

Flot et thermalisation du point de vue expérimental

Magali Estienne

Vendredi 2 juin 2006



Journées thématiques ions lourds : la thermalisation

IPN - Orsay

Magali.estienne@ires.in2p3.fr

Dynamique des fluides : observables

J-Y Ollitrault, N. Borghini

✖ Paramètres microscopiques :

- λ : libre parcours moyen
- v_{thermal} : vitesse moyenne des particules

✖ Paramètres macroscopiques :

- R : dimension caractéristique du système
- v_{fluid} : vitesse du fluide

✖ On peut relier micro et macro :

- c_s = vitesse du son $\sim v_{\text{thermal}}$
- η = viscosité $\sim \lambda v_{\text{thermal}}$

Variables macroscopiques pour caractériser le flot

J-Y Ollitrault, N. Borghini

✖ Thermodynamiquement équilibré ?

Le nombre de Knudsen $Kn = \lambda/R$

- $Kn \gg 1$: limite dite du *free-streaming*
- $Kn \ll 1$: thermalisation (limite hydro)

✖ Idéal ou visqueux ?

Le nombre de Reynolds $Re = Rv_{\text{fluid}}/\eta$

- $Re \gg 1$: flot idéal (non visqueux)
- $Re \leq 1$: flot visqueux

✖ Compressible ou incompressible ?

Le nombre de Mach $Ma = v_{\text{fluid}}/c_s$

- $Ma \ll 1$: flot incompressible
- $Ma > 1$: flot compressible (supersonique)

Scaling macroscopique universel ?

Ces trois nombres sont reliés :

$$Kn \times Re \sim Ma$$

Fluide compressible :
pour $Ma > 1$

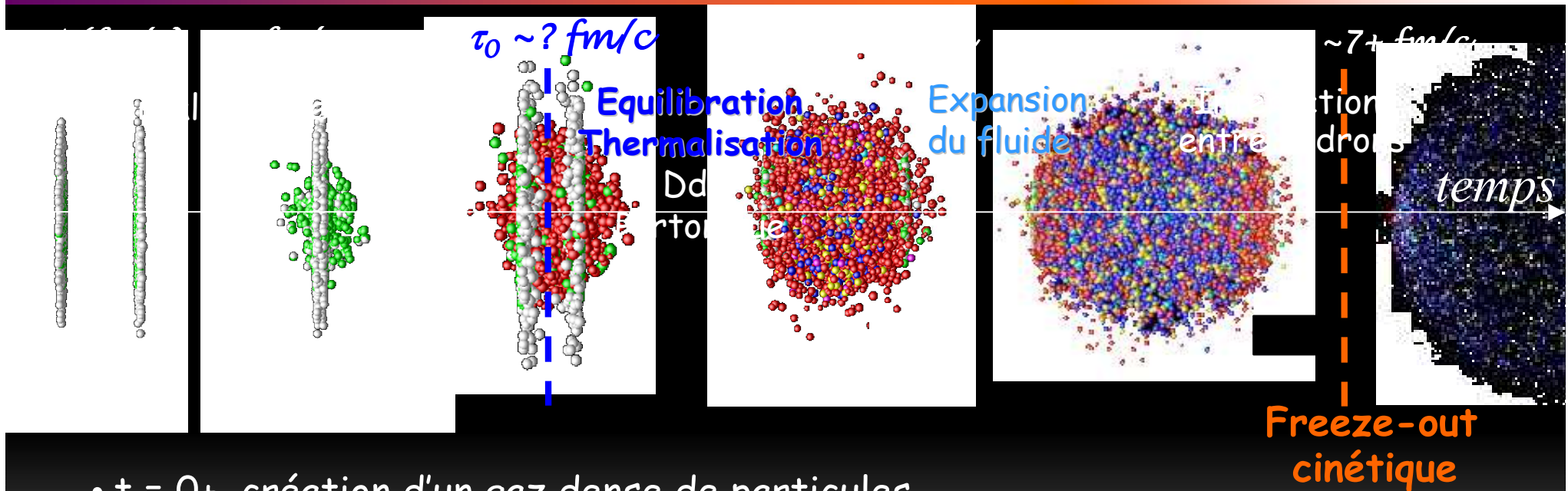
=> Thermalisé = idéal



Kn petit Re grand

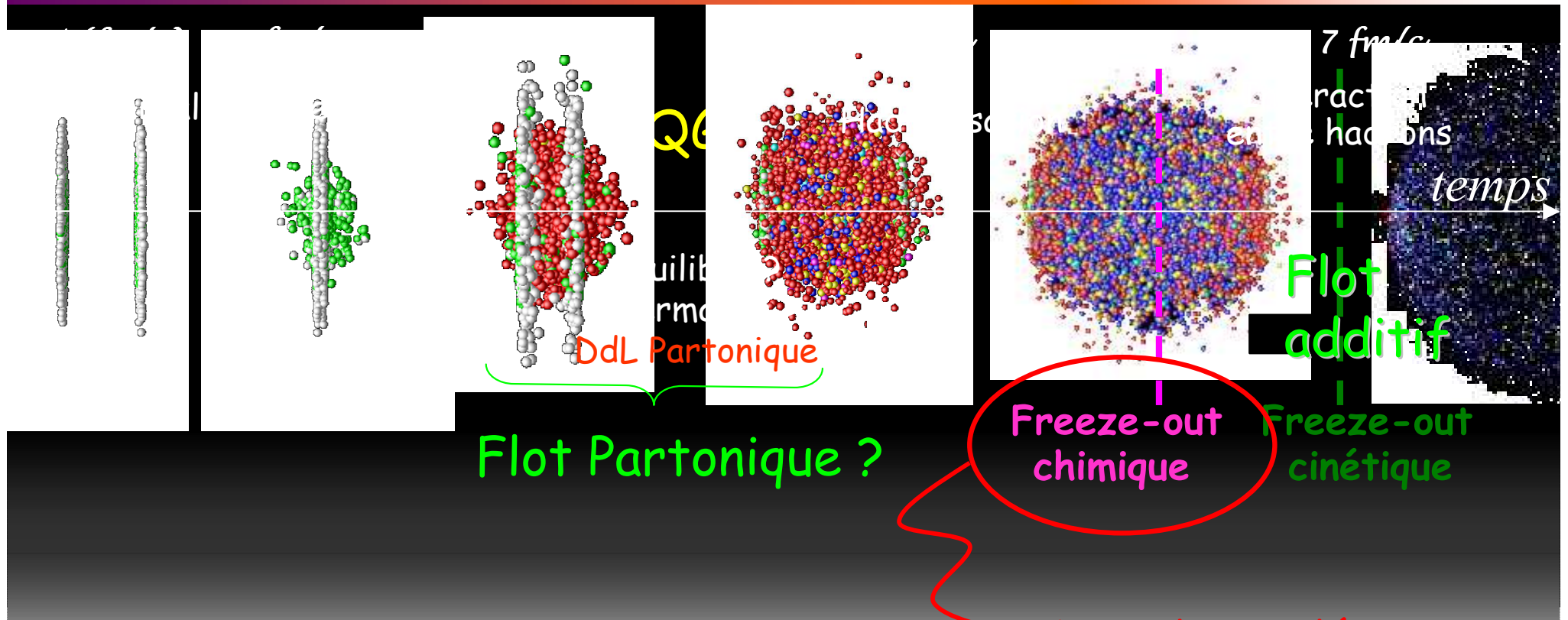
Viscosité = départ de l'équilibre

Scénario de la collision



- $t = 0+$, création d'un gaz dense de particules
- $t = \tau_0$, le libre parcours moyen λ est plus petit que les dimensions caractéristiques du système étudié R_0 ($\lambda \ll R_0$)
 \Rightarrow Thermalisation du système à la température T_0 .
 \Rightarrow Dans ce cas, la dynamique des fluides idéaux peut s'appliquer
- expansion du fluide \Rightarrow la densité diminue, λ et R augmentent
- A un certain $t = t_{f_0}$, $\lambda \sim R$ et la dynamique des fluides idéaux n'est plus valide
 \Rightarrow Freeze-out cinétique : introduction d'un paramètre caractéristique T_{f_0}

Scénario de la collision



- I - Modèle hydrodynamique
- II - Observables parlantes de l'hydrodynamique
- III - Un milieu de partons en interaction
- IV - Quel degré de viscosité / d'idéalité ?
Scaling universel. Théorie vs expérience. Au-delà de l'hydro idéale

I-Modèle hydrodynamique

Dynamique des fluides idéale : ingrédients

Le modèle ne fait aucune hypothèse sur la pré-thermalisation du système.
La physique décrite par l'hydro idéale débute à $t=\tau_0$
Sinon, appel à de la dynamique à 3 fluides ou à des modèles de transport comme « parton cascade »

Trois (quatre) *inputs* majeurs : ➡ **Grande incertitude !!!**

● Conditions initiales :

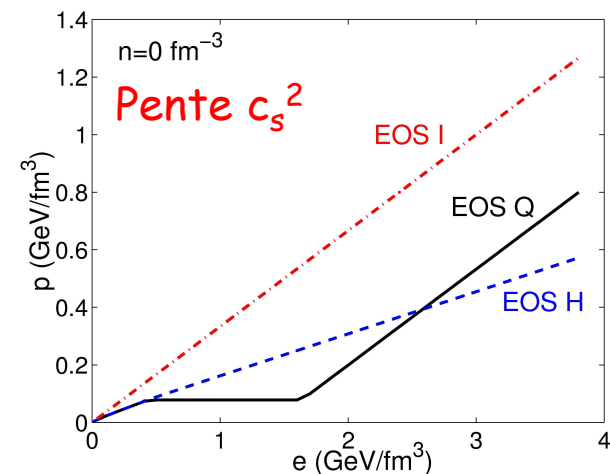
- ✗ le temps τ_0 au bout duquel le comportement hydrodynamique démarre est l'instant à partir duquel le **système thermalise**. A partir de quand l'hypothèse de thermalisation est valide ?
- ✗ Source **Boostée** : paramètre α

● La transition de phase :

- ✗ de quelle nature est-elle si elle a lieu ?
=> **Hypothèse** d'une EOS correspondant à une transition du **1er ordre (modèle Kolb Heinz)**

● Conditions dans l'état final :

- ✗ $\lambda \sim R$ lorsque la température a décru jusqu'à une **température de découplage** T_d = fin de validité de l'hydro idéale.
Surface de *freeze-out* - Cooper-Frye description



Choix des inputs et hypothèses

J-Y Ollitrault PRD 46, 229 (1992)

J-P Blaizot & J-Y Ollitrault in *Quark Gluon Plasma*

• Quel est l'effet de τ_0 sur le flot ?

- si **constant ambiguë** car simplification de la réalité. Rien ne dit que les particules thermalisent toutes au même instant (densité initiale non homogène).
- $\tau_0 \sim 1 \text{ fm}/c$ **non nécessaire**
- peut être de la taille transverse du système => **jusqu'à 7 fm/c**. Flot transverse collectif peu modifié.
- $\tau_0 \ll \tau_d$ est une **sécurité** mais **pas la meilleure condition initiale pour les collisions périphériques** qui peuvent mettre plus de temps à thermaliser car moins denses

• Quel est l'effet de T_d sur le flot ?

- plus T_d est petite, plus l'hydrodynamique dure.
- si $T_d = T_0$, le système se découple dès qu'il a thermalisé.
- l'anisotropie varie lentement avec T_d si $T_{\text{eff}} \ll T_d$. T_{eff} = température au temps qu'il a fallu au flot pour se développer.
- Plus T_{eff} proche de T_d , le système se gèle avant que l'expansion transverse ait pu se développer.

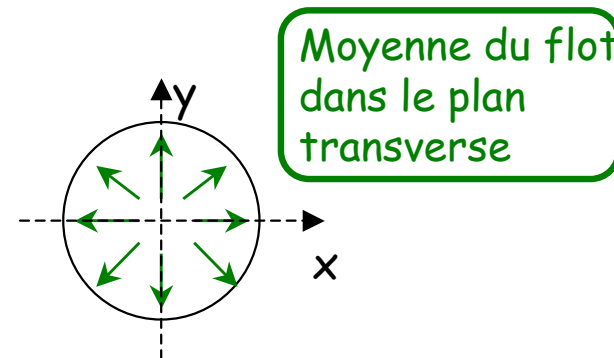
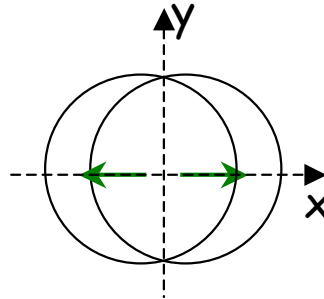
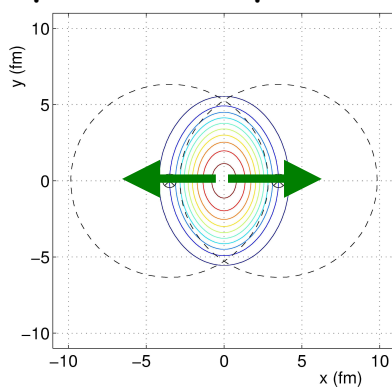
• Quelques hypothèses :

- Distribution thermique de p => peut être ensuite boostée (input 4)
- $\lambda \sim 0$
- Hydro « de base » 2D+1 : la rapidité centrale est invariante sous un boost de Lorentz dans la direction longitudinale $v_z = z/t$
- Ne suppose pas l'équilibre chimique et T_{ch}

Flot radial v_0

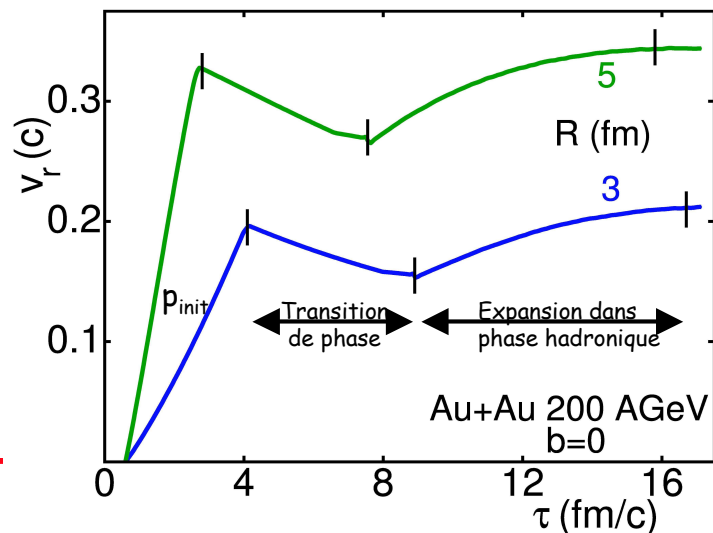
Double composante :

- **Pression initiale** dans les collisions centrales \Rightarrow émission de particules isotrope dans le plan transverse.



Excentricité = 0

- **Réinteractions multiples** essentiellement dans la phase hadronique \Rightarrow développe à nouveau l'amplitude de la vitesse d'expansion transverse..



Idée : comparer spectres en énergie cinétique mesurés à ceux d'un fluide thermalisé en expansion

Hyp : fluide non-relativiste thermalisé à T et vitesse v_{flow}

$$v_{part} = v_{th} + v_{flow}$$

$$\langle E_{part} \rangle = mv_{flow}^2 + 3T/2$$

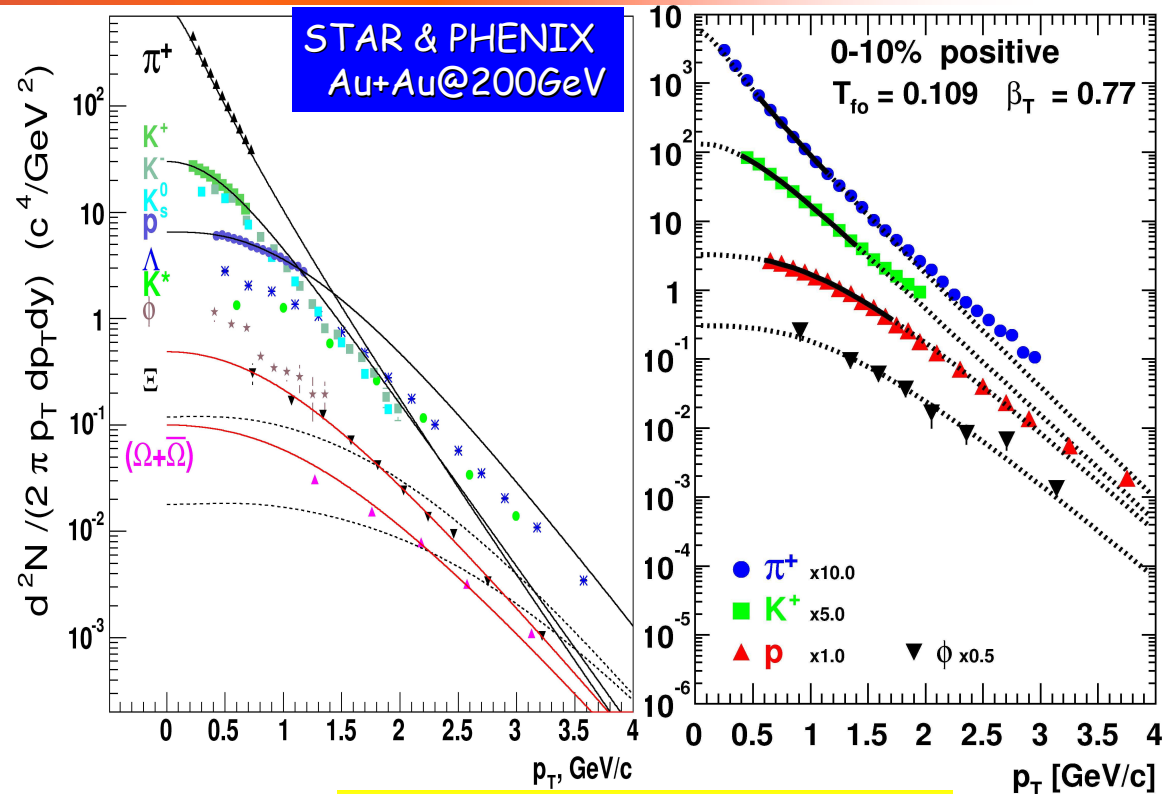
\Rightarrow Ajustement des spectres en p_T

Modèle du Blastwave

- Modèle inspiré de l'hydro :
Source de particules
localement thermalisée et
en expansion

- Deux paramètres :
→ Température au FO
cinétique : T_{fo}
→ Vitesse d'expansion
transverse : β_T

Schnedermann, Sollfrank, Heinz
Nucl-th/9307020

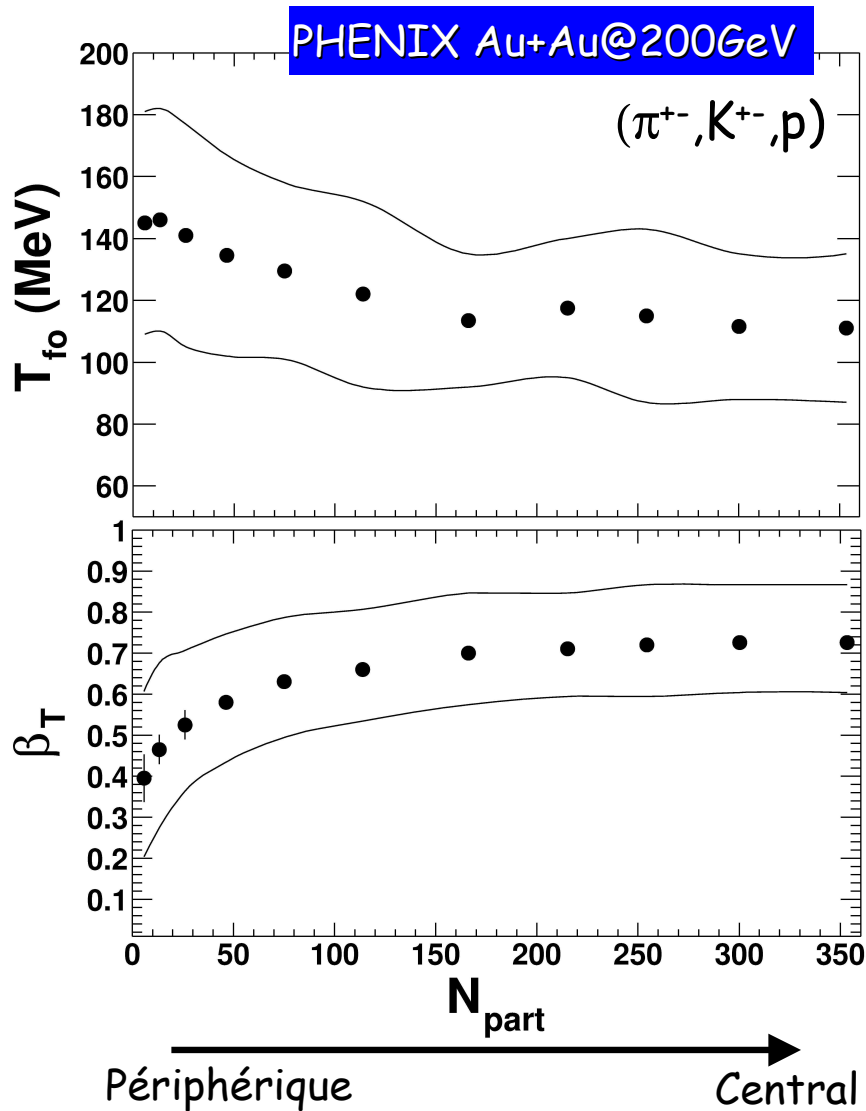


Très bonne reproduction de
la forme des spectres à bas

$$\frac{dN}{m_T dm_T} \propto \int_0^R r dr m_T K_1 \left(\frac{m_T \cosh \rho}{T_{fo}} \right) I_0 \left(\frac{p_T \sinh \rho}{T_{fo}} \right)$$

$$\rho = \tanh^{-1} \beta_r \quad \beta_r = \beta_s \left(\frac{r}{R} \right)^\alpha \quad \alpha = 0.5, 0.7, 1, 2$$

Un flot à forte origine hadronique



✖ On parvient à ajuster **ensembles** les particules légères (π^{\pm} et K^{\pm}) et les protons
=> **idée de collectivité**

✖ T et β_T corrélés et grandes barres d'erreur

✖ β_T augmente et T diminue quand b diminue
=> **Re-scattering** augmente quand b diminue
=> **augmentation isotrope du flot dans la phase hadronique**

• Le flot radial est essentiellement bâti dans la **phase hadronique**

• **Désaccord entre blastwave et hydro idéale** sur T_{fo} et T_d

• Est-ce que T_{fo} est bien la température au Freeze-out ?

• Information sur la **taille de la source** en ajustant les données HBT

Wiedemann Phys Rev C57, 266 (1996)
Lisa & Retière

Comparaison hydro 2D+1 avec l'expérience

Test des différents *inputs* du modèle :

- (2+1) hydro (+ partial chemical equilibrium $T_{ch} \approx 165 \text{ MeV}$)

- P.F. Kolb, J. Sollfrank, U. Heinz, P. Huovinen, ...

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

- Résultats à $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ (BRAHMS, PHENIX, PHOBOS, STAR)
- Résultats à $\sqrt{s_{NN}} = 62.4 \text{ GeV}$ (préliminaires !) (STAR)
 - Thèse de J. Speltz à Strasbourg (production des baryons multi-étranges à 62.4 GeV)
 - Utilisation et tuning du modèle de P.F. Kolb and U.Heinz
 - $\tau_0(62 \text{ GeV}) = \tau_0(200 \text{ GeV}) = 0.6 \text{ fm/c}$; $s_0(62 \text{ GeV}) < s_0(200 \text{ GeV})$
 - EoS : transition de phase du 1^{er} ordre à T_c . $T_c = T_{ch} = 165 \text{ MeV}$; T_d différent

Bon accord à 200 GeV: π , K , p

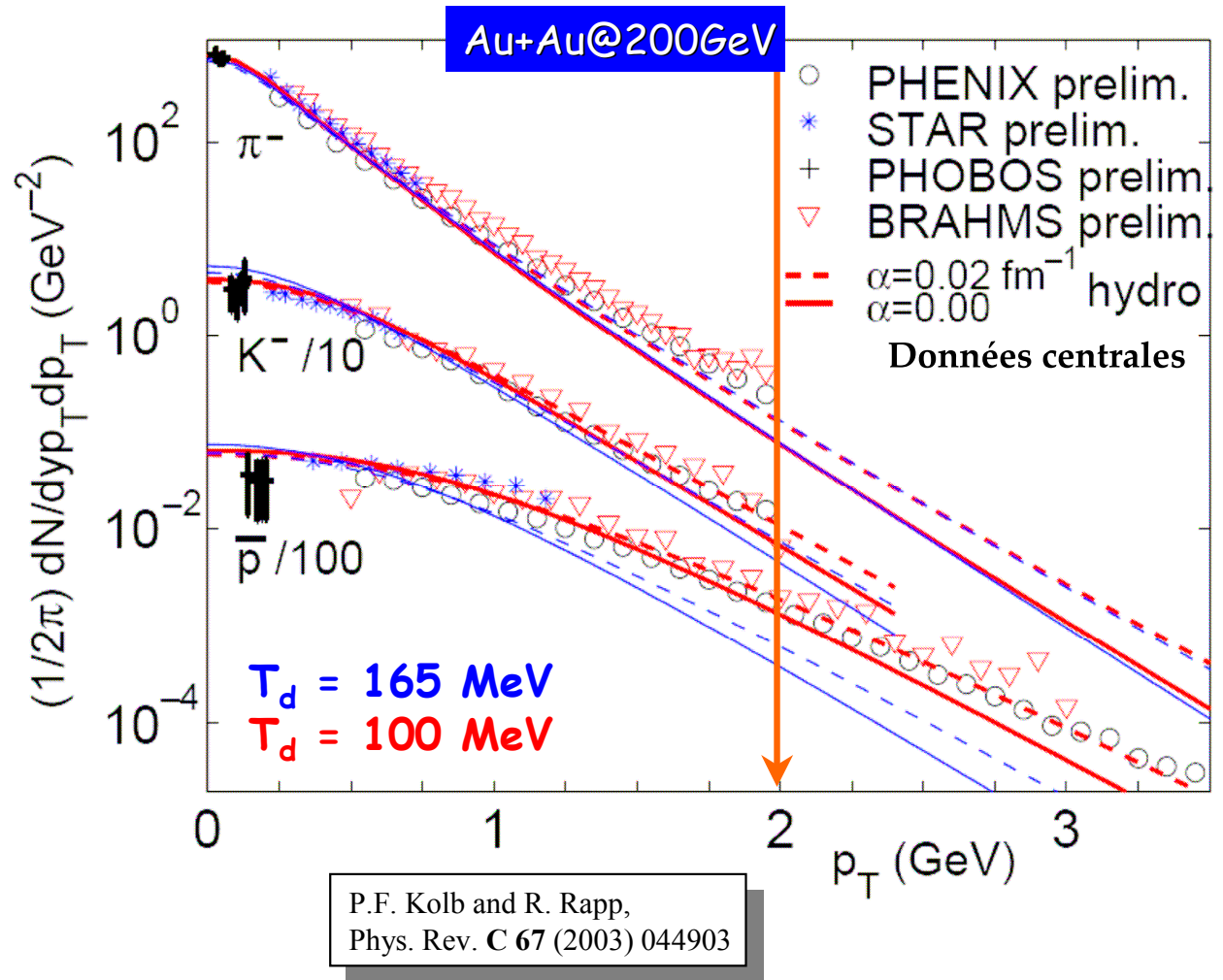
➤ Spectres bien reproduits à **bas** p_T (< 2 GeV/c). A plus haut p_T , désaccord, **moins de rescattering**

=> limite de validité de la thermalisation ?

➤ Si boost initial α : vitesse transverse initiale (à τ_0) :
 $v_T(r) = \tanh(\alpha r)$

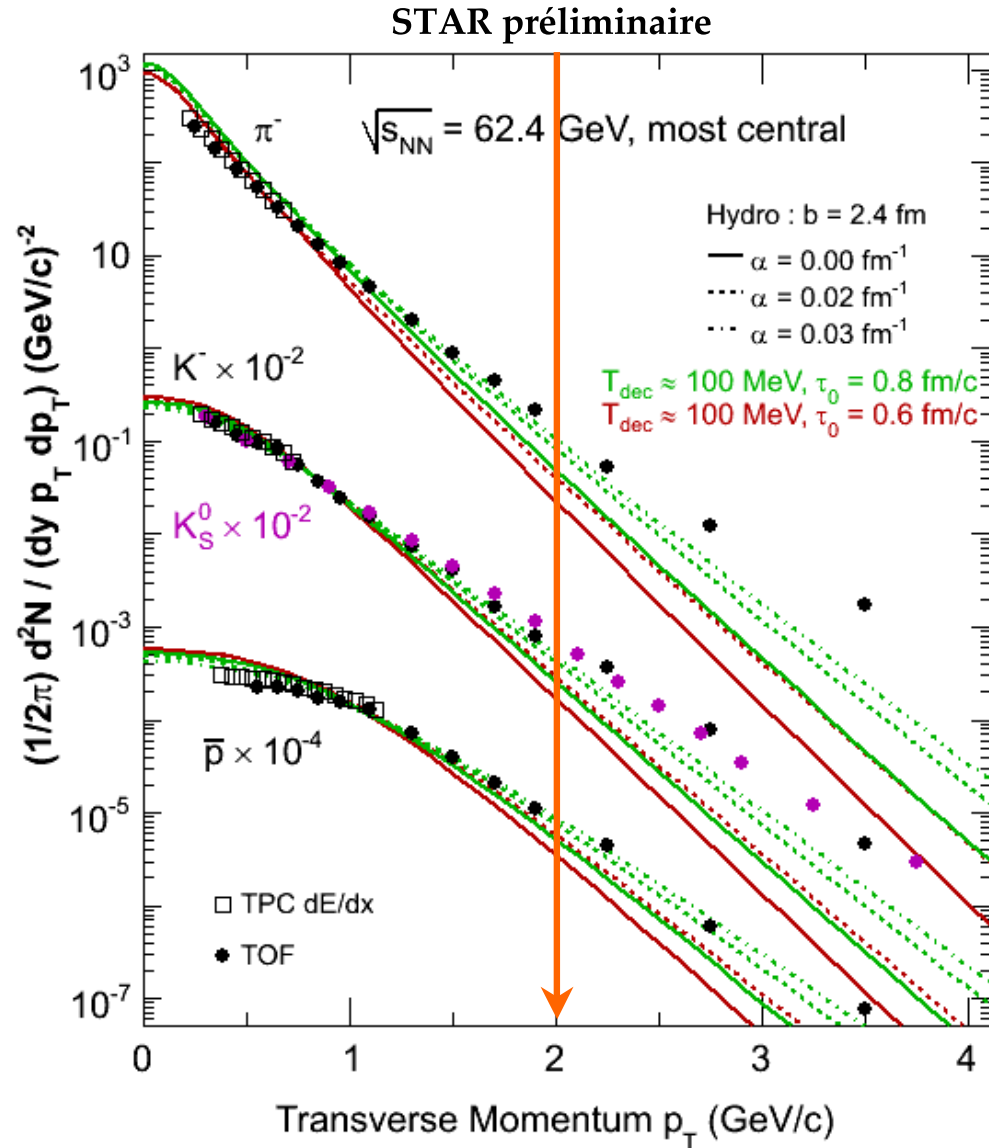
➤ Meilleur accord pour :

- $\alpha = 0.02 \text{ fm}^{-1}$
- $T_d = 100 \text{ MeV}$



Introduction d'un boost initial pour reproduire les données

L'accord est moins bon à 62.4 GeV



- Prédictions normalisées aux données

- Plus petit domaine d'accord :

⇒ hydro encore valable à 62.4 GeV ?

- Est-ce que le feed-down est traité pareil entre les données et l'hydro ?

- $T_d = 100$ MeV

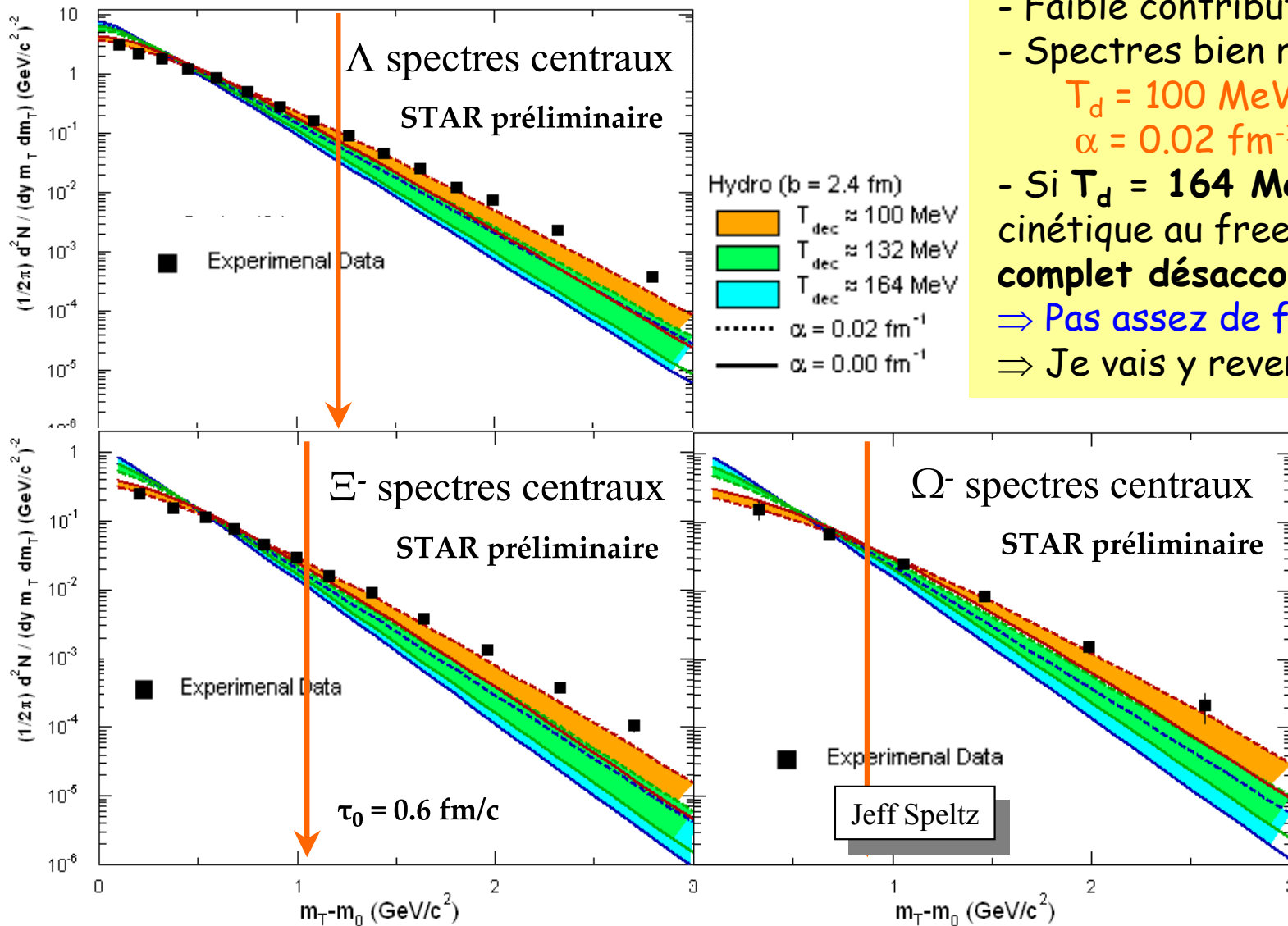
- Les conditions initiales modifient les prédictions :

⇒ Une début de thermalisation plus lent ($\tau_0 = 0.8$ fm/c)

⇒ Plus de boost initial nécessaire ($\alpha = 0.03$ fm⁻¹)

Jeff Speltz

Baryons multi-étranges à 62.4 GeV



- Modèle normalisé aux données
- Faible contribution du feed-down
- Spectres bien reproduits avec :

$$T_d = 100 \text{ MeV}$$

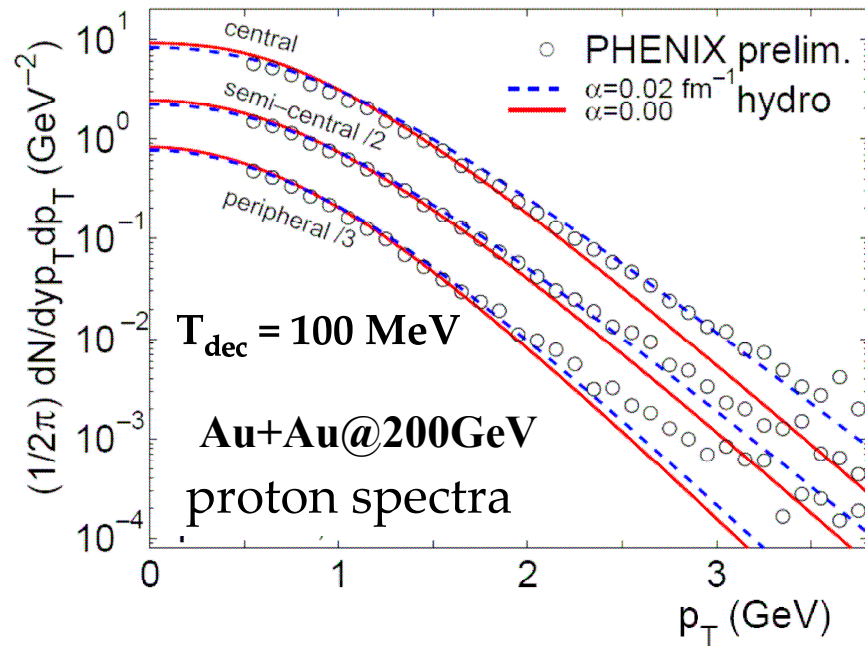
$$\alpha = 0.02 \text{ fm}^{-1}$$

- Si $T_d = 164$ MeV (découplage cinétique au freeze-out chimique), **complet désaccord !!!**

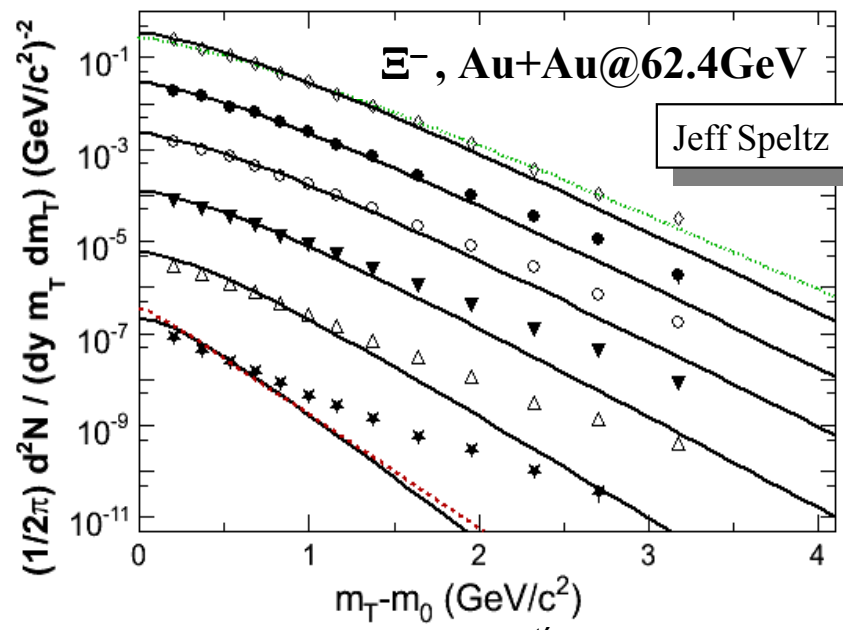
\Rightarrow Pas assez de flot radial !

\Rightarrow Je vais y revenir...

Dépendance avec la centralité



STAR préliminaire



- Bon accord pour $p_T < 2 \text{ GeV/c}$ sauf collisions plus périphériques.

- Collision plus **périphériques non reproduites** par l'hydro !

* **Système plus petits**

* **Moins de rescattering.**

⇒ Tester un temps de thermalisation plus long pour données périphériques

⇒ Un découplage cinétique plus tôt ne change rien ($T_d=164 \text{ MeV}$).

hydro $T_{\text{dec}} = 100 \text{ MeV}$; $\alpha = 0.02 \text{ fm}^{-1}$; $\tau_0 = 0.6 \text{ fm/c}$

hydro $T_{\text{dec}} = 100 \text{ MeV}$; $\alpha = 0.02 \text{ fm}^{-1}$; $\tau_0 = 0.8 \text{ fm/c}$

hydro $T_{\text{dec}} = 164 \text{ MeV}$; $\alpha = 0.02 \text{ fm}^{-1}$; $\tau_0 = 0.6 \text{ fm/c}$

Hypothèse de thermalisation de moins en moins valide avec la centralité qui diminue