

Statut ALICE

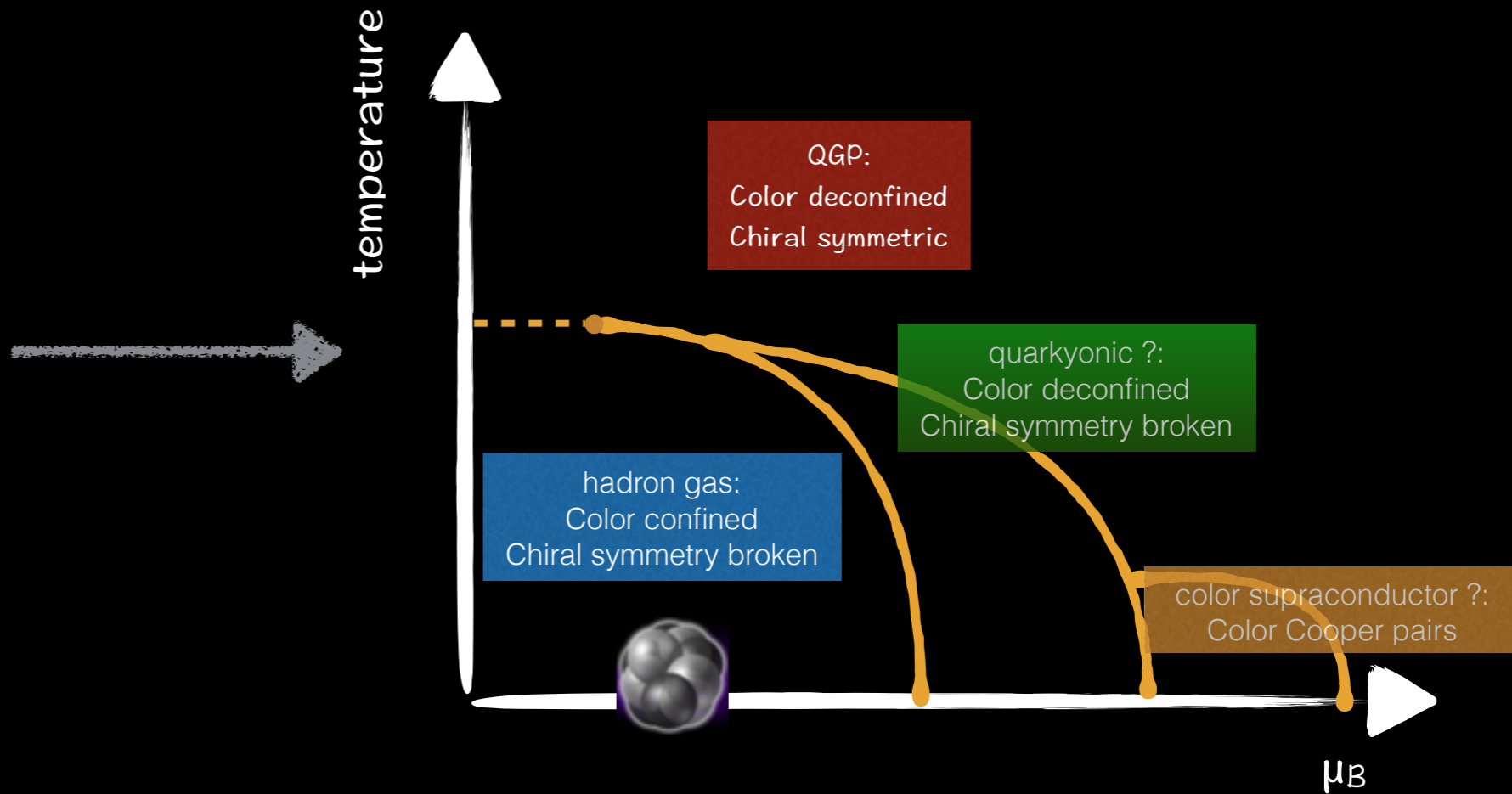
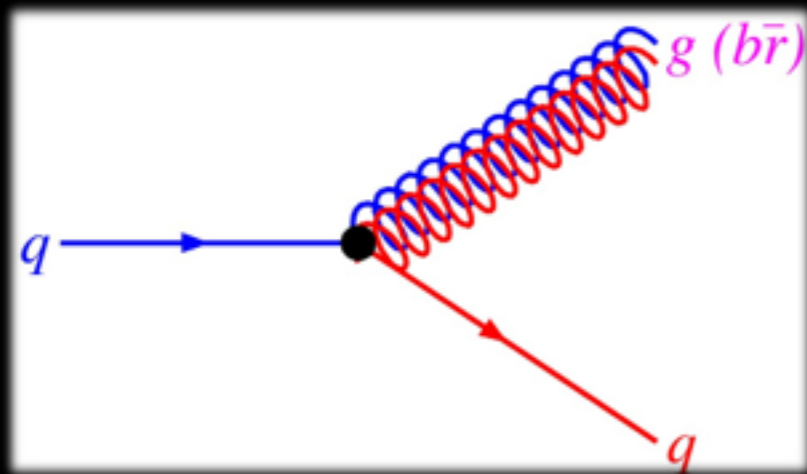


Questions ouvertes

# Rappel

Les objectifs scientifiques du programme ions lourds au  
LHC

# Thermodynamique de la matière en interaction forte



Comment la complexité de la matière émerge de la dynamique de l'interaction forte

# Le mandat de ALICE

Etablir les propriétés fondamentales de la matière en interaction forte et à haute température au travers de mesures de **precision, complètes\***

\*  $p_t \sim T \oplus PID \oplus p_t \gg \Lambda_{\text{QCD}}$



# Les faits établis: exp

- Aux températures du LHC la matière a les propriétés d'un liquide\* parfait\*\*

## The Quark-Gluon Plasma, a nearly perfect fluid

■ L. Cifarelli<sup>1</sup>, L.P. Csernai<sup>2</sup> and H. Stöcker<sup>3</sup> - DOI: 10.1051/epn/2012206

■ <sup>1</sup> Dipartimento di Fisica, Università di Bologna, 40126 Bologna, Italy;

■ <sup>2</sup> Department of Physics and Technology, University of Bergen, 5007 Bergen, Norway;

■ <sup>3</sup> GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, 64291 Darmstadt, Germany

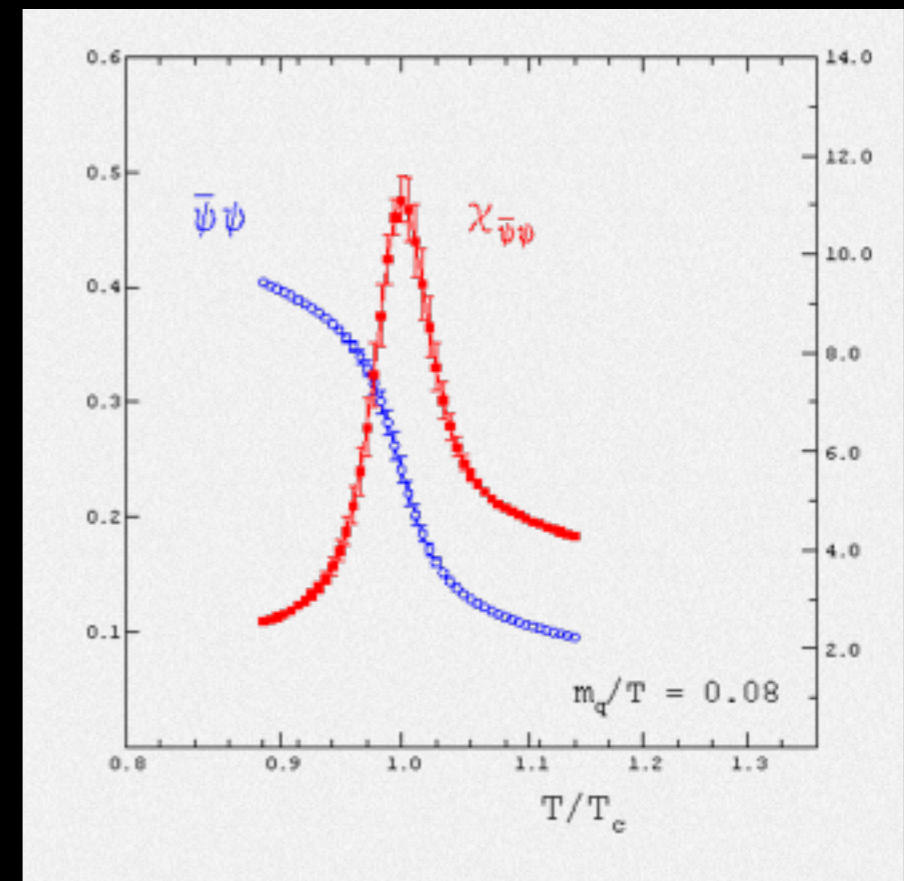
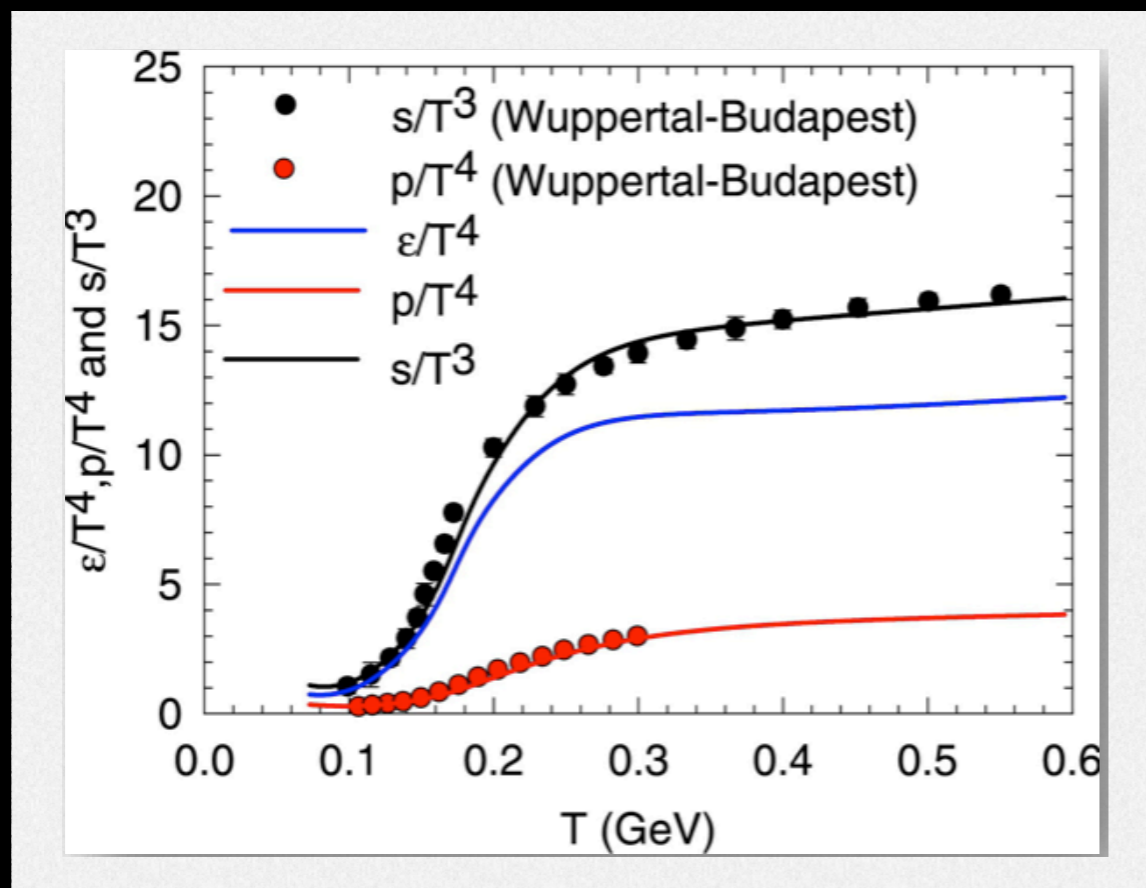
We are living in interesting times, where the World's largest accelerator, the Large Hadron Collider, has its most dominant successes in Nuclear Physics: collective matter properties of the Quark-Gluon Plasma (QGP) are studied at a detail which is not even possible for conventional, macro scale materials.

\* en interaction forte

\*\* non-dissipatif

# Les faits établis: théorie

- transition **douce**\* d'un gas de hadrons vers QGP ( $Z_3$  symétrie); symétrie chirale **restaurée**\*\*



\* pas une transition de phase, pas SB

\*\* les quarks retrouvent leur masse intrinsèque (Higgs)



# Stratégie standard

- Grand et dense: physique des ions lourds
- Petit et dilué: mesures de référence

# Stratégie standard

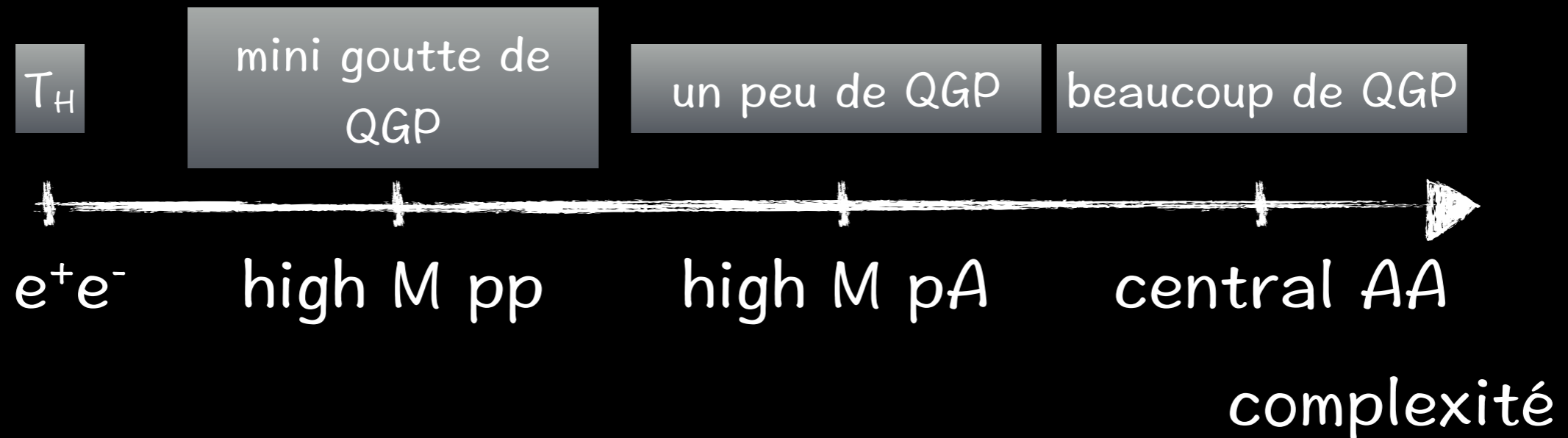
- Grand et dense: physique des ions lourds
  - ▶  $AA \rightarrow p\text{QCD} + N\text{pdf} + FF + \text{collectivité}$
- Petit et dilué: mesures de référence
  - ▶  $pp \rightarrow p\text{QCD} + \text{pdf} + FF$
  - ▶  $pA \rightarrow p\text{QCD} + N\text{pdf} + FF$

# Mais ... High M pp/pA

- production des particules
- spectres
- rayons HBT
- Ridges
- suppression des quarkonia

# Vers un nouveau paradigme

- Collectivité partout !



Une approche expérimentale et théorique cohérente de QCD statistique de  $e^+e^-$  à AA

# Questions ouvertes

un jugement personnel

# questions à la théorie

- IS à LHC: champs classiques de gluons ?  
faiblement ou fortement couplés ?
- dynamiques: de IS vers un liquide hydro en 0.5 fm/c
- DoF: un milieu sans quasi-particules ? tout près de  $T_H$  ? hadronisation ?



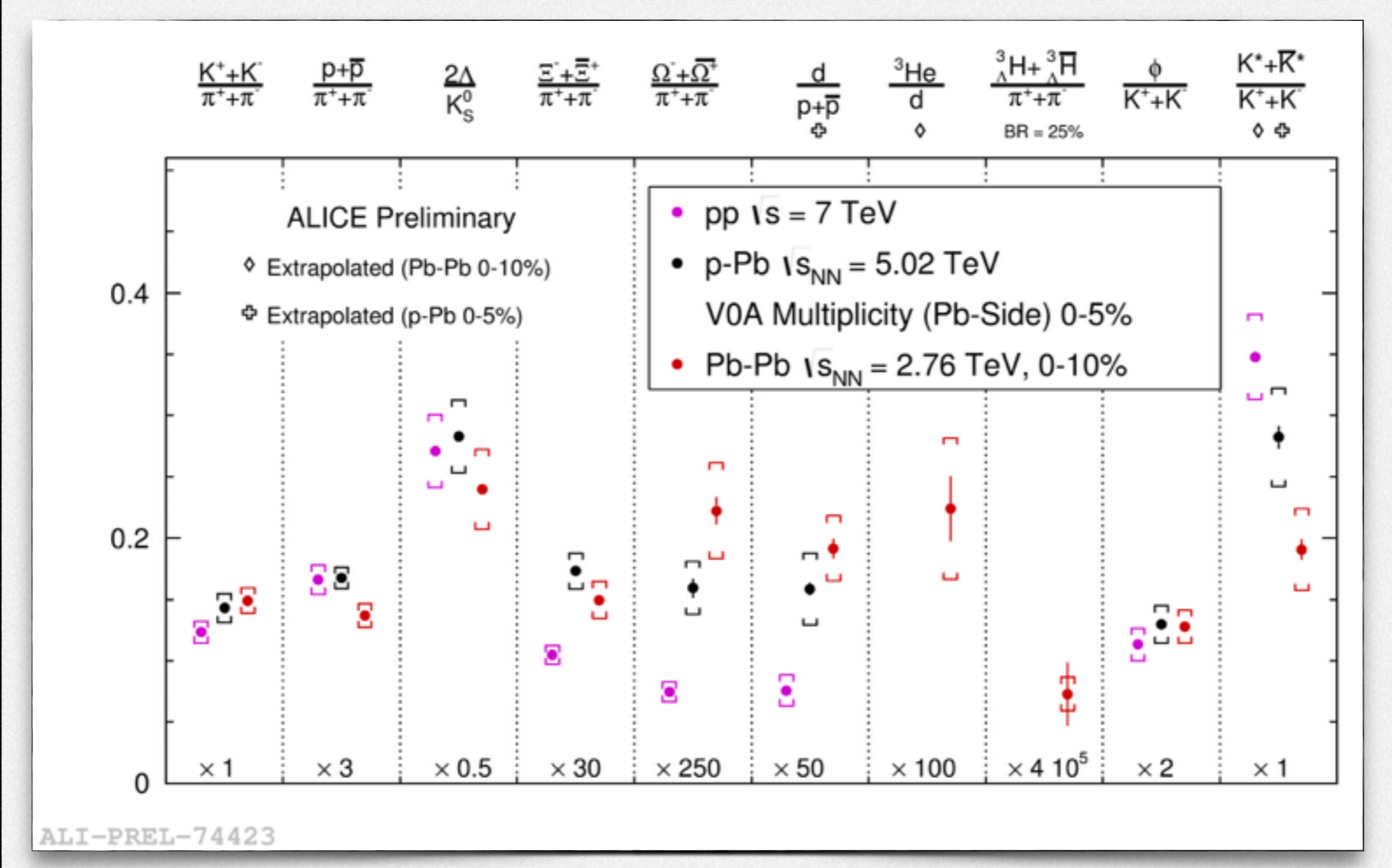
# questions à la théorie

- IS à LHC: champs classiques de gluons ? faiblement ou fortement couplés ?
- dynamiques: de IS vers un liquide hydro en 0.5 fm/c
- DoF: un milieu sans quasi-particules ? tout près de  $T_H$  ? hadronisation ?
- ▶ Comment contraindre expérimentalement la physique de l'équilibration dans QCD ?
- ▶ LHC offre les conditions les plus favorables
  - ✓ très petit  $x$
  - ✓ milieu non dissipatif

soft:  $p_T \sim T, \Lambda_{\text{QCD}}$

teste le milieu

# production de hadrons



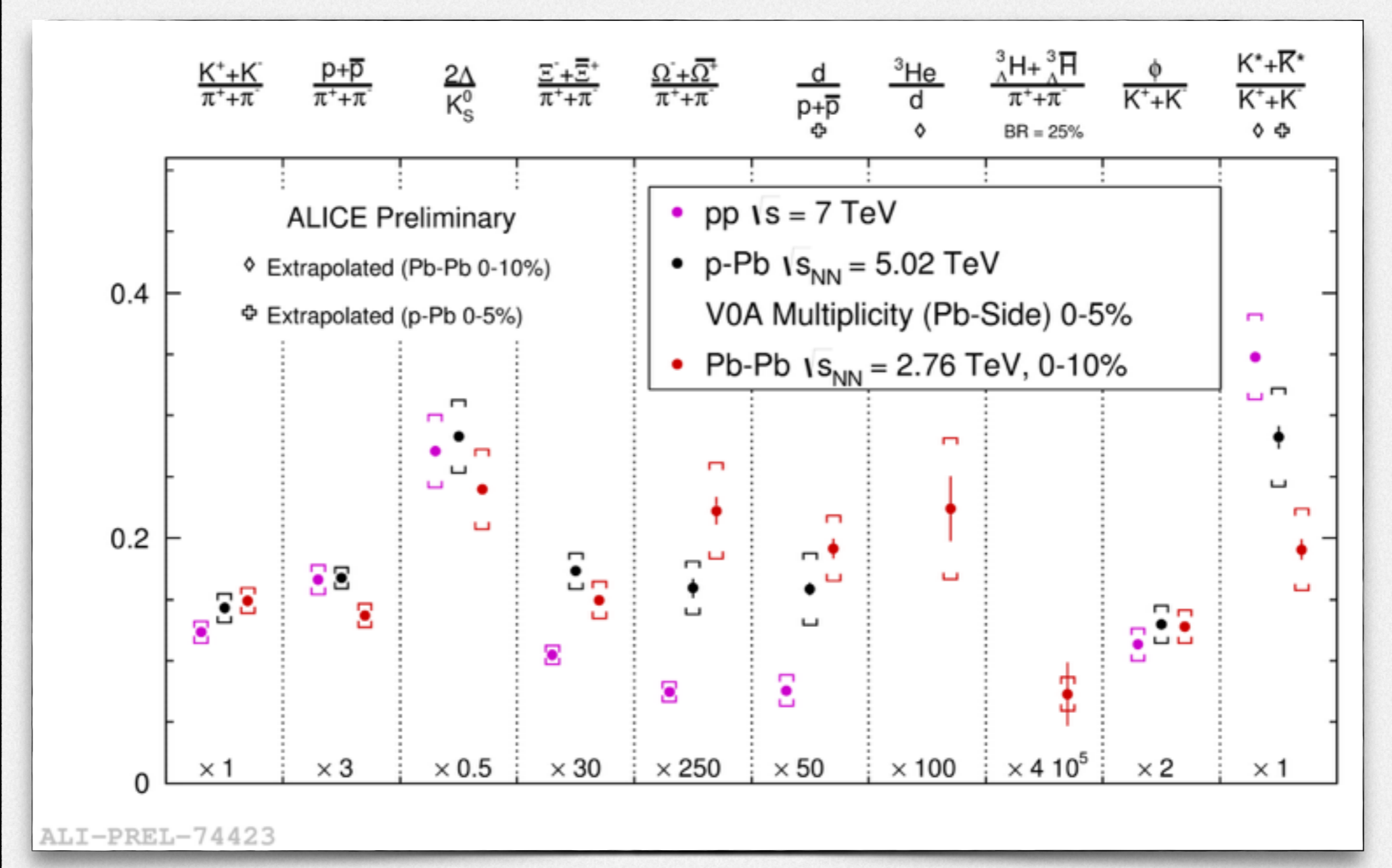
augmentation S,  
suppression K\*

OK

suppression p  
augmentation d

???

# production de hadrons



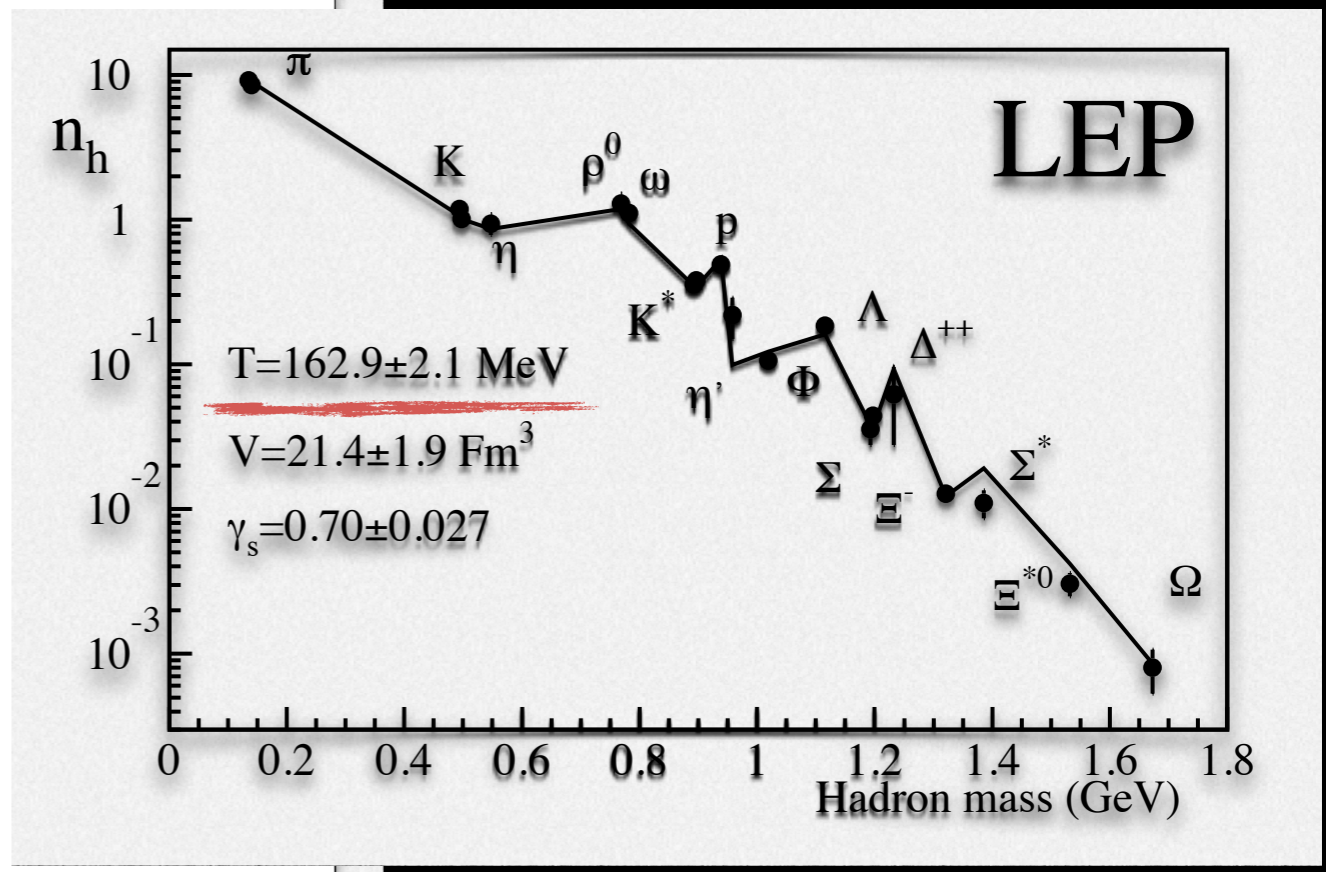
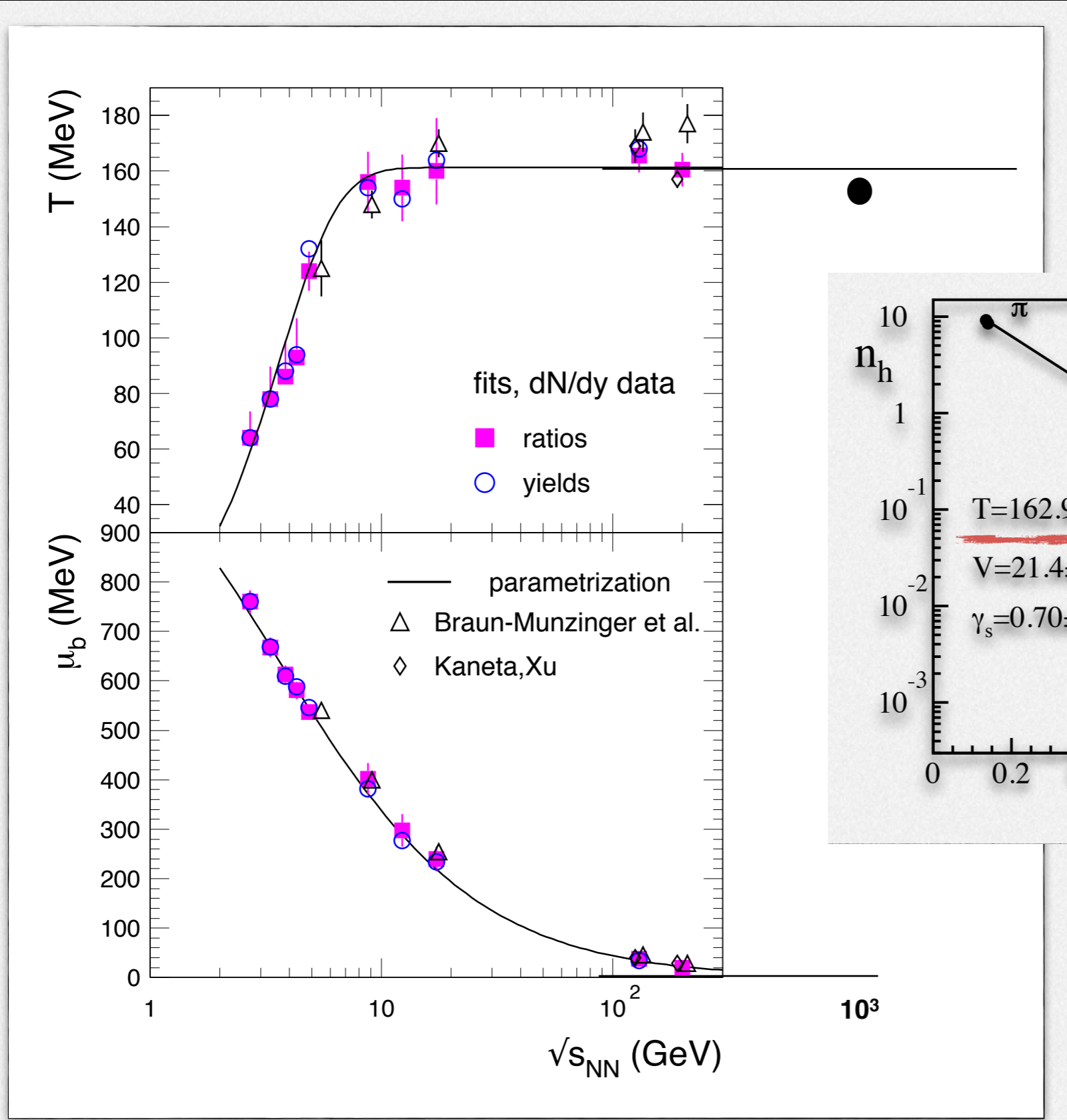
7 ordres de grandeur !

p, d, noyaux !!

$T_H = 155$  MeV !!!

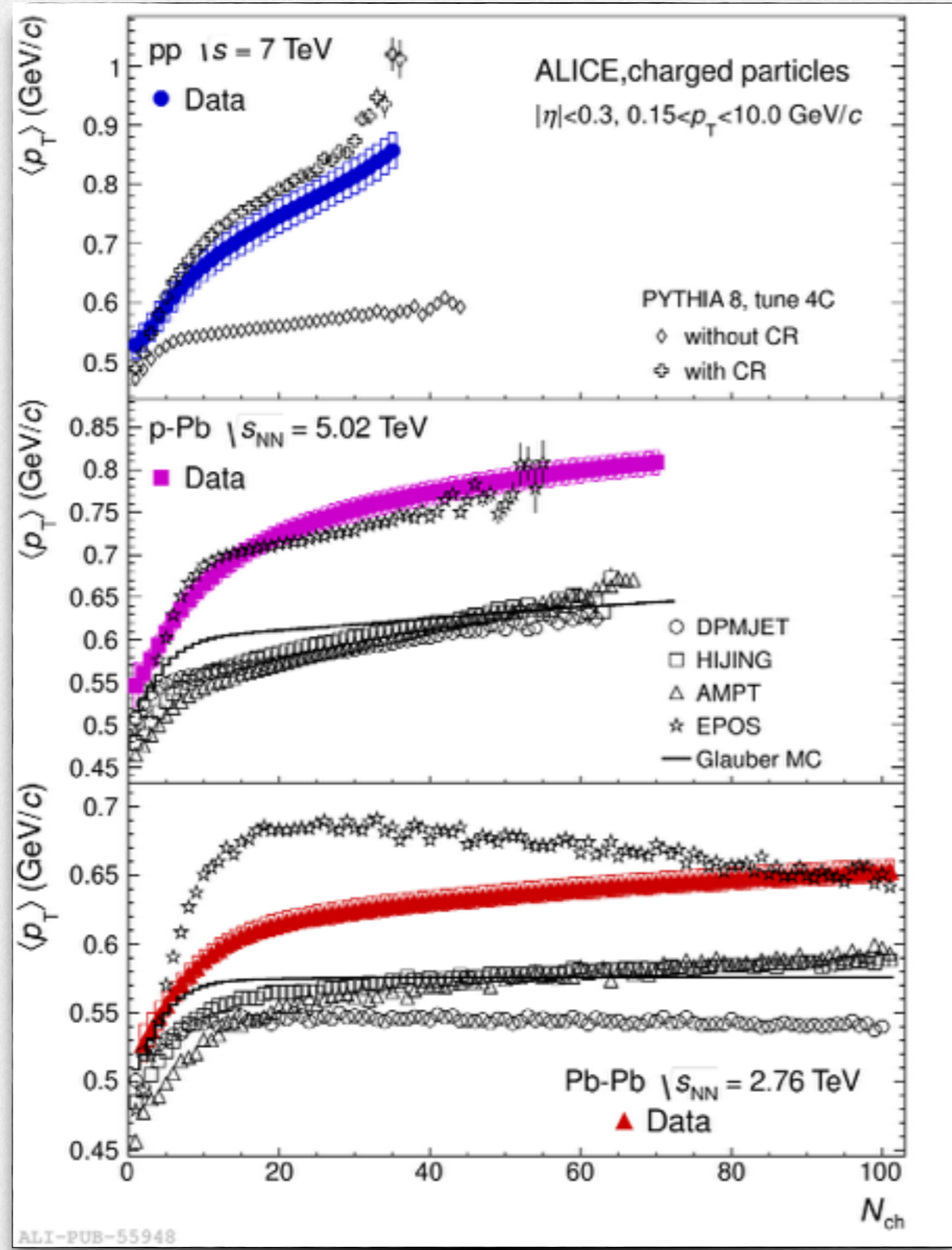
# production de hadrons

$T_H = 155 \text{ MeV} !!! !!!!!$   
hadrons invisibles ?





# $\langle p_t \rangle$ vs $M$



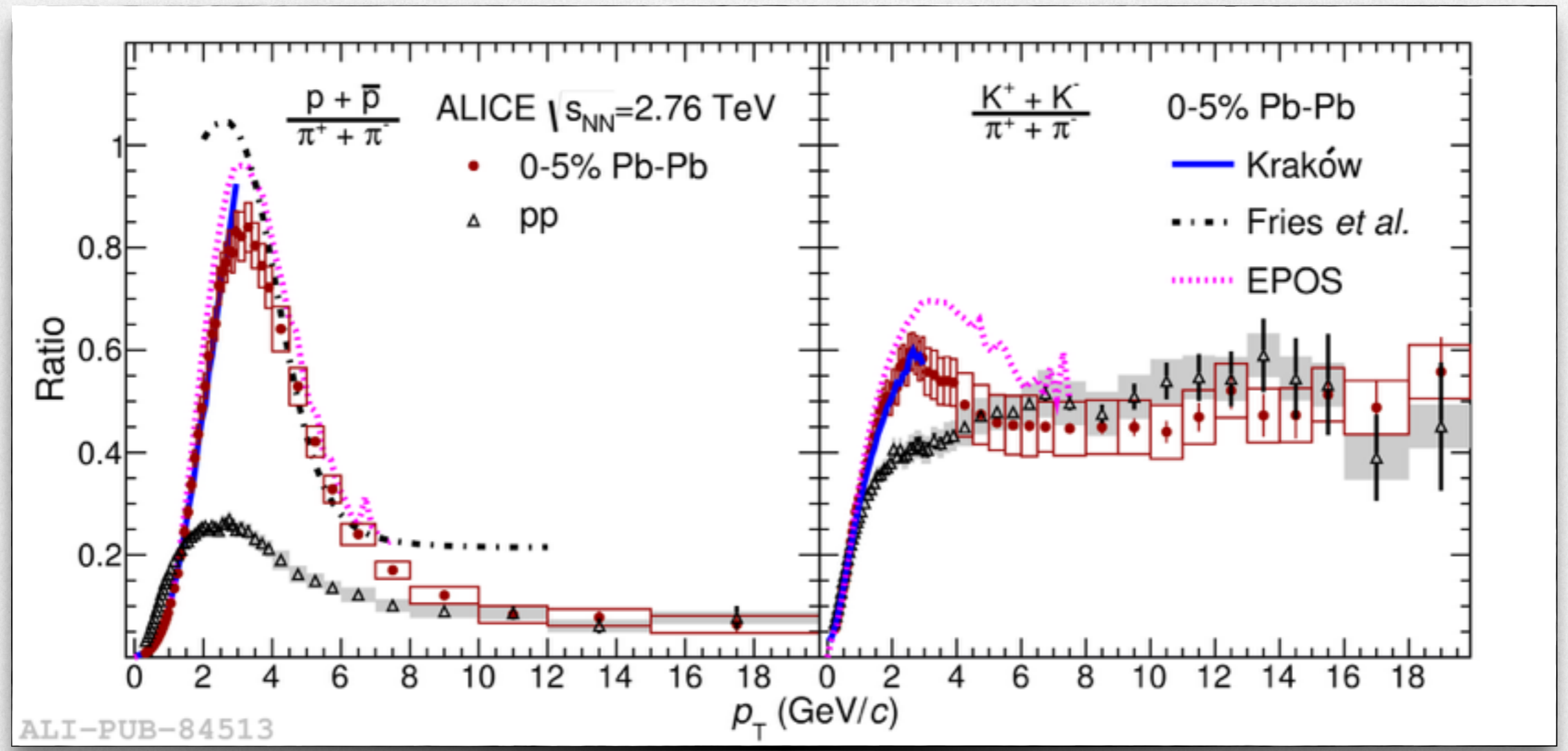
pp:  $\neq$  superposition incohérente d'interactions multiples de partons (CR)

pA:  $\neq$  superposition incohérente de collisions pp (EPOS + hydro)

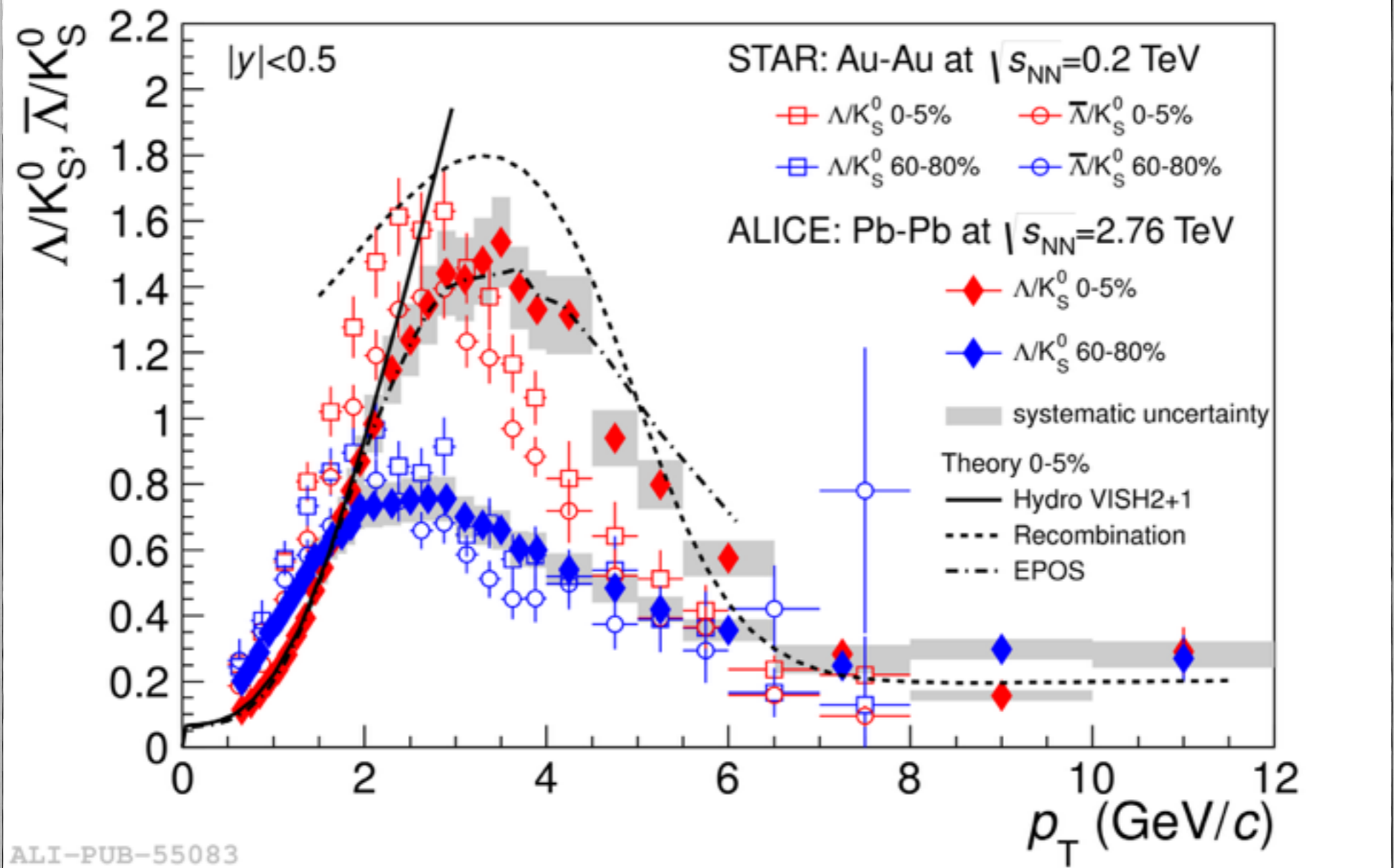
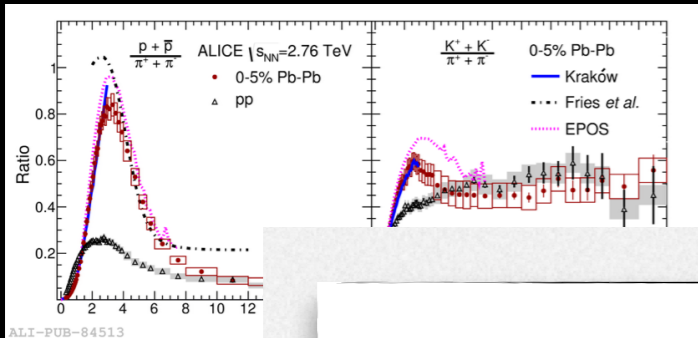
collectivité partout ?  
Modèles !



# Baryon & Meson léger

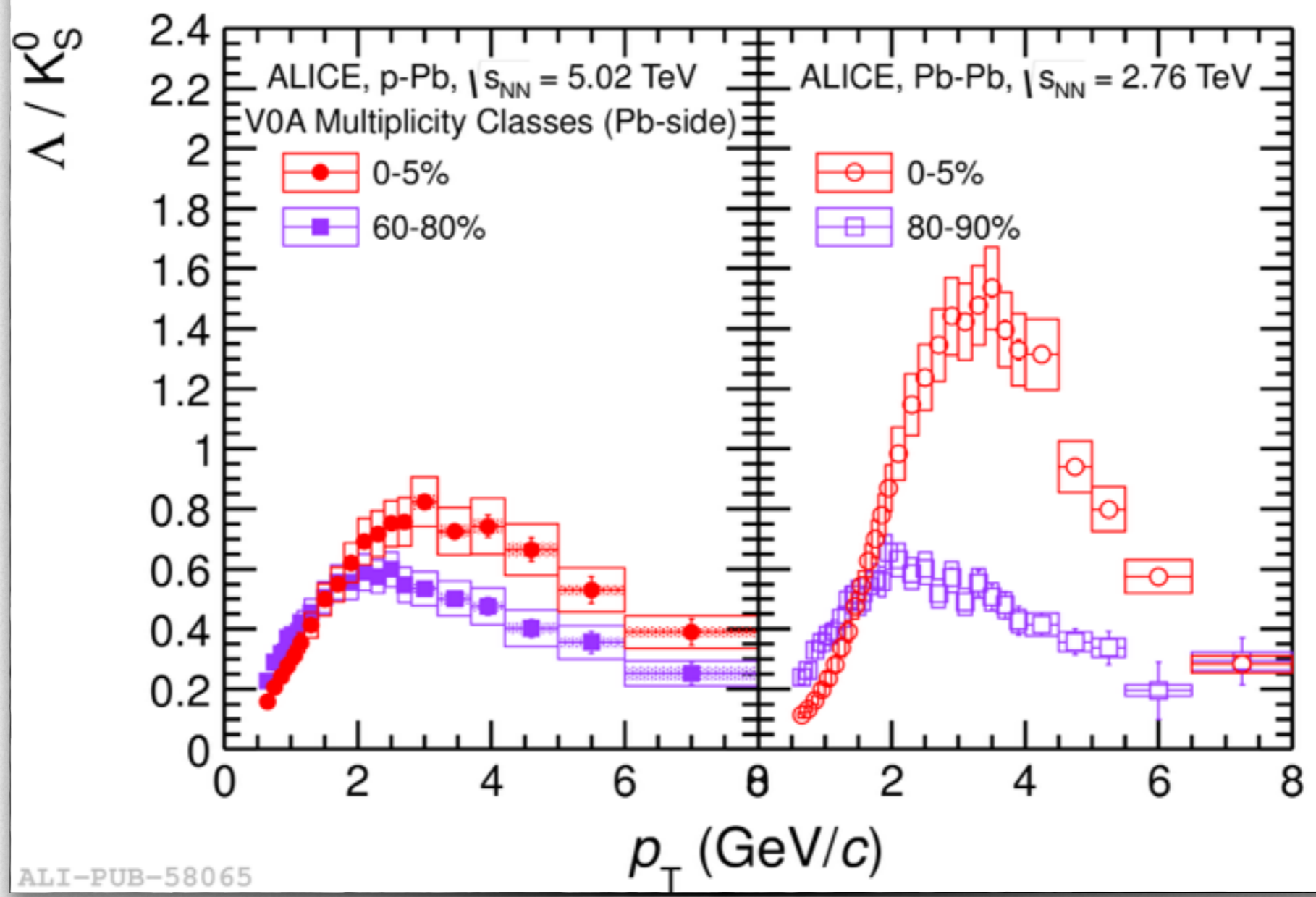
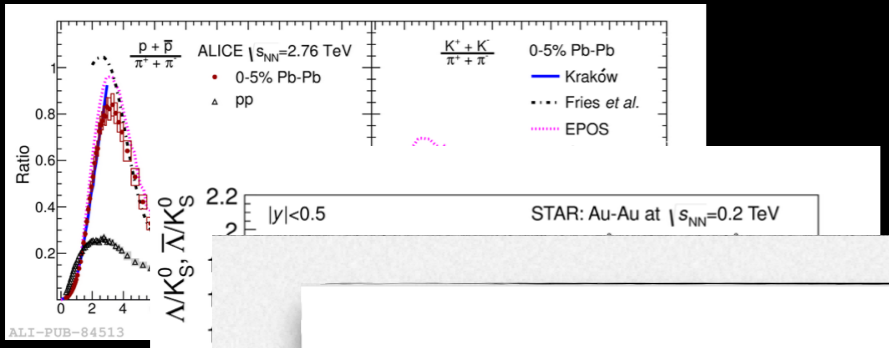


# Baryon & Meson étrange

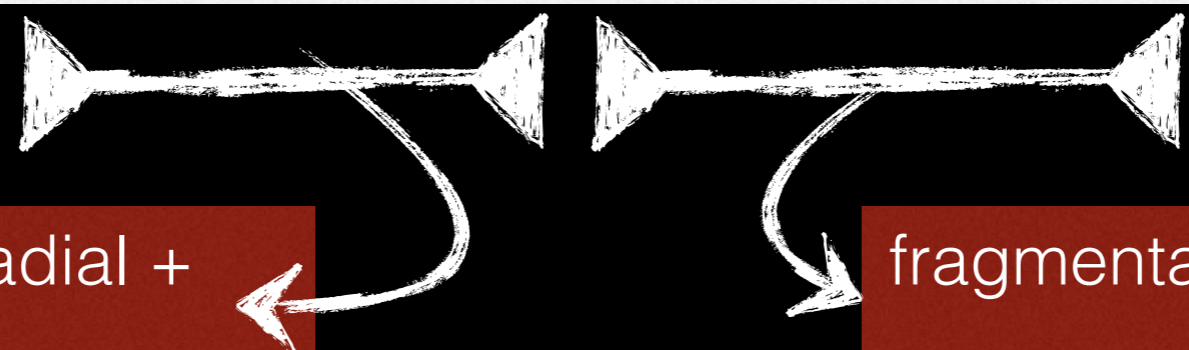
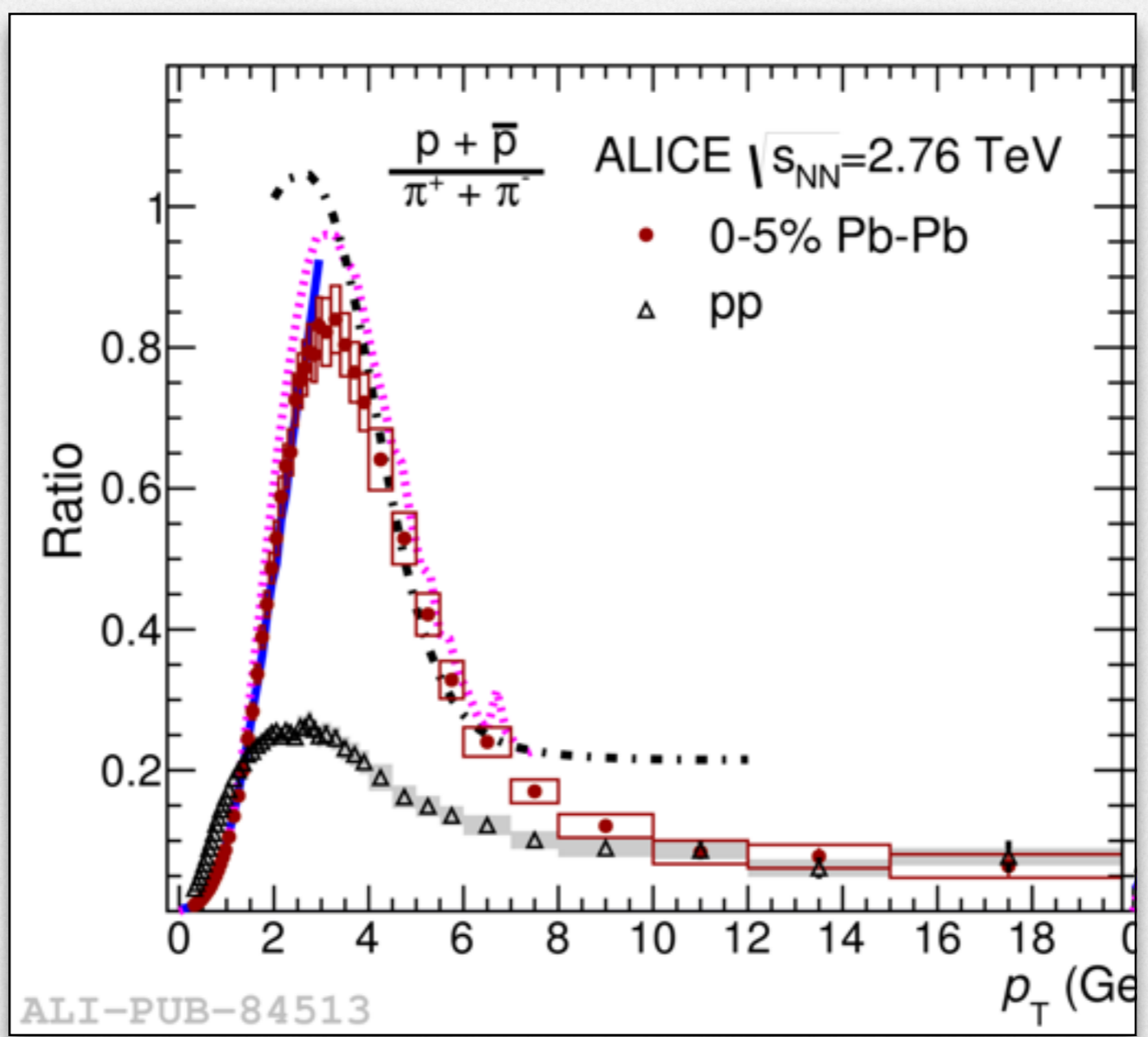
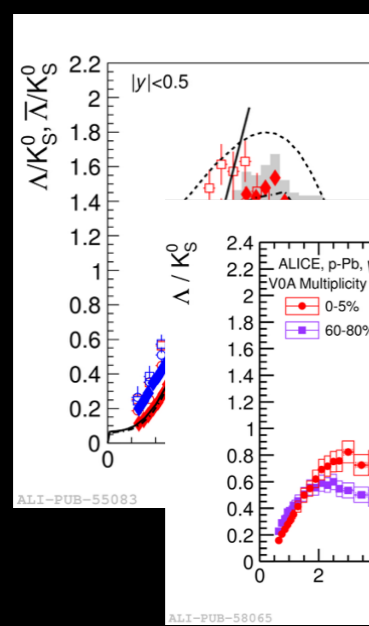


# Baryon & Meson

pPb pareil !



ALI-PUB-58065

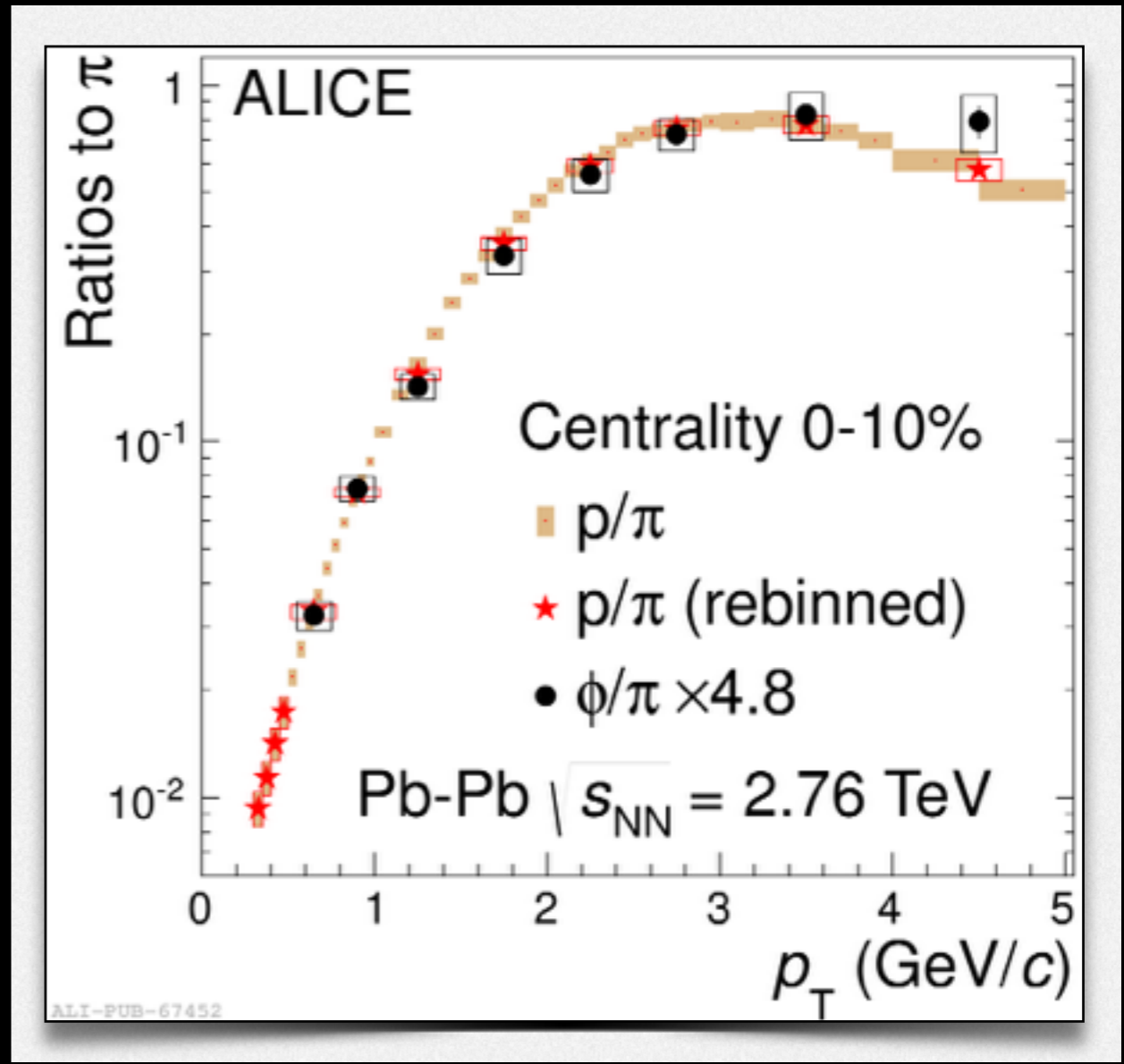
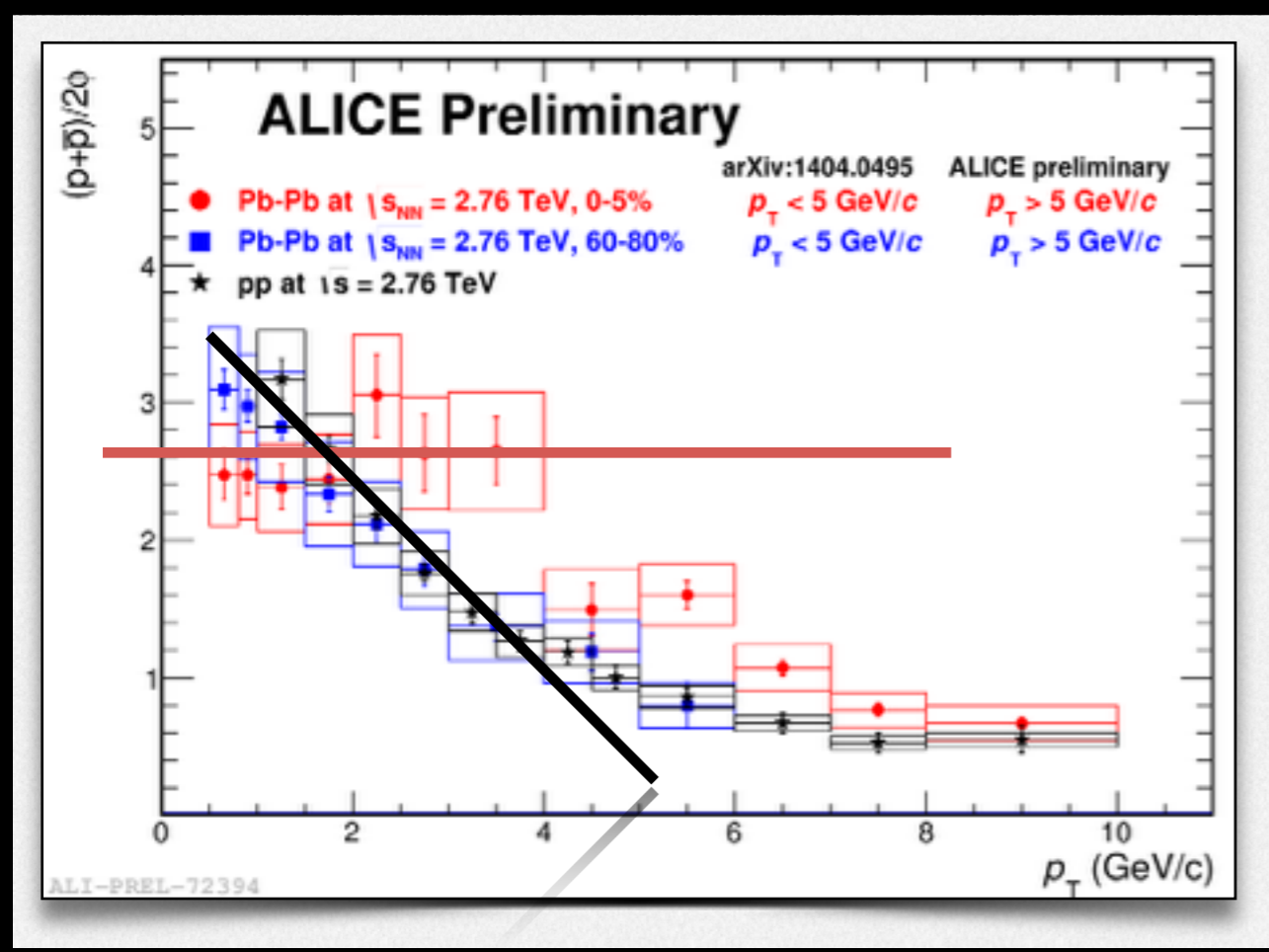


effets collectifs: flow radial + coalescence ?

fragmentation jet dans le vide: pQCD



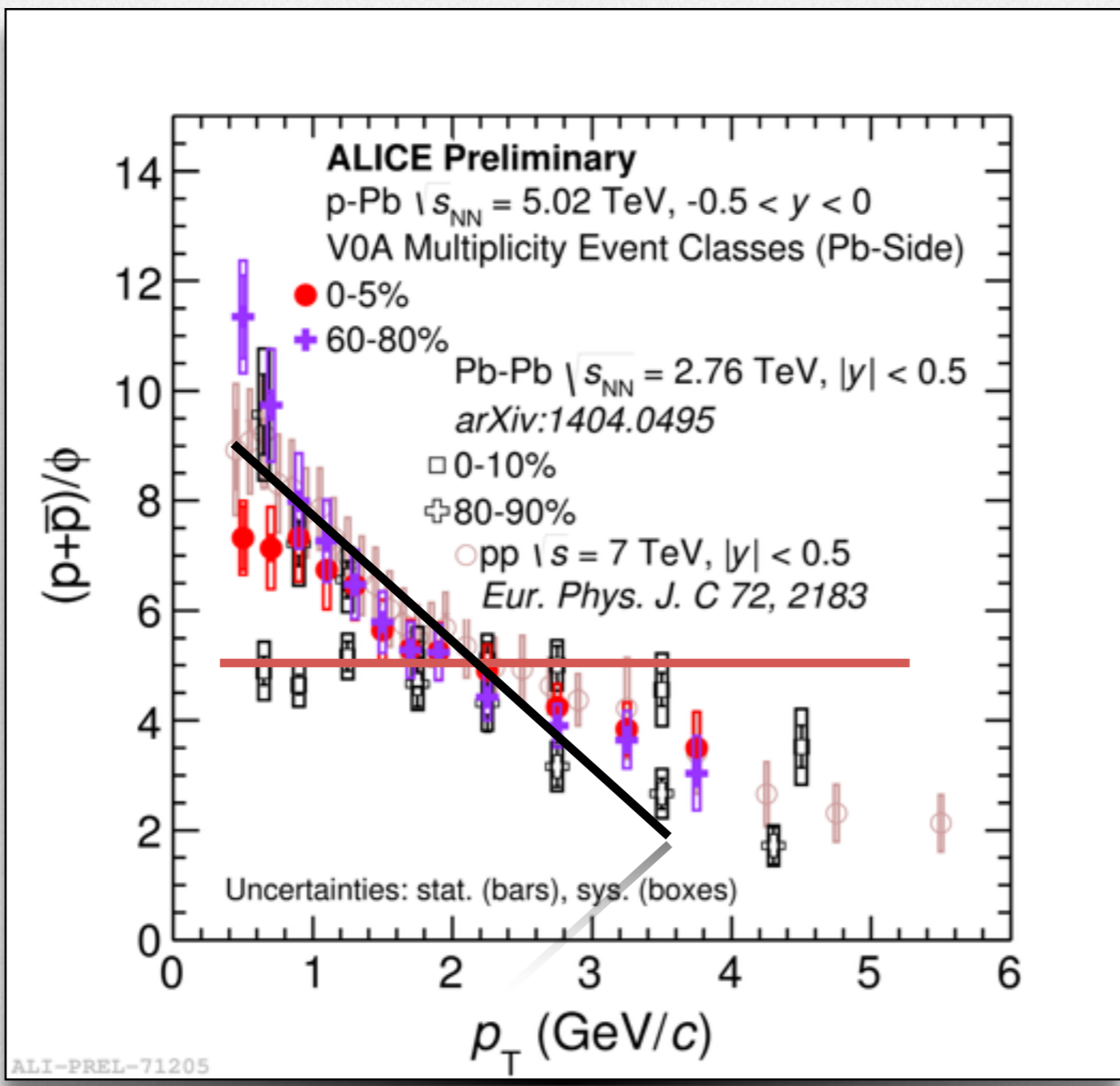
# Baryon & Meson



effets collectifs: flow radial + ~~coalescence~~ ?

Masse plutôt que # quark

# Baryon & Meson

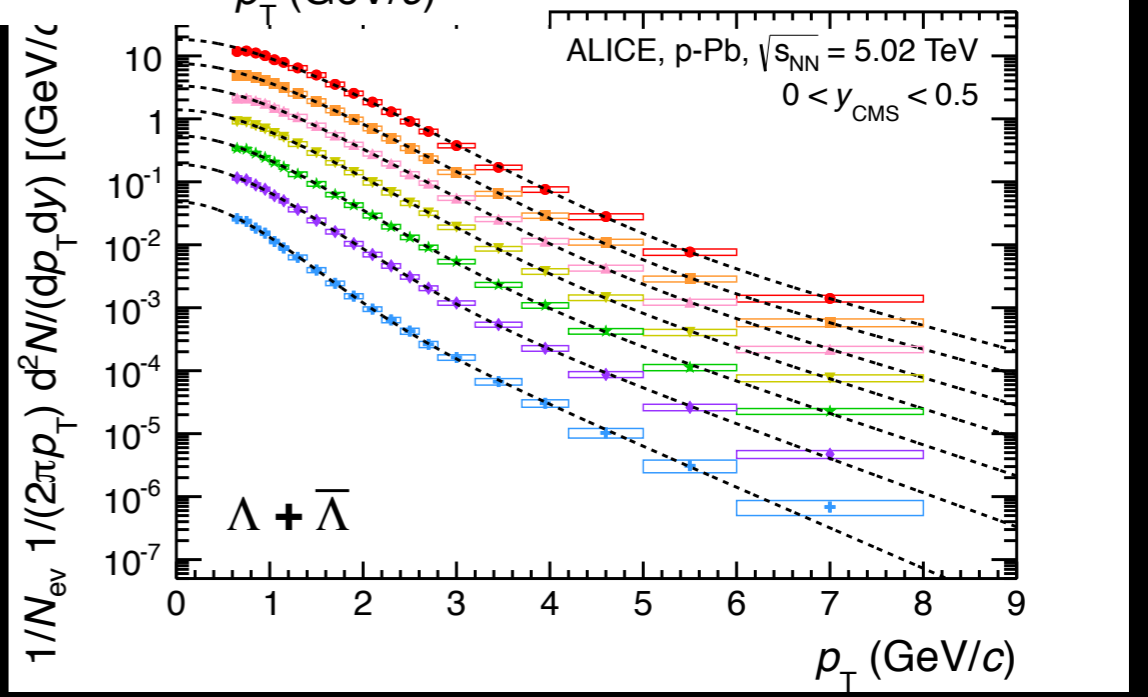
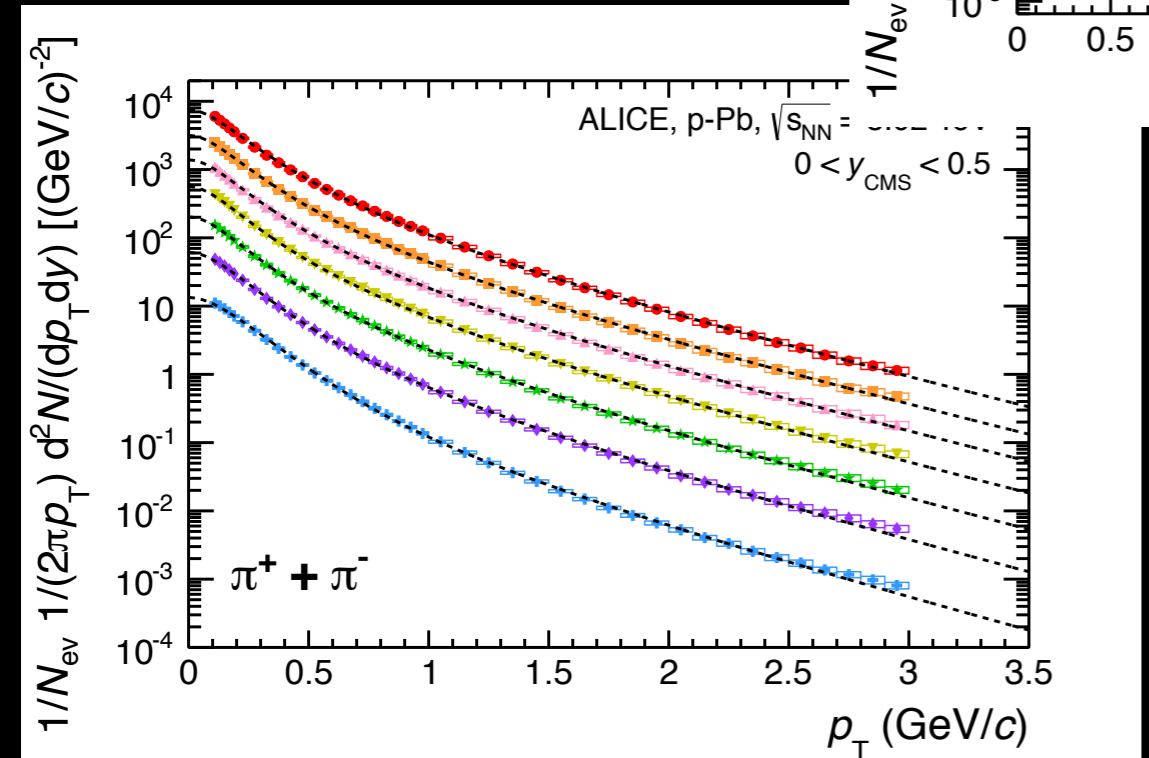
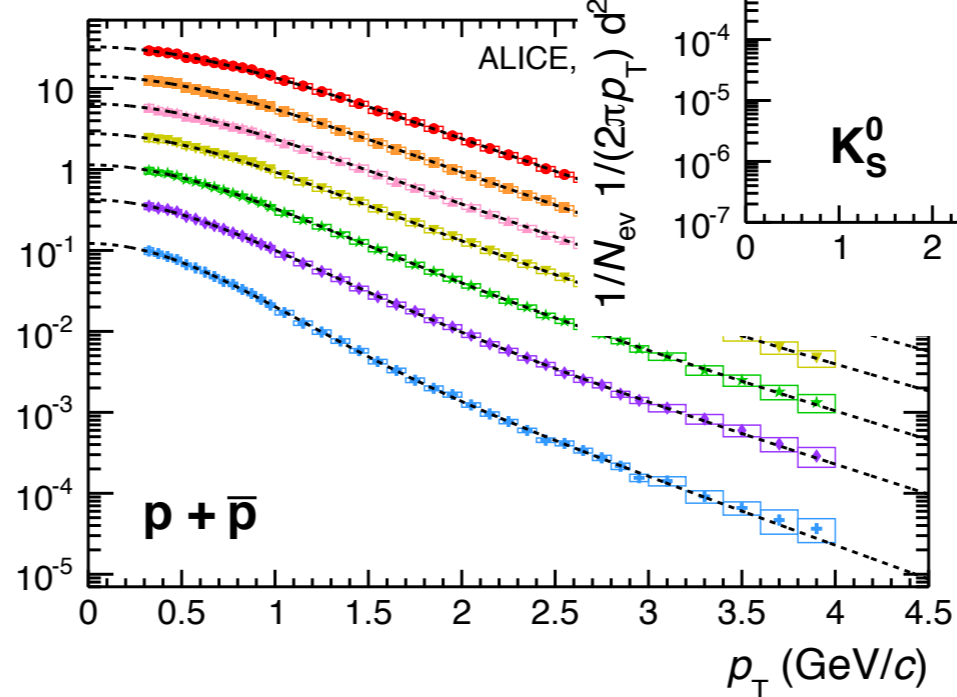
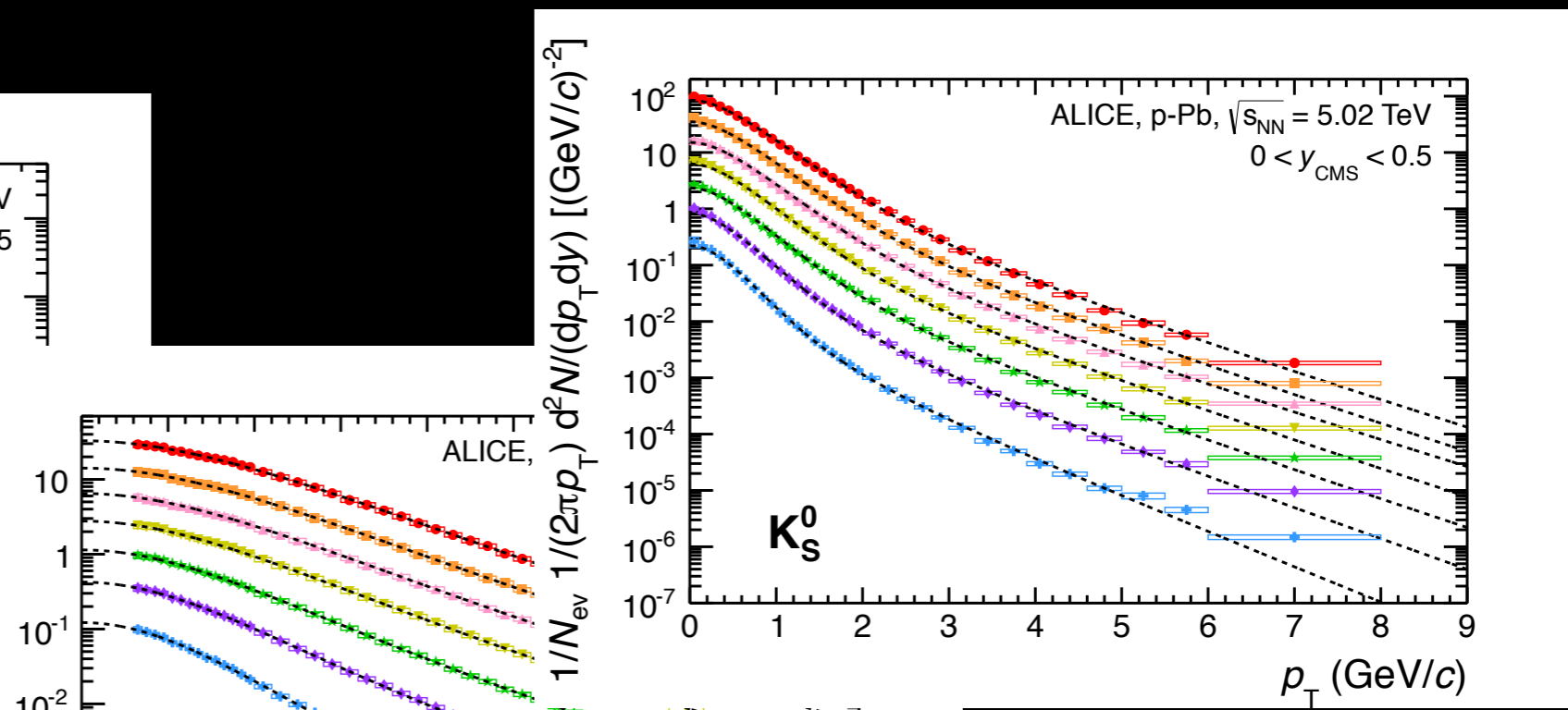
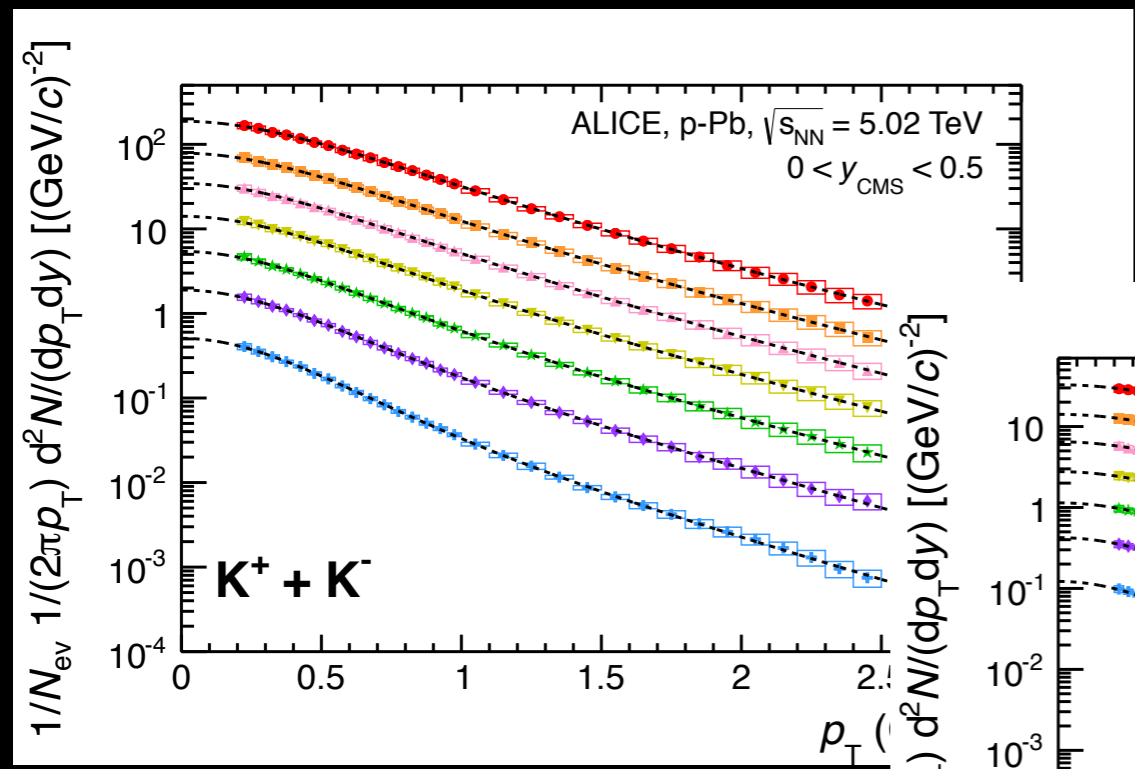


effets collectifs: flow radial + ~~coalescence~~ ?

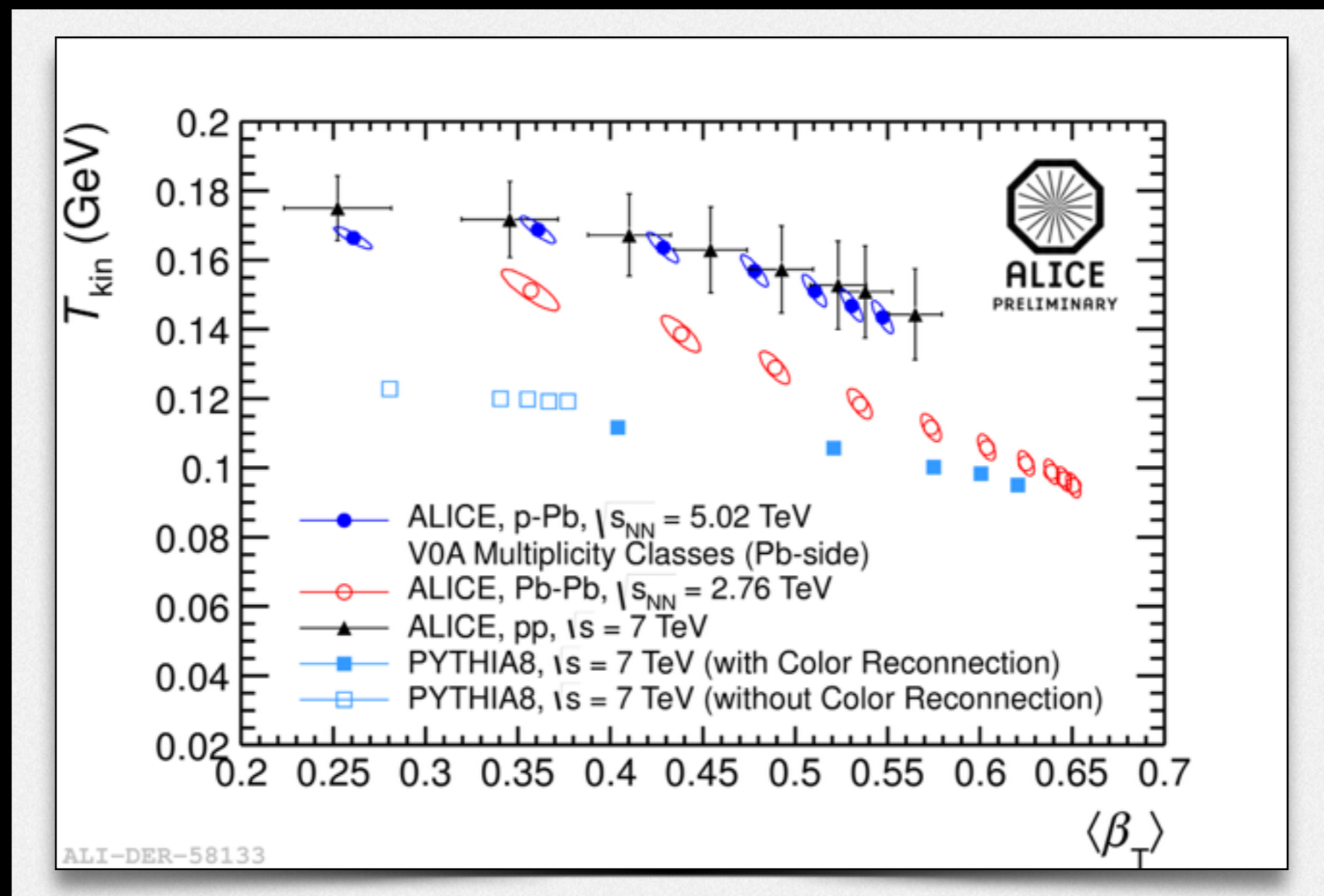
Masse plutôt que # quark  
PbPb périphérique et pPb ??



# Blue shift: flow radial



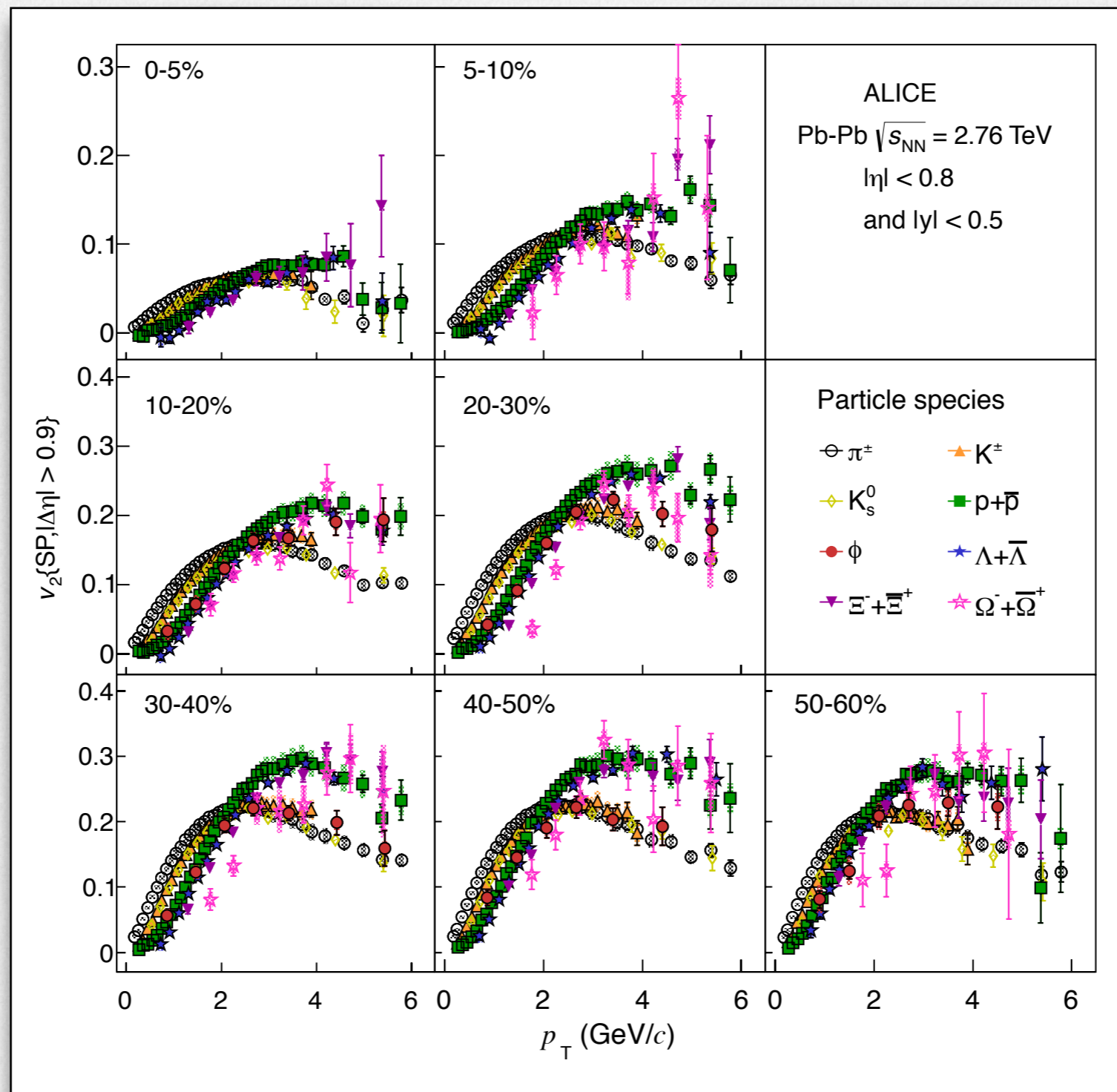
# Flow radial



p-Pb and pp: gradient radial (plus fort)!

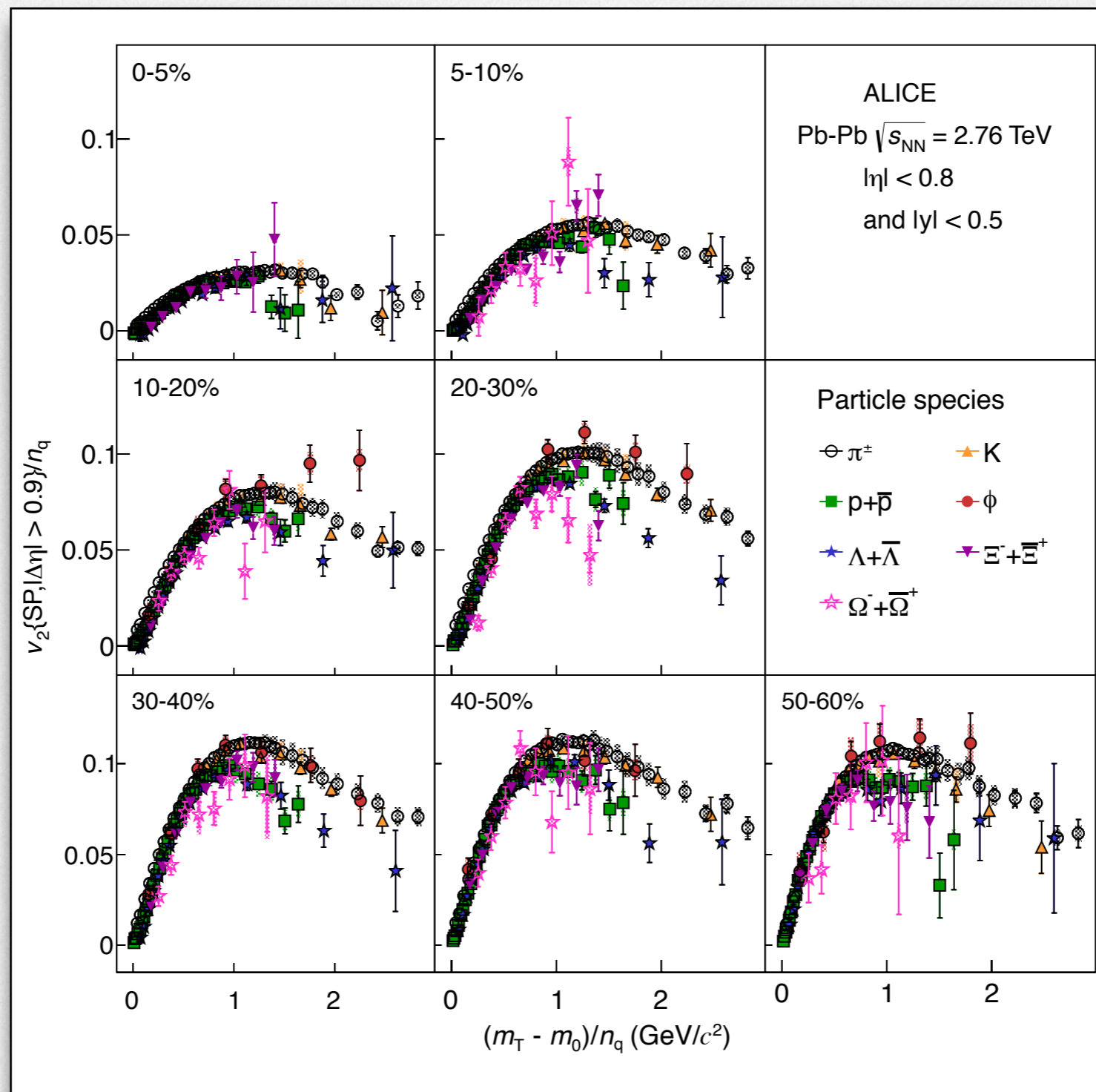
p-p: mécanisme FS singe flow radial !!

## Flow elliptique



hadronization par coalescence de  $q \rightarrow q$  DoF à  $T > T_H$ ?

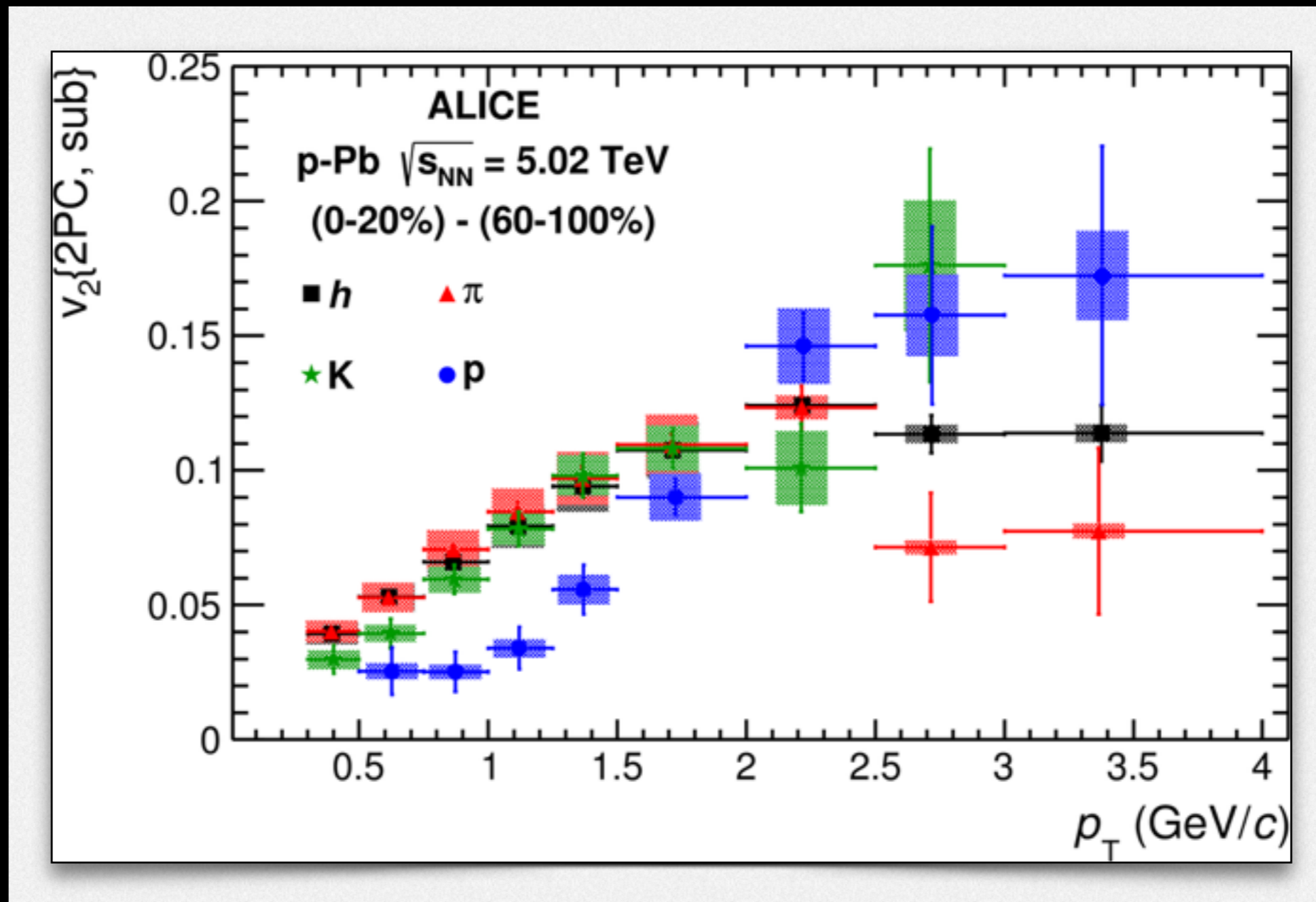
## Flow elliptique



~~hadronization par coalescence de  $q \rightarrow q$  DoF à  $T > T_H$ ?~~



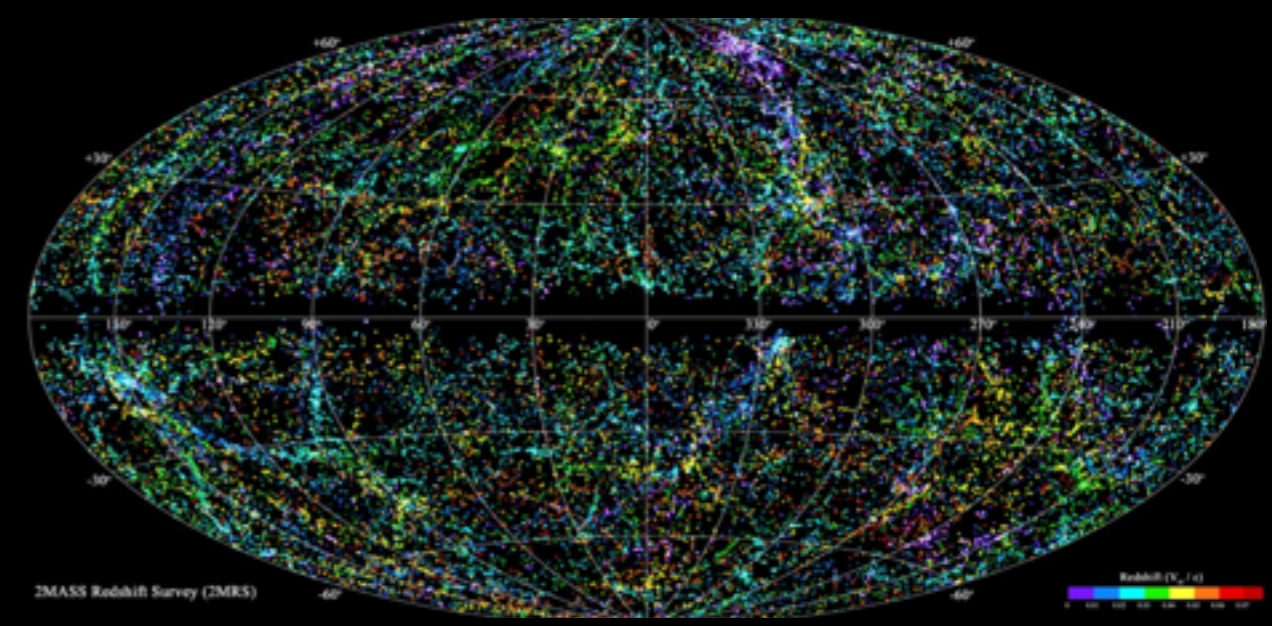
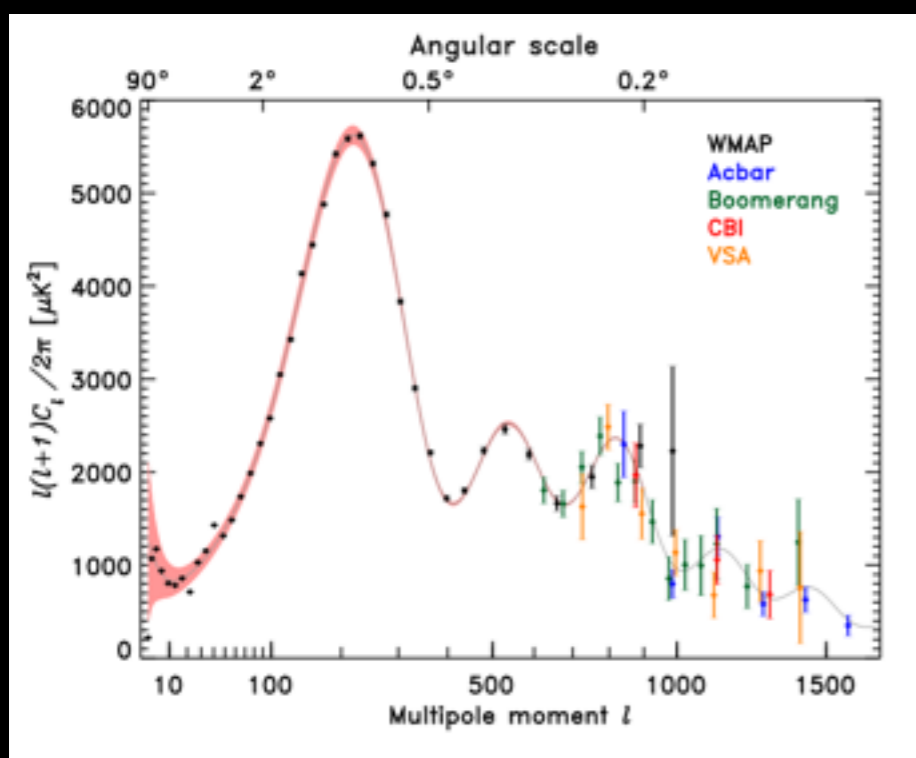
## Flow elliptique



pPb: flow hydro, pareil ! le succès gênant de hydro

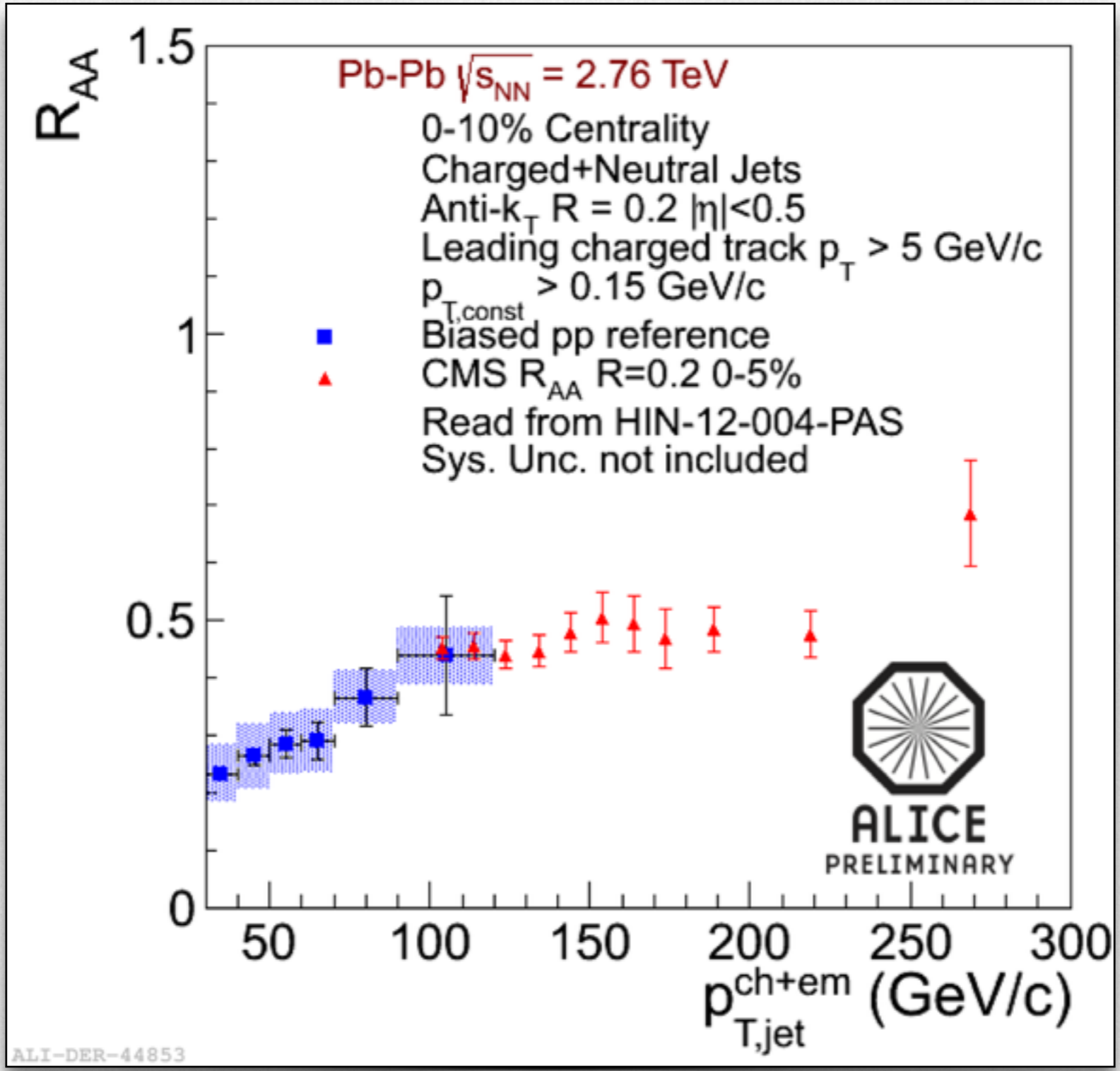
La dissipation dans le liquide parfait est minimale:

QGP est transparent aux fluctuations quantiques dans IS



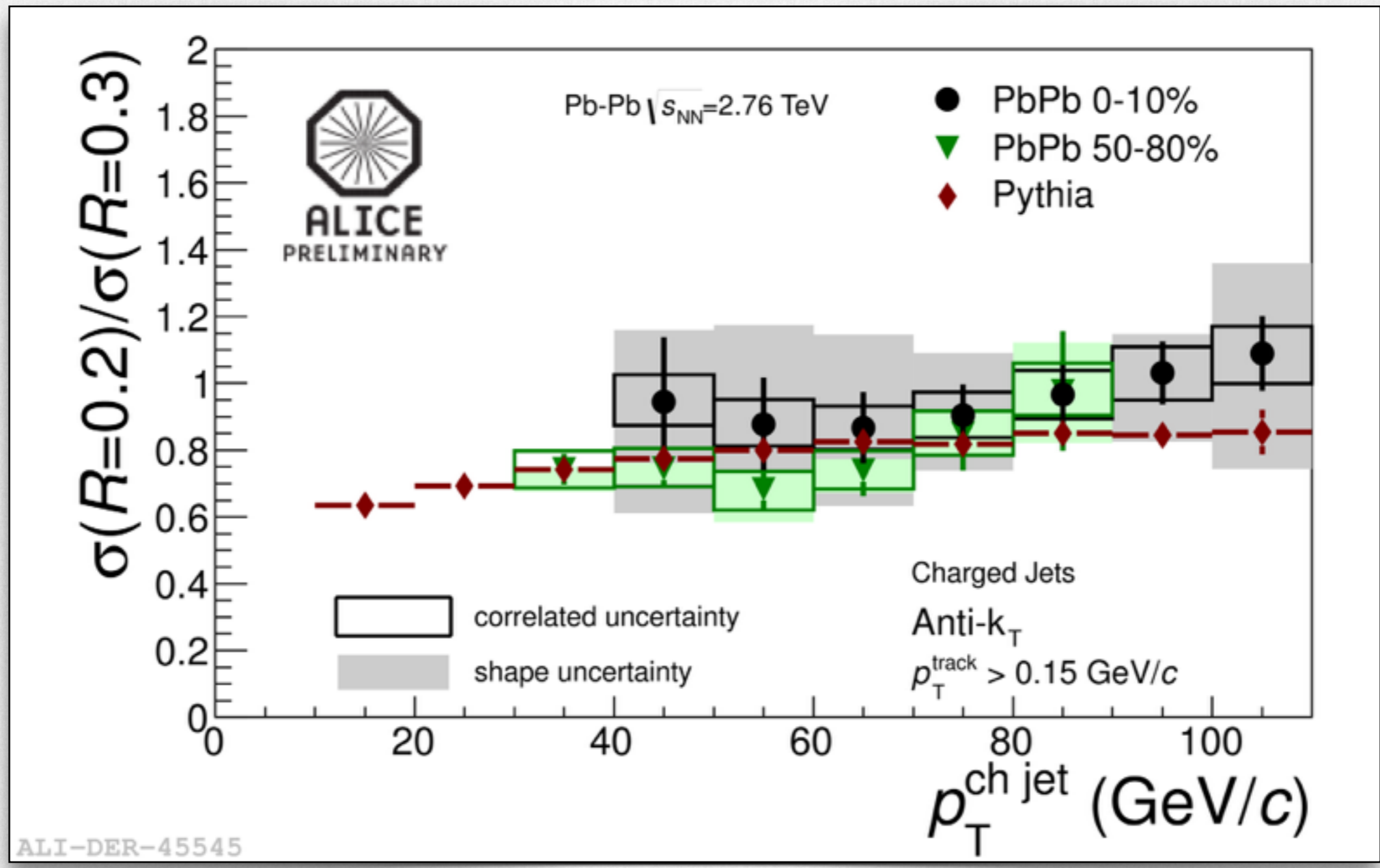
hard:  $p_T, m_T \gg T, \Lambda_{\text{QCD}}$

sonde QGP à grande résolution (DoF)



jets comme les hadrons dominants



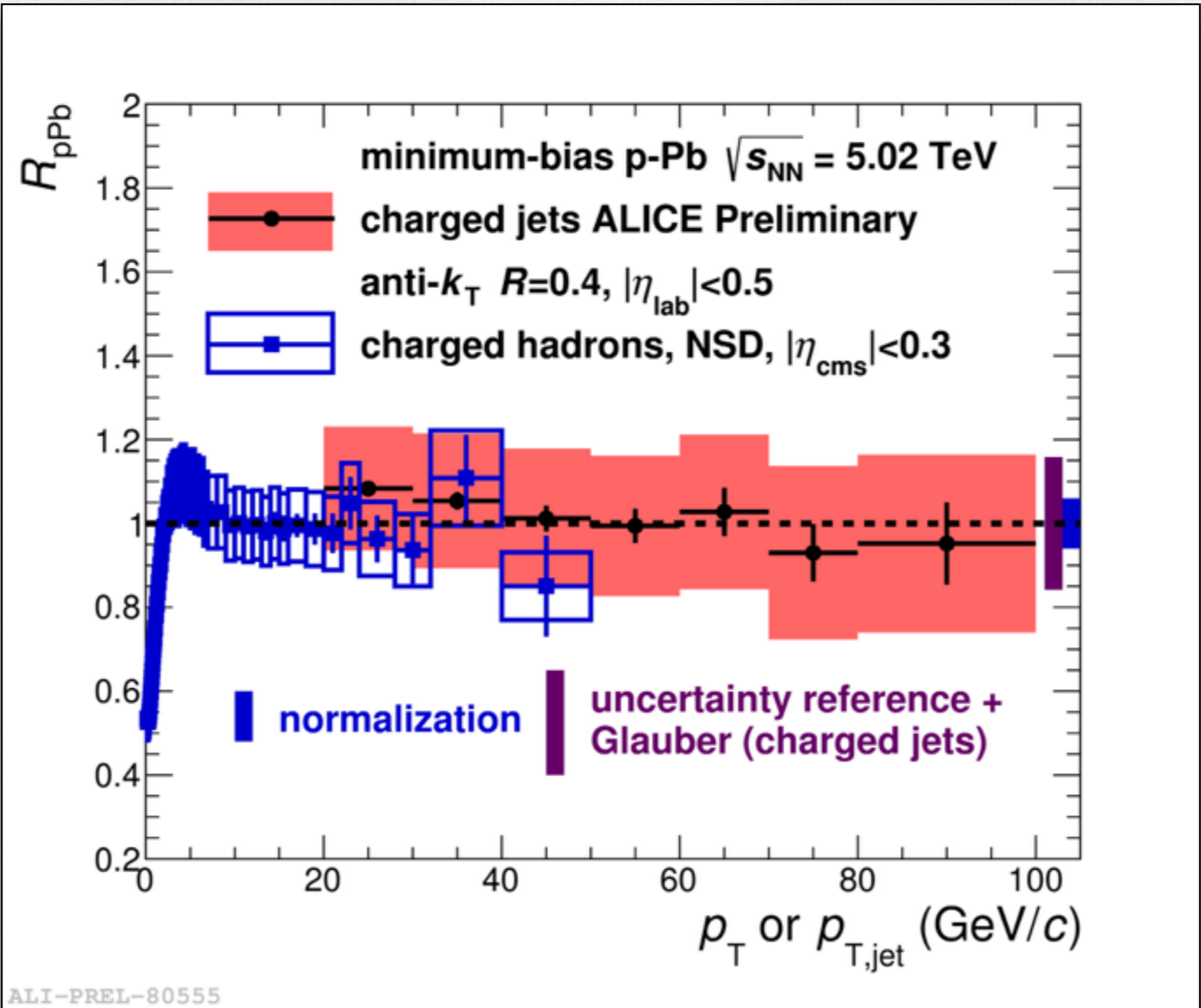


ALI-DER-45545

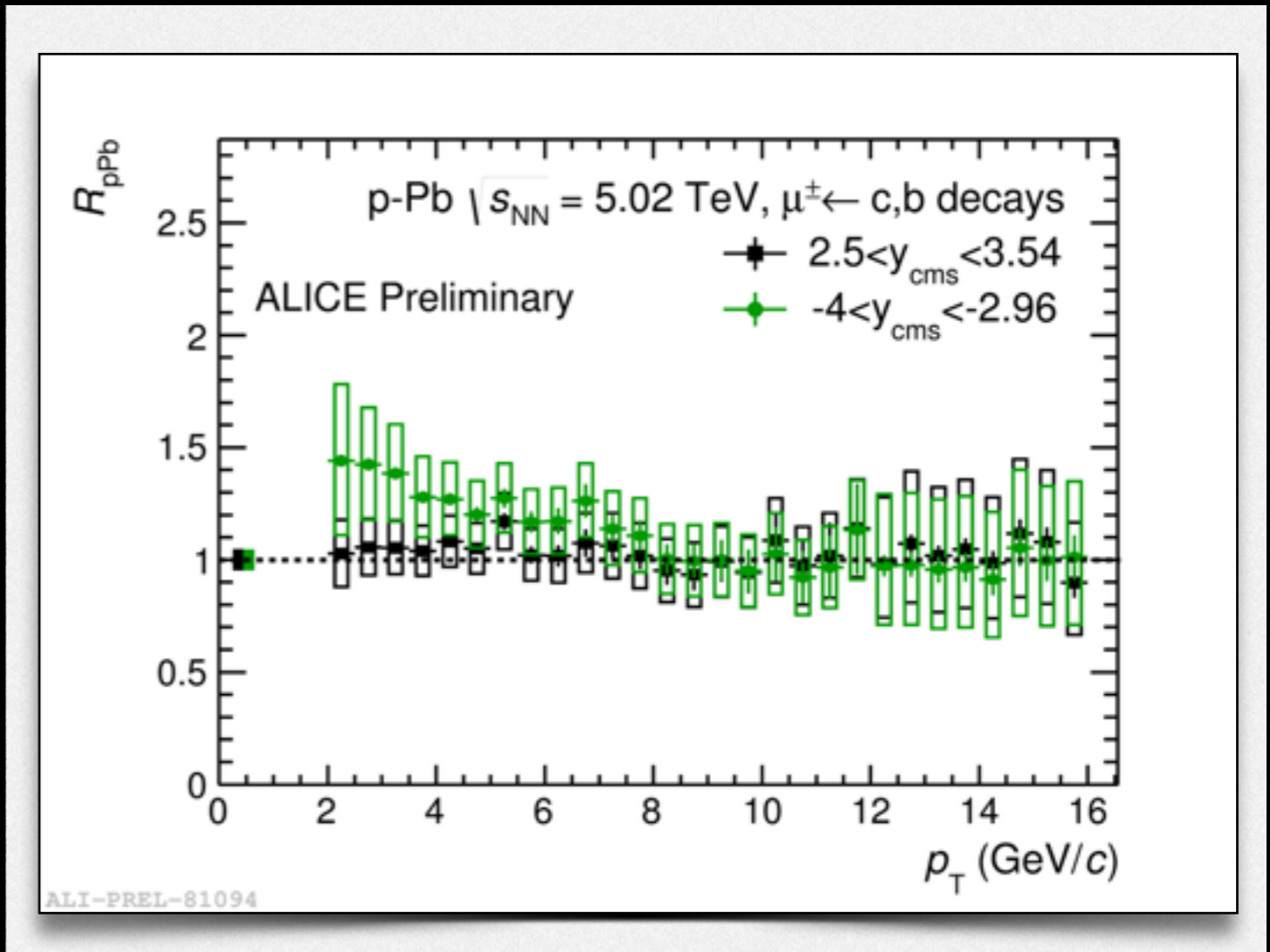
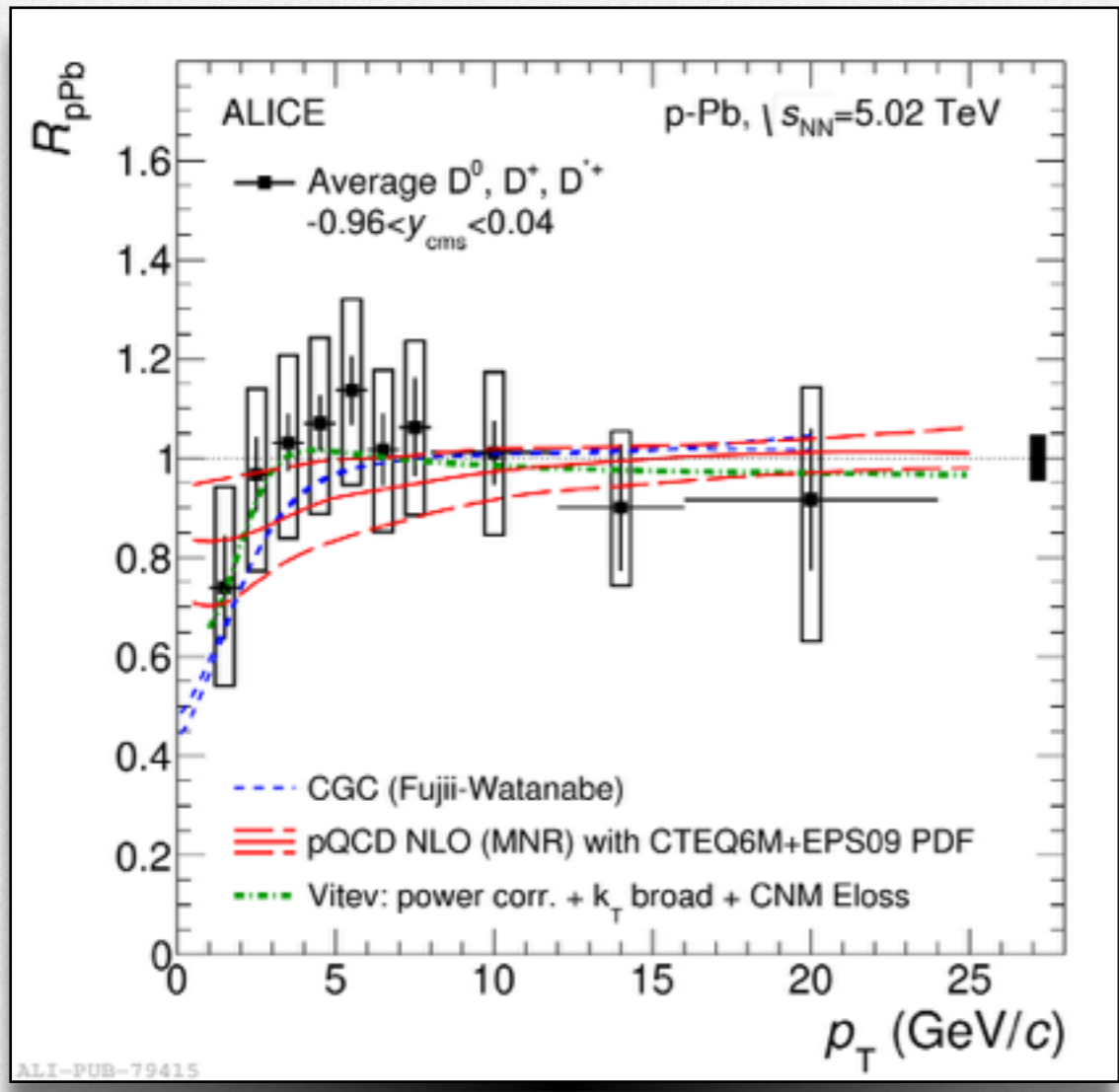
Où est rayonnée l'énergie perdue ?

$$\hat{q} = f(\sqrt{s}, T, E_{\text{jet}}, L_{\text{milieu}})$$

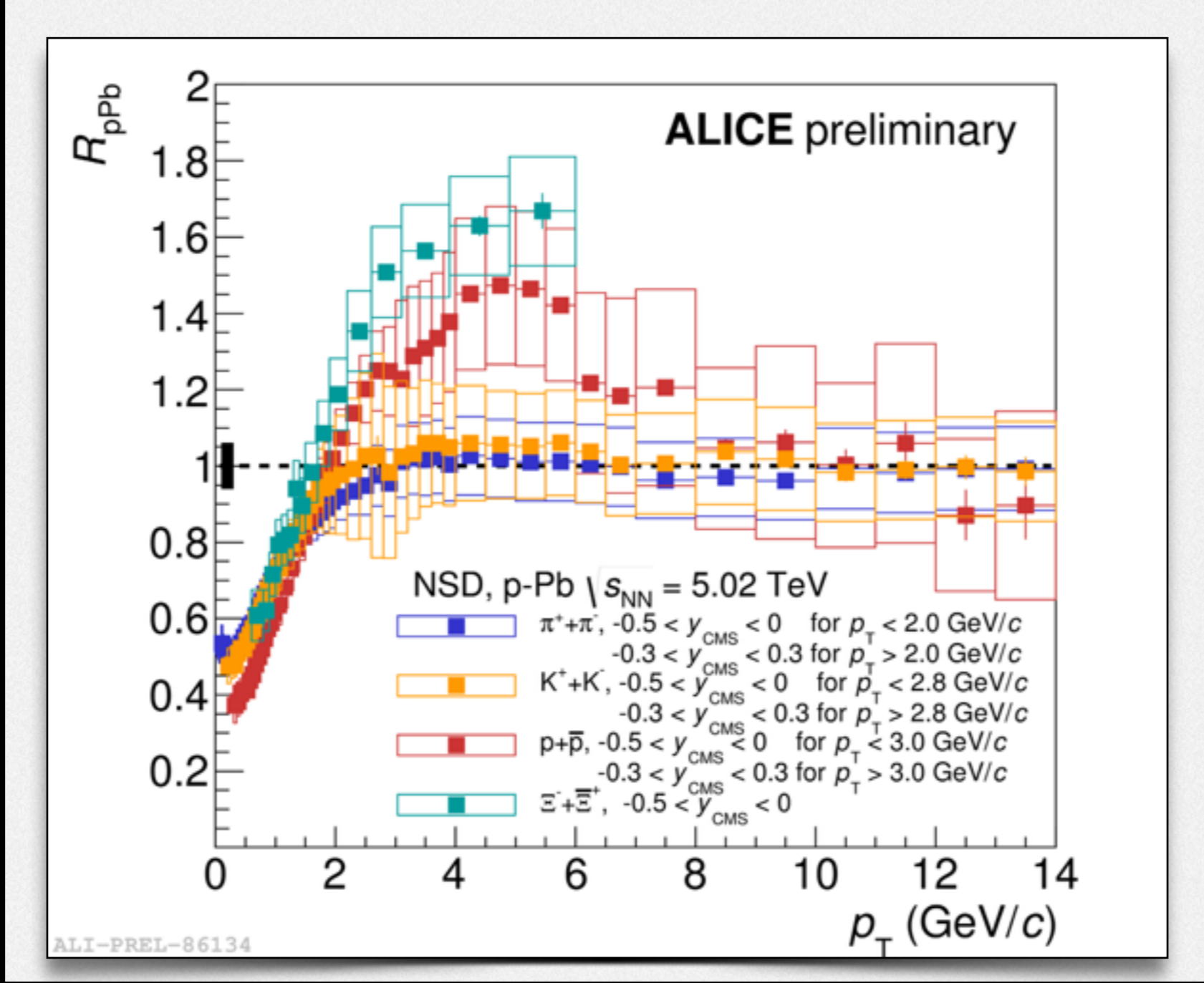
- ▶ Quelles contraintes quantitatives sur les propriétés du milieu ?
- ▶ Théorie et expérience: même langage ?
- ▶ Existe-t-il une approche expérimentale pour discriminer aspect perturbatif et couplage fort ?



Pas d'effet de milieu FS dans pPb ??

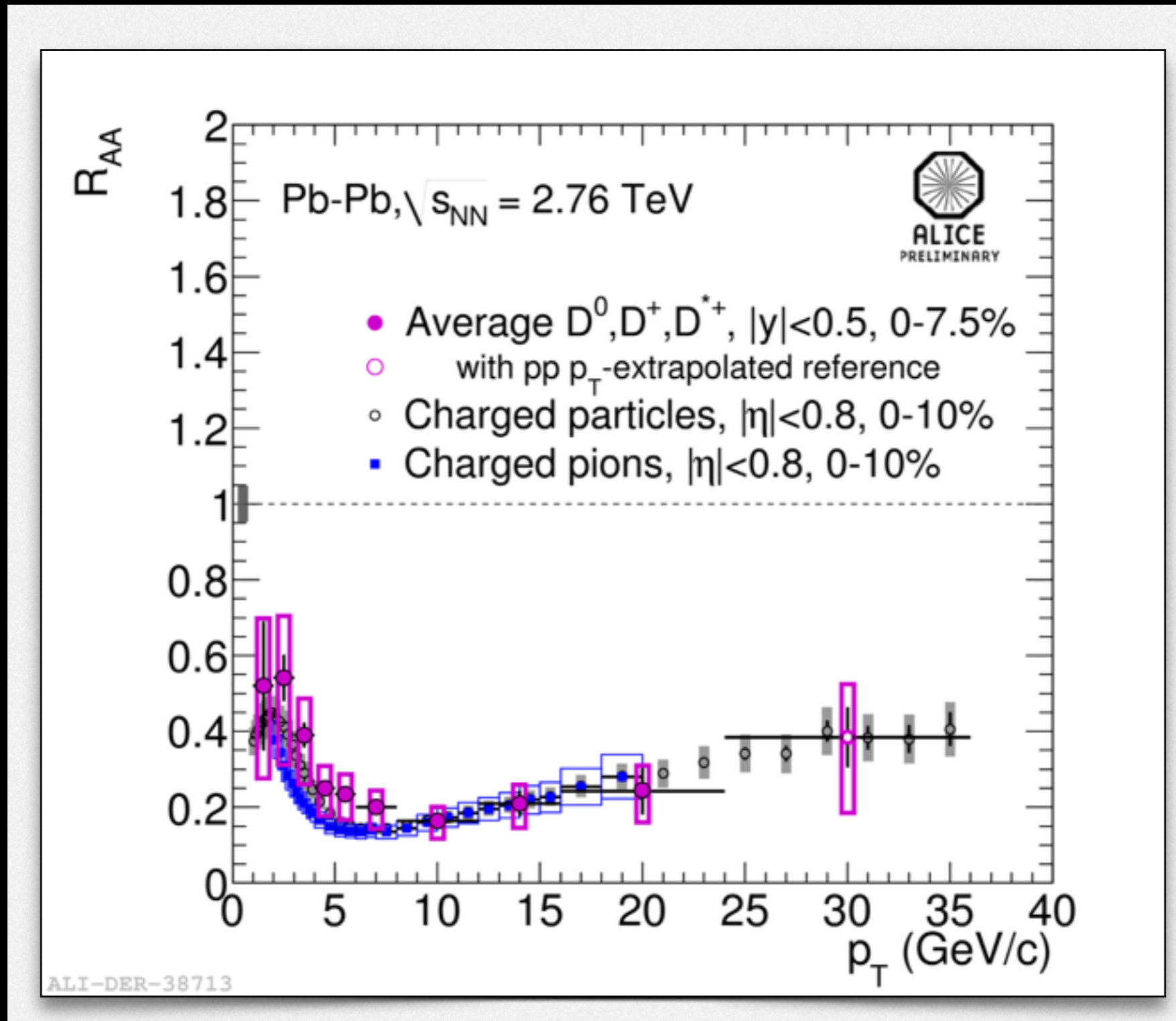


Pas d'effet de milieu FS dans pPb ??

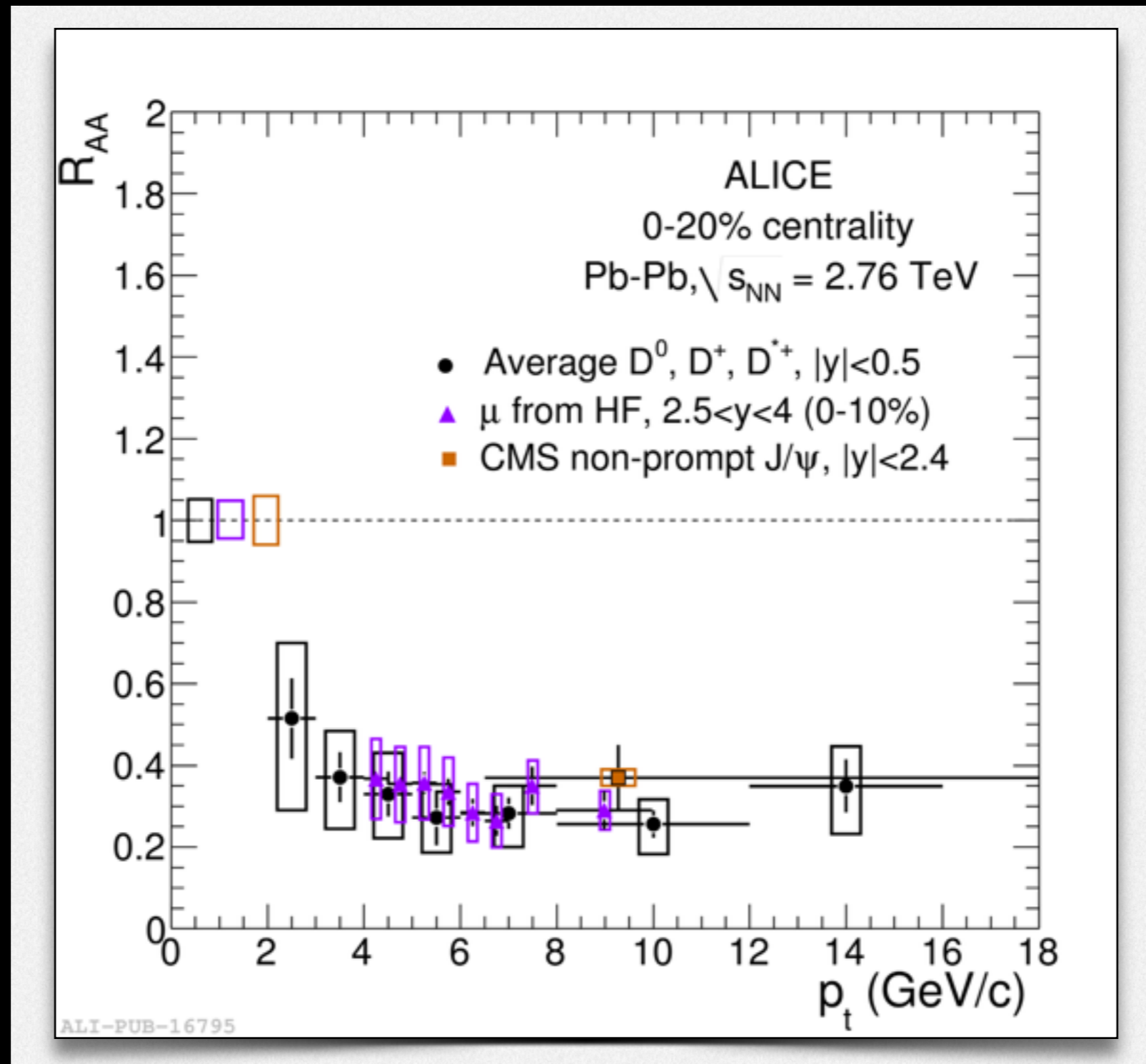


Une autre manifestation du flow transverse ?

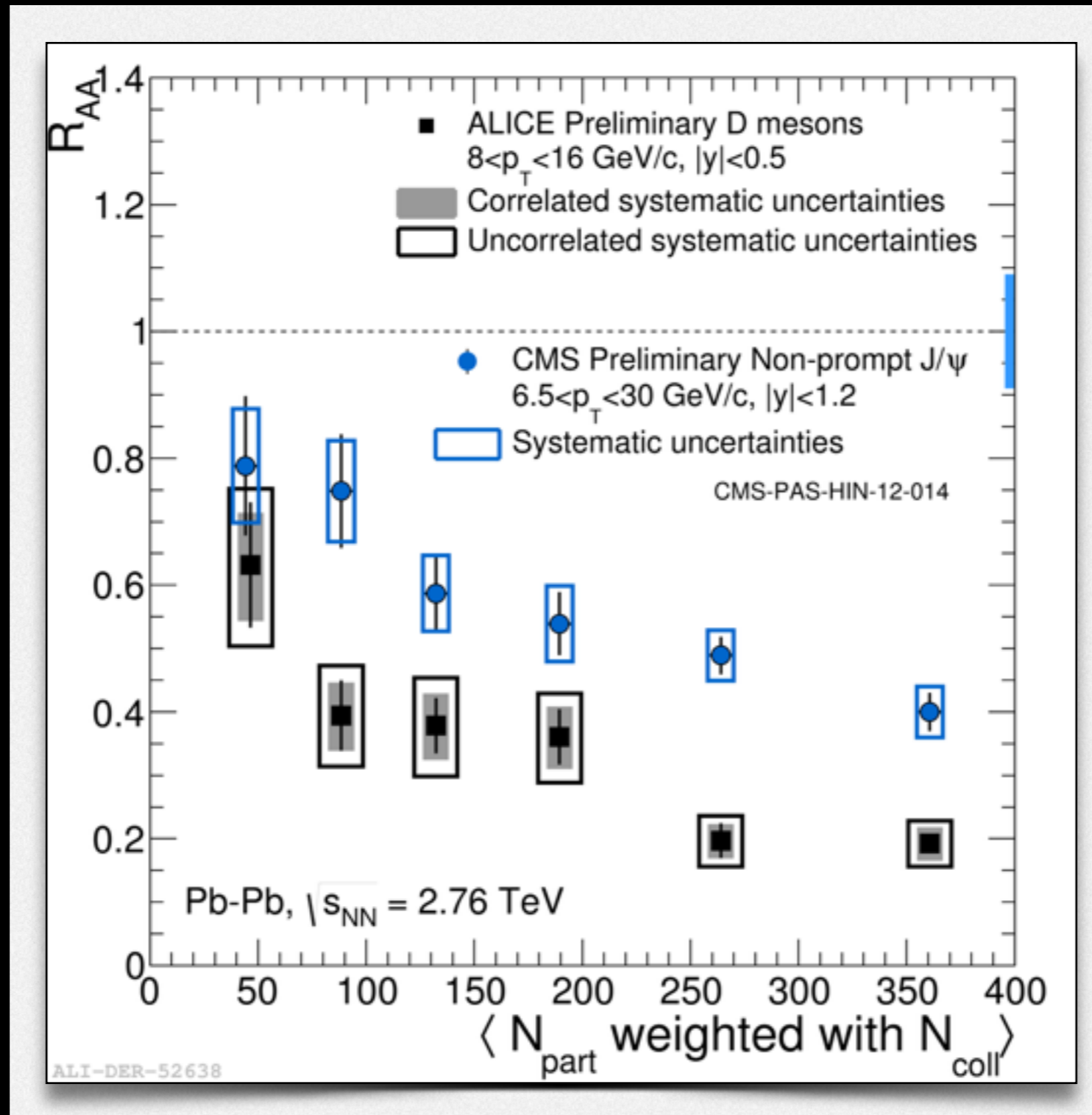




Effet charge de couleur (g vs q) ?

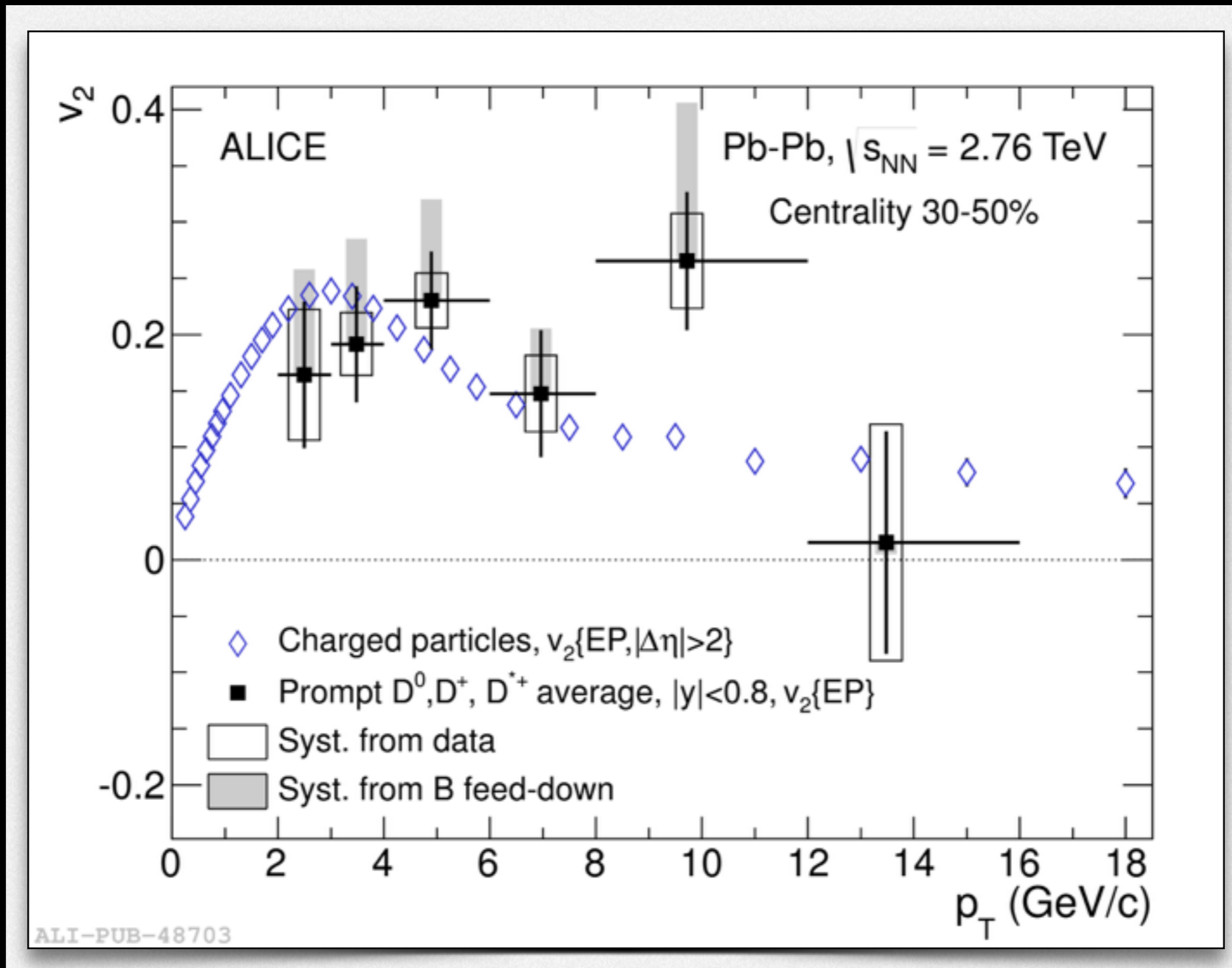


Effet de masse (c vs b) ?

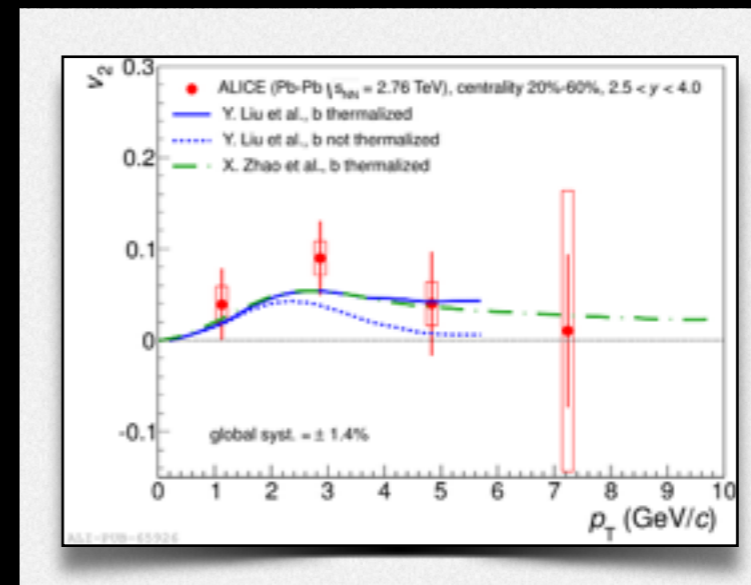
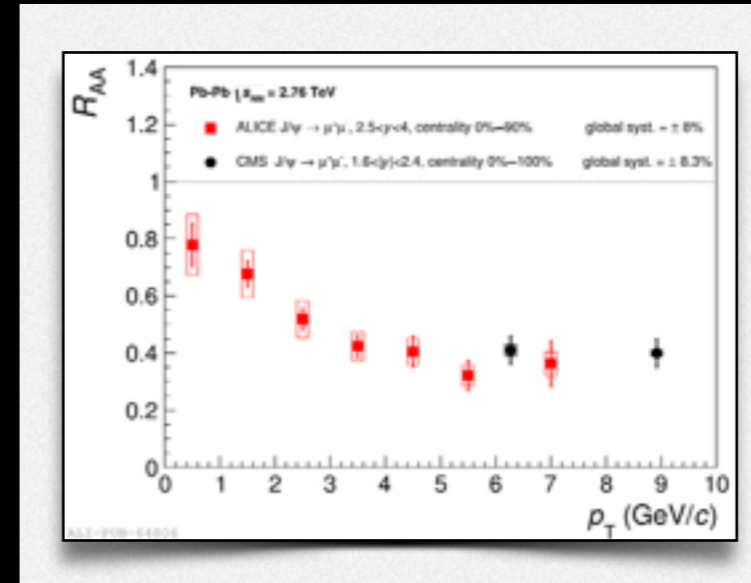
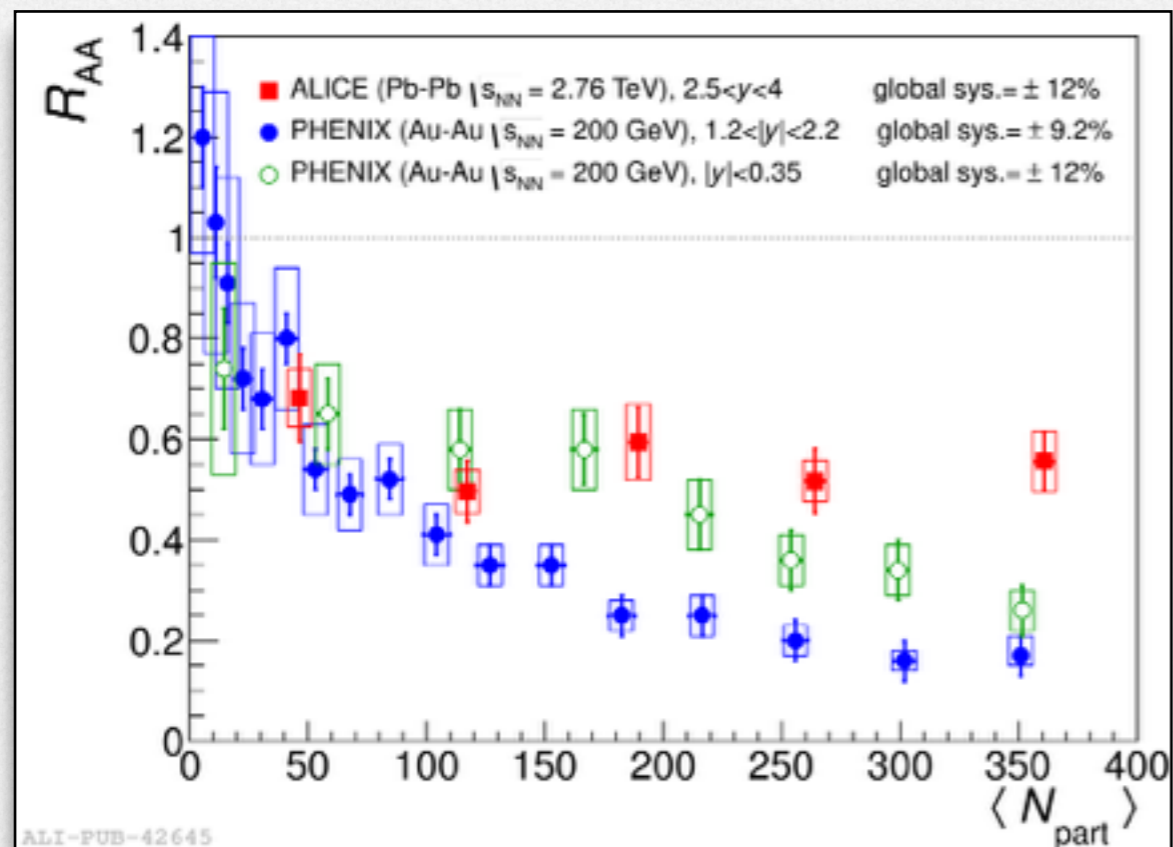


Radiatif ou collisions ?





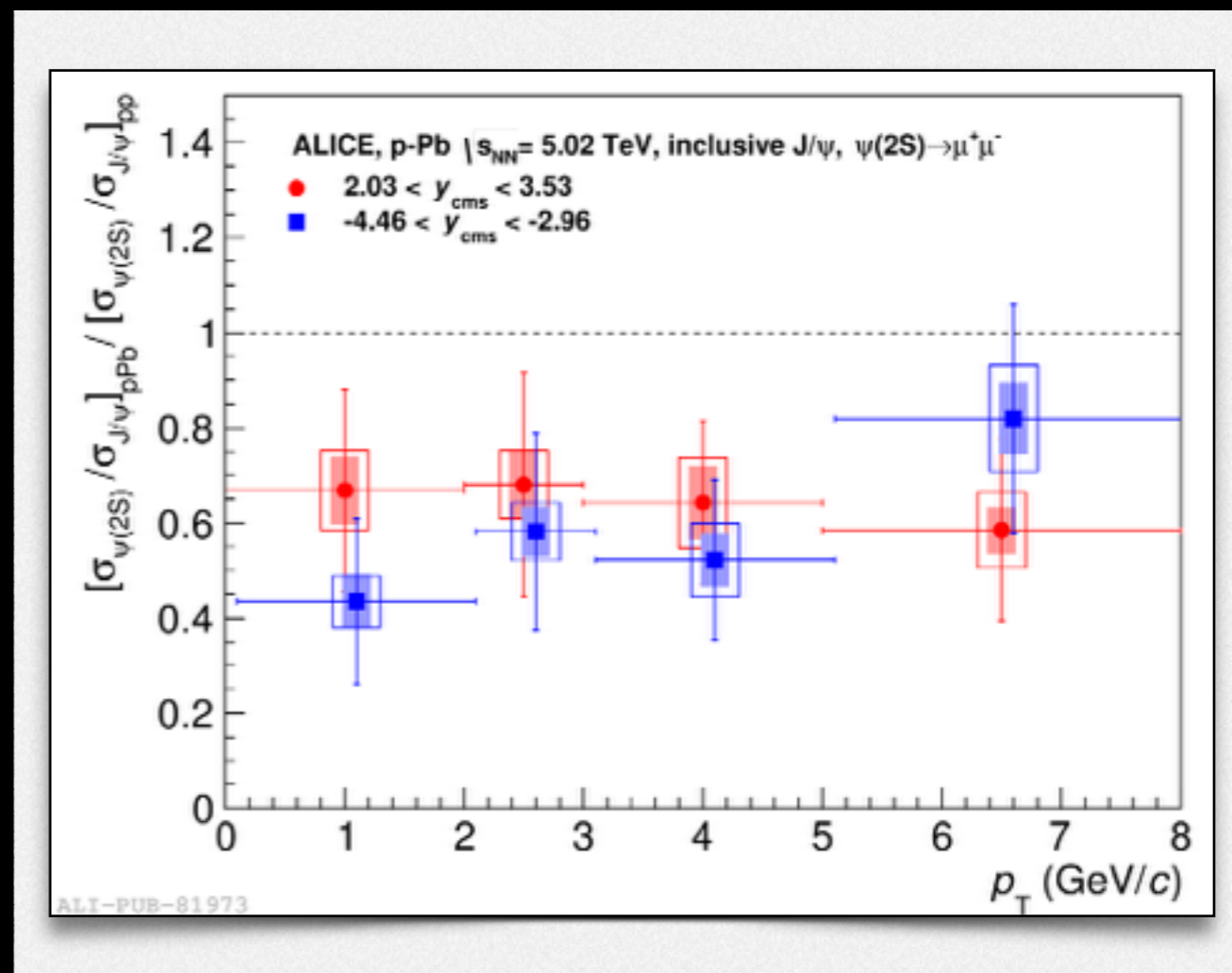
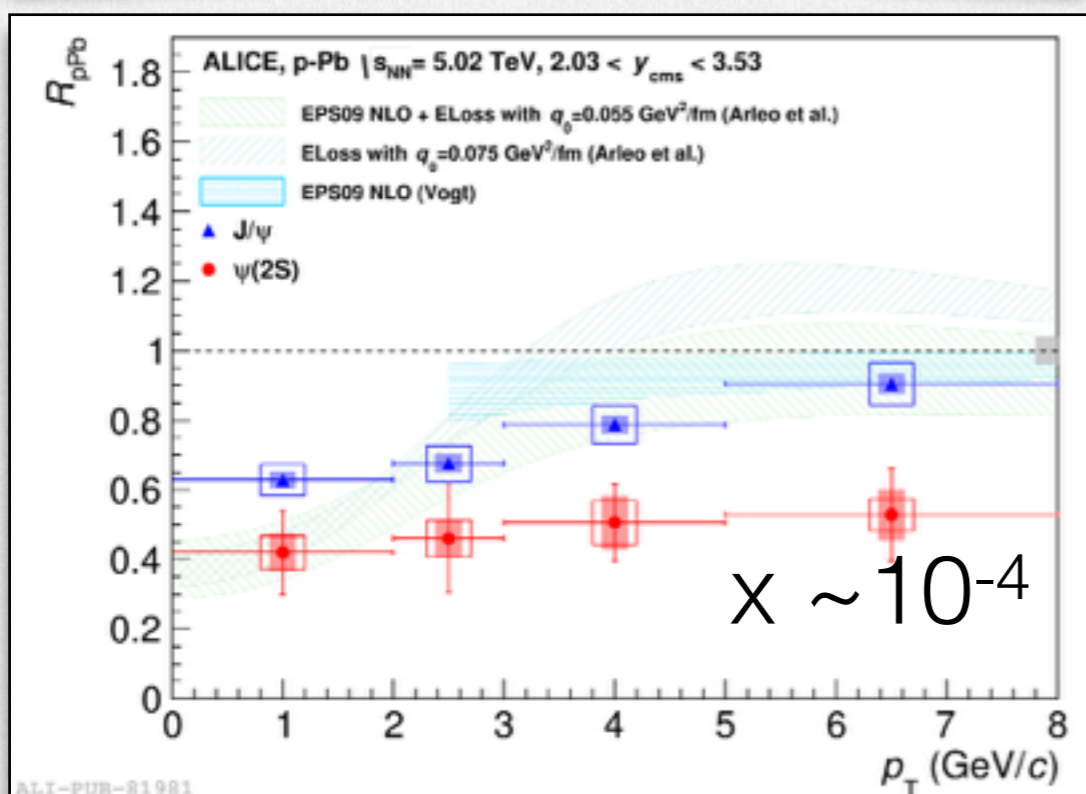
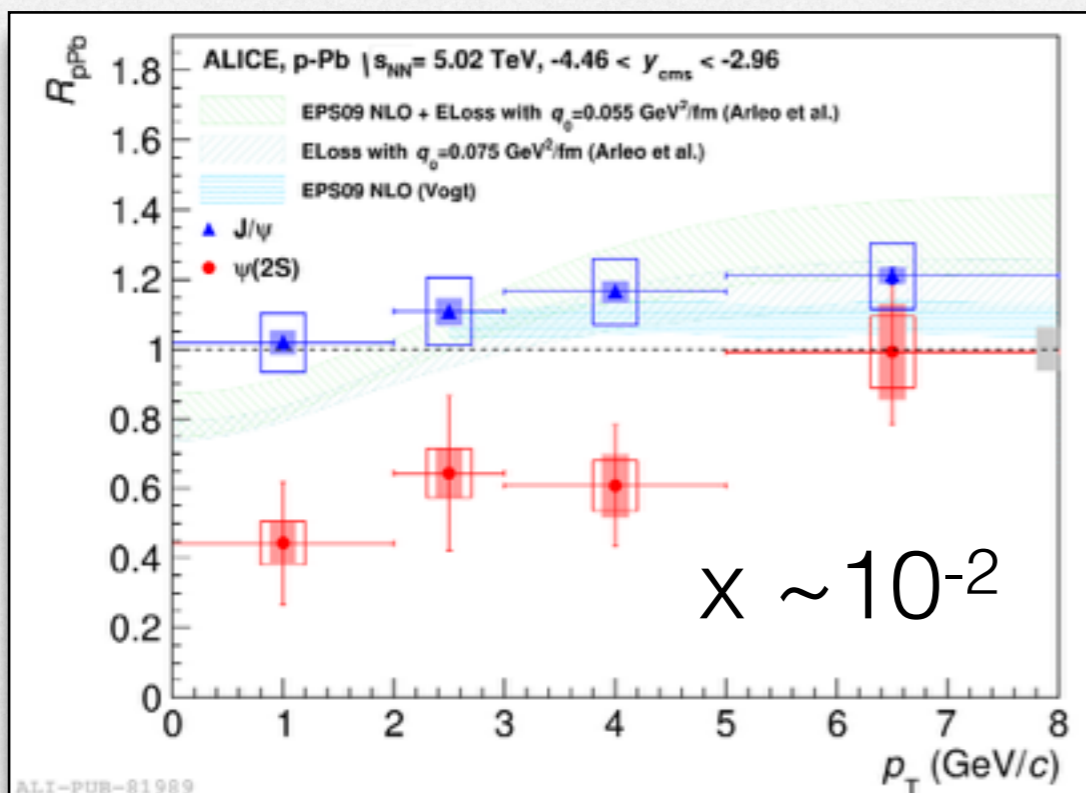
Flow ? coalescence ?



processus dur ⊕ écrantage de couleur ⊕ coalescence

▶ c déconfinés dans **QGP** → hadronisation statistique ?

▶ destruction/création continues dans **QGP** → gel ?



(anti-)shadowing et plus pour ψ(2S) ??

... et pour conclure

## Un nouveau chapitre du manuel de référence QCD

- ▣ La physique de l'équilibre dans QCD
- ▣ Comment est réalisée une dissipation minimale ?
- ▣ De quoi est fait le QGP ?

« It is made of quarks and gluons .... »

- *Frank Wilczek, QM2014* -