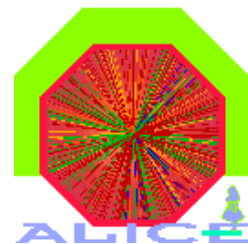


Soutenance de Thèse

Recherche de matière étrange (exotique)
dans les expériences STAR et ALICE
auprès des collisionneurs d'ions lourds
ultra-relativistes RHIC et LHC

par Renaud VERNET

Soutenu le 9 février 2006 à Strasbourg



Plan

- PARTIE I : PQG et particules étranges
- PARTIE II : Identification des hyperons dans l'expérience ALICE
- PARTIE III : Matière étrange exotique
- PARTIE IV : Recherche de dibaryons avec l'expérience STAR
- PARTIE V : Identification de dibaryons dans l'expérience ALICE
- Conclusions

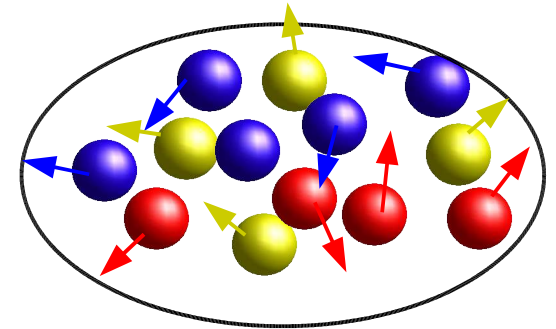
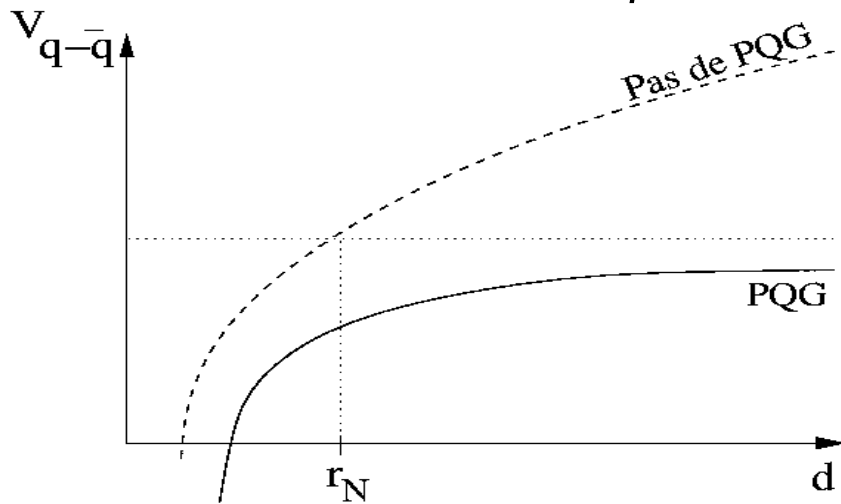
PARTIE 1

Plasma de Quarks et de Gluons et particules étranges

- ↪ *matière hadronique et PQG*
- ↪ *importance des particules étranges*
- ↪ *quelques résultats du SPS et du RHIC*

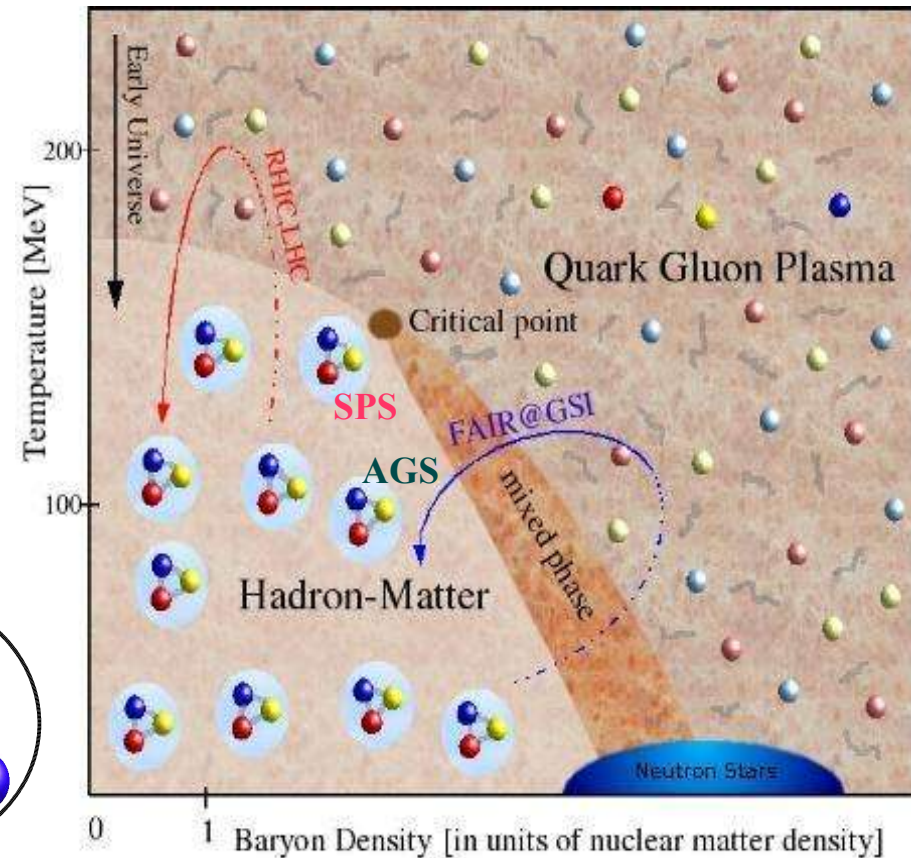
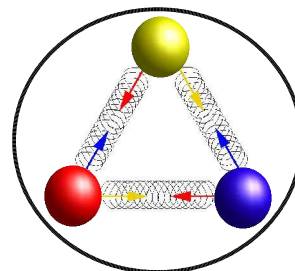
Confinement / déconfinement

- potentiel $V_{q\bar{q}} = \frac{-K_1}{r} + K_2 r$

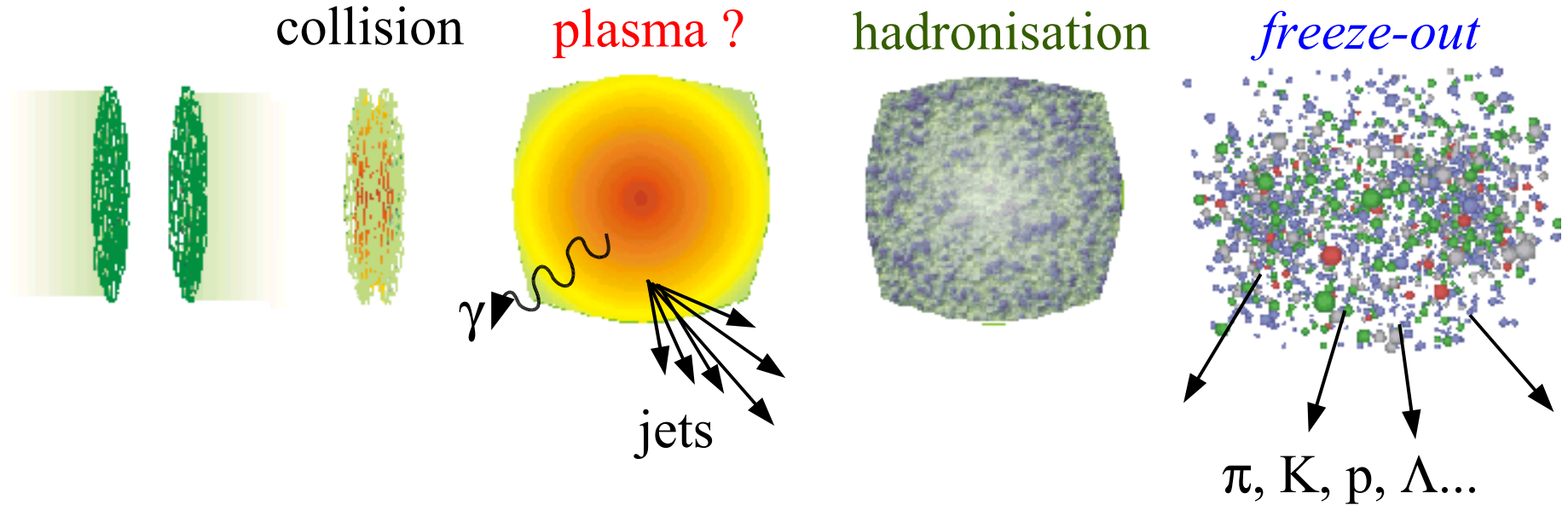


- T et/ou $\mu_B \gg 1$
- transition de phases

- 1^{er} ou 2^{eme} ordre
- *crossover*



Sonder le PQG



- sondes dures (directes) : premiers instants
 - ↳ *processus durs, phénomènes à haut p_T*
- sondes molles (indirectes)
 - ↳ *état du système au freeze-out*
 - composition chimique
 - effets collectifs

Degré d'équilibration chimique

I

- description des rapports de particules
- les modèles statistiques (T, μ_B) reproduisent les abondances relatives mesurées au RHIC

II

↳ *facteurs de saturation $\gamma_{u,d,s} \sim 1$ (coll. centrales)*

III

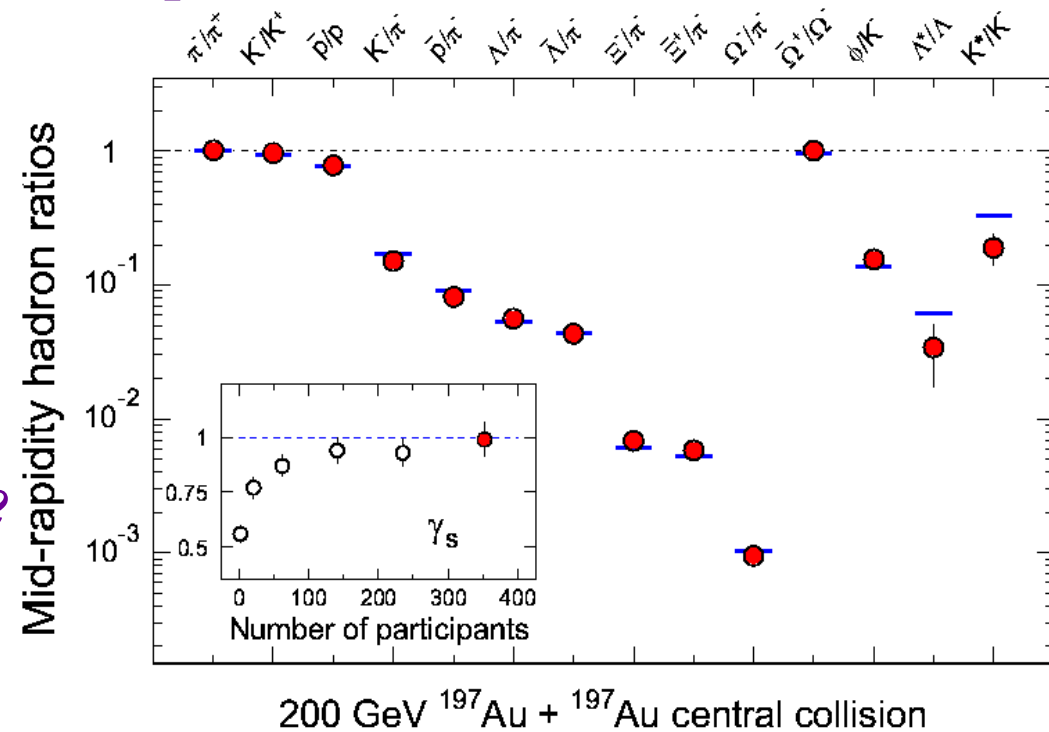
↳ *fort degré d'équilibre chimique atteint au RHIC*

IV

⇒ importance de la mesure des particules étranges !!

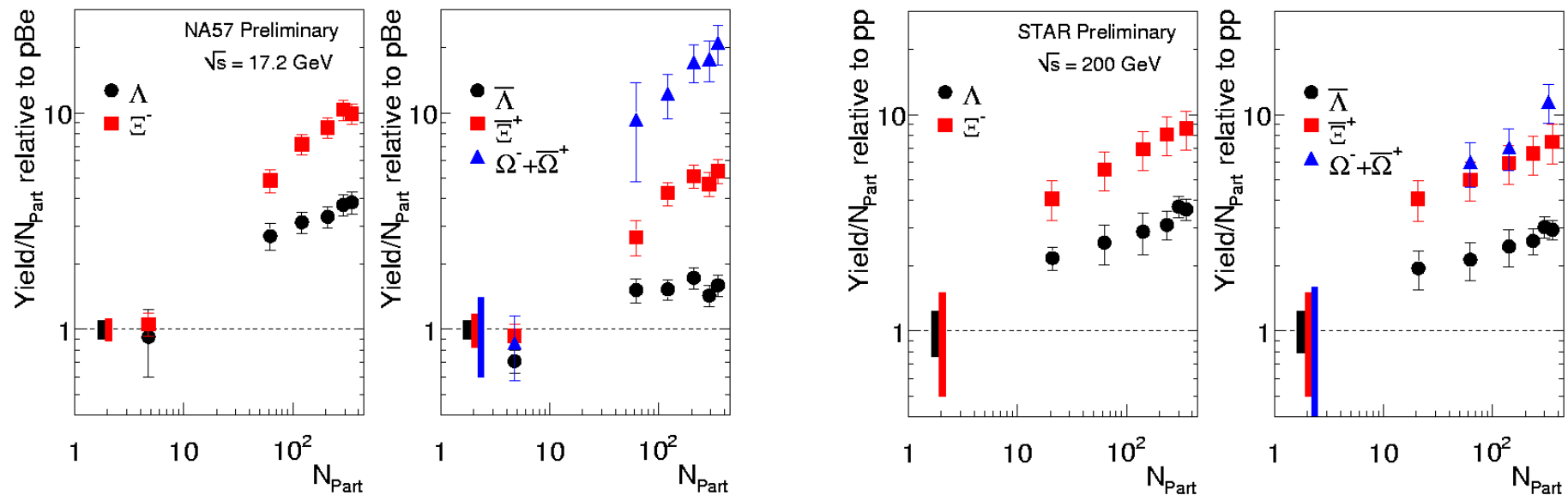
V

- LHC ?
 - ↳ *nouveaux phénomènes ?*
 - ↳ *mesures essentielles*



Augmentation de l'étrangeté

- création de paires $s \bar{s}$ favorisée dans un PQG
- augmentation mesurée au SPS et RHIC :



effets de suppression canonique – volume de corrélation ?

- comportement au LHC ?!

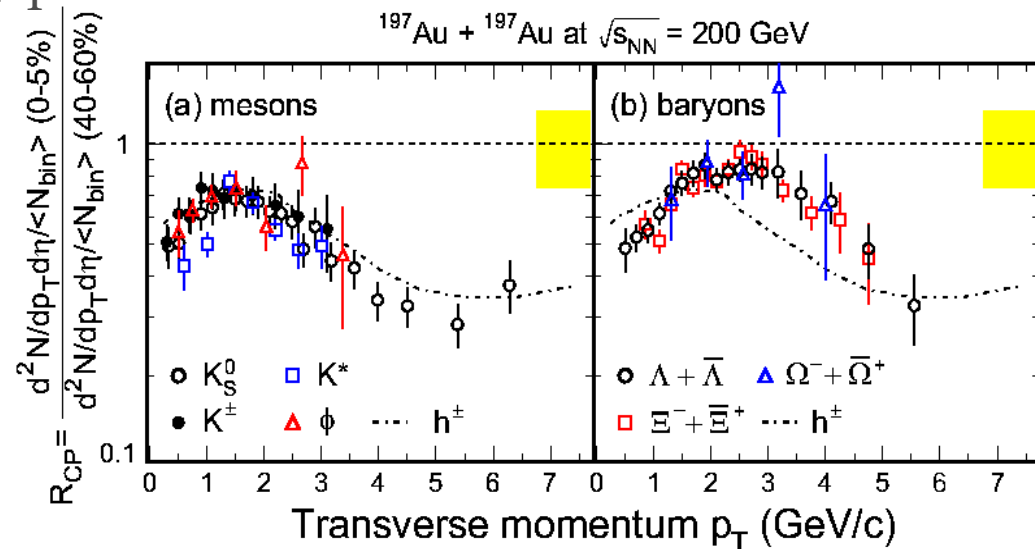
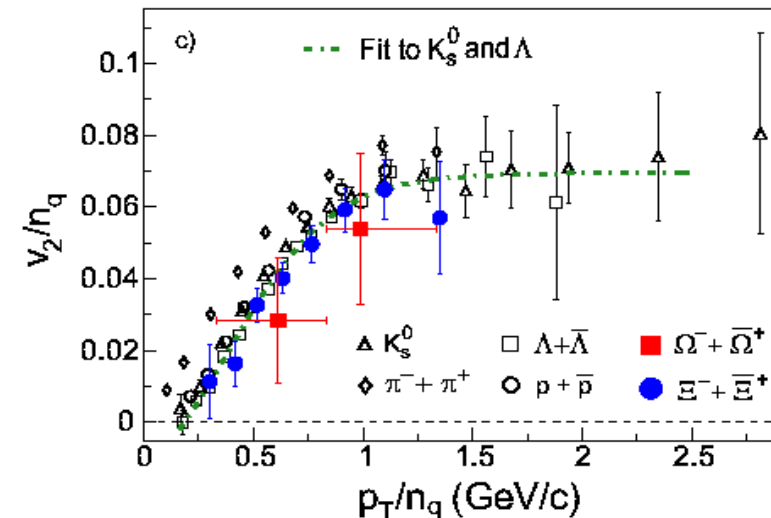
↳ + *processus durs* :

- mécanismes hors équilibre, sursaturation de l'étrangeté ?
- dépendance avec N_{bin} ...

Expansion et hadronisation

- I • Flow elliptique (v_2) :
 - ↪ faibles sections eff. de Ξ et Ω
 - ↪ loi d'échelle en nb de quarks constituants à p_T intermédiaire
- II • R_{CP} : suppression des hauts p_T
 - ↪ différent mésons / baryons
- III • création de hadrons de p_T intermédiaires
 - ↪ coalescence
 - ↪ fragmentation
 - ↪ comportement au LHC ?

particules étranges !!
large gamme de p_T +
nature méson/baryon



Les particules étranges au LHC

- la mesure des particules étranges a contribué à des résultats parmi les plus marquants du RHIC
 - ↳ *ces études devront être effectuées au LHC aussi*
- + nouvelles opportunités au LHC :
 - ↳ *PQG plus prononcé :*
 - temps de vie, volume...
 - ↳ *+ de particules (dN_{ch}/dy) :*
 - analyses par classes d'événements, fluctuations d'observables...
 - ↳ *+ de processus durs :*
 - suppression hauts p_T , jets (étranges)...
 - domaines en p_T de compétition entre mécanismes de coalescence et fragmentation

PARTIE 2

Identification des hypérons avec l'expérience ALICE

↪ *identification de Λ*

↪ *identification de cascades : Ξ et Ω*

L'expérience ALICE

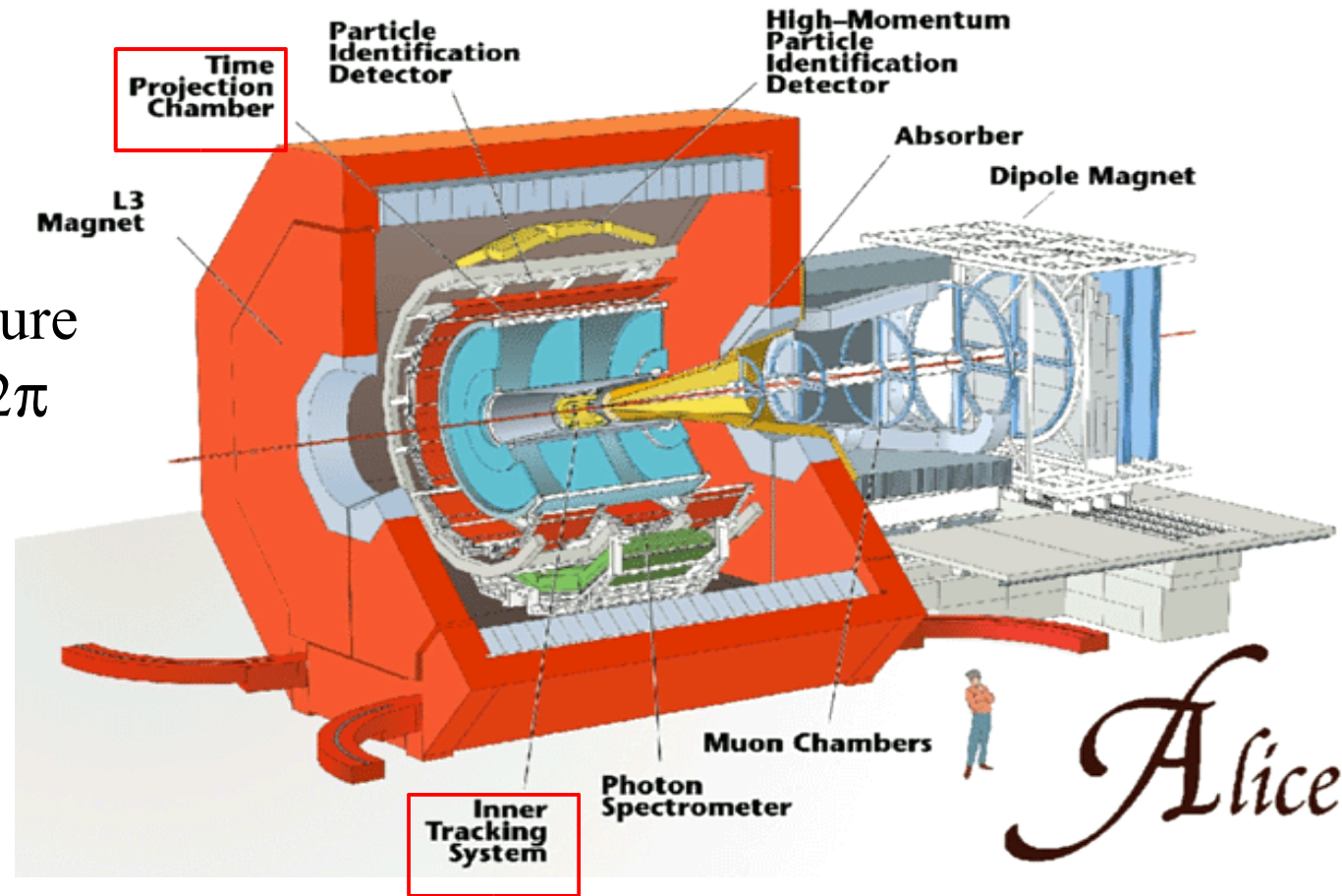
TPC :

500k cellules de lecture
couvert. azimutale = 2π

couvert. $\eta = \pm 0.9$

$\sigma(p) = 0.7 \%$

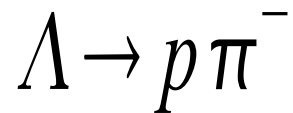
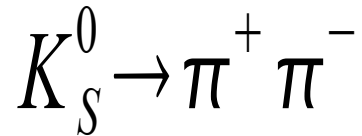
$\sigma(dE/dX) = 6 \%$



ITS :

6 couches de détecteurs Si : 2 pixel + 2 dérive + 2 μ -pistes
haute granularité (pixel) \Rightarrow vertex primaire
complémentaire au tracking TPC + tracking autonome

Identification des V^0



- $c\tau \sim 3$ et 8 cm

↳ *zone de reconstruction*

- 6 coupures :

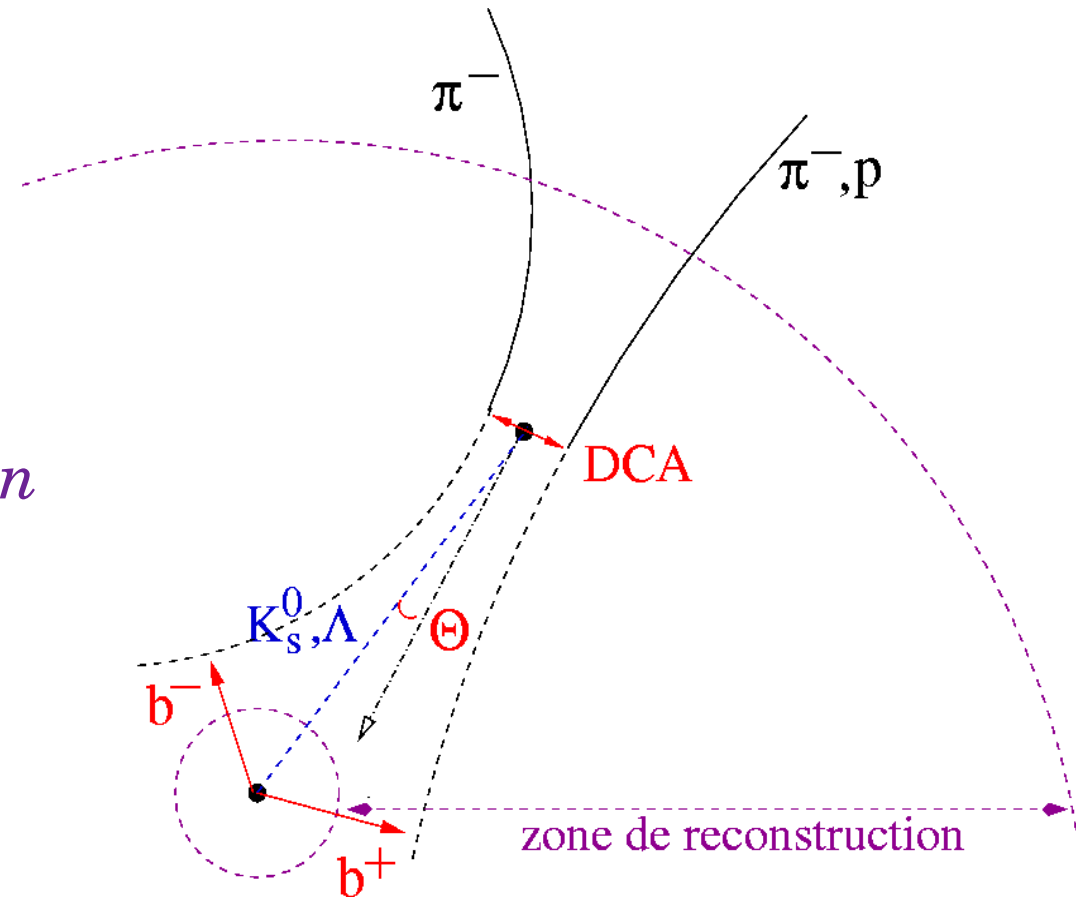
↳ *4 géométriques*

- b^+ , b^- , DCA, $\cos\Theta$

↳ *2 cinématiques :*

- p_T^+ et p_T^-

↳ \Rightarrow *limiter la contamination des traces primaires*



Choix de la zone de reconstruction

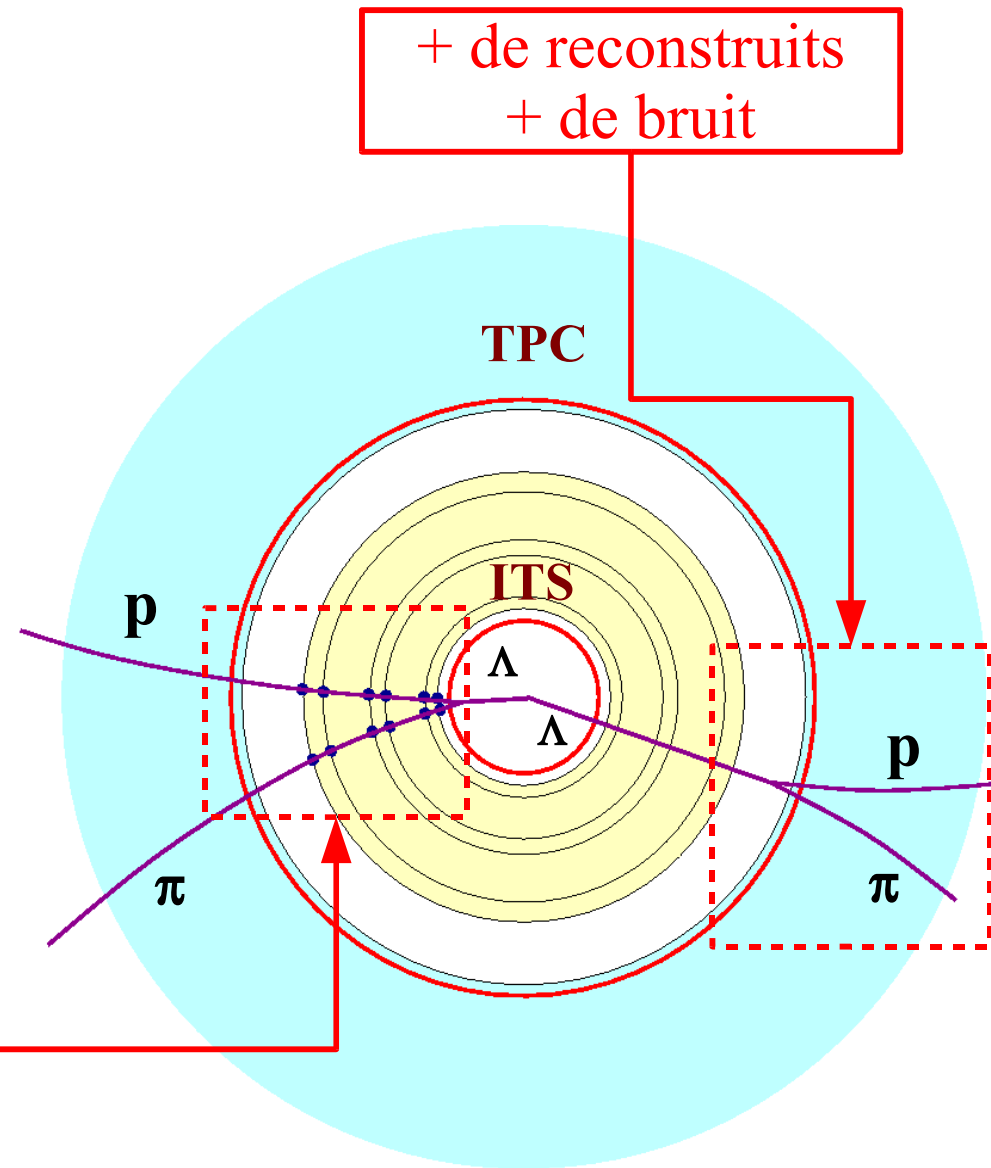
- 2 stratégies

- ↳ *restreinte*

- $r_{\perp} < 2.9 \text{ cm}$
 - 1 *cluster*/couche ITS

- ↳ *étendue*

- $r_{\perp} < 100 \text{ cm}$
 - pas de condition ITS



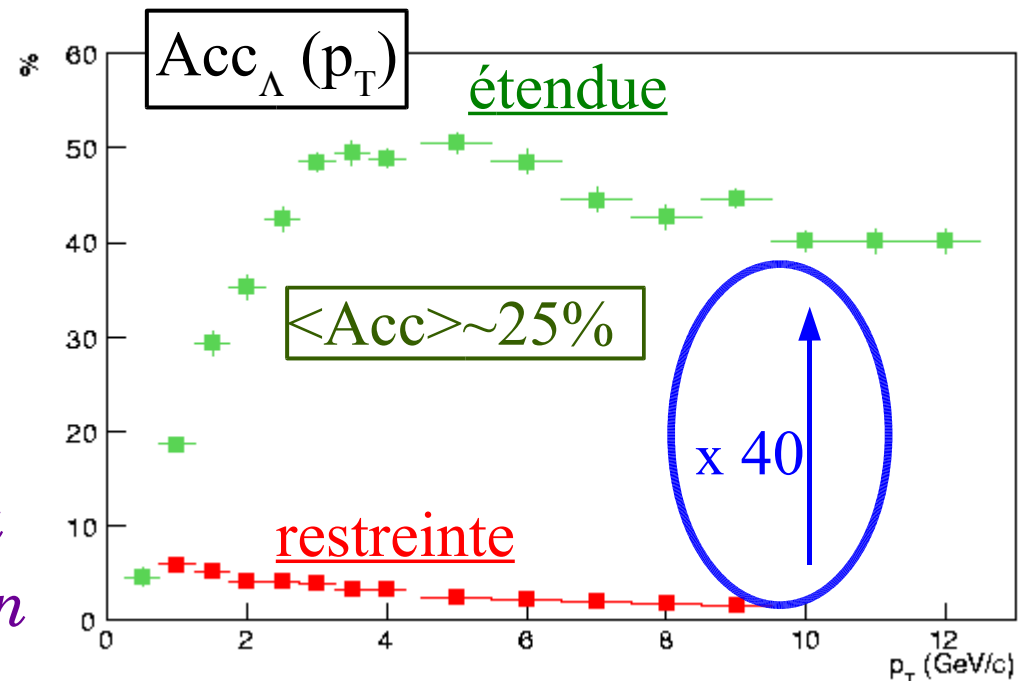
Acceptance du Λ

- Trace trouvable :
 - $|\eta| < 1.05$
 - 70 clusters TPC
 - ne se désintègre pas
 - X clusters dans l'ITS

$$Acc_{\Lambda} = \frac{nb \Lambda \text{ trouvables}}{nb \Lambda \text{ générés}}$$

\Rightarrow limitée par BR = 63.9 %

- Λ trouvable :
 - 2 traces-fille sont trouvables
 - se désintègre dans la zone de reconstruction



Choix des événements à simuler

I

II

III

IV

V

- particules primaires :

↳ *HIJING*

- $dN_{ch}/dy=4000$

- particules étranges :

↳ $|\eta| < 1$

- Λ : 100

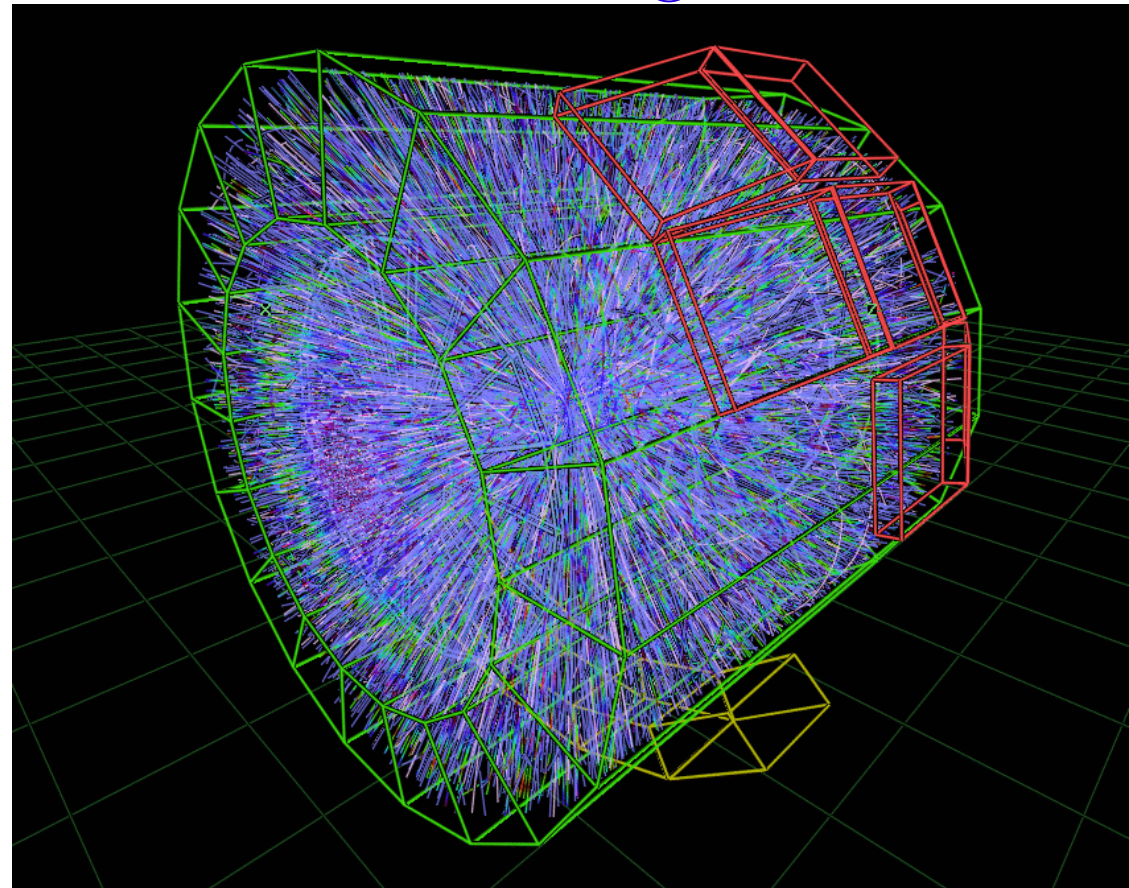
- Ξ : 15

- Ω : 3

- + anti-particules

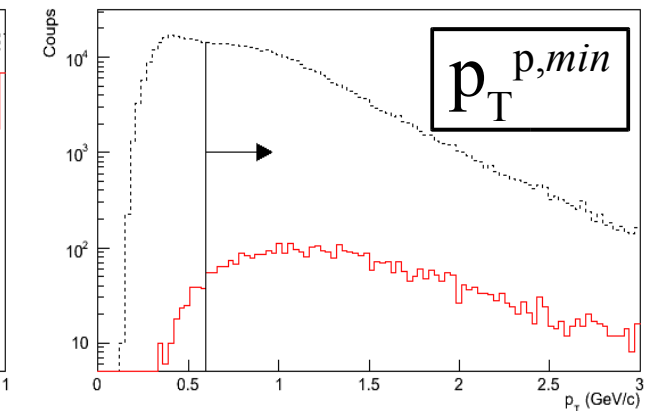
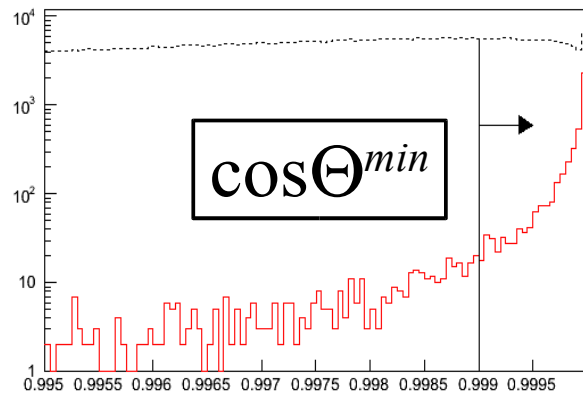
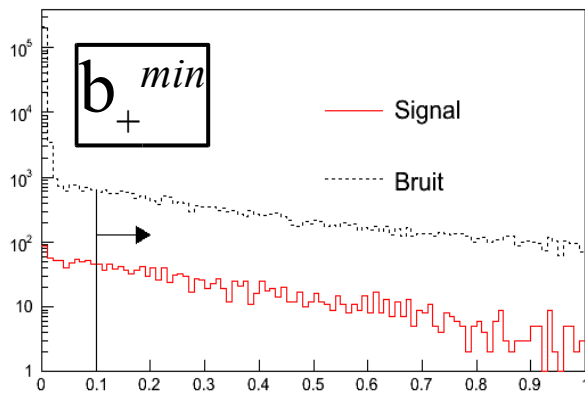
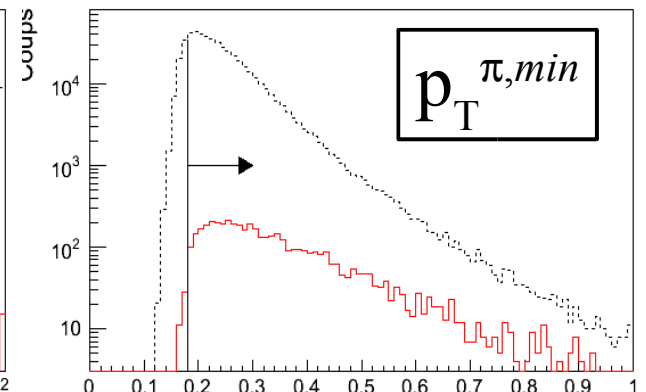
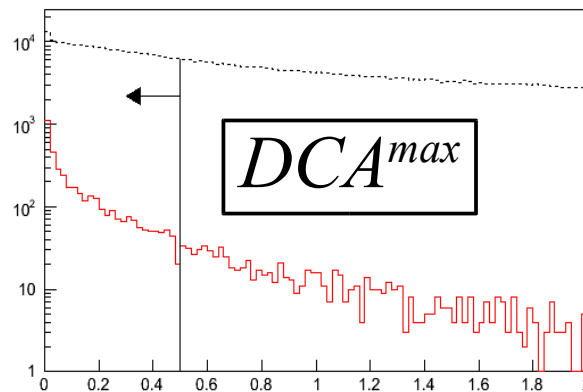
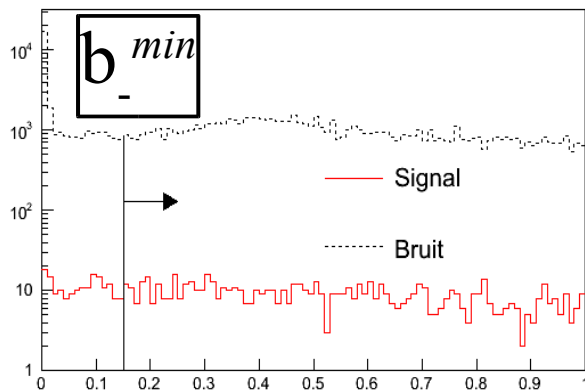
- \Rightarrow 300 événements générés

collision Pb-Pb @ 5.5 TeV



Choix des coupures pour Λ

- comment rejeter beaucoup de bruit tout en gardant une quantité substantielle de signal ?



- \Rightarrow définition des coupures de "référence"

Reconstruction du Λ

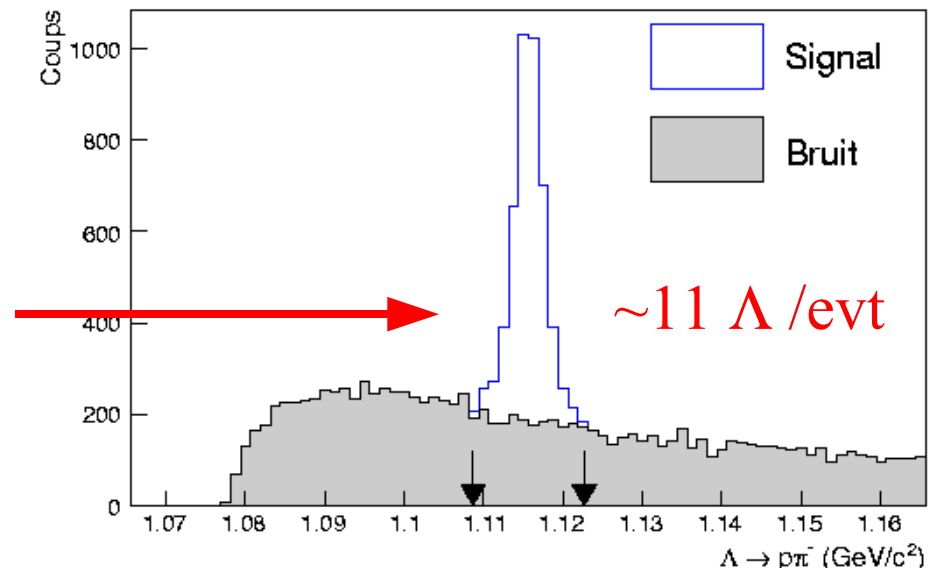
- 300 evts \Leftrightarrow qq secondes de faisceau !

$$\langle \text{Eff}_{\Lambda} \rangle = 42 \%$$

$$\langle \epsilon_{\Lambda} \rangle = 10.7 \%$$

$$S/B = 1.3$$

$$\sigma_m = 2 \text{ MeV}/c^2$$



- performances quantifiées par :

↪ *efficacité de reconstruction :
probabilité de trouver un Λ
trouvable*

$$\text{Eff}_{\Lambda} = \frac{\text{nb } \Lambda \text{ trouvés}}{\text{nb } \Lambda \text{ trouvables}}$$

↪ *taux de reconstruction :
efficacité globale*

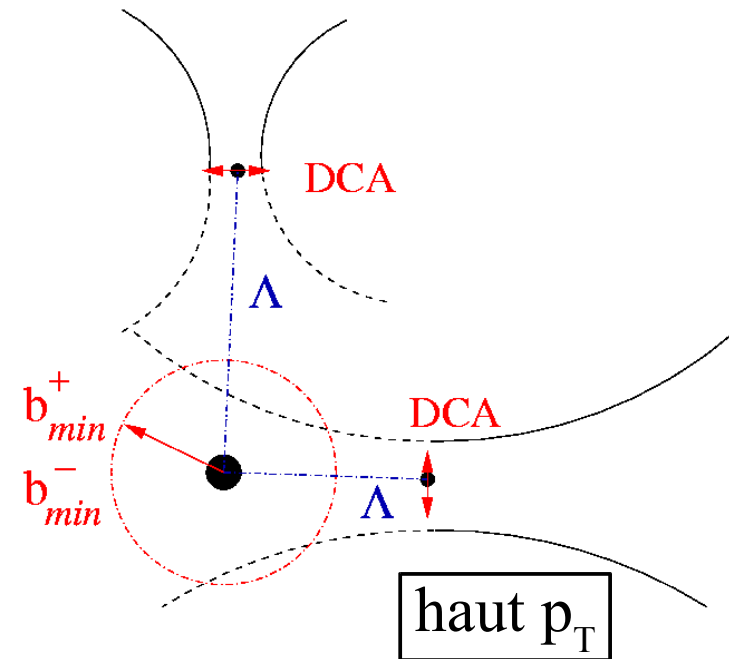
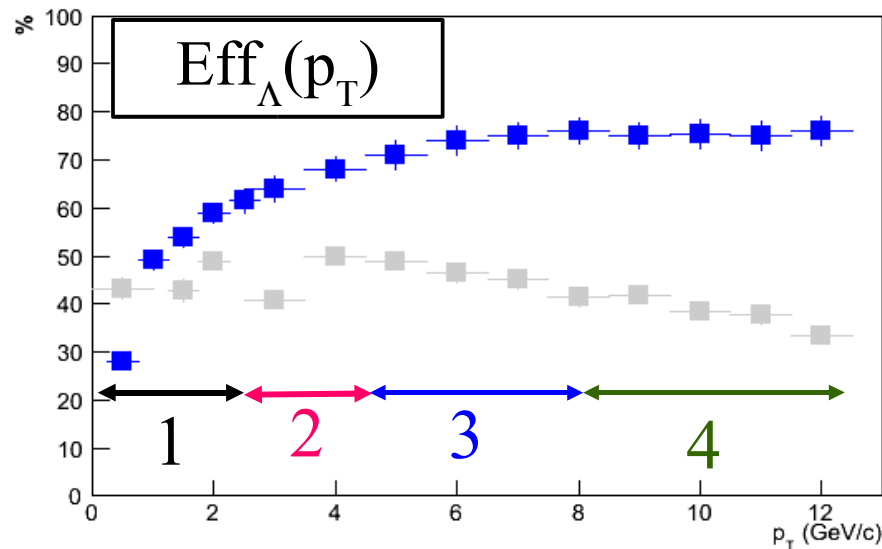
$$\epsilon_{\Lambda} = \text{Acc}_{\Lambda} * \text{Eff}_{\Lambda} = \frac{\text{nb } \Lambda \text{ trouvés}}{\text{nb } \Lambda \text{ générés}}$$

Choix de coupures dépendantes du p_T

- coupures de référence sévères pour les hauts p_T

↘ b^+ et b^- ↘ lorsque p_T ↗

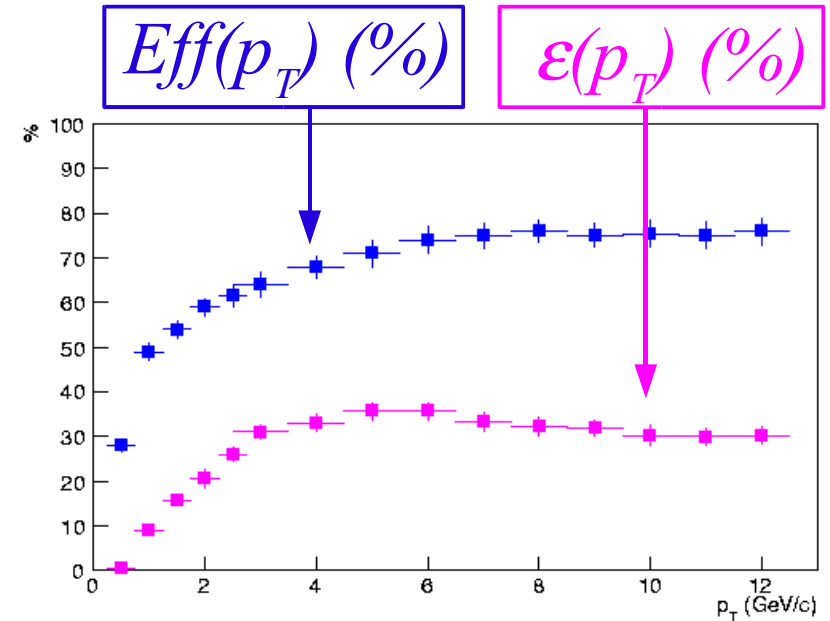
↘ moins bonne résolution sur traces → DCA



b^-	>	0.1	0.1	0.06	0.02	cm
b^+	>	0.05	0.05	0.03	0.01	cm
DCA	>	0.5	1	1	1	cm
$\cos\Theta$	>	0.999	0.999	0.999	0.999	

Résultats : performances sur Λ améliorées

- amélioration de Eff et ε
 - ↳ Eff reste constante avec p_T
 - ↳ gain de 20% en moyenne
- S/B identique aux coupures de référence

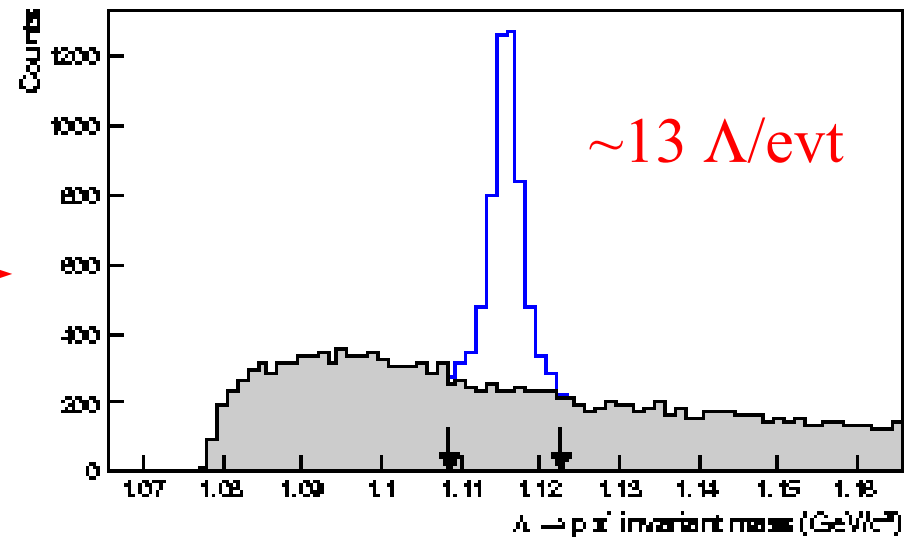


$$\langle Eff_{\Lambda} \rangle = 50 \%$$

$$\langle \varepsilon_{\Lambda} \rangle = 12.6 \%$$

$$S/B = 1.3$$

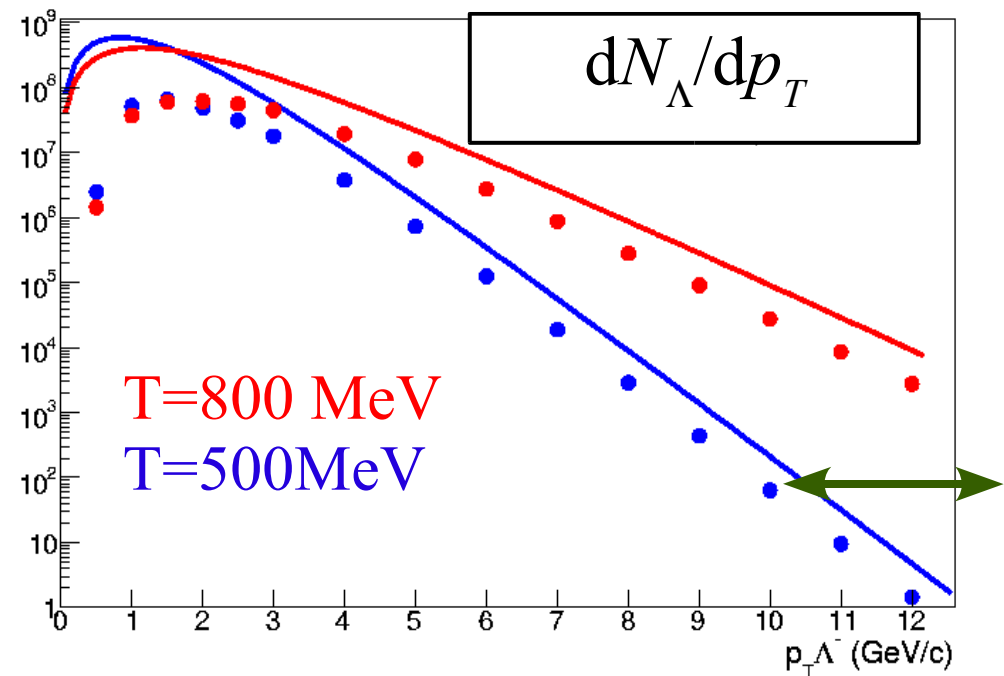
$$\sigma_m = 2 \text{ MeV}/c^2$$



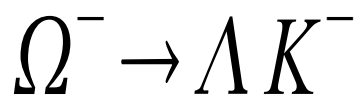
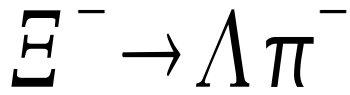
Que peut-on attendre des Λ au LHC ?

- 1^{ère} année de données Pb-Pb : 10^7 evts centraux
- convolution des profils dN/dp_T et $\varepsilon(p_T)$:
 - ↳ *spectre en p_T des Λ reconstruits*
 - ↳ *hypothèses : $500 < T_\Lambda < 800$ MeV*

- gamme de p_T atteinte :
→ ~ 12 GeV/c



Identification des cascades



III $c\tau \sim 5$ et 2 cm

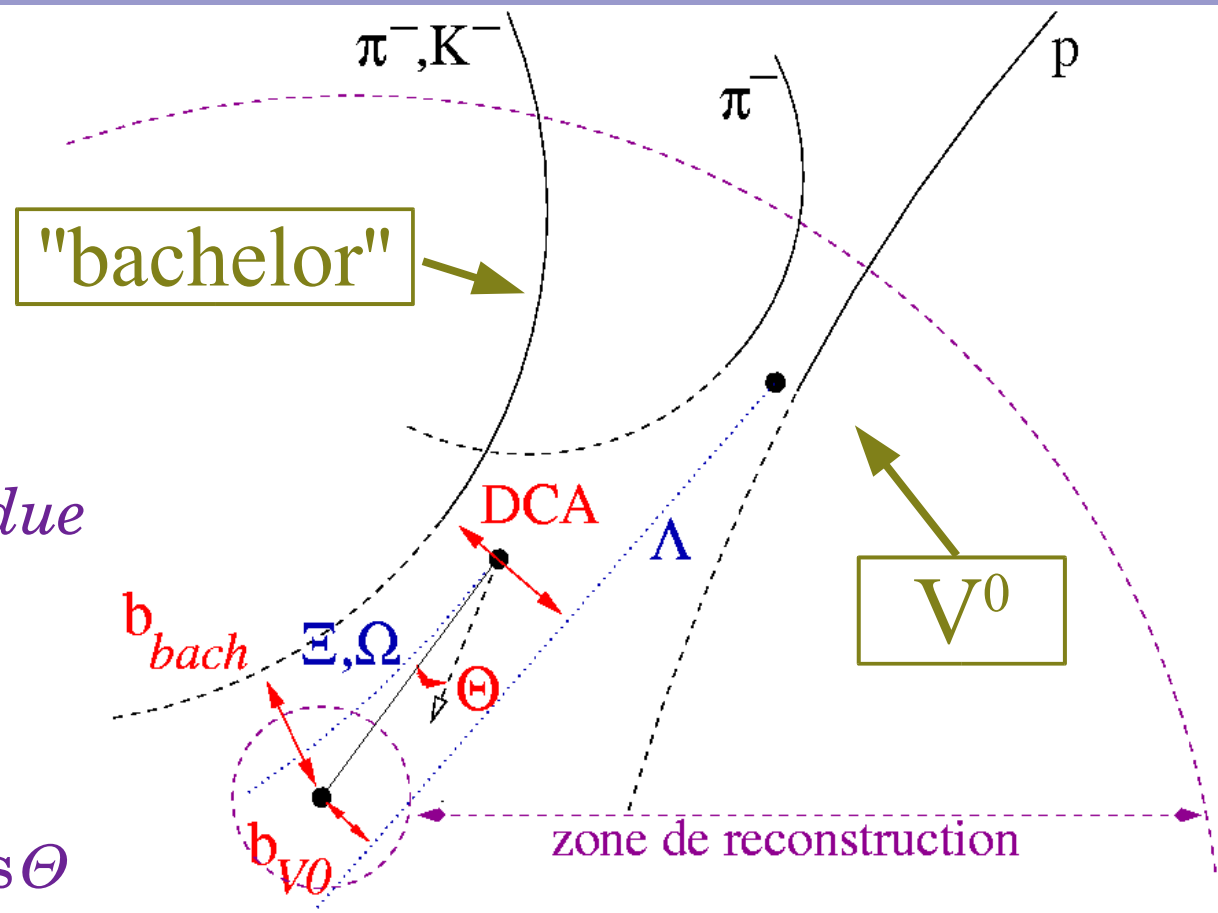
\rightarrow zone de reco. étendue

IV 5 coupures

\rightarrow masse du V^0

$\rightarrow b_{bach}, b_{V^0}, DCA, \cos\Theta$

V $\Xi(\Omega)$ trouvable $\Leftrightarrow \Lambda$ et $\pi(K)$ trouvable



Performances pour les Ξ

I • $\langle \text{Acc}_{\Xi} \rangle = 9\%$ (BR~100%)

II • coupures dep. du p_T

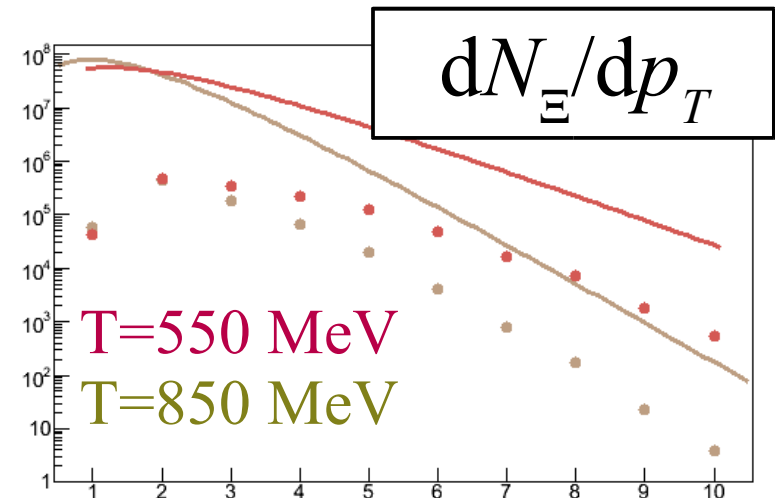
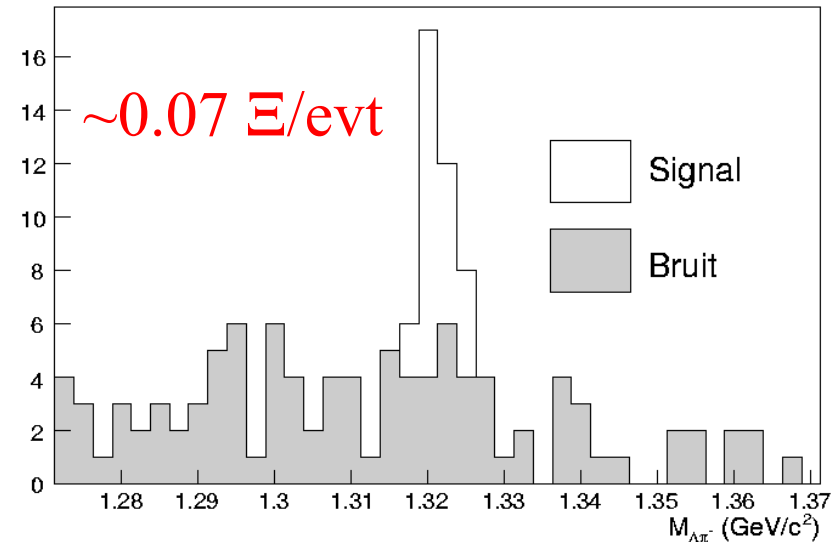
• 300 evts simulés

III $\langle \varepsilon_{\Xi} \rangle = 0.5\%$

$S/B = 1.5$

$\sigma_m = 2.4 \text{ MeV}/c^2$

IV • extrapolation 10^7 evts :
V \rightarrow *identification* $\rightarrow p_T = 10 \text{ GeV}/c$



Performances pour les Ω

- $\langle \text{Acc } \Omega \rangle = 6\%$
- spectre en masse invariante estimé pour 5000 evts (~2 min de faisceau)

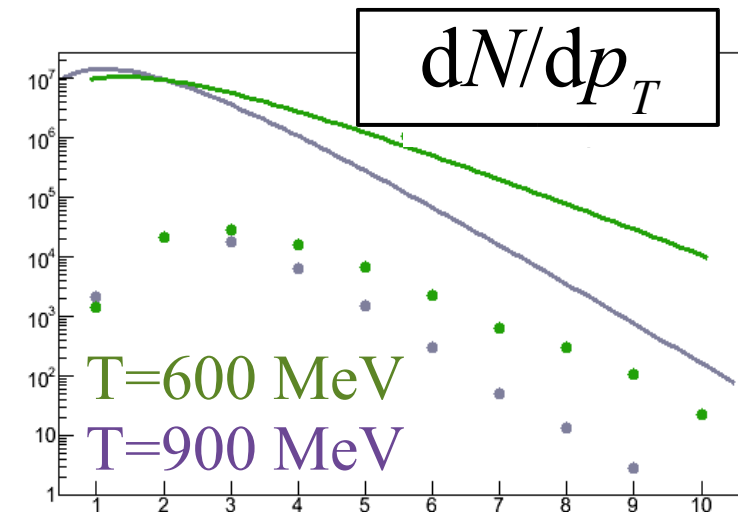
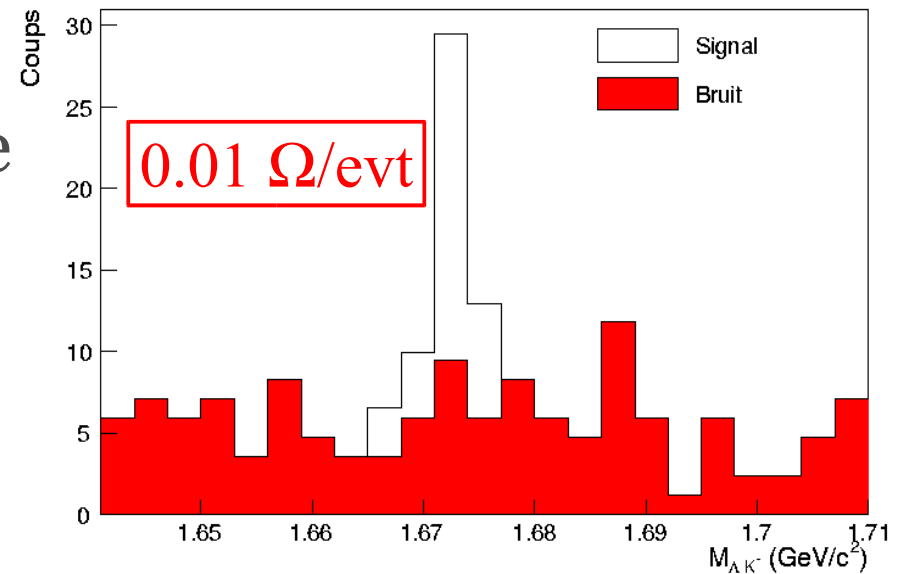
$$\langle \varepsilon_{\Omega} \rangle = 0.2 \%$$

$$S/B = 1.5$$

$$\sigma_m = 2.4 \text{ MeV}/c^2$$

- extrapolation 10^7 evts :

↳ *identification* $\rightarrow p_T = 8 \text{ GeV}/c$



Conclusions sur la PARTIE II

- Identification des hypérons avec ALICE

- ↳ *large zone de reconstruction adéquate*

- ↳ *taux de reconstruction :*

- $\Lambda : 11\%$ $\Xi : 0.5\%$ $\Omega : 0.2\%$

- ↳ *rappports S/B*

- ~ 1.5 pour Λ, Ξ, Ω

- ↳ *large gamme de p_T atteinte :*

- jusqu'à 12 (Λ), 10 (Ξ) et 8 GeV/c (Ω) pour 10^7 evts

- ↳ *bonnes conditions d'étude :*

- composition chimique, dynamique d'expansion, phénomènes à haut p_T ...

Perspectives

- Analyser davantage d'événements
 - ↳ *grille de calcul du LHC*
 - coupures corrélées
 - affiner par ADL, réseau de neurones
 - efficacité vs p_T **ET** $y...$
- Se préparer aux données $p-p$
- Dès les premières données
 - ↳ *embedding*
 - meilleure estimation des efficacités
 - influence de la centralité

PARTIE III

Particules étranges exotiques

- ↪ *stabilité de la matière nucléaire*
- ↪ *dibaryons étranges*
- ↪ *recherche de dibaryons dans les accélérateurs d'ions lourds*

Stabilité de la matière nucléaire

• quark s : degré de liberté supplémentaire

↳ *matière de quarks étranges*

↳ *plus stable que la matière nucléonique ?*

↳ *strangelets*

- "sac" de quarks u, d, s (Bag Model)

- $6 \rightarrow 10^{57}$ quarks

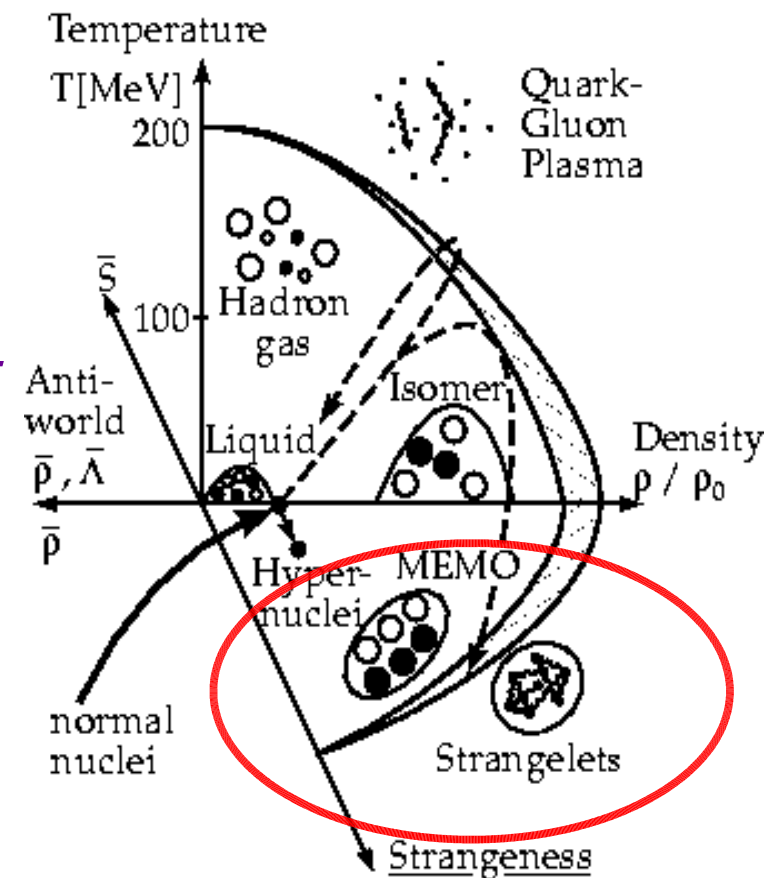
↳ *MEMO (Metastable Exotic Multi-hypernuclear Object)*

- extension des hypernoyaux

- hadroniques et métastables

- agglomérats hypérons+nucléons

↳ *les plus légers : dibaryons*

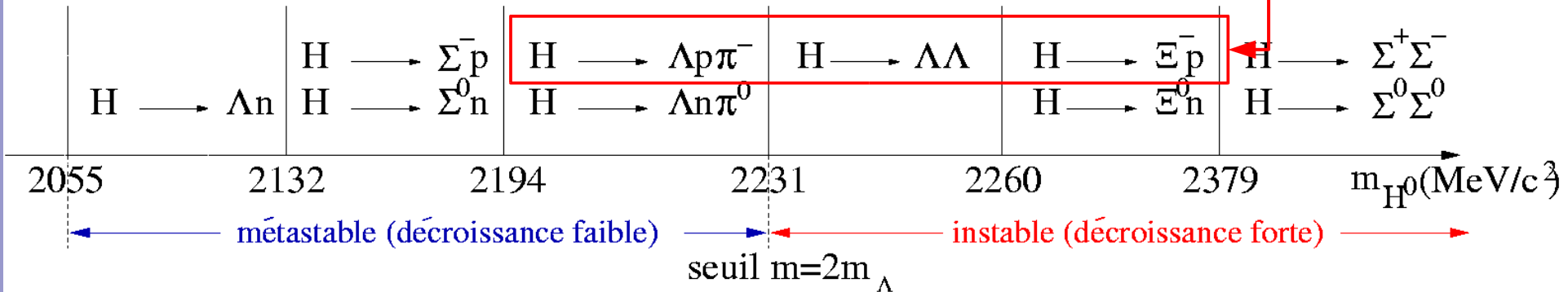


Dibaryons : le strangelet H^0

- prédit par R.L. Jaffe

↳ *sac de 6 quarks (udsuds) $\sim 2 \Lambda$*

topologie !
~hypérons



↳ *probablement métastable : $\tau \sim 10^{-10} - 10^{-8} \text{ s}$*

↳ *mais possibilité de forme résonante : $\tau \sim 10^{-23} \text{ s}$*

- formation

↳ *PQG : distillation de l'étrangeté*

↳ *sans PQG : via MEMO*

Dibaryons : états liés hadroniques

I
• J. Schaffner-Bielich *et al.*

↪ *objets métastables composés de 2 baryons*

• $(\Lambda\Lambda)_b, (\Sigma^+p)_b, (\Xi^0p)_b, (\Xi^0\Lambda)_b\dots$

↪ *formés par coalescence*

III
• $(\Lambda\Lambda)_b$ et $(\Xi^0p)_b$: désintégrations chargées

↪ *topologie (cf. hypérons) :*

• $(\Lambda\Lambda)_b \rightarrow \Lambda p \pi^- (\Leftrightarrow H^0)$

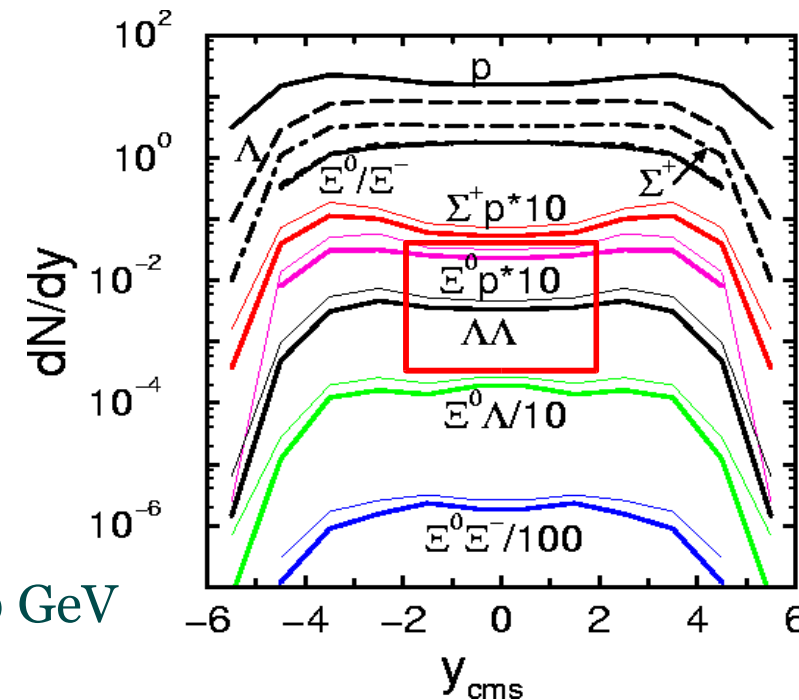
• $(\Xi^0p)_b \rightarrow \Lambda p$

IV

V

↪ *taux de production :*

• $10^{-3}-10^{-2}/\text{evt}$ RHIC (Au-Au) 200 GeV



Recherche de dibaryons

- les collisions d'ions lourds sont propices à la formation de dibaryons
 - ↳ *PQG, coalescence de baryons*
- déjà recherchés auprès de l'AGS (notamment)
 - ↳ *pas de signal significatif*
- expériences STAR et ALICE
 - ↳ *faible μ_B mais large acceptance dans la partie centrale*
 - ↳ *trajectographie de haute précision*
 - ↳ *identification topologique possible des modes :*
 - métastables : $H^0, (\Lambda\Lambda)_b \rightarrow \Lambda p \pi^-$ / $(\Xi^0 p)_b \rightarrow \Lambda p$
 - résonants : $H^0 \rightarrow \Lambda\Lambda$ / $H^0 \rightarrow \Xi^- p$

PARTIE IV

Recherche de dibaryons avec l'expérience STAR

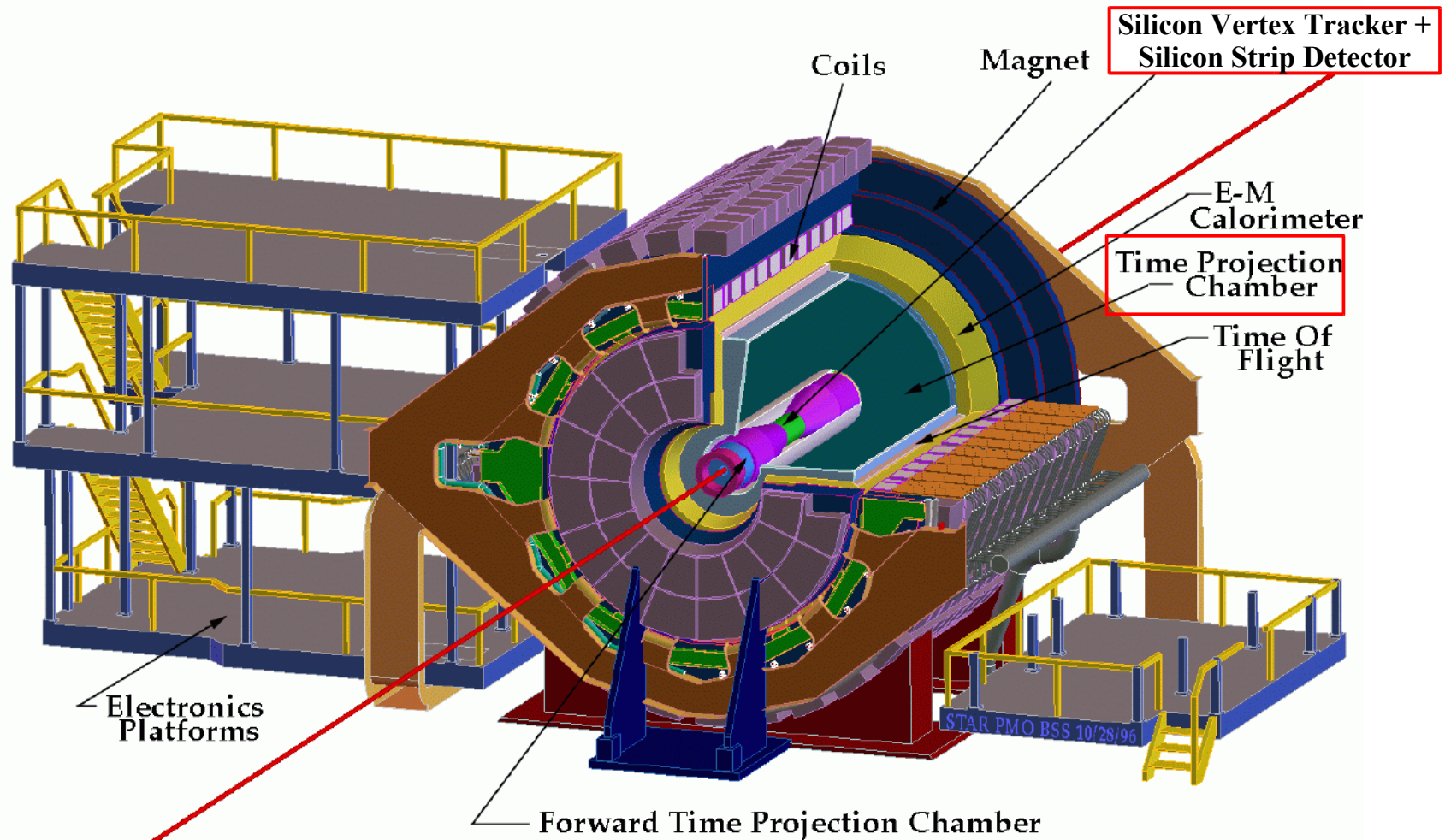
↪ *mode métastable* $H^0, (\Lambda\Lambda)_b \rightarrow \Lambda p \pi$

- simulation
- recherche dans Au-Au à $\sqrt{s_{\text{NN}}}=62.4$ et 200 GeV

↪ *recherche du mode résonant* $H^0 \rightarrow \Xi^- p$

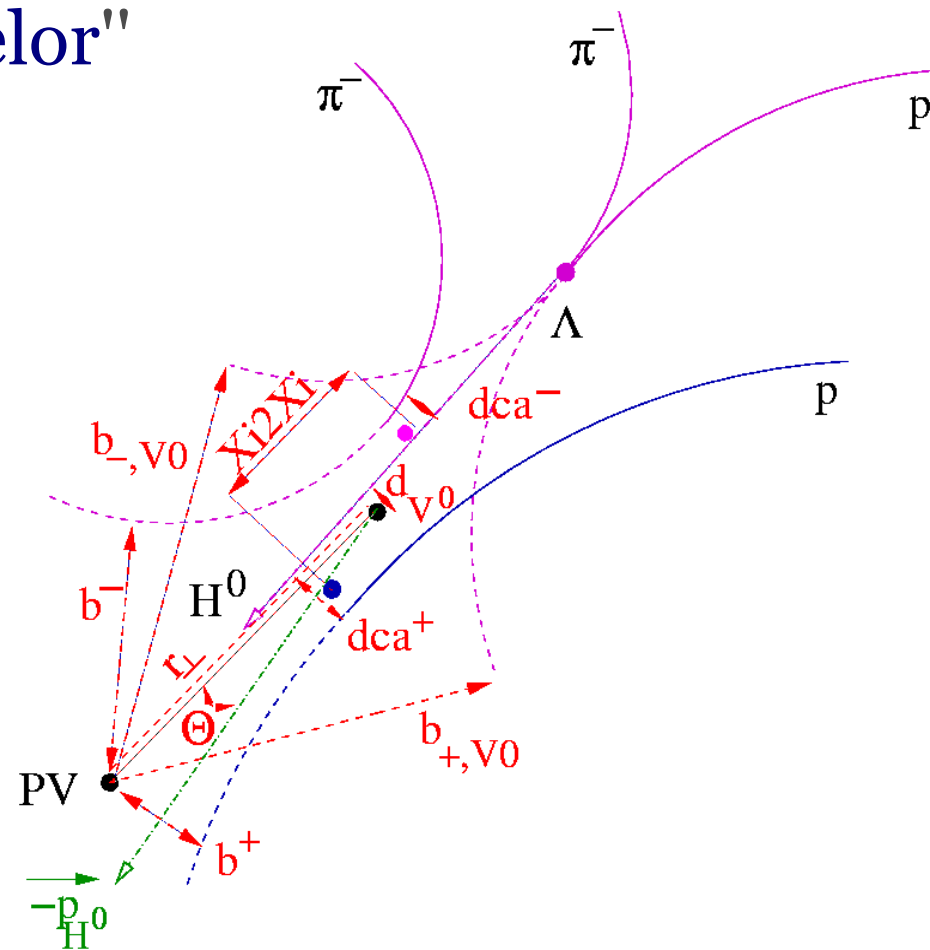
L'expérience STAR

STAR Detector



Recherche du $H^0/(\Lambda\Lambda)_b$ métastable

- $H^0 \rightarrow \Lambda\pi^-p$
- recherche de "cascades"
- association avec 2^{ème} "bachelor"
- reconstruction :
 - ↳ $TPC (+ SVT)$
- coupures :
 - ↳ *topologiques* + $p_T^{min}=2GeV$
 - ↳ $3 \sigma dE/dX$
 - ↳ $25 hits TPC$
 - ↳ $|z_{PV}| < 25 cm$



Simulation de H^0 à $\sqrt{s_{NN}}=62.4$ GeV

• "embedding" :

↳ injection de H^0 MC dans les données à 62.4 GeV

- $m=2.21$ GeV/ c^2
- $\tau=1.3 \cdot 10^{-2}$ s
- $T=400$ MeV

• soustraction masse du V^0

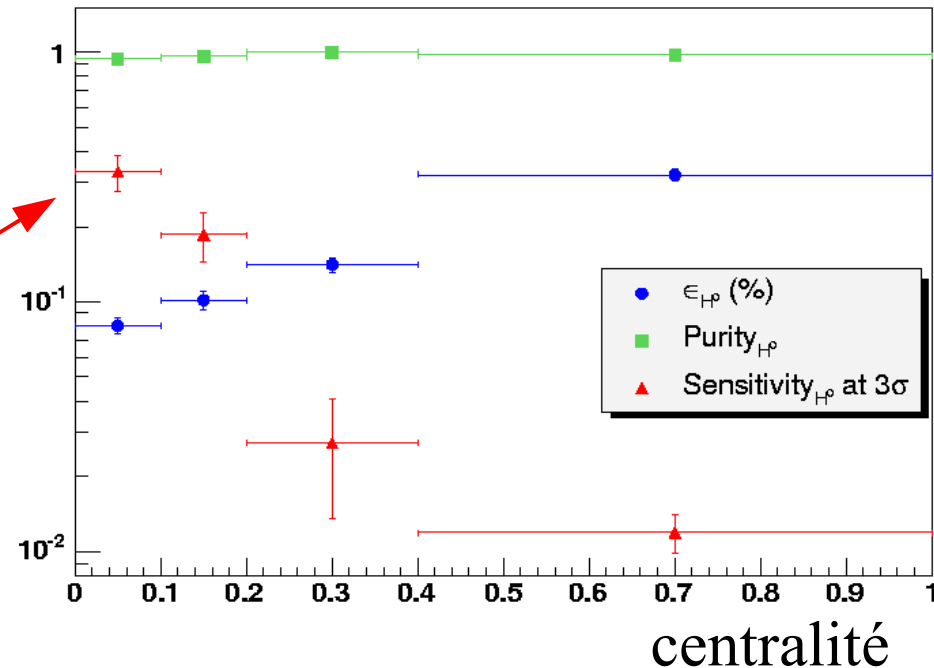
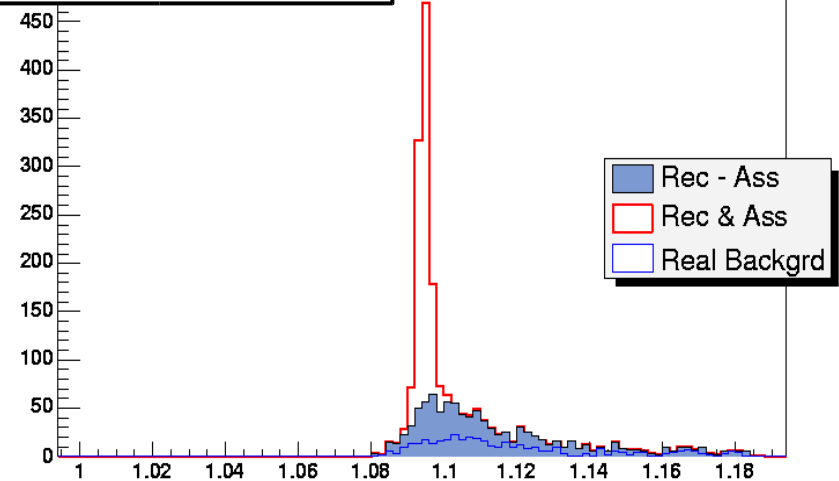
↳ concentre le signal

• calcul de sensibilité à 3σ

↳ $6 \cdot 10^6$ événements MinBias

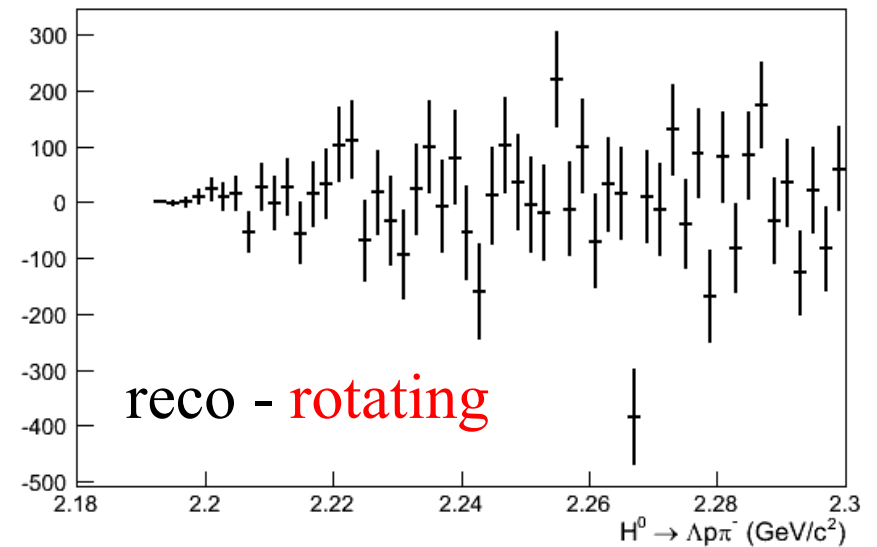
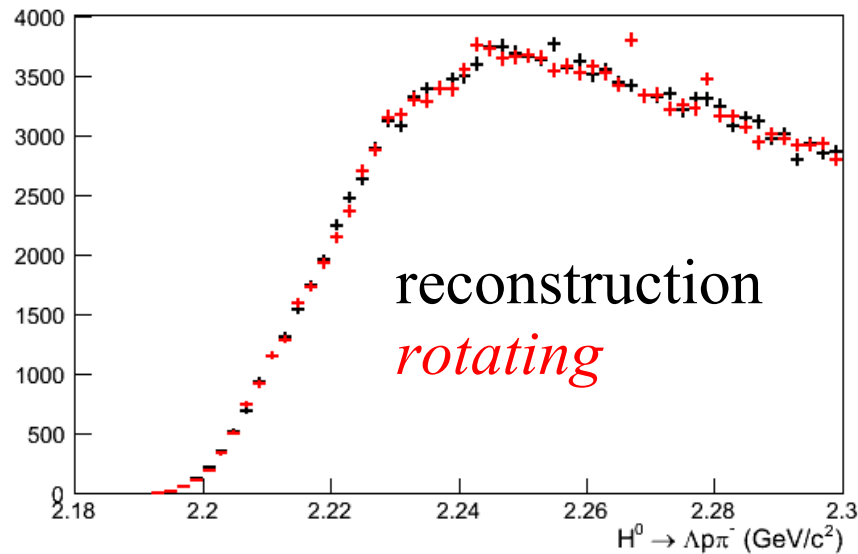
↳ différentes centralités

$dN/d(m_{H^0}-m_{V^0})$



H⁰ dans les données Au-Au /1

- reconstruction
 - ↳ données Au-Au à $\sqrt{s_{NN}} = 62.4 \text{ GeV}$
- estimation du bruit de fond par "rotating"

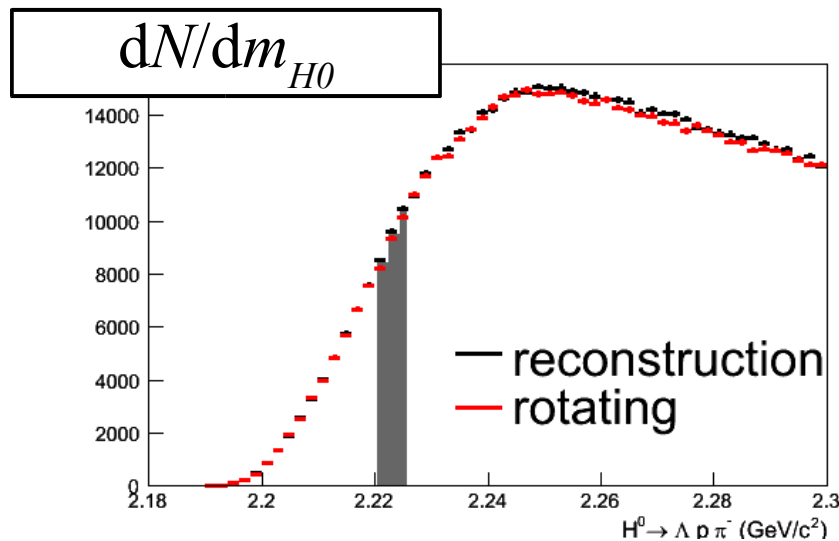


pas de signal
significatif

H⁰ dans les données Au-Au /2

- données Au-Au à $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV – trig. "central"

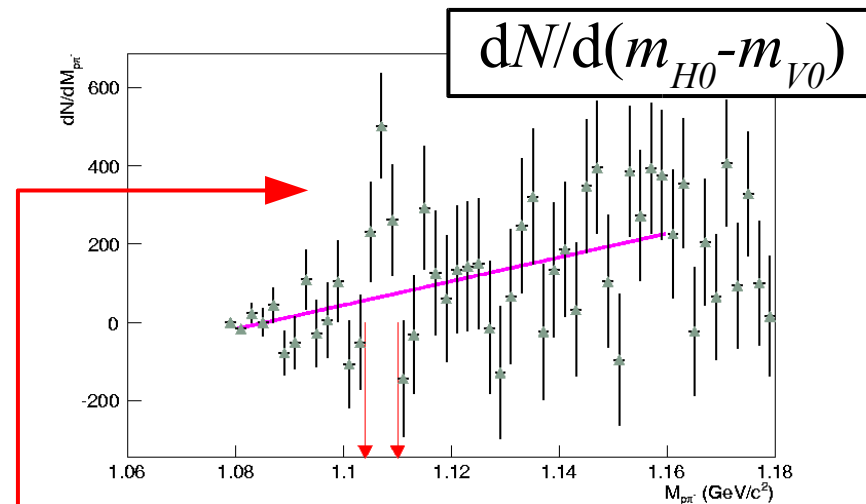
↳ centralité : 0 → 8 %



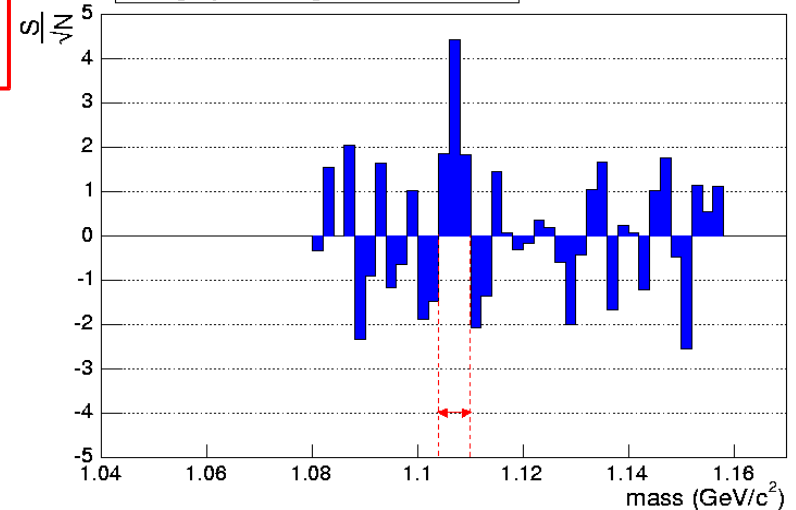
signal ?

- significance $S/\sqrt{B} \simeq 4.85 \pm 1.4$

↳ estimation $dN/dy \sim 0.38$
⇒ paramètre MC ok ?

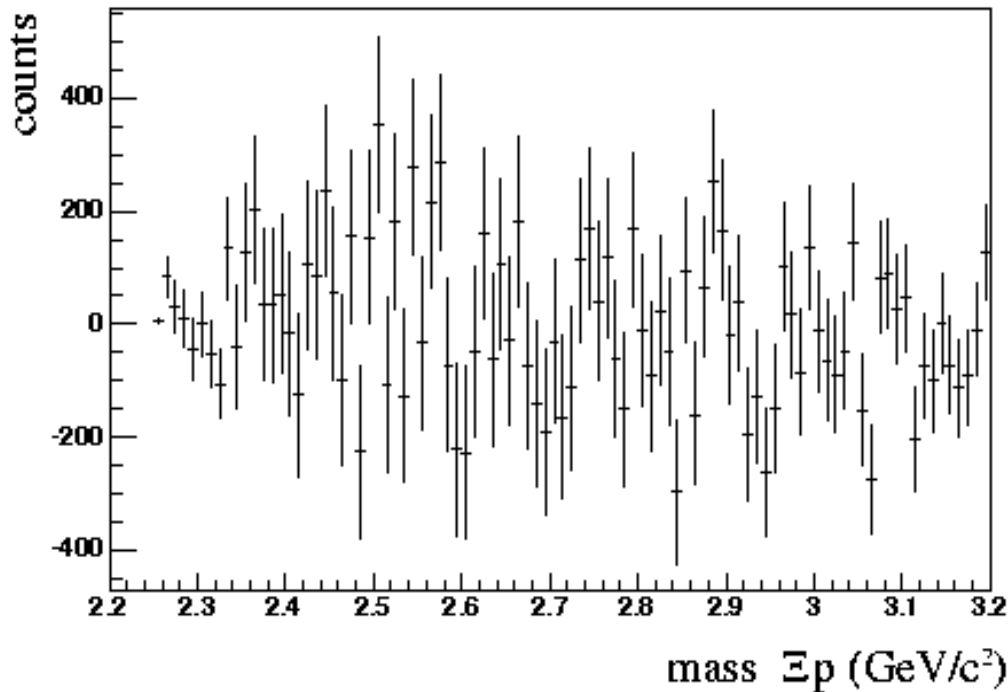


significance per mass bin



Mode résonant $H^0 \rightarrow \Xi^- p$

- corrélations entre Ξ^- et p primaires
 - ↳ *bruit de fond très important*
 - ↳ *estimation par "event mixing"*
- données Au-Au à 62.4 GeV



pas de signal
significatif

PARTIE V

Performances d'identification de dibaryons dans l'expérience ALICE

↪ *modes métastables*

↪ *mode résonant*

ALICE : simulation de $H^0, (\Lambda\Lambda)_b \rightarrow \Lambda p \pi^-$

- paramètres physiques choisis :

$\rightarrow m = 2.21 \text{ GeV}/c^2$

$\rightarrow \tau \sim 2 \cdot 10^{-10} \text{ s}$

$\rightarrow T = 300 \text{ MeV}$

- recherche de couples de V^0

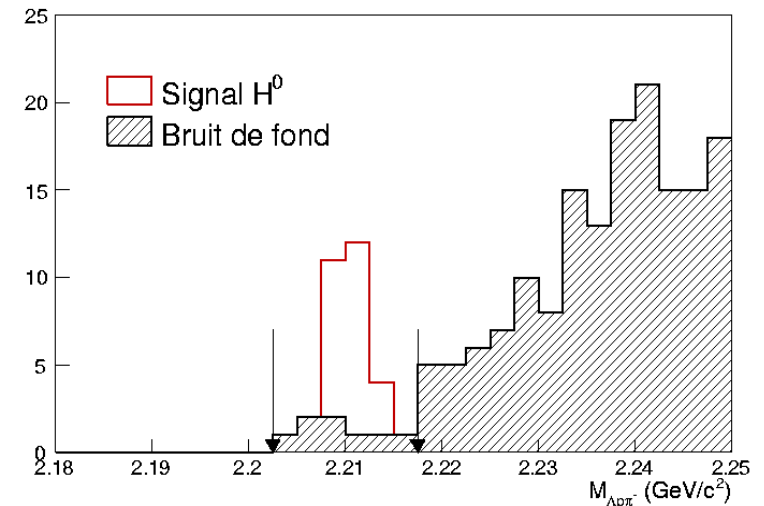
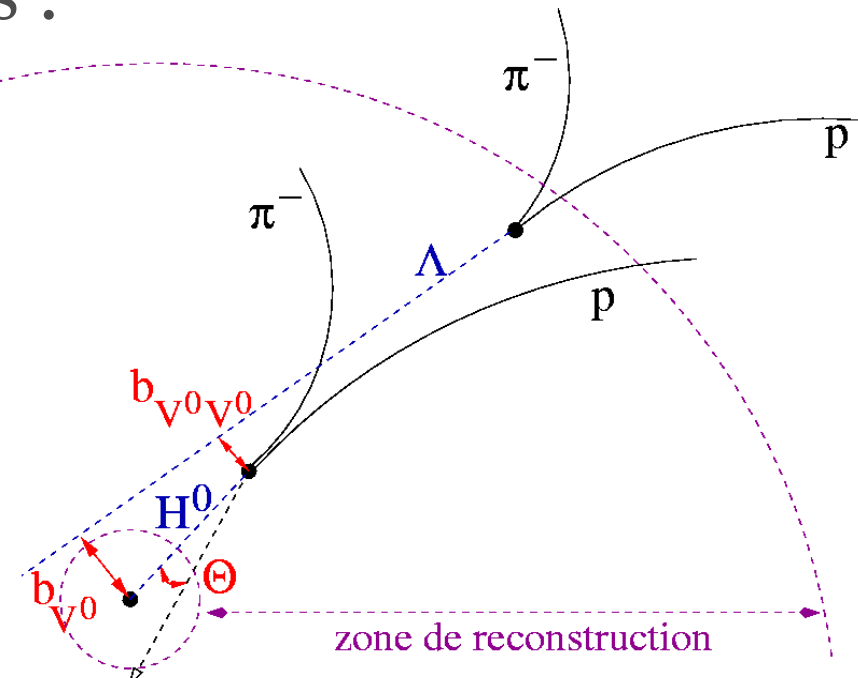
\rightarrow coupures topologiques

\rightarrow zone de reconstr. restreinte

- équivalent de 135 000 evts

- sensibilité à 3σ pour 10^7 evts :

$\rightarrow dN_{H^0} / dy = 2.5 \cdot 10^{-2}$



ALICE : simulation de $(\Xi^0 p)_b \rightarrow \Lambda p$

- données physiques :

↪ $m = 2.225 \text{ GeV}/c^2$

↪ $\tau \sim 2.6 \cdot 10^{-10} \text{ s}$

↪ $T = 300 \text{ MeV}$

- géométrie ~ cascade

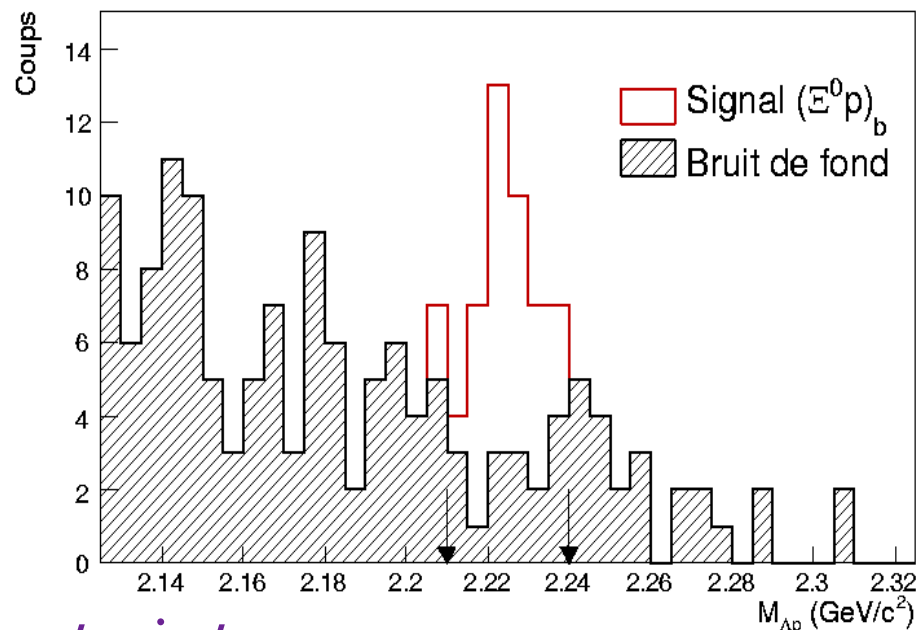
↪ π remplacé par p

↪ zone de reconstruction restreinte

- équivalent de 60 000 evts

- sensibilité à 3σ pour 10^7 evts :

↪ $dN_{\Xi^0 p} / dy = 1.7 \cdot 10^{-2}$



ALICE : simulation de $H^0 \rightarrow \Lambda\Lambda$

- paramètres physiques choisis :

↪ $m=2.252 \text{ GeV}/c^2 (>2m_\Lambda)$

↪ $\Gamma=15 \text{ MeV}$ (résonance)

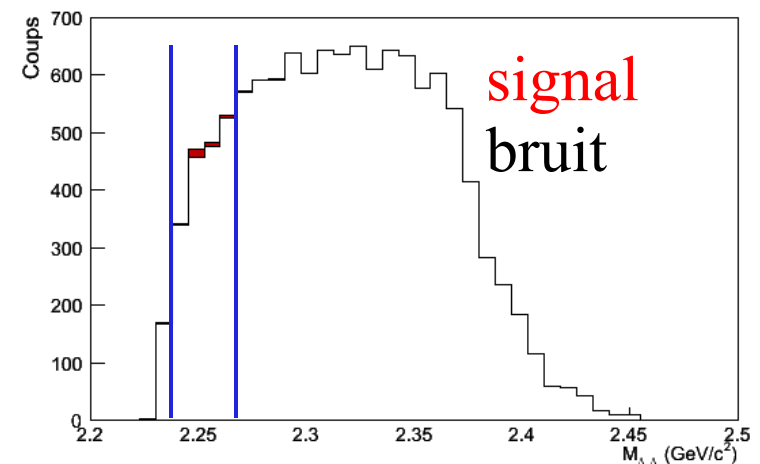
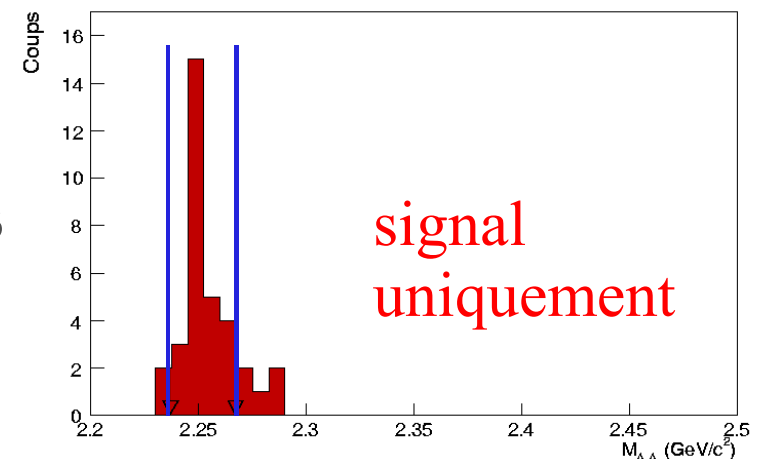
- corrélations entre V^0 primaires

↪ coupures sévères sur les V^0

- pureté $\sim 85\%$
- 10^4 evts simulés

- sensibilité à 3σ pour 10^7 evts :

↪ $dN_{H^0}/dy = 0.37$

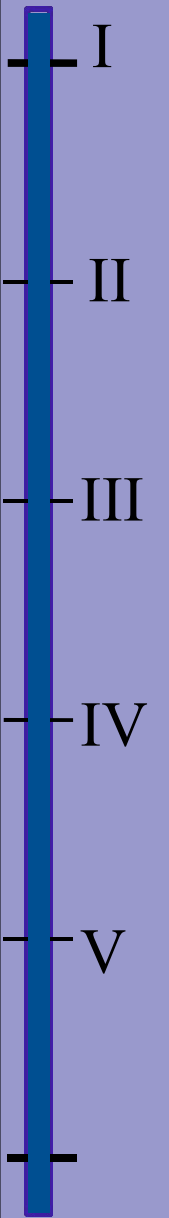
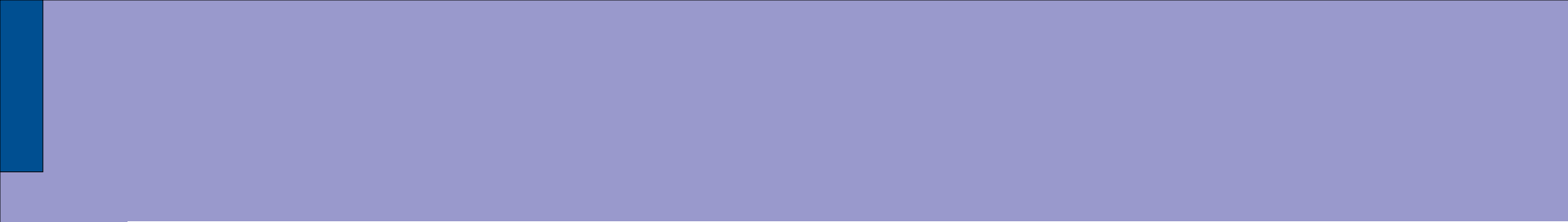


Conclusion sur les PARTIES IV et V

- Recherche de dibaryons dans STAR
 - ↳ *données Au-Au à 62 GeV - minBias*
 - pas de signal dans les modes $\Lambda p \pi^-$ et $\Xi^- p$
 - ↳ *données Au-Au à 200 GeV - central*
 - pic de signficance 4.85 dans le mode $\Lambda p \pi^-$
 - analyse dans des données + récentes Au-Au@200GeV
 - confirmer ou non ce résultat Au-Au à 200 GeV - central
- Sensibilité d'ALICE aux dibaryons pour 10^7 evts
 - ↳ *modes métastables*
 - $\Lambda p \pi^-$: $2.5 \cdot 10^{-2}$ et Λp : $1.7 \cdot 10^{-2}$
 - ↳ *mode résonant*
 - $\Lambda \Lambda$: 0.37



FIN



Compléments

Recherche d'étrangeté dans STAR

- Trajectographie de particules chargées

- ↳ *TPC : Time Projection Chamber*

- ionisation du gaz par les particules chargées
- L=4m et R=2 m : couverture totale en $|\eta| < 0.89$
- couverture azimutale complète

- ↳ *SVT : Silicon Vertex Tracker*

- détecteur au Si à dérive (SDD)

- ↳ *SSD : Silicon Strip Detector*

- μ -pistes double-face

- ↳ *Identification par dE/dX*

Recherche d'étrangeté dans ALICE

• Trajectographie de particules chargées

↳ *TPC : Time Projection Chamber*

- ionisation du gaz par les particules chargées
- L=5m et R=2.5 m : couverture totale en $|\eta| < 0.89$
- couverture azimutale complète
- 500.000 cellules de lecture

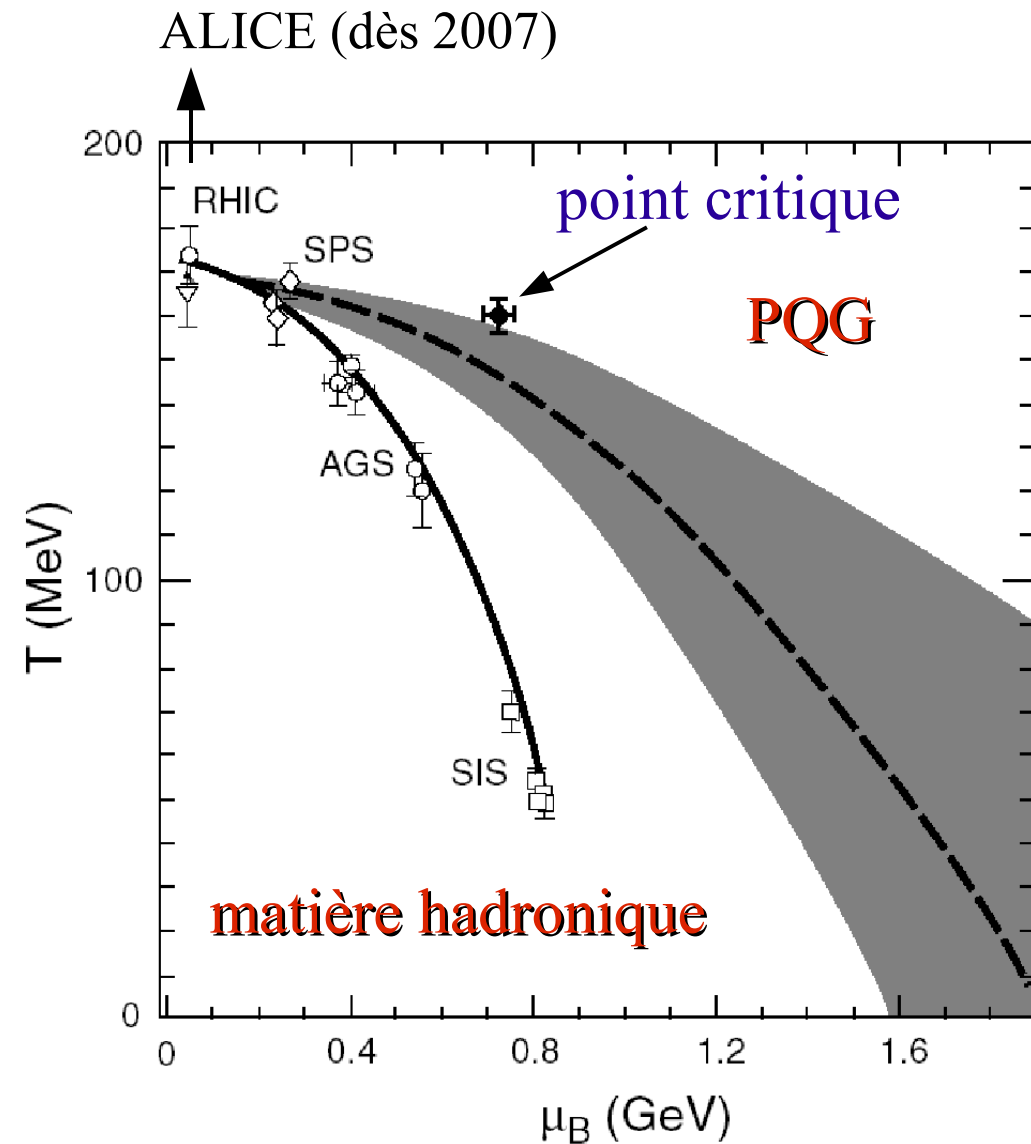
↳ *ITS : Inner Tracking System*

- 3*2 couches de detecteurs au Si : pixel (SPD), dérive (SDD) et μ pistes (SSD)
- très haute granularité \Rightarrow vertex primaire
- complémentaire TPC + tracking autonome (bas p_T)

↳ *PId possible : dE/dX , TRD, TOF, HMPID*

Les accélérateurs jusqu'à maintenant

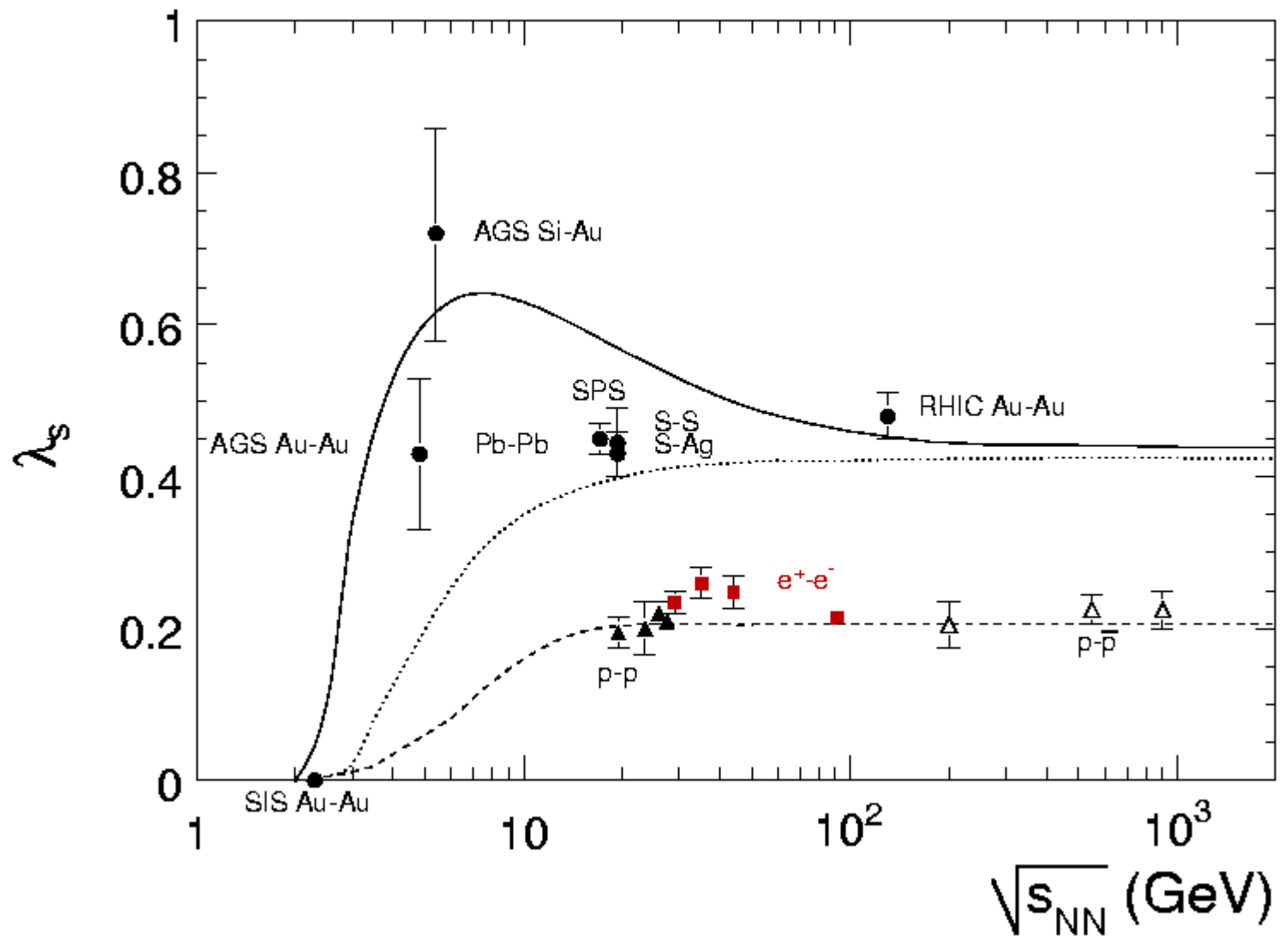
- SPS : proche de la transition
- RHIC : vraisemblablement dans la phase PQG
- ALICE : $T \gg T_c$



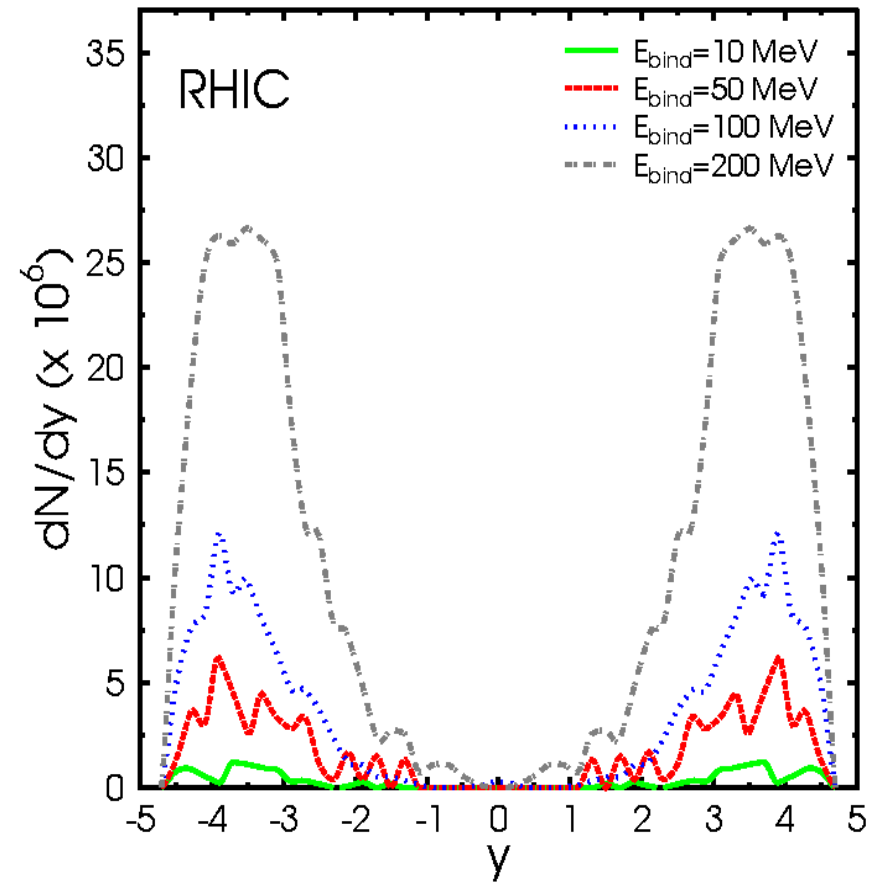
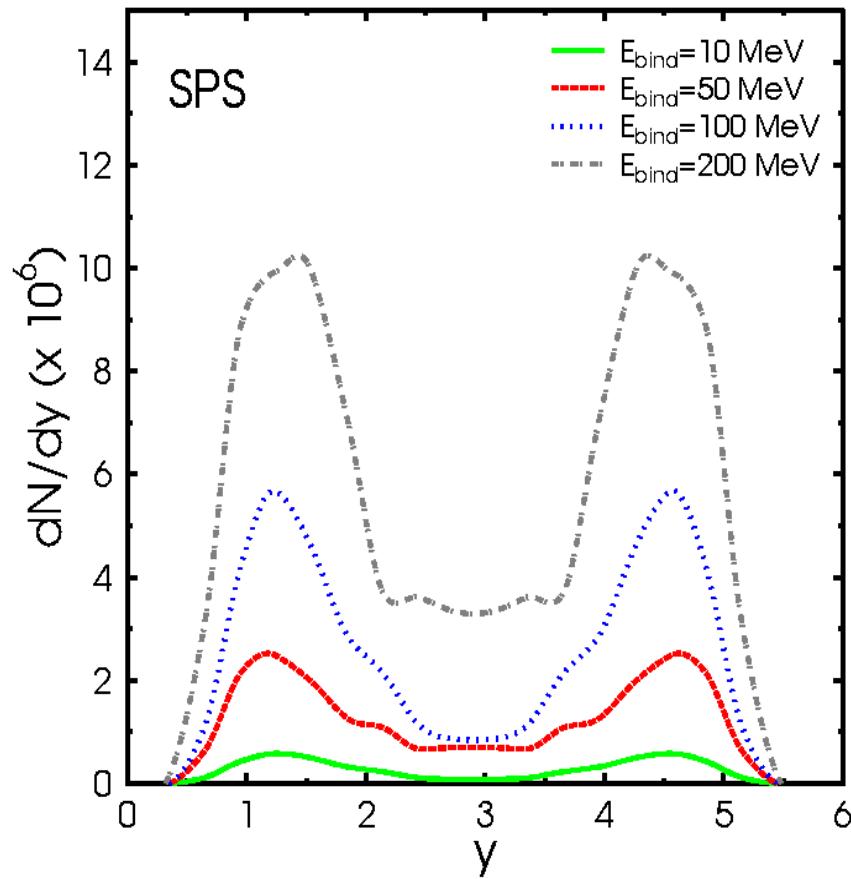
Reconstruction hypérons

- $\varepsilon_{\Lambda} = 10.7 \pm 0.18 \%$
- $\varepsilon_{\Xi} = 0.56 \pm 0.11 \%$
- $\varepsilon_{\Omega} = 0.23 \pm 0.04 \%$

Wroblewski



creation de H^0 sans PQG



recherche de strangelets lourds

- NA 52 (SPS)
 - ↳ *Pb-Pb 158 AGeV*
- STAR (RHIC)
 - ↳ *$m > 30 \text{ GeV}/c^2$*
 - ↳ *taux de production $< 10^{-7}$ à grande rapidité*

rappports d'embranchement

