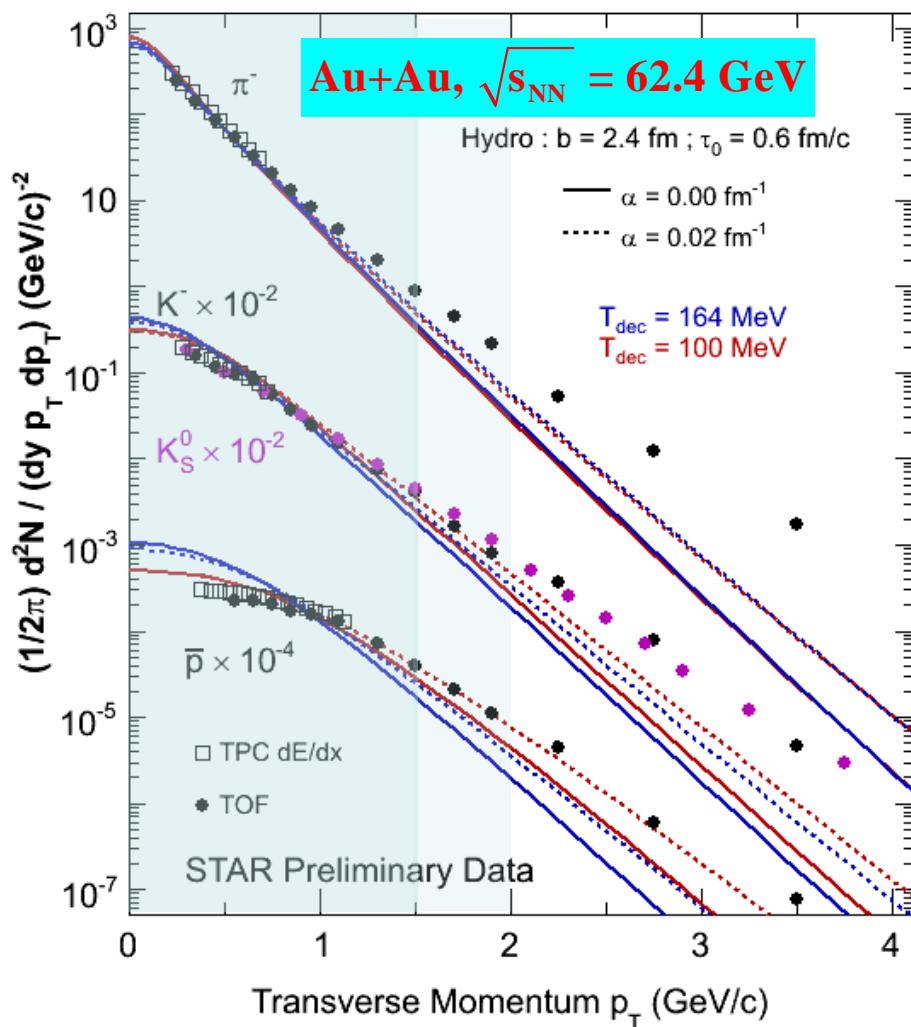


- Le **meilleur** accord entre données et hydro pour :
  - $T_{dec} = 100$  MeV
  - $\alpha \neq 0$
- $\alpha \neq 0$  : importance des conditions initiales

Modèle (plot) de P.F. Kolb and R. Rapp, Phys. Rev. C **67** (2003) 044903

$\alpha$  : vitesse transverse initiale (à  $\tau_0$ ) :  $v_T(r) = \tanh(\alpha r)$

# Spectres centraux à 62 GeV : $\pi^-$ , $K^-$ , $\bar{p}$



- Accord comparable (peut-être légèrement moins pour les  $\pi^-$ ) entre hydro et données qu'à 200 GeV
- Ne marche qu'à bas- $p_T$  ( $p_T < 1.5 - 2$  GeV/c)
- Échec à plus haut  $p_T$  ( $> 2$  GeV/c) attendue:
  - Moins de rediffusions

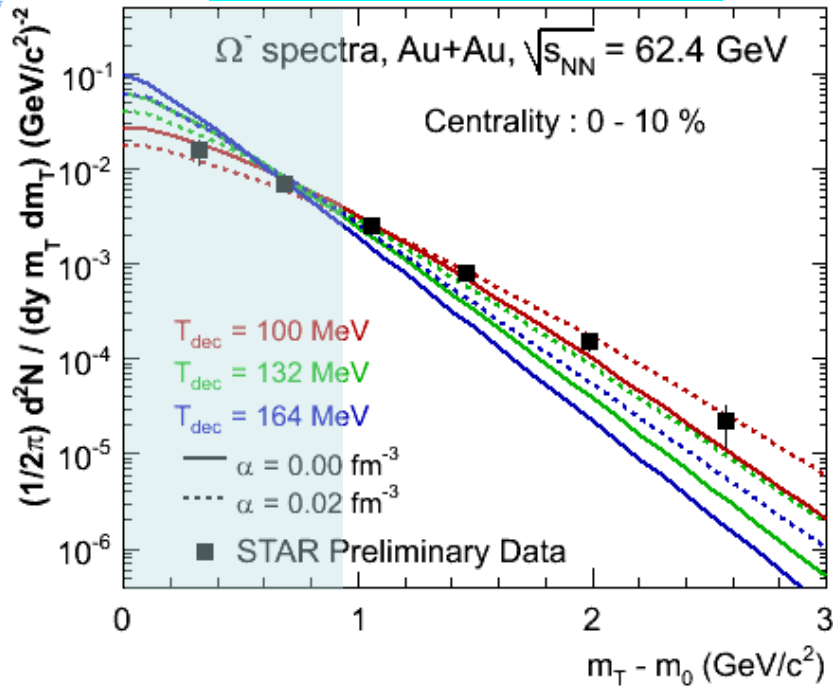
⇒ Limite de validité de l'hypothèse de thermalisation

P.F. Kolb, J. Sollfrank and U.Heinz, Phys. Rev. C 62 (2000) 054909

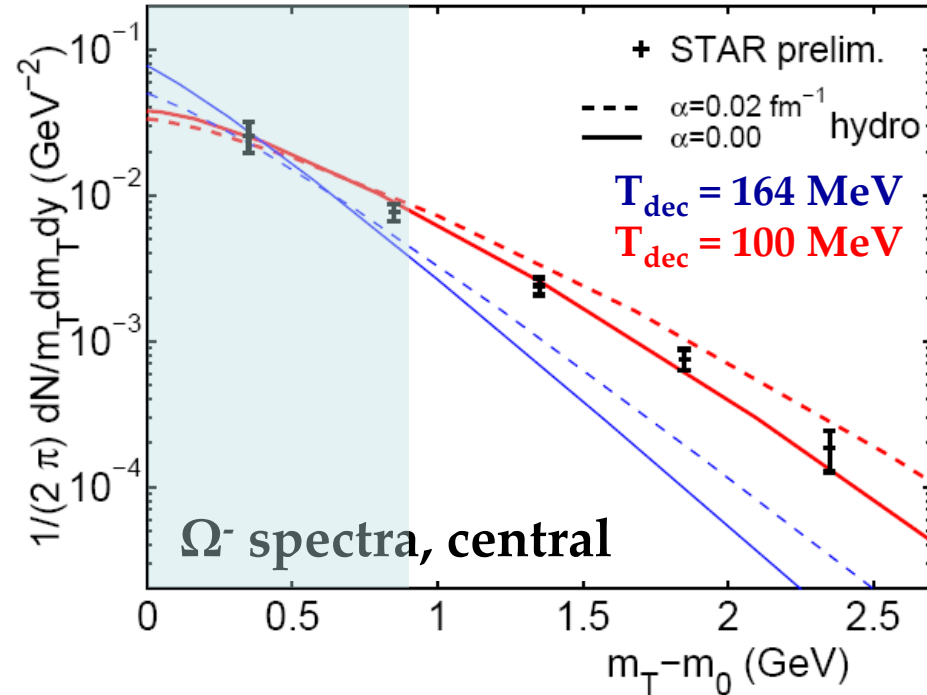
P.F. Kolb and R. Rapp, Phys. Rev. C 67 (2003) 044903

P.F. Kolb and U.Heinz, nucl-th/0305084

**Au+Au,  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  GeV**



**Au+Au,  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV**



- Données reproduites **le mieux** avec :
  - $T_{dec} \approx 100$  MeV
  - Pour les deux énergies
- Le **même** que pour  $\pi^-$ ,  $K^-$ ,  $\bar{p}$
- Accord valable pour le **spectre entier** !

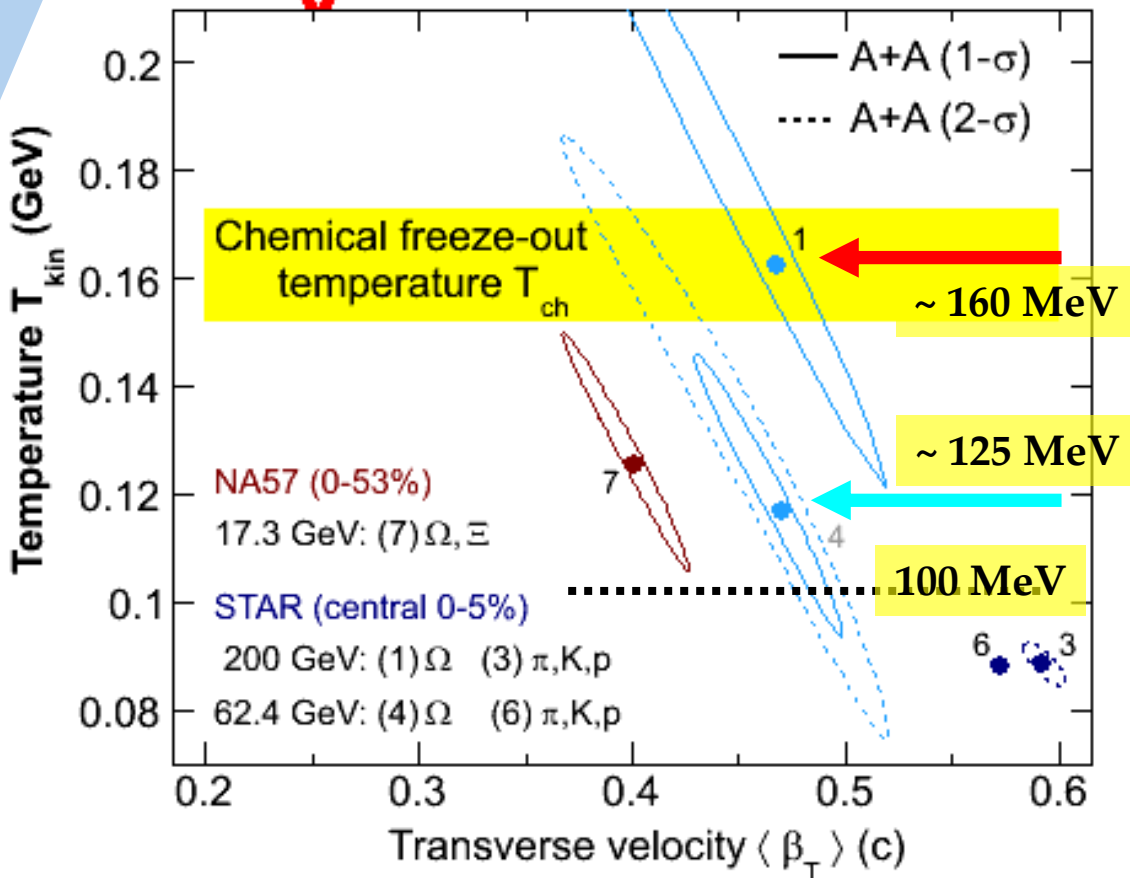
P.F. Kolb and U. Heinz, nucl-th/0305084

- $T_{dec} \approx 164$  MeV (gel à l'hadronisation):  
**pas** suffisamment de flow radial

Blast-Wave : E. Schnedermann *et al.*, Phys. Rev. C 48 (1993) 2462  
 F. Retière and M. Lisa, Phys. Rev. C 70 (2004) 044907



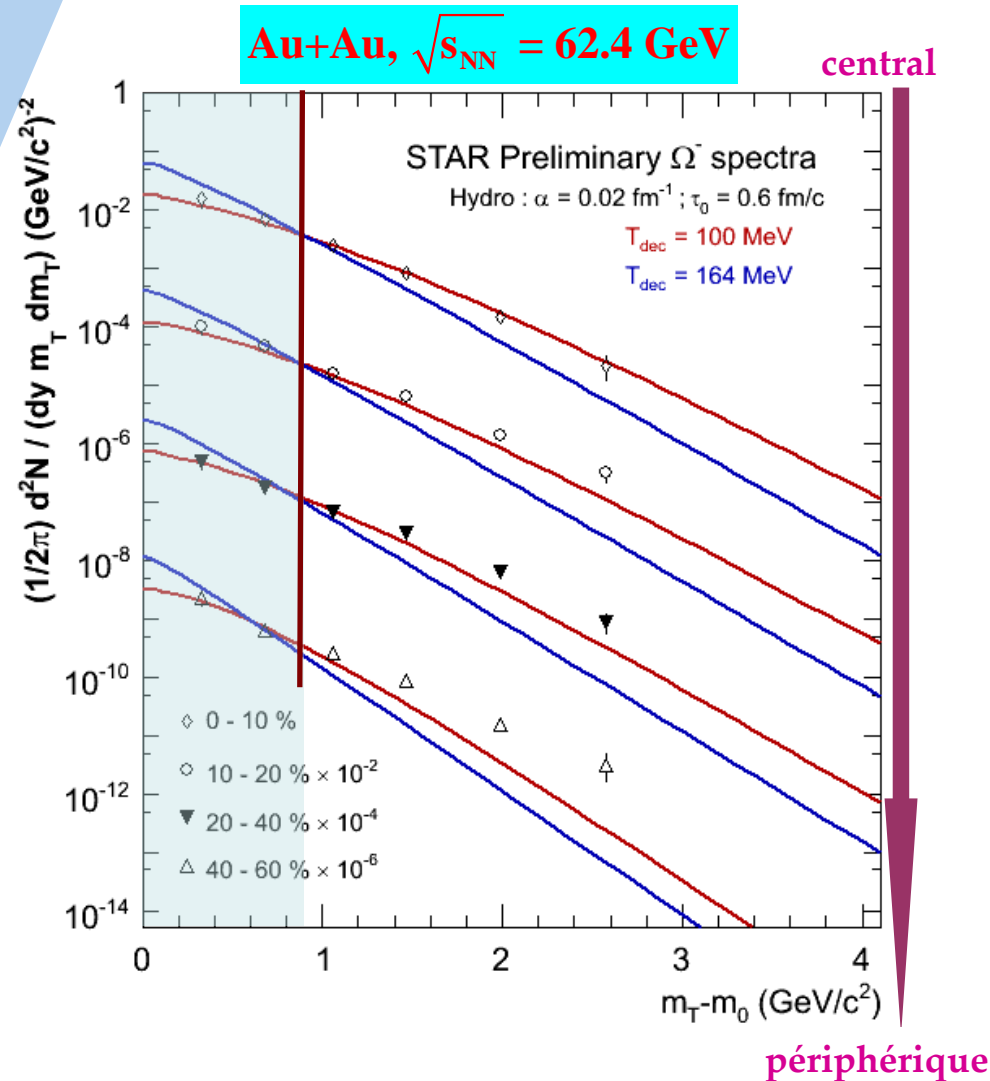
Preliminary Au+Au,  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  GeV



- Blast-Wave: paramétrisation inspirée de l'hydro :
  - Paramètre  $T_{kin}$
  - Paramètre  $\langle \beta_T \rangle$
  - Ajustement direct ( $\chi^2$ ) sur les données
- Blast-Wave donne des résultats légèrement différents pour les  $\Omega$  que l'hydro :
  - $T_{kin} \sim T_{ch} > 100$  MeV
- Grandes incertitudes
- Ajustement B-W sur l'hydro :  $T_{kin} \neq T_{dec}$  (différence allant jusqu'à 30 MeV)
- Sont  $T_{dec}(\text{hydro})$  et  $T_{kin}(\text{B-W})$  la même quantité physique ?

NA57 : C. Alt *et al.* Phys. Rev. Lett 94 (2005) 192301

# Dépendance en centralité : spectres $\Omega$ à 62 GeV



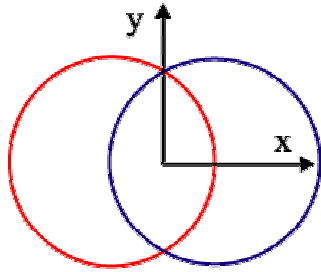
- **Bon accord** pour collisions **centrales**: l'accord diminue pour collisions périphériques
- Les spectres les plus **périphériques** **pas** reproduits par l'hydro
- **Échec** pour les collisions plus périphériques **attendue** :
  - Taille du système plus **faible**
  - Moins de **rediffusions**

⇒ L'hypothèse de **thermalisation** moins valide avec moins de centralité

⇒ **Caractériser** les limites du « **fluide parfait** » ?

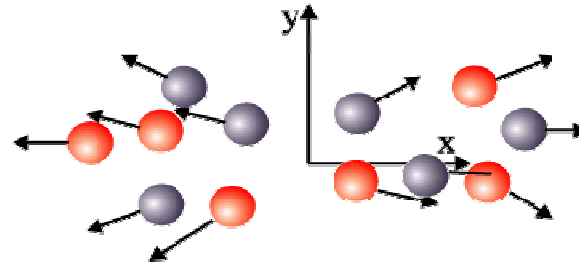
—  $p_T = 2 \text{ GeV}/c$





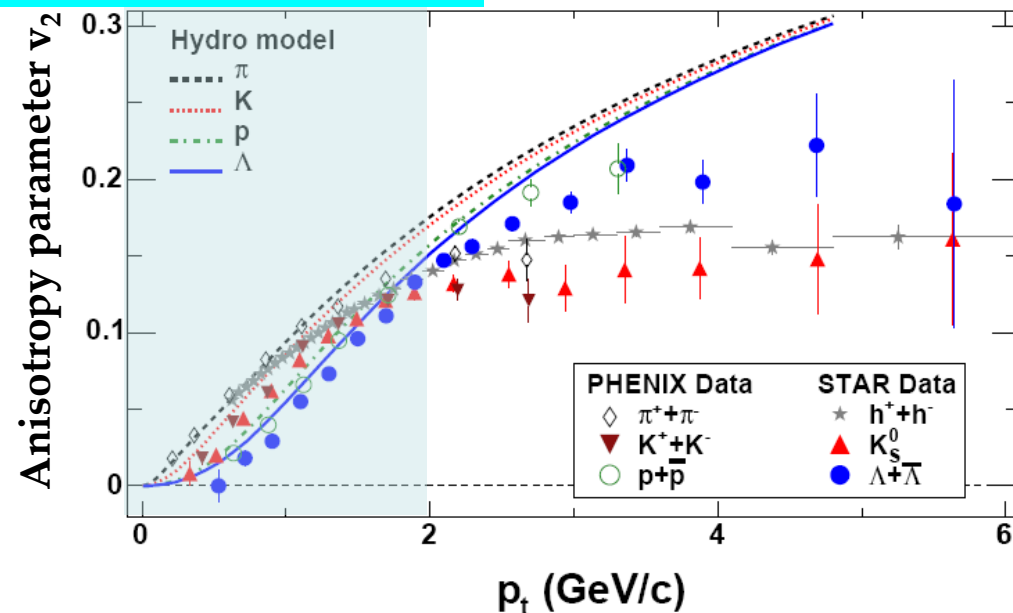
Anisotropie spatiale

interactions



Anisotropie en impulsion  $\Rightarrow v_2$

Au+Au,  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV



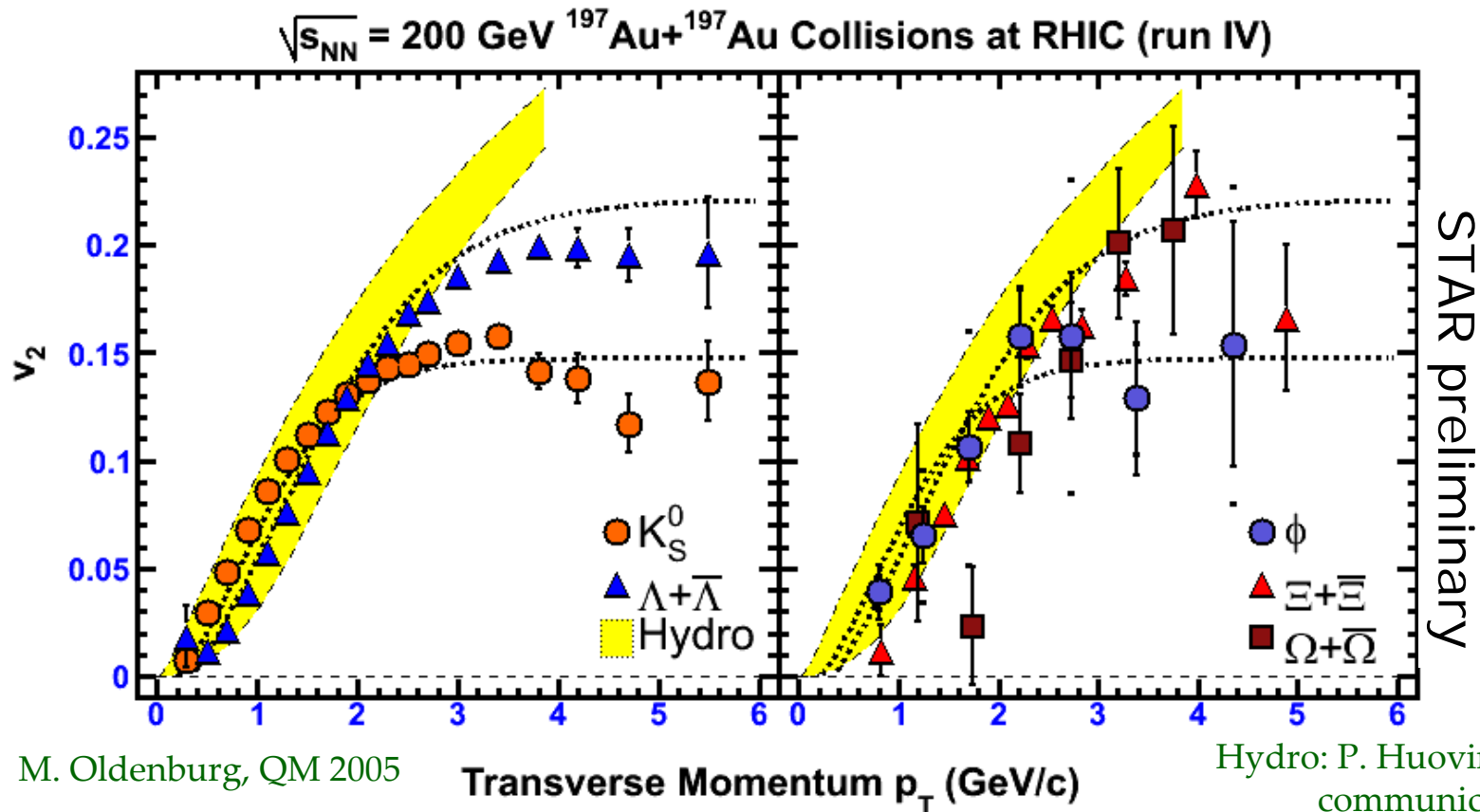
J. Adams *et al.*, Phys. Rev. **C 72** (2005) 014904

- $\tau_0 = 0,6$  fm/c  $\Rightarrow$  thermalisation rapide

- **Hierarchie en masse** à bas- $p_T$  de l'hydro reproduite dans données
- **Accord qualitatif** jusqu'à  $p_T \sim 2$  GeV/c
  - Comme pour les spectres
- À  $p_T > 2$  GeV/c les données dévient de l'hydro
  - Description possible par des effets dissipatifs

D. Molnar and M. Gyulassy,  
Nucl. Phys. **A 697** (2002) 495

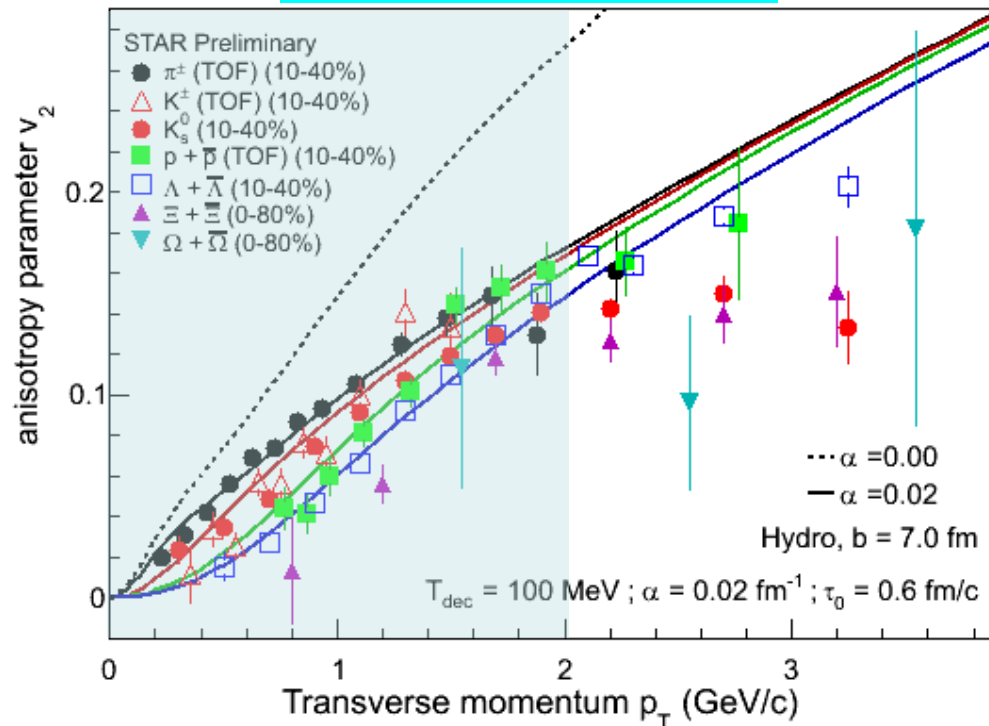
# $v_2$ des particules étranges à 200 GeV



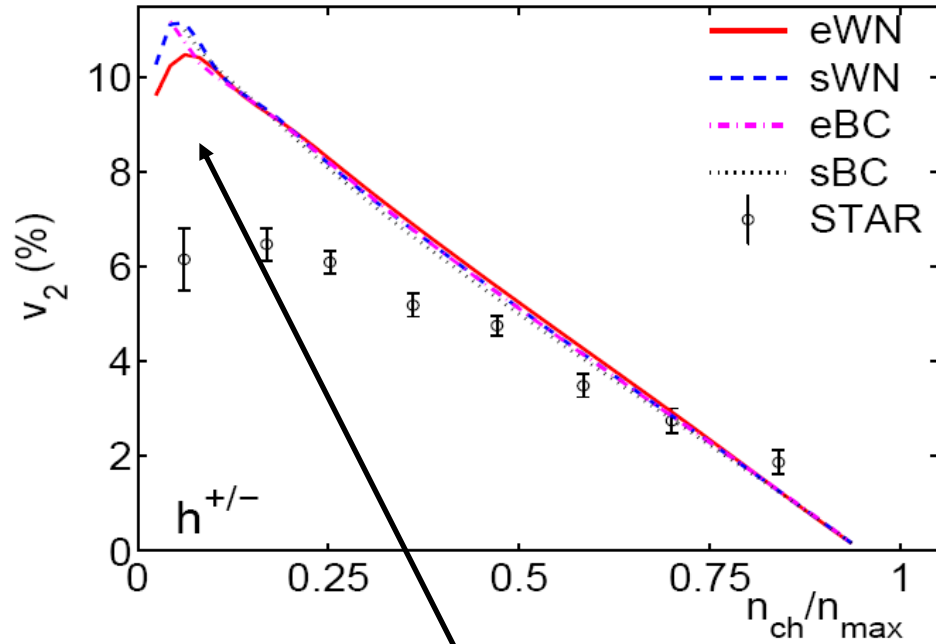
- **Toutes** les particules étranges (y compris  $\Omega(sss)$  et  $\phi(ss\bar{s})$ ) ont du **flow**
  - Indication pour **thermalisation** des quarks légers ?
- Différence baryon/méson à  $p_T$  intermédiaire ( $2 \text{ GeV}/c < p_T < 5-6 \text{ GeV}/c$ ):
  - Indication pour mouvement collectif dans phase **partonique** (coalescence/recombinaison)

- Caractéristiques **semblables** qu'à 200 GeV:
  - Hiérarchie en masse à bas- $p_T$
  - Échec de l'hydro à partir de  $p_T \sim 2$  GeV/c
  - Flow du quark s
  - ~ Même amplitude
- **Même** paramètres que pour les spectres
  - $T_{\text{dec}} \approx 100$  MeV
  - $\alpha \neq 0$  fm<sup>-1</sup>

Au+Au,  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  GeV

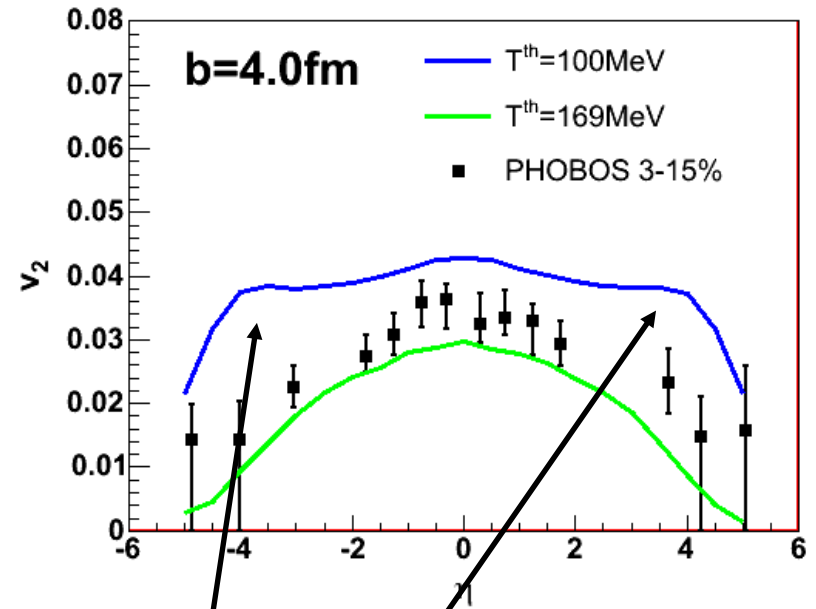


$\alpha \neq 0$  fm<sup>-1</sup>  $\Rightarrow$  Accord spectre +  $v_2$  avec mêmes paramètres !



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

- Pour la dépendance en  $\eta$  :  
modèle 3D

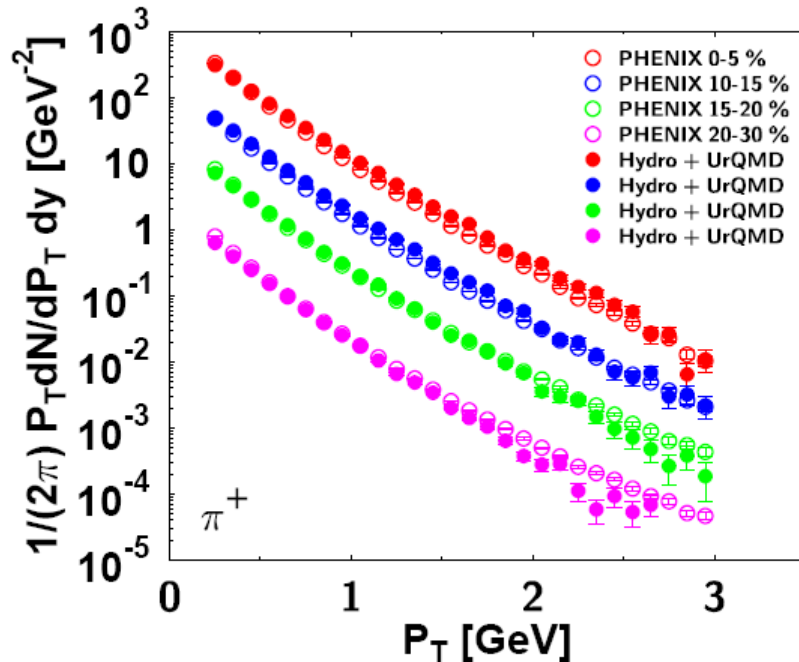


T. Hirano and M. Gyulassy, nucl-th/0506049  
T. Hirano, nucl-th/0601006

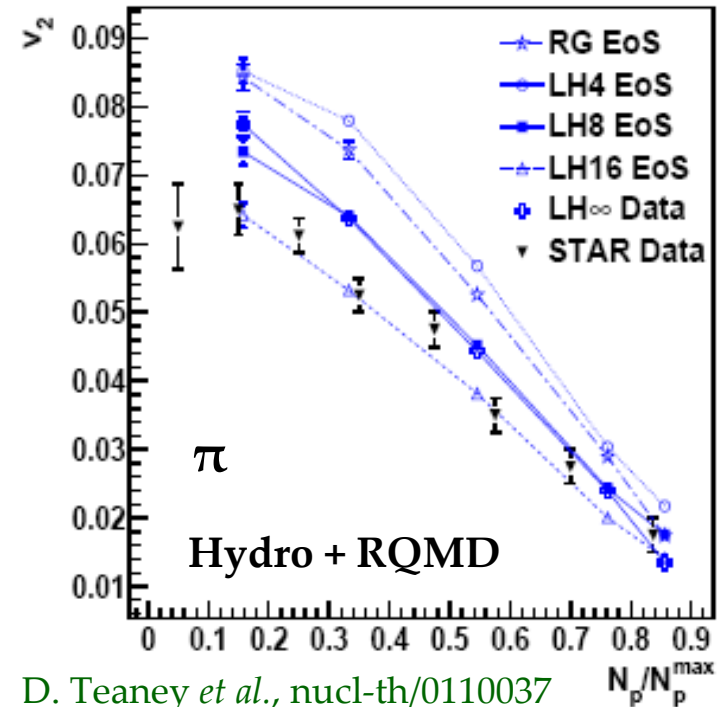
- L'hydro idéale génère trop de flow : remède = cascade

- Hydro idéale dans phase partonique + transition ( $T_c$ )
- À  $T_{ch} \approx T_c$  : modèle microscopique de cascade hadronique/partonique (RQMD, UrQMD,...)
- Tient compte de possibles effets dissipatifs dans phase hadronique

hybride

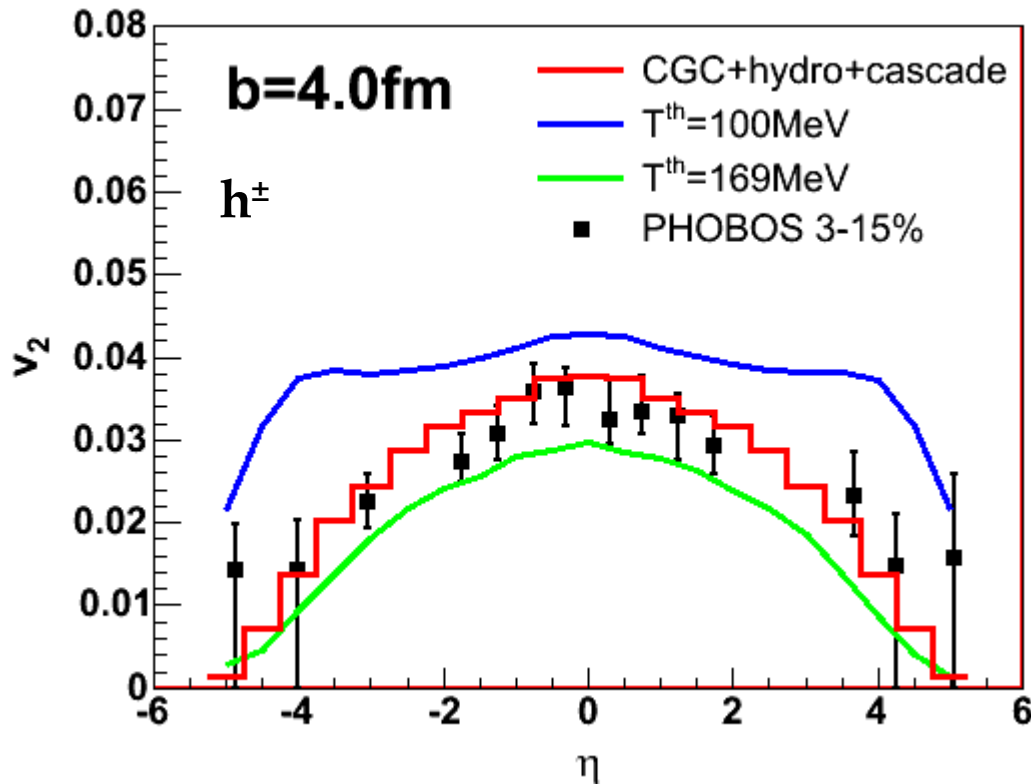


C. Nonaka and S.A. Bass, nucl-th/0510038



D. Teaney *et al.*, nucl-th/0110037

- Description complète : modélise aussi la période avant la thermalisation: CGC, fluctuations e-by-e (Nexus),...



- CGC+hydro+cascade bonne description de  $dv_2/d\eta$

T. Hirano and M. Gyulassy, nucl-th/0506049

T. Hirano, nucl-th/0601006

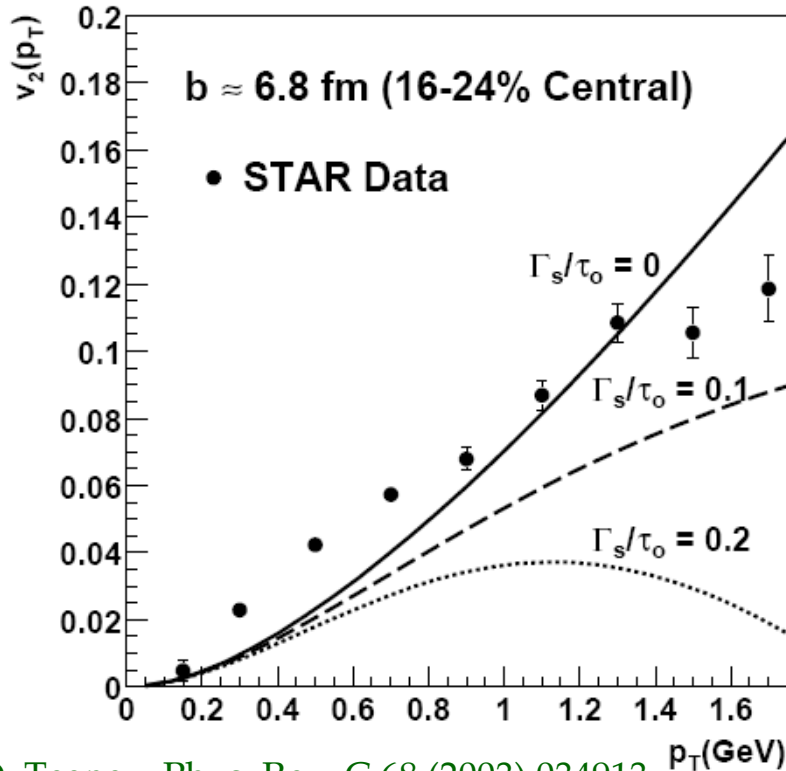
- **Bon accord** entre données (centrales,  $|y| < 1$ ) et l'**hydrodynamique idéale** :
  - Spectres et  $v_2$  à toutes les énergies du RHIC ( 62 GeV et 200 GeV)
  - Utilisation d'une **EoS** avec transition de phase **QGP** → **HG**
  - Indication pour **thermalisation rapide** ( $\tau_0 = 0,6$  fm/c)
  - Découplage cinétique ( $T_{\text{dec}}$ ) semble **similaire** pour toutes les particules dans l'hydro
    - Clarification nécessaire pour le B-W (mesures plus précises à bas- $p_T$ , ...)
- L'hydrodynamique idéale **échoue** progressivement pour les collisions **périphériques, à haut- $p_T$ , à grande rapidité**
  - Description possible par différents outils qui tiennent compte d'effets **dissipatifs**
  - Possible caractérisation du début et des déviations de la « fluidité parfaite »?
- Pour les observables montrées :
  - Si un **QGP** est formé à 200 GeV il l'est vraisemblablement aussi à **62 GeV!**
- Rien n'est vraiment parfait!



# Backup



- Pour de faibles déviations du comportement idéal (non visqueux) : hydrodynamique relativiste **visqueuse**



D. Teaney, Phys. Rev. C 68 (2003) 034913

$$\frac{\Gamma_s}{\tau} \propto \frac{\eta}{s}$$

$\eta$  : « shear » viscosité  
 $s$  : densité d'entropie

- $\Gamma_s/\tau \sim 0.1 \Rightarrow \eta/s \sim$  limite inférieure

P. Kovtun et al., hep-th/0405231

- Comme  $\eta \sim 0.1$  GeV/fm<sup>2</sup> autour de  $T_c$  dans un QGP et HQ, mais  $\eta/s$  plus large dans HG  $\Rightarrow$  réduction brusque de  $s \Rightarrow$  **déconfinement**

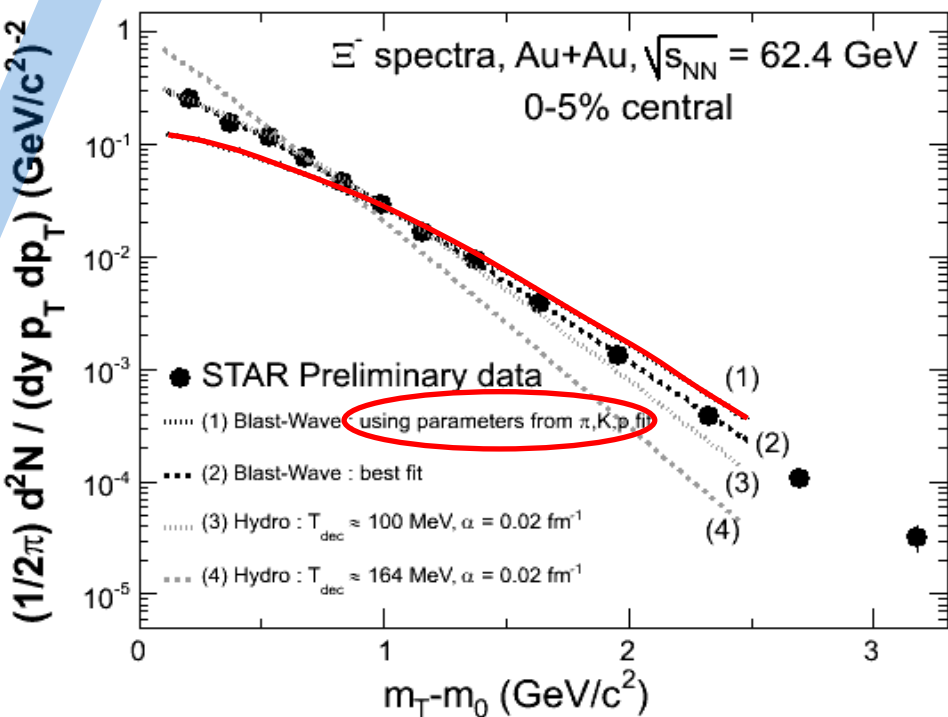
T. Hirano and M. Gyulassy, nucl-th/0506049

et

Utilisation d'une **EoS** avec QGP donne le meilleur accord avec les données

U. Heinz and P. Kolb, hep-ph/0204061

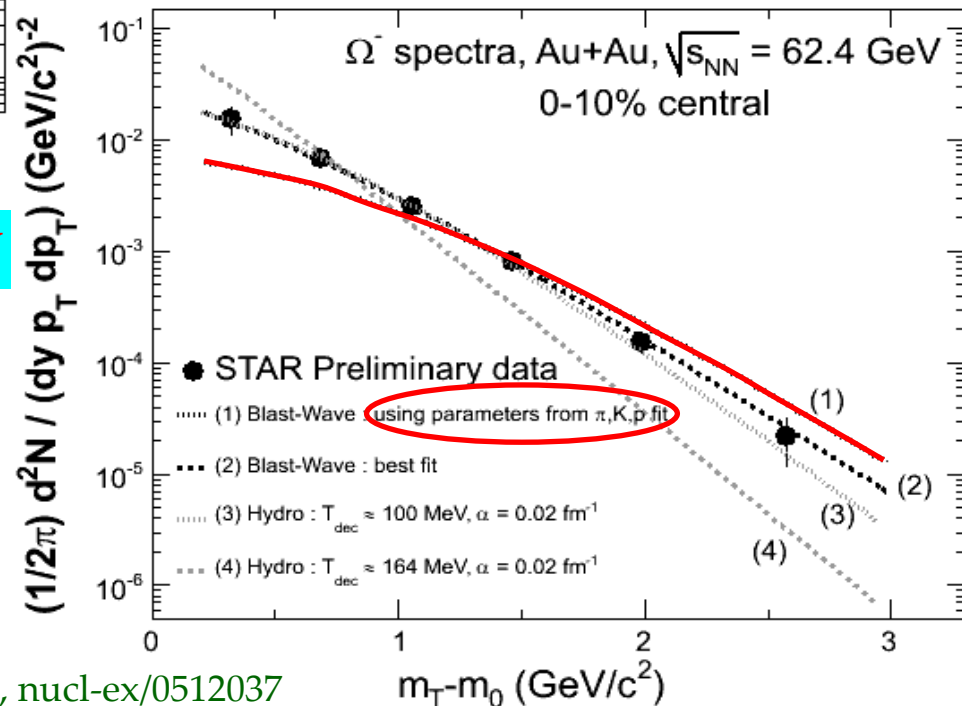
# Compilation de Comparaisons



Au+Au,  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  GeV

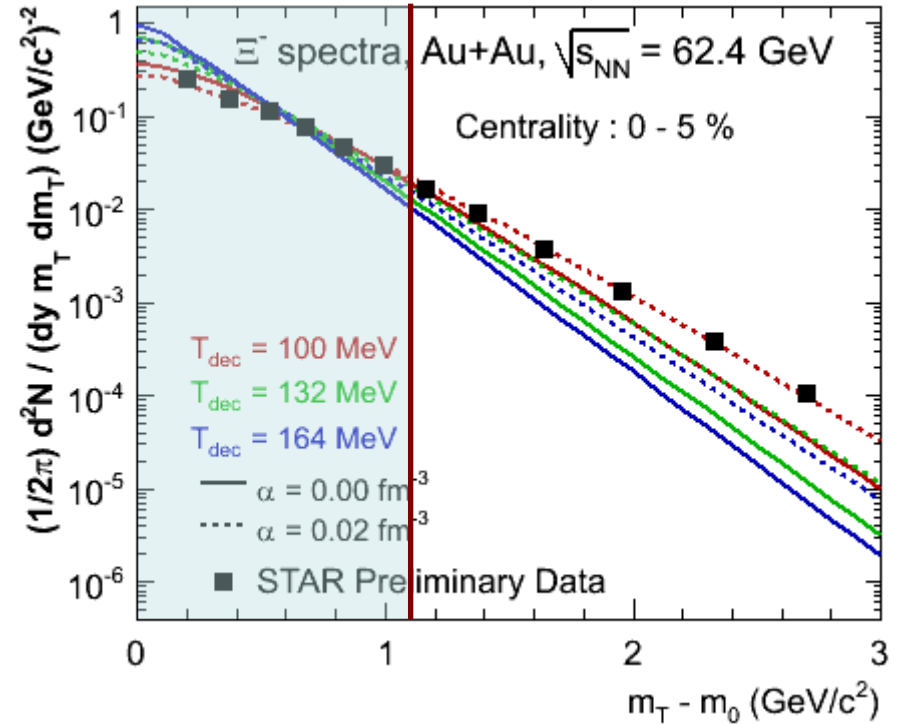
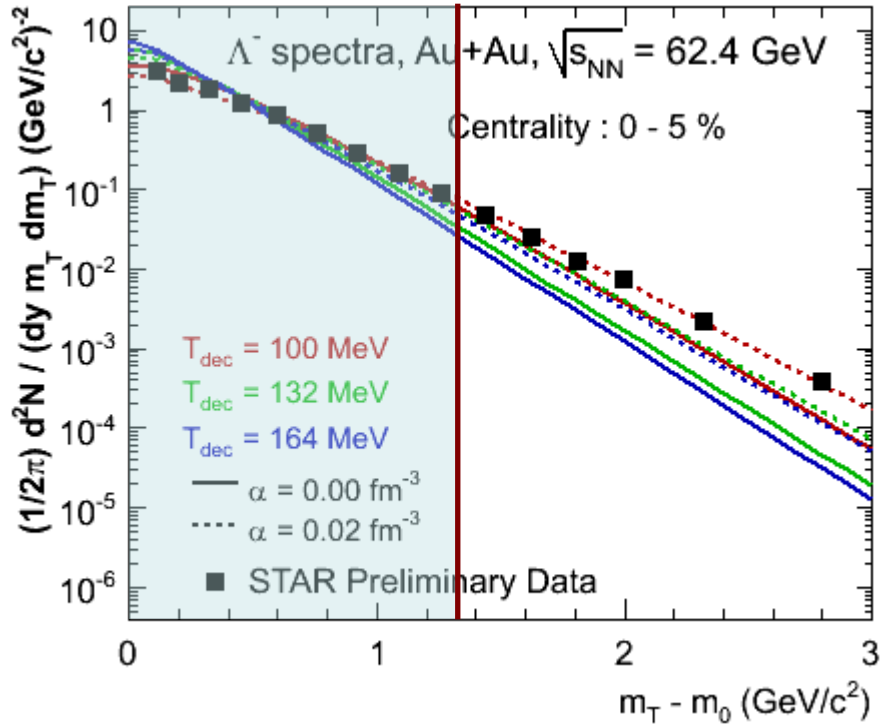
- Différence entre  $\Xi^-$ ,  $\Omega^-$  et  $\pi, K, p$  essentiellement due à  $\langle \beta_T \rangle$

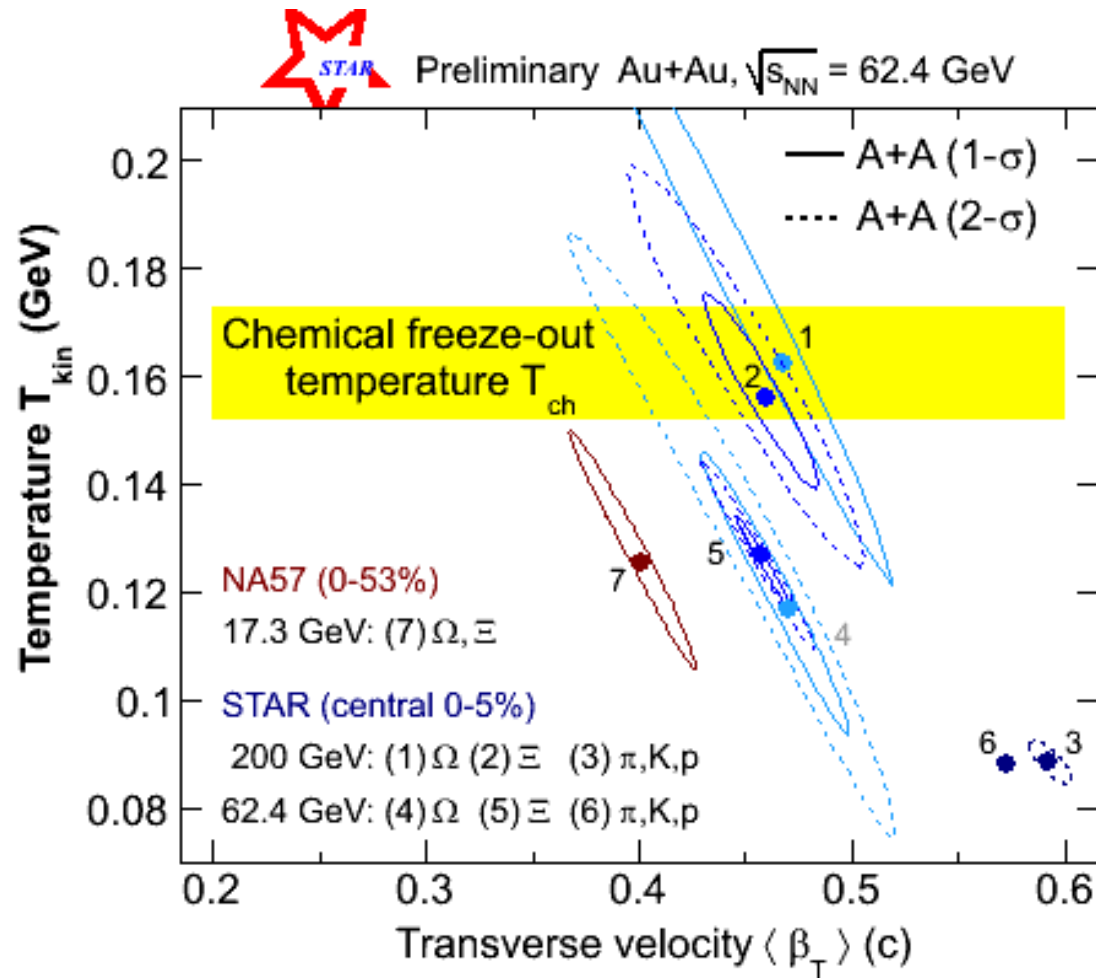
- Utiliser paramètres B-W des  $\pi, K, p$  sur les baryons multi-étranges
  - $T_{kin} = 90$  MeV
  - $\langle \beta_T \rangle = 0.57 c$
- $\Xi^-$  et  $\Omega^-$  non reproduits



J. S. (for the STAR Collaboration), nucl-ex/0512037

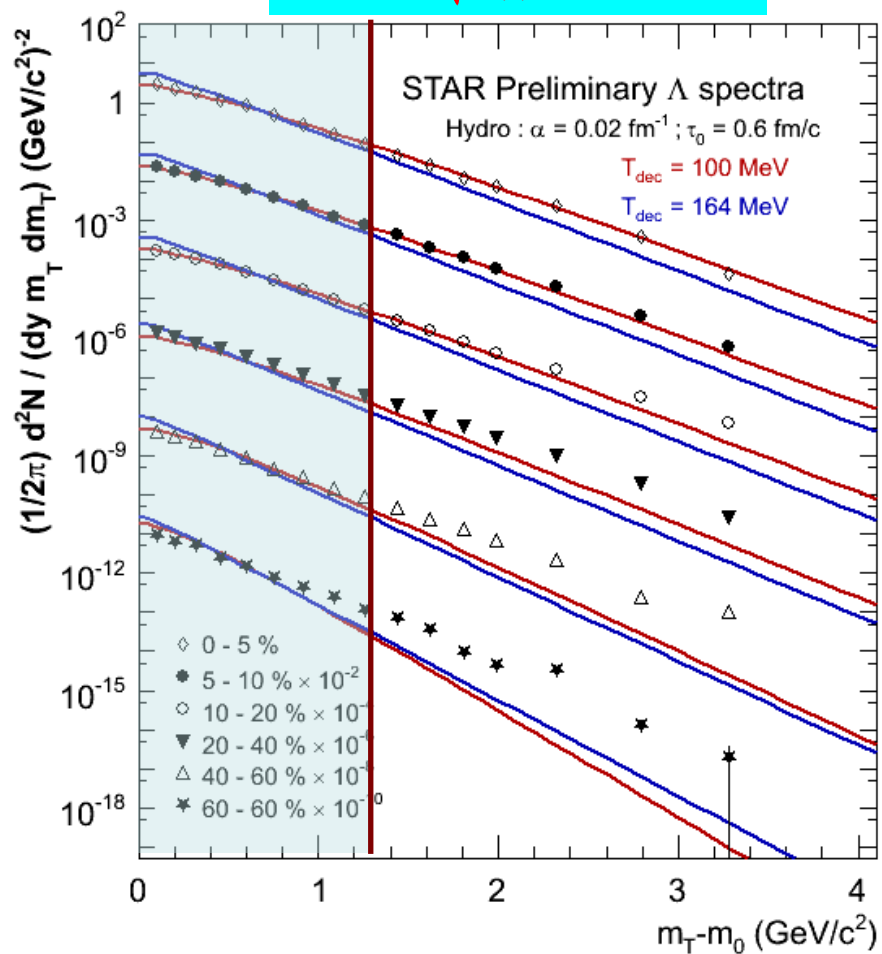
# Spectres centrales à 62 GeV : $\Lambda$ , $\Xi$



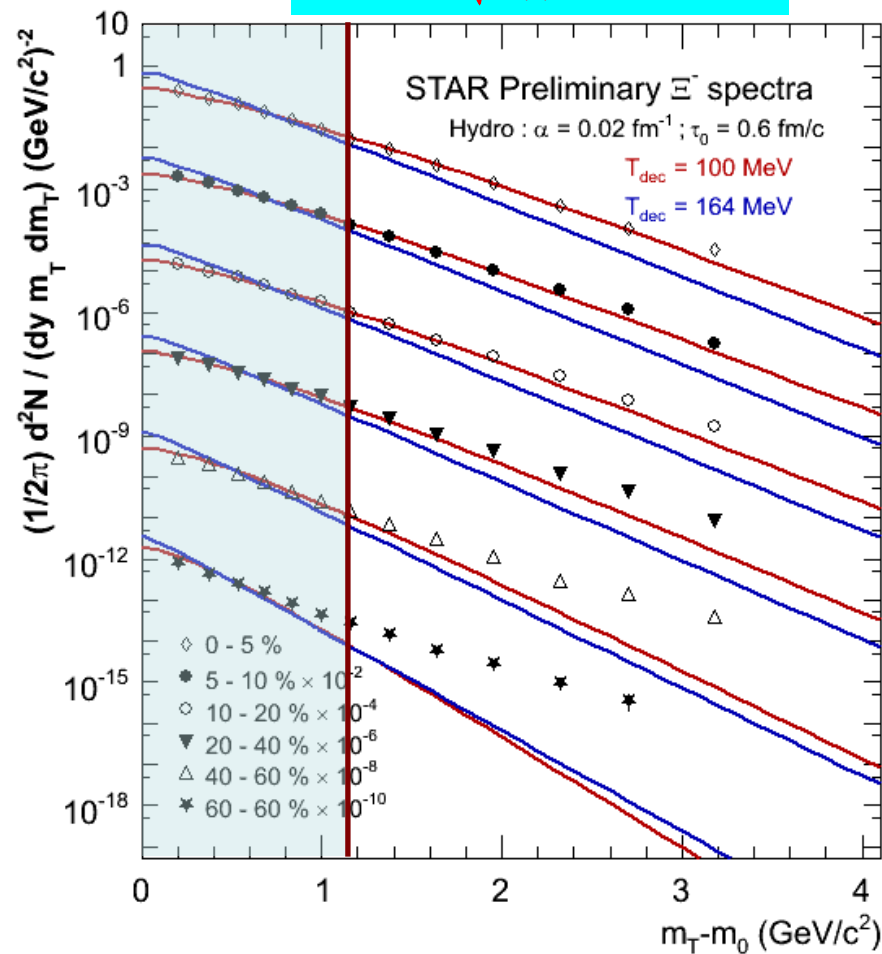


# Dépendence en centralité : spectres $\Lambda$ , $\Xi$ à 62 GeV

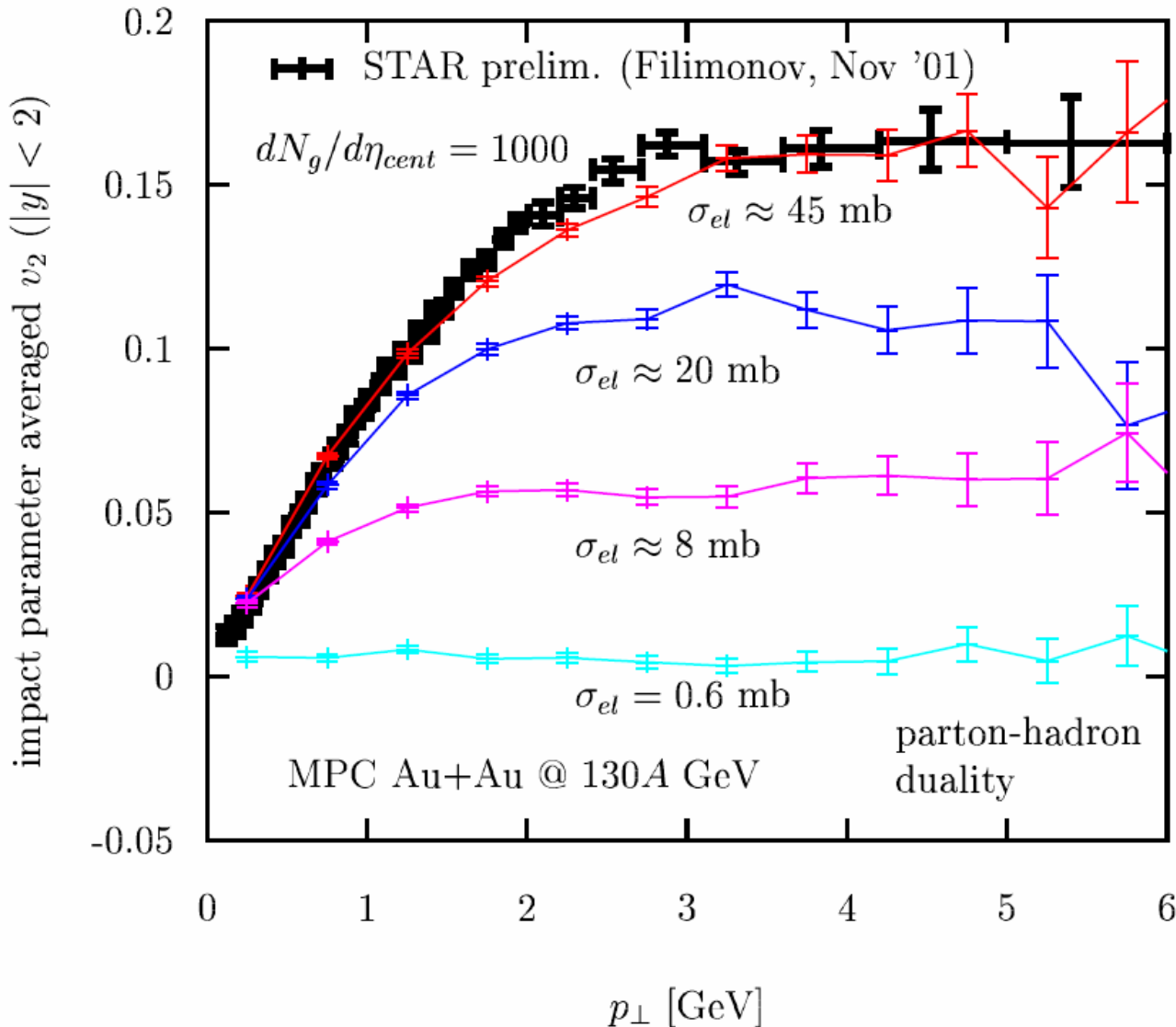
Au+Au,  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  GeV



Au+Au,  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  GeV



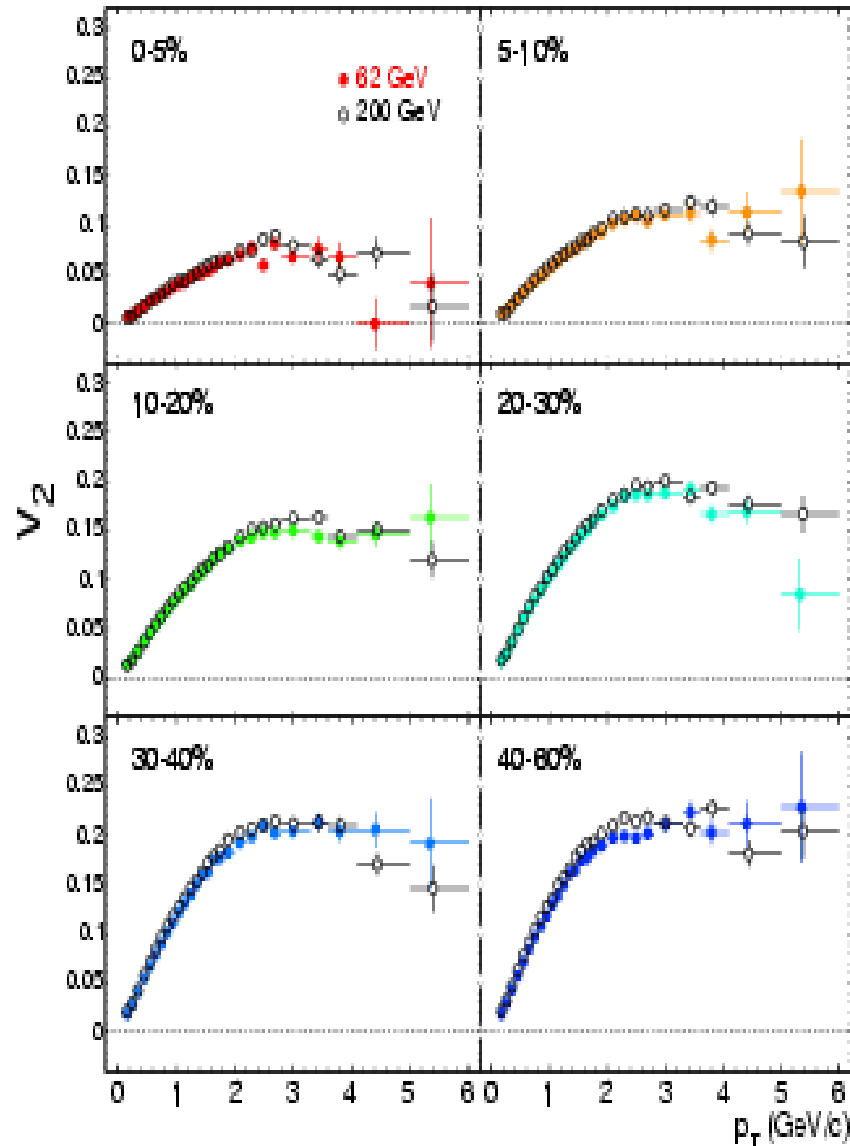
# $v_2$ : Microscopic Parton Cascade



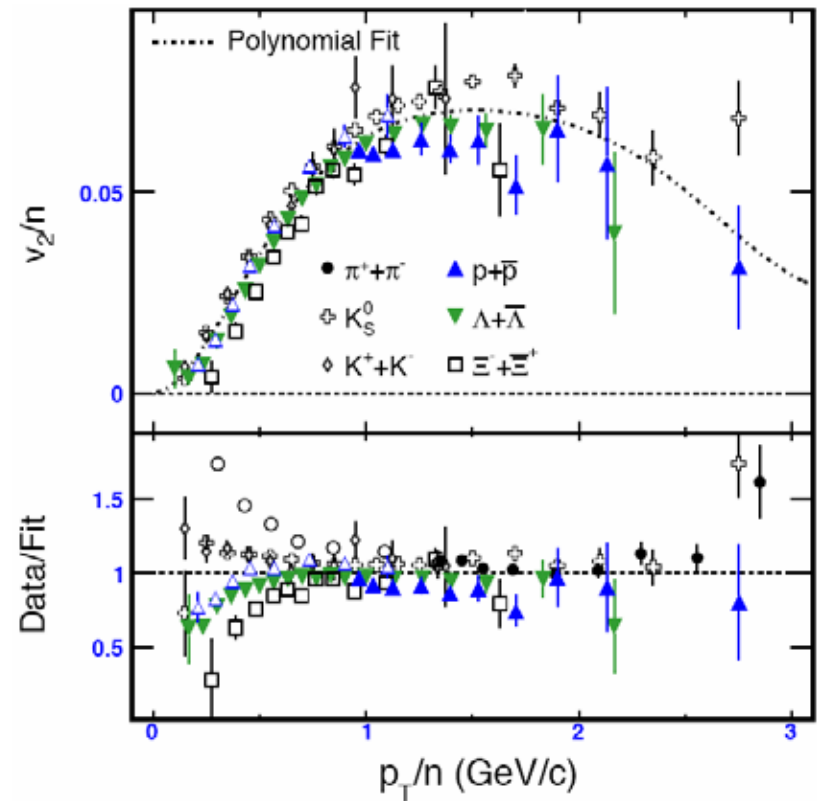
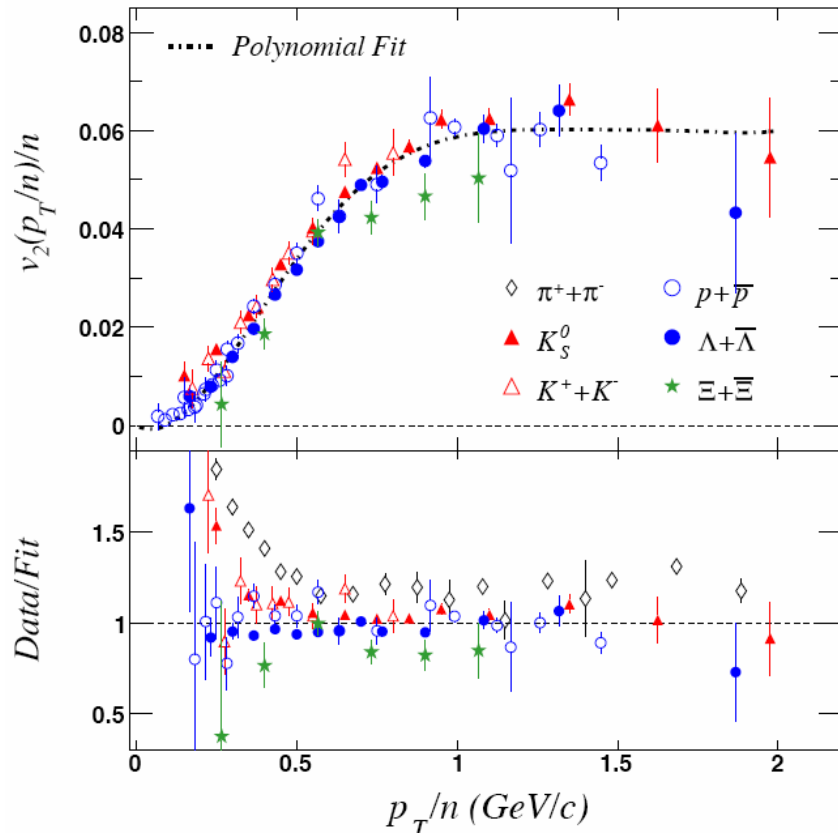
- Nécessite très large section efficace élastique
- Reproduit les données

D. Molnar and M. Gyulassy,  
Nucl. Phys. A 697 (2002) 495

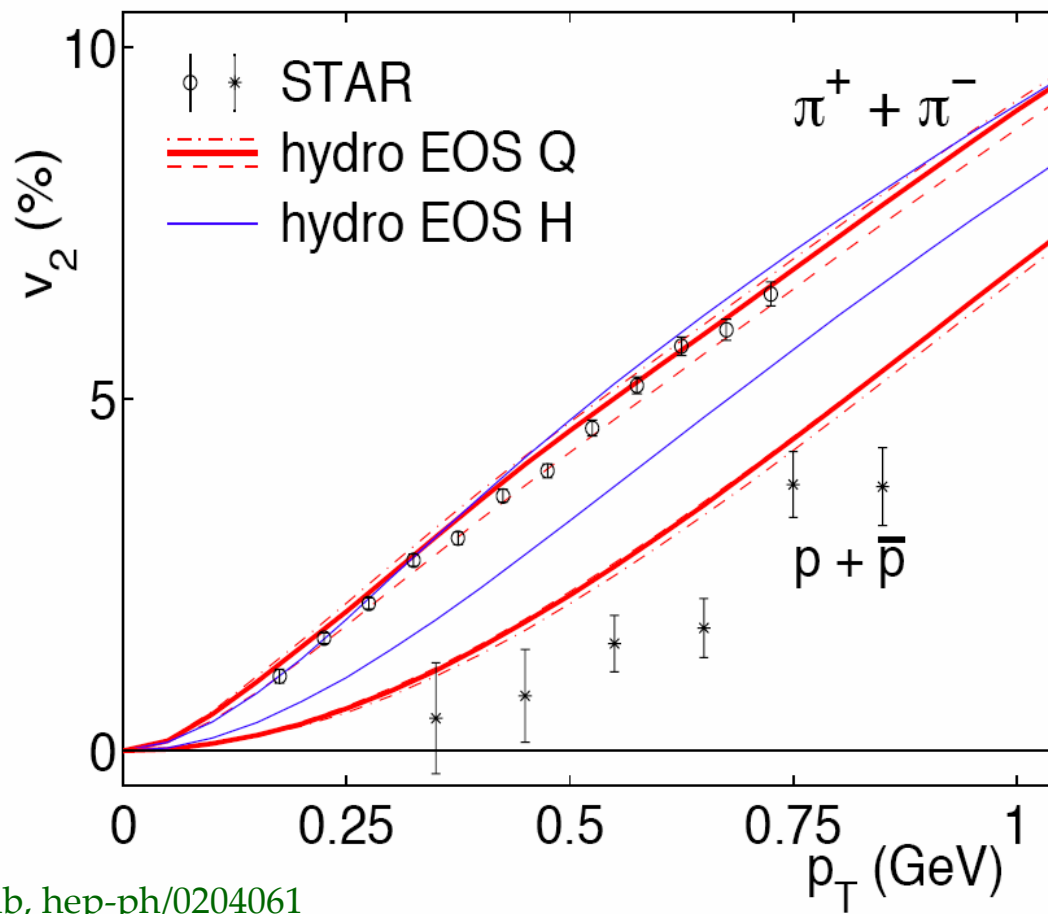
# Comparaison $v_2$ 62 GeV et 200 GeV



# Mise en échelle avec le nombre de quarks constituants







U. Heinz and P.F. Kolb, hep-ph/0204061

# Comparaison de différents modèles hydro

