

# *De l'étrangeté au pays d'Alice*

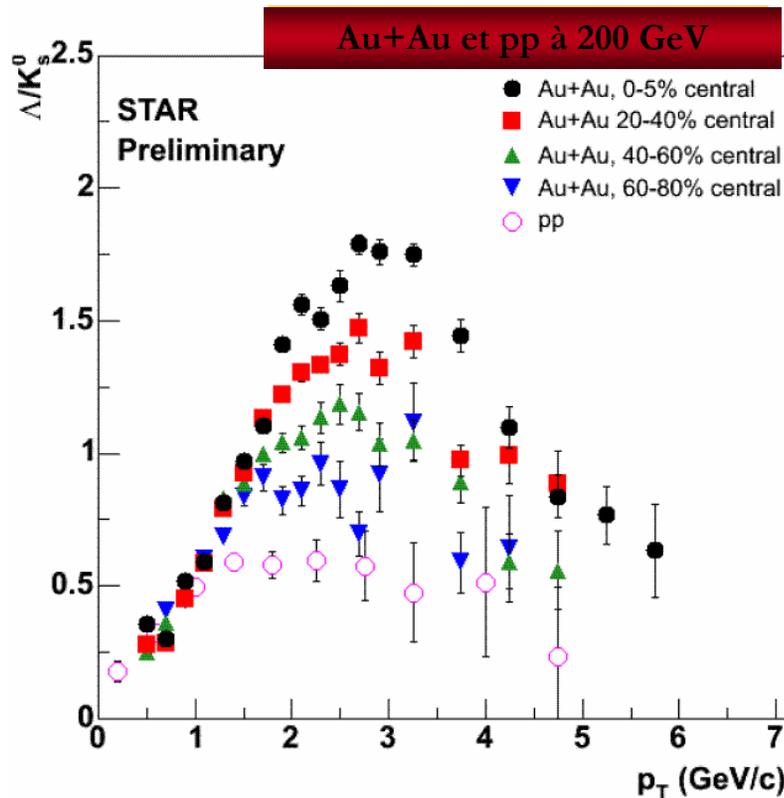
---

Etude des collisions proton-proton  
- région des  $p_T$  intermédiaires -

Hélène Ricaud - IPHC, Strasbourg

- 1- La naissance de la coalescence
- 2- Etude du rapport étrange baryon/méson
- 3- Au cœur de Pythia: physique et paramètres
- 4- Vers le LHC, Pythia tuning

# Une étrange anomalie...



➤ Les données de l'expérience STAR ont montré une **surproduction de baryons** par rapport aux mésons:

- dans les **collisions d'ions lourds**  
- sur un domaine limité en impulsion transverse: **1,5 GeV /c <  $p_T$  < 4 GeV/c**

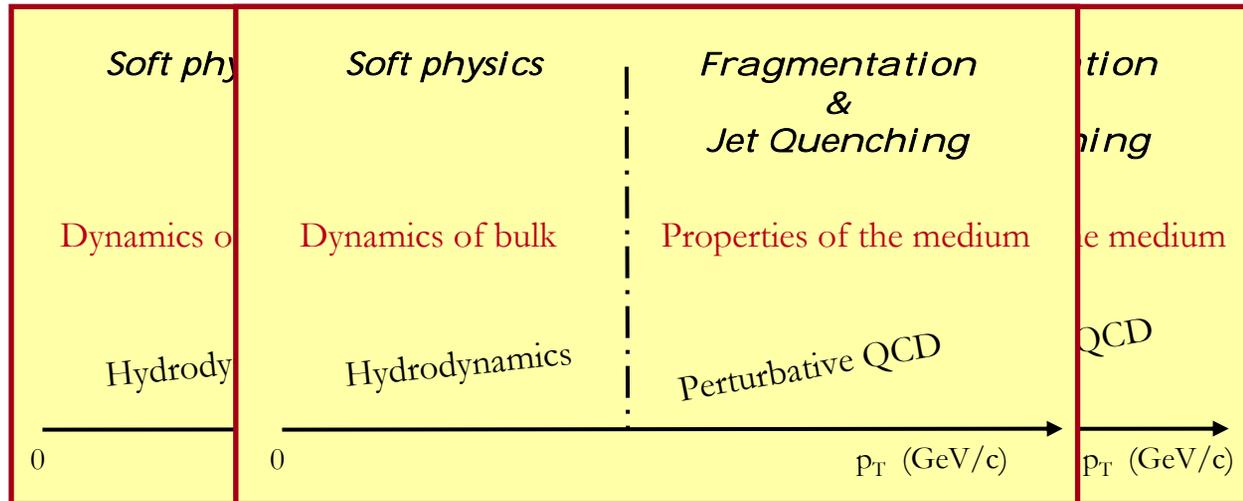
Excès baryonique d'autant plus marqué que la centralité de la collision augmente.

➤ Phénomène non observé dans les collisions proton-proton

**Une des observations les plus surprenantes et inattendues du RHIC**

*La naissance de la coalescence*

# L'impulsion transverse dans toutes ses régions



Collision d'ions lourds

## ➤ Bas $p_T$ : les modèles hydrodynamiques

- Les observations du RHIC ont mené à la mise en place d'une région des impulsions transverses intermédiaires.
- description de l'évolution de la boule de feu formée lors de collisions d'ions lourds ultra-relativistes en considérant la matière résultante comme un fluide.
- théorie reposant sur de très nombreuses réinteractions entre partons.

⇒ pertinents pour reproduire les spectres des particules dans le domaine des bas  $p_T$

**(Re)Naissance des modèles de recombinaison/coalescence**

## ➤ Haut $p_T$ : la QCD p

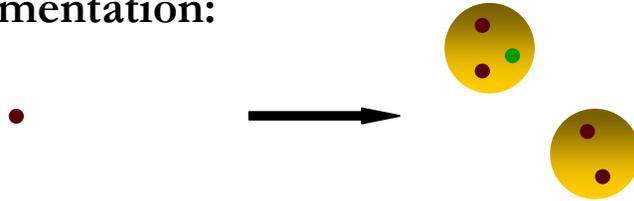
- description des interactions dures entre partons à très courte distance ( $\alpha_s$  faible)

⇒ pertinente pour reproduire la physique à haut  $p_T$

# Fragmentation & Coalescence

Lors de la production de baryons deux processus entrent en compétition:

➤ **La fragmentation:**

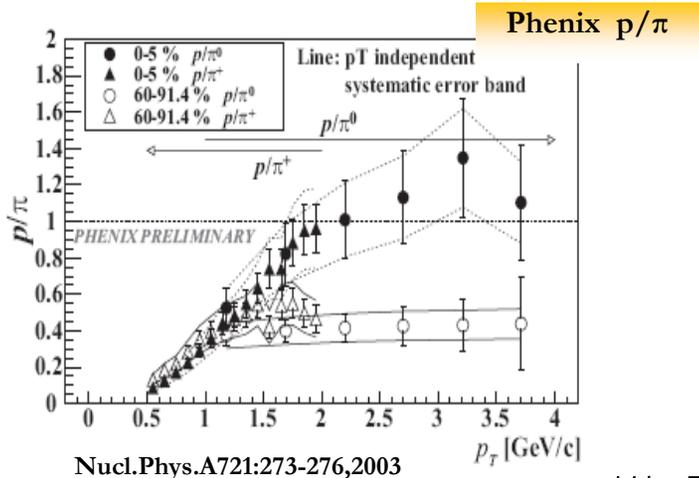


Parton initiateur  $p_T \rightarrow p_h = z \cdot p_T$  selon une probabilité  $D_{q \rightarrow h}(z)$

$z$ : énergie nécessaire pour créer des quarks à partir du vide

$D_{q \rightarrow h}(z)$ : fonction de fragmentation du quark  $q$  en un hadron  $h$

$$\frac{dN_h^2}{d^2 p_h} = \sum_q dz \frac{dN_c^2}{d^2 p_q} D_{q \rightarrow h}(z) \quad \text{avec} \quad \frac{D_{q \rightarrow p}(z)}{D_{q \rightarrow \pi}(z)} < 0.2 \quad \text{d'où un rapport baryon/meson} \quad \frac{p}{\pi} < 0.2$$

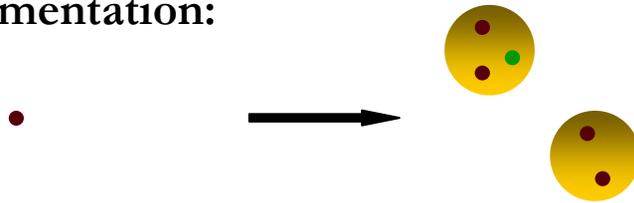


**La fragmentation n'est pas un processus dominant à  $p_T < 4-6 \text{ GeV}/c$**

# Fragmentation & Coalescence

Lors de la production de baryons deux processus entrent en compétition:

## ➤ La fragmentation:

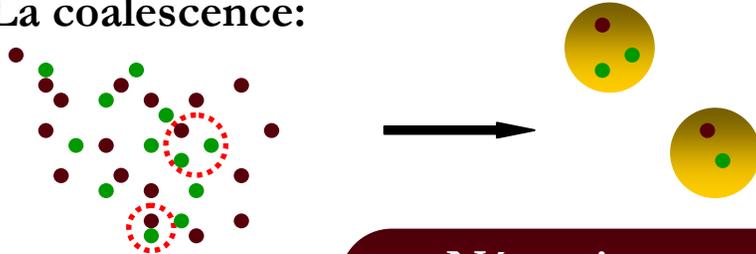


Parton initiateur  $p_T \rightarrow p_h = z \cdot p_T$  selon une probabilité  $D_{q \rightarrow h}(z)$

$z$ : énergie nécessaire pour créer des quarks à partir du vide

$D_{q \rightarrow h}(z)$ : fonction de fragmentation d'un quark  $q$  en un hadron  $h$

## ➤ La coalescence:



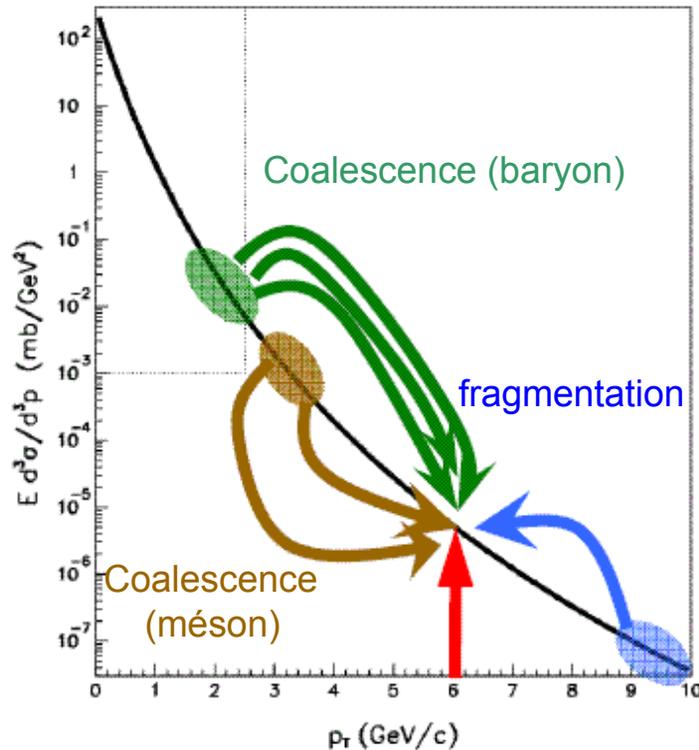
Association de quarks proches dans l'espace des phases.

Nécessite un système dense,  
une phase partonique thermalisée



Application délicate aux collisions  
proton-proton...

# La coalescence, un processus dominant aux $p_T$ intermédiaires



Exemple: production d'un pion et d'un proton portant une impulsion de 6 GeV/c

➤ **par fragmentation:**

Un quark d'impulsion 10 GeV/c est nécessaire.

➤ **par coalescence:**

- Un pion de 6 GeV/c est obtenu par recombinaison de deux quarks de 3 GeV/c chacun.

- Un proton de 6 GeV/c est obtenu par recombinaison de trois quarks de 2 GeV/c chacun.

La distribution de quarks en fonction de  $p_T$  étant une exponentielle décroissante à bas  $p_T$ ,

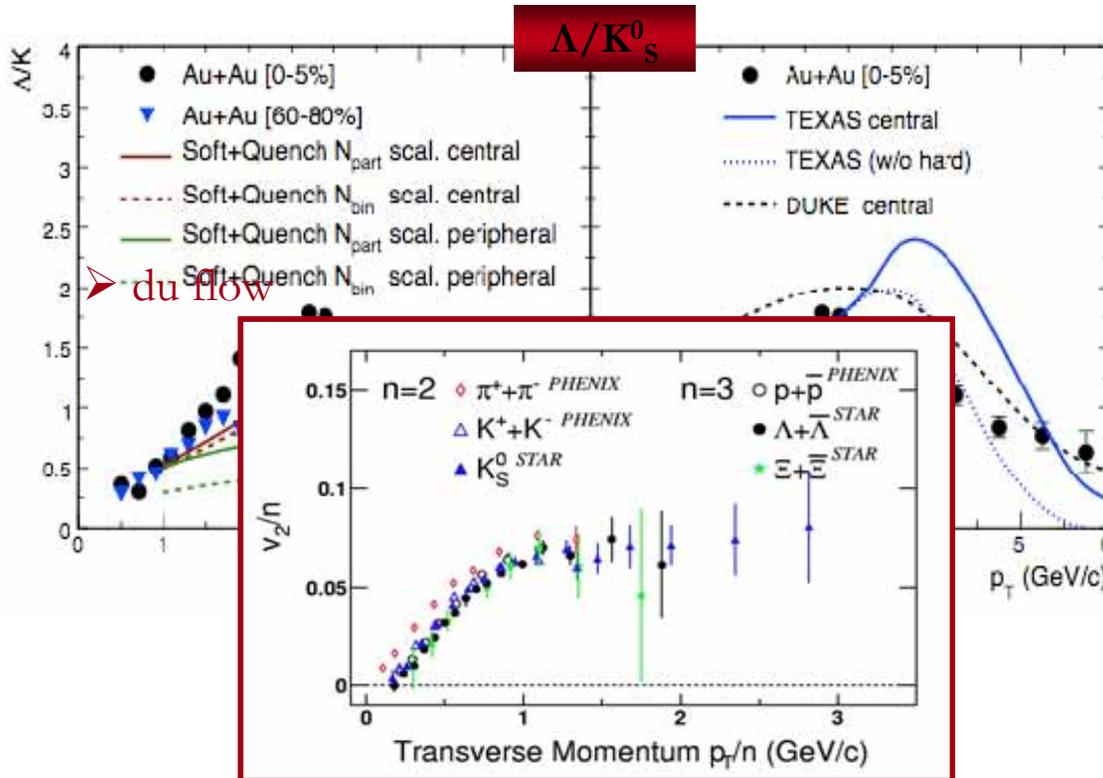
- la coalescence est dominante devant la fragmentation.

- la coalescence favorise la production de baryons aux  $p_T$  intermédiaires et donne ainsi une explication au comportement du rapport baryon/méson.

# Un rapide succès...

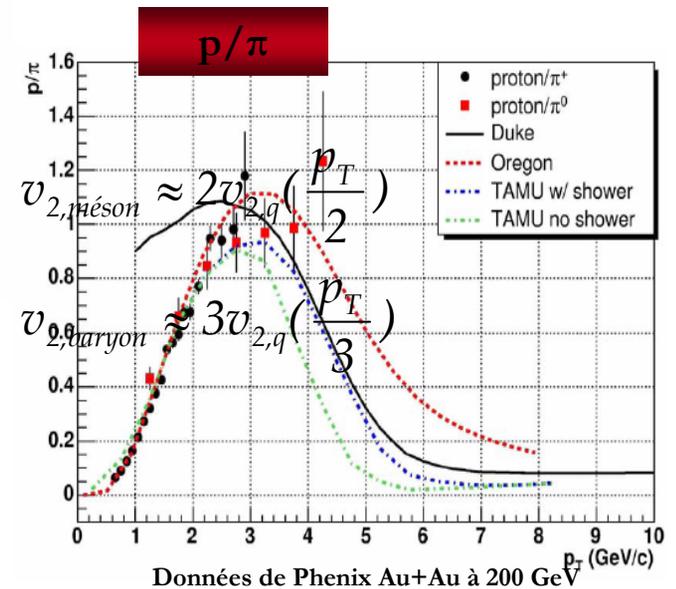
Les modèles de coalescence ont permis avec succès de reproduire les comportements

➤ des rapports baryon/méson



Comportement qualitatif du flow elliptique des baryons et mésons en fonction de  $p_T$  dans le cadre de la coalescence

Phys.Rev.Lett.92(2004)052302  
 Phys.Rev.Lett.91(2003)182301



- Phys.Rev.Lett.91:092301,2003 -

## ...mais des limites cependant

---

Des interrogations demeurent quant-à la rigueur des modèles de coalescence:

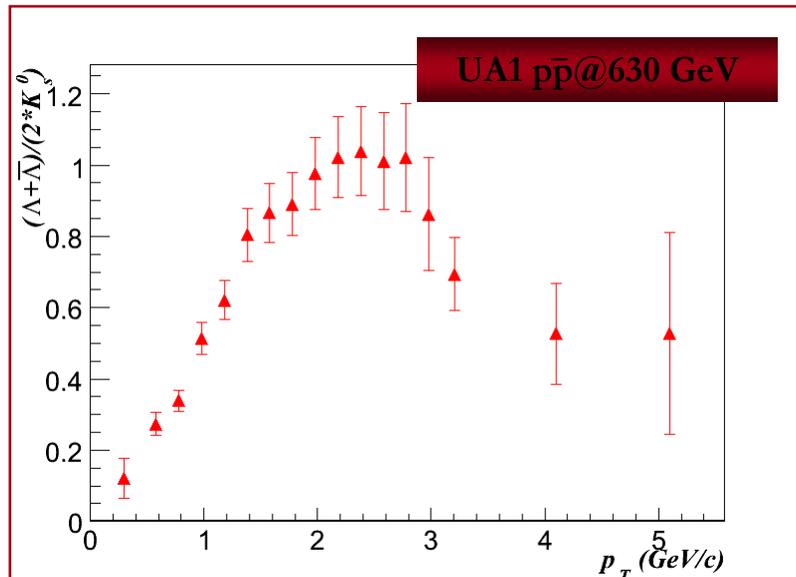
- conservation de l'énergie non imposée
- surprenante absence des gluons pour expliquer la formation des hadrons.
- absence des quarks de la mer
- aucune connexion est faite entre les quarks constituants du modèle et les partons sans masse d'un plasma où la symétrie chirale est totalement restaurée.

Mais le bon accord de ces modèles avec les données expérimentales poussent les théoriciens à éclaircir ces zones d'ombres.

→ Introduction des quarks de la mer et des gluons à l'étude : **Phys.Lett.B618:77-83,2005**

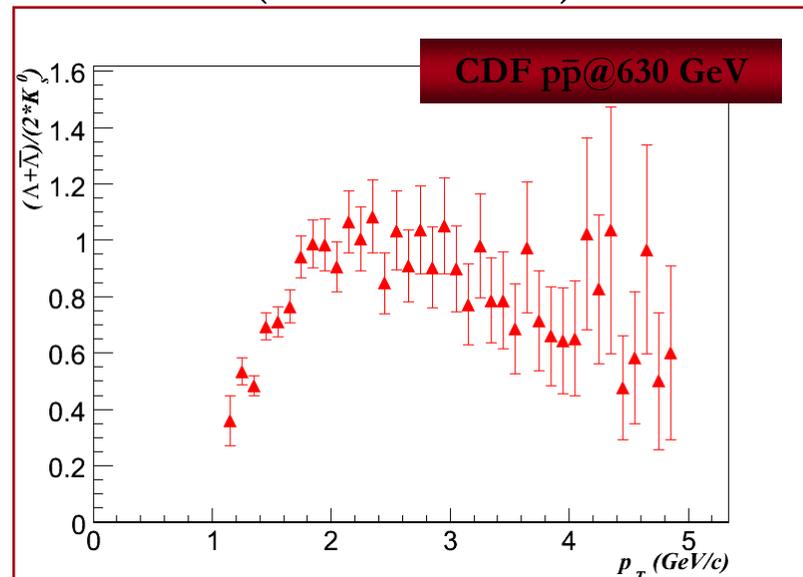
*Etude du rapport étrange baryon/méson  
dans les collisions élémentaires proton-proton et antiproton-proton*

# Collisions proton-antiproton à 630 GeV



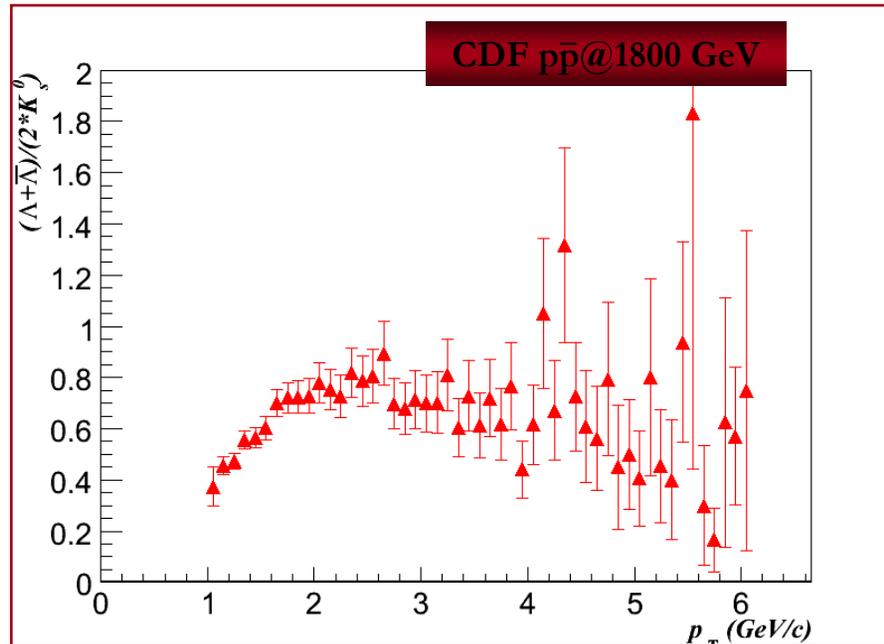
ratio computed from  
Phys.Lett B366(1996)441 - Bocquet et al.  
(UA1 collaboration)

ratio computed from  
Phys.Rev.D(2005)052001 - D.Acosta et al.  
(CDF collaboration)



L'amplitude du rapport est déjà relativement importante pour cette énergie et la coalescence peut difficilement être évoquée pour expliquer ce comportement.

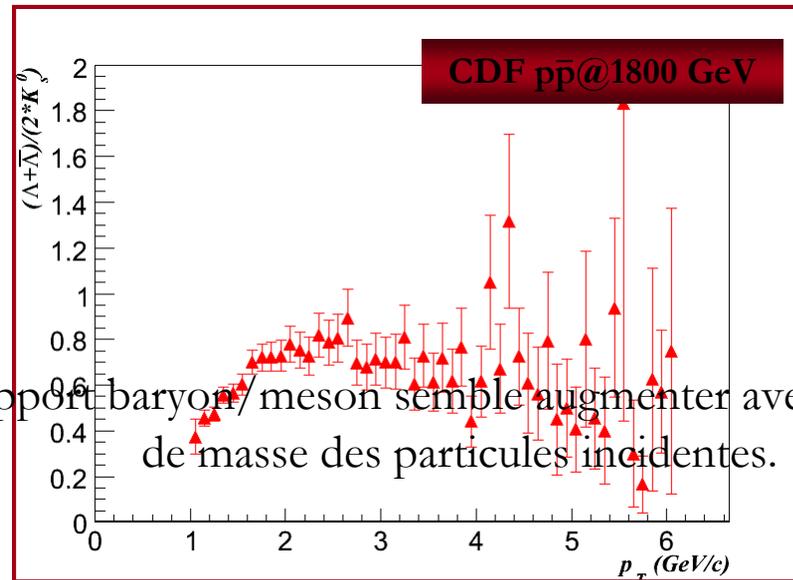
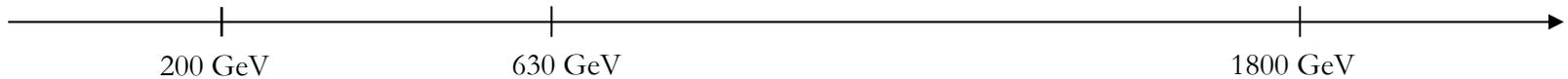
# Collision proton-antiproton à 1800 GeV



ratio computed from  
**Phys.Rev.D(2005)052001 - D.Acosta et al.**

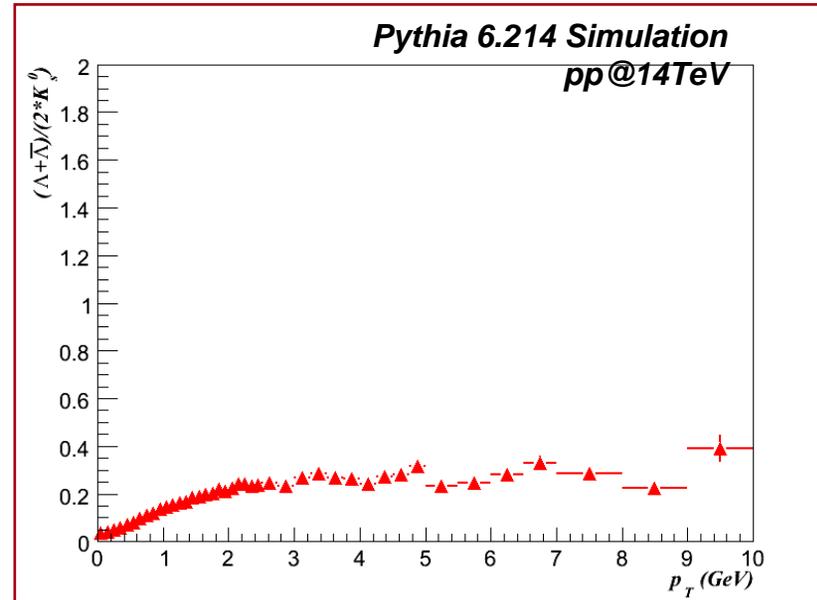
Le rapport  $(\Lambda + \bar{\Lambda}) / 2K_s^0$  est sensiblement plus bas mais reste compatible en tenant compte des erreurs.

# Evolution du rapport $(\Lambda + \bar{\Lambda})/2K^0_S$ avec l'énergie



L'amplitude du rapport baryon/meson semble augmenter avec l'énergie dans le centre de masse des particules incidentes.

## Et à 14 TeV ?



Pythia (par défaut) contredit la tendance observée.  
Le rapport baryon/méson est nettement plus faible.

Nécessité d'optimiser les paramètres pour gagner en amplitude.

*Au cœur de Pythia, physique et paramètres*

# Interactions de biais minimum dans Pythia

---

**Définition expérimentale:** événements hadron-hadron inélastiques sélectionnés à l'aide d'un trigger. Traditionnellement associés aux « non single diffractive events »

**Définition théorique:** la plupart des modèles associe les événements Minimum Bias aux interactions inélastiques non diffractives.

Les événements Minimum Bias sont dominés  
par les interactions douces  
bien qu'ils contiennent également  
des contributions issues des diffusions dures.

## Tuning « Minimum bias » dans Pythia 6.2:

- inclut les événements single diffractive  $AB \rightarrow XB$  ( processus MSUB(92) )  
 $AB \rightarrow AX$  ( processus MSUB(93) )
- est optimisé pour les données futures d'ATLAS («minimum bias Atlas tuning»), donc pour les phénomènes à très haut  $p_T$ .

# Underlying event

L'underlying event comprend tout ce qui n'est pas issu des deux jets de diffusion dure.

- Composante dure:

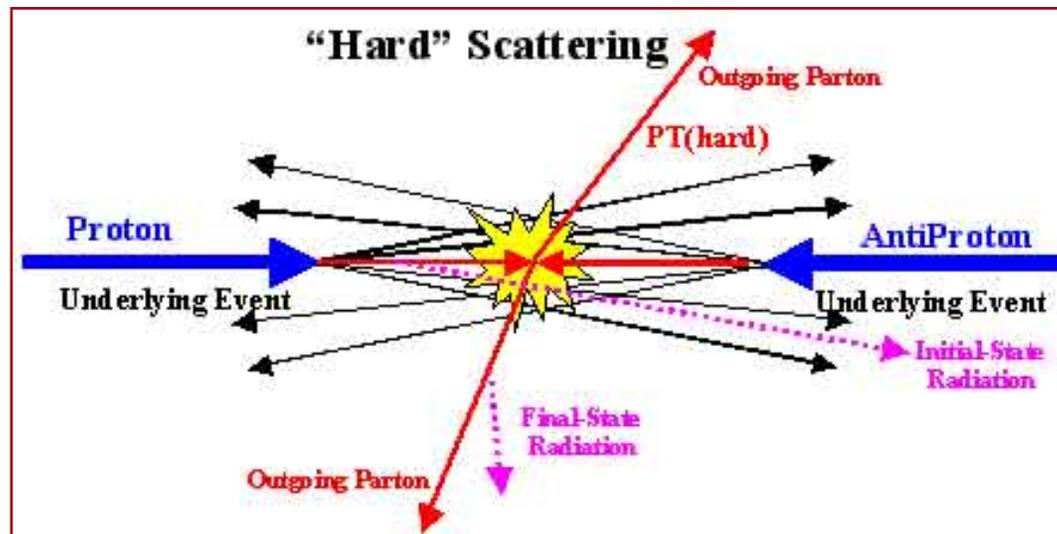
Radiation des états initiaux (ISR)

Radiation des états finaux (FSR)

- Composante douce:

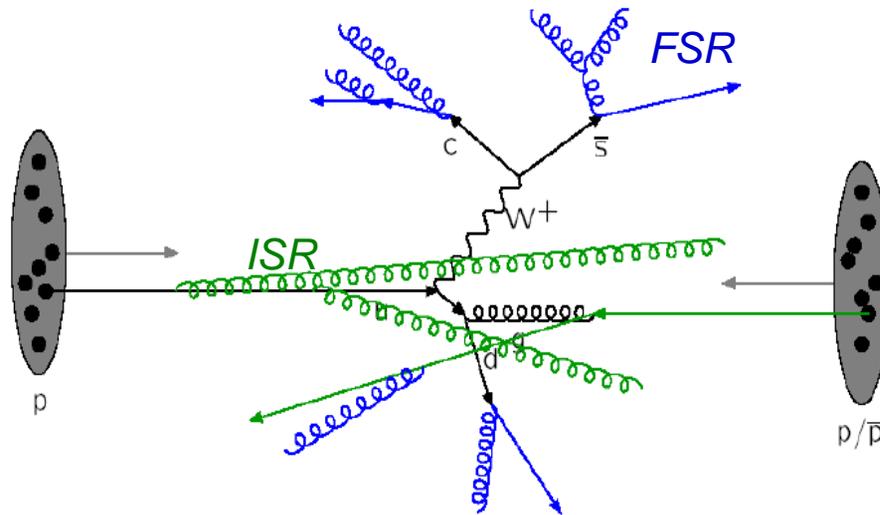
Beam remnant

Interactions multiples



# Underlying event

## - Radiation des états initiaux et finaux -



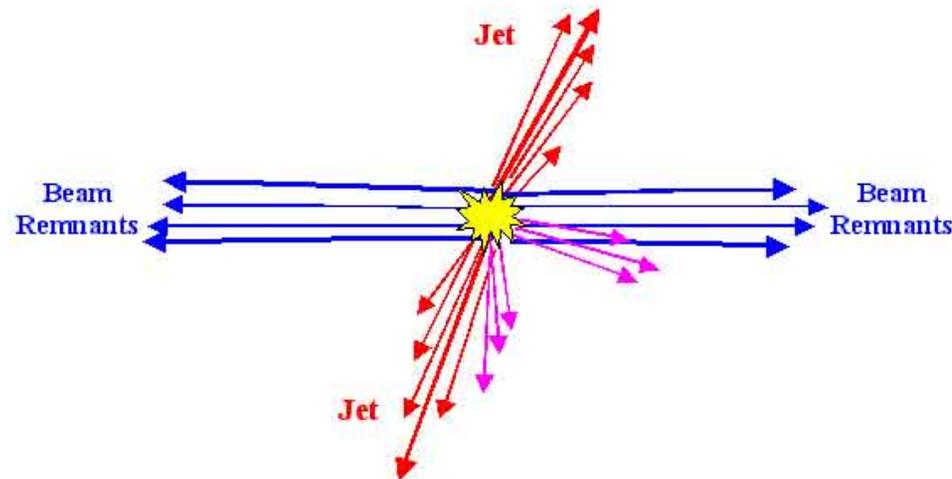
Dans tous les processus faisant intervenir des objets colorés dans les états finaux ou initiaux, des radiations de gluons peuvent se produire.

- Partant d'un simple processus  $2 \rightarrow 2$ , ces corrections vont générer des processus plus complexes tels que  $2 \rightarrow 3$ ,  $2 \rightarrow 4$ ,...
- Corrections réalisées en utilisant le langage des gerbes partoniques (« parton shower »)
- La contribution de ces radiations à la production totale de particules devient de plus en plus importante lorsque l'énergie de la collision augmente.

# Underlying event

## - *Beam remnants* -

Chaque particule incidente du faisceau peut laisser derrière elle un « beam remnant » qui n'entre en jeu ni dans le phénomène de radiation de l'état initial ni dans le processus dur de diffusion.



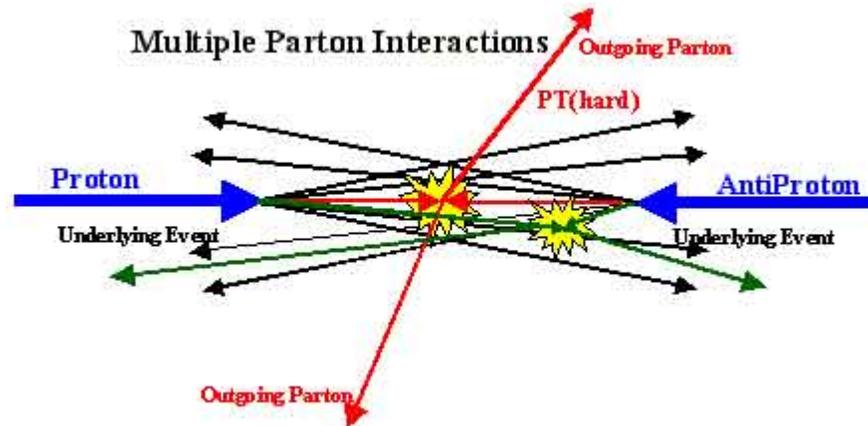
- existence de corrélation de couleur entre le « beam remnant » et le parton initiateur.

# Underlying event

## - Interactions multiples -

Pythia considère la possibilité que des interactions multiples aient lieu dans les collisions hadron-hadron.

- peut apporter une contribution non négligeable à l'underlying event et ainsi à la multiplicité.
- Traitement basique des interactions multiples dans Pythia:
  - génération d'une séquence ordonnée en  $p_T$ :  $p_{T1} > p_{T2} > \dots$
  - arrêt de la séquence pour une valeur de coupure  $p_{T \text{ min}}$
  - définition d'une distribution de matière à l'intérieur du hadron



# Underlying event

## - *Interactions multiples, paramètres de Pythia-*

**MSTP(90)  $\neq 0$**

Processus d'interactions multiples actif

Deux options possibles:

- Scenario simple: **MSTP(82)=1** : coupure abrupte à  $p_{T\min}$
- Scenario complexe: **MSTP(82) $\neq 1$**  : transition douce entre la région des bas et celle des haut  $p_T$

Différentes valeurs du paramètres correspondant à différentes distribution de matière:

**MSTP(82)=2** : uniforme

**MSTP(82)=3** : gaussienne

**MSTP(82)=4** : gaussienne double

Contrôle du taux d'interaction via la valeur de la coupure  $p_{T\min}$ :

$$p_{T\min} = [PARP(82)] \left( \frac{\sqrt{s}}{1\text{TeV}} \right)^{[PARP(90)]}$$

$$\sigma_{\text{int}} = \int_{p_{T\min}}^{s/4} \frac{d\sigma}{dp_T^2} dp_T^2 \quad \Rightarrow \quad n = \frac{\sigma_{\text{int}}}{\sigma_{\text{tot}}}$$

# Production de baryons: modèles Simple & Advanced Popcorn

## ➤ **Production de particules: le modèle de Lund**

- modélisation du champs de force de couleur entre quarks et gluons par des cordes sans masse.

- la brisure de ces cordes offre une approche imagée de la dynamique des quarks et gluons durant le processus de fragmentation.

## ➤ **La production de baryon: un processus plus complexe que celle des mésons**

- les baryons sont plus fréquents dans les jets de quarks que dans les jets d'antiquarks, les paires baryon-antibaryon ne viennent donc pas de la décroissance isotrope d'un cluster.

Z.Phys.C75:41-49,1997

### **Explication apportée par les modèle Popcorn**

Vue simplifiée: un ou plusieurs mésons sont produits entre le baryon et l'antibaryon le long de la corde.

- **simple popcorn:** un seul méson peut être produit.

- **advanced popcorn:** la production de plusieurs mésons est autorisée.

*Vers le LHC, Pythia tuning*

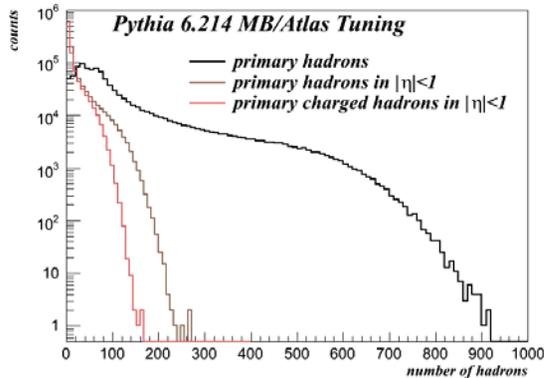
## Pythia 6.2: les paramètres

Switchs	Atlas tuning	Underlying event			Popcorn (+Atlas)		Comments
		UEr1	UEr2	UEr3	Simple	Advanced	
MSTP(51)	kCTEQ5L	-	-	-	kCTEQ5L	kCTEQ5L	PDF set
MSTP(81)	1	1	1	1	1	-	Multiple interaction
MSTP(82)	4	4	4	4	4	-	Double gaussian model
MSTP(88)	-	-	-	-	2	2	sea quark can be used for baryon formation
MSTJ(1)	-	-	-	-	1	1	Can be used to form baryons
MSTJ(12)	-	-	-	-	3	5	Choice of baryon production model
<b>Parameters</b>							
PARP(67)	1	4	4	4	1	1	Regulate ISR activity
PARP(71)	-	4	4	4	-	-	Regulate FSR activity
PARP(82)	1.8	2	2	2	1.8	1.8	(GeV) $p_{T_{\min}}$ at ref. energy
PARP(83)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	Core density in proton matter distribution
PARP(84)	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	Core radius
PARP(85)	0.33	0.9	0.9	0.9	0.33	0.33	Regulate gluon prod mechanism
PARP(86)	0.66	0.95	0.95	0.95	0.66	0.66	Regulate gluon prod mechanism
PARP(89)	1000	1800	1800	1800	1000	1000	Energy scale (TeV) used to calculate $p_{T_{\min}}$
PARP(90)	0.16	0.25	0.16	0.08	0.16	0.16	Power of the $p_{T_{\min}}$ energy dependence
PARJ(81)	-	0.29	0.29	0.29	-	-	$\Lambda$ value in running $\alpha_s$ for parton shower
PARJ(1)					Default value (0.1) $\times$ 1.2	Default value (0.1) $\times$ 2	Suppression of diquark-antiquark pair production in the colour field, compared with $q\bar{q}$ production
PARJ(18)					1	0.19	

# Multiplicité – Min Bias Atlas tuning & Underlying event

Simulation d'1M  
d'événements

## Minimum Bias with Atlas tuning

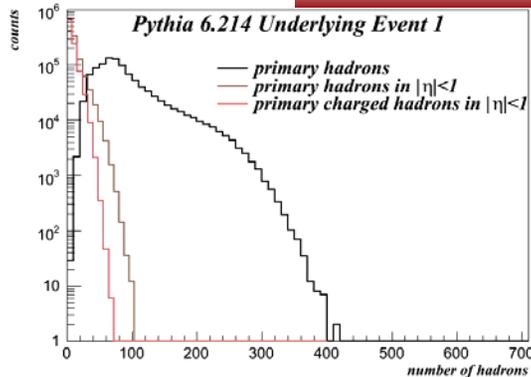


➤ Multiplicité plus importante pour la description Minimum Bias.

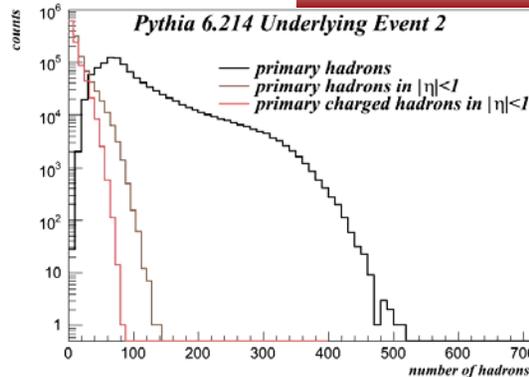
➤ Description Underlying event: la multiplicité augmente avec la diminution du paramètre PARP(90).

## Underlying event

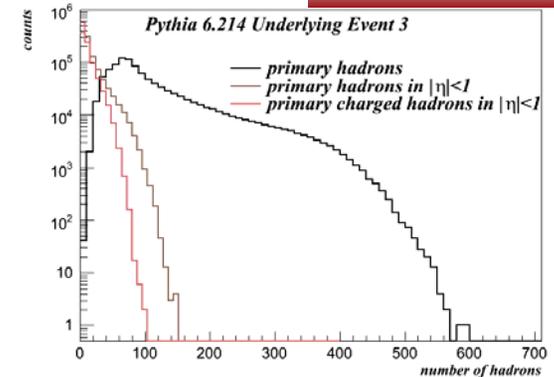
PARP(90)=0.25



PARP(90)=0.16



PARP(90)=0.08



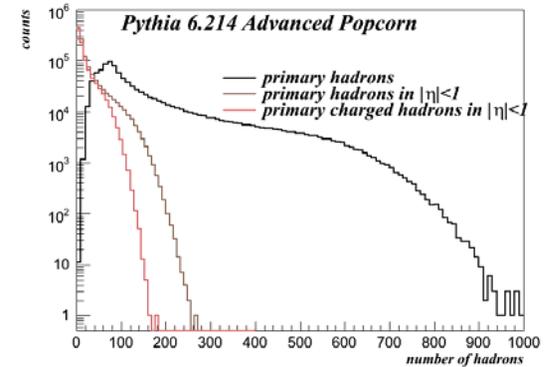
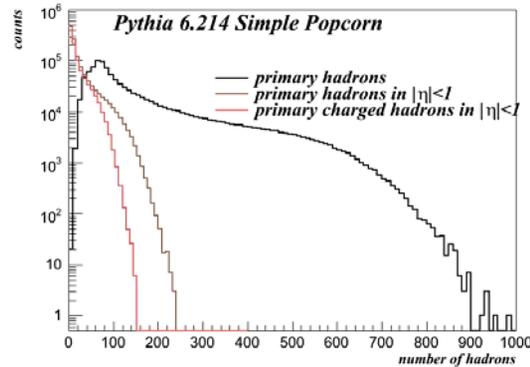
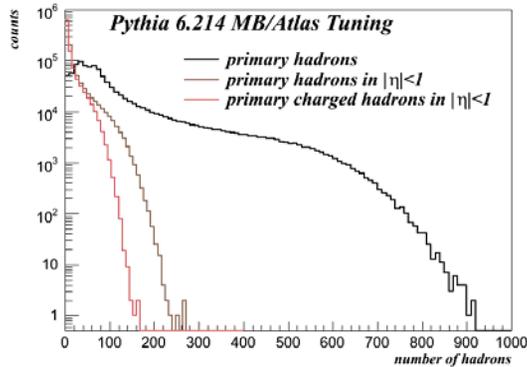
Valeurs du paramètre PARP(90) choisies selon les suggestions de P.Skands

# Multiplicité – Minimum Bias & modèle Popcorn

*Min Bias Atlas tuning*

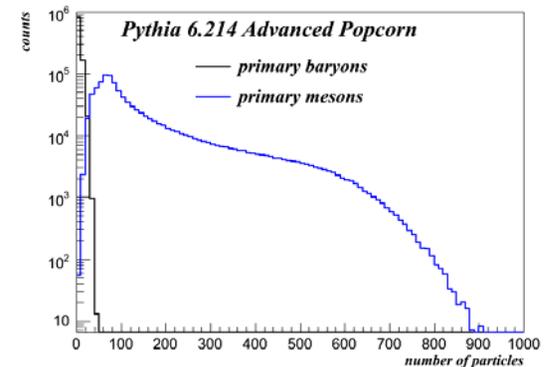
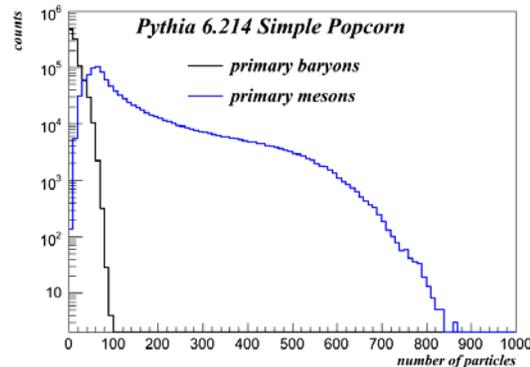
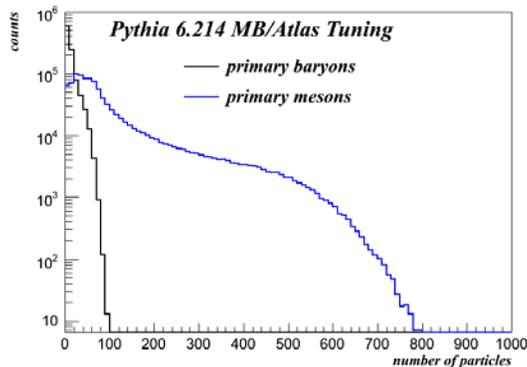
*Modèles popcorn*

- Multiplicité hadronique -



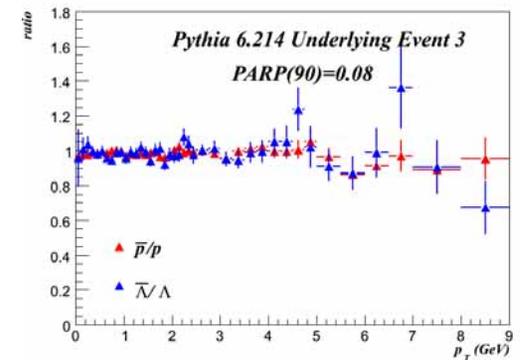
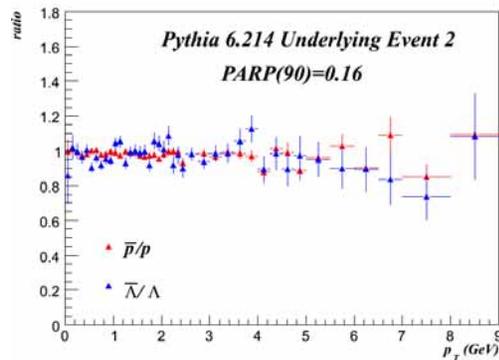
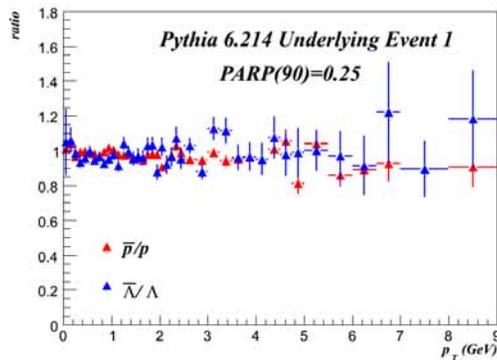
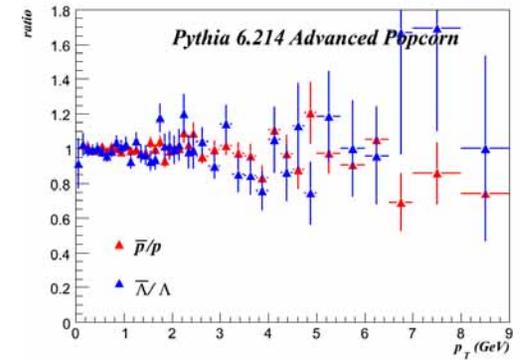
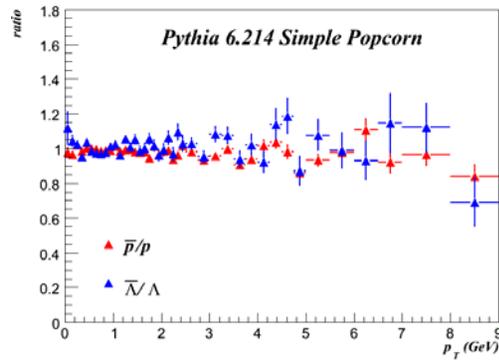
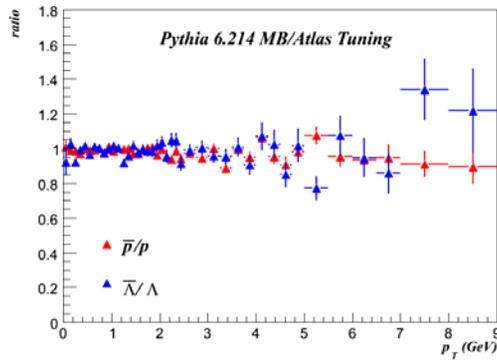
➤ Aucun changement significatif entre ces descriptions

- Multiplicité baryonique -



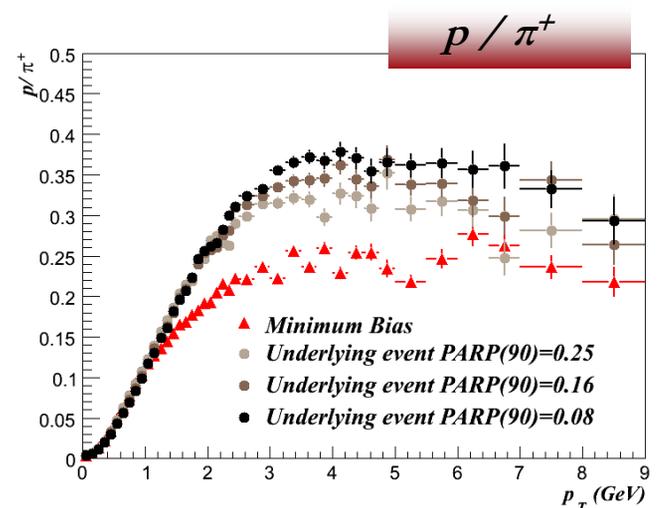
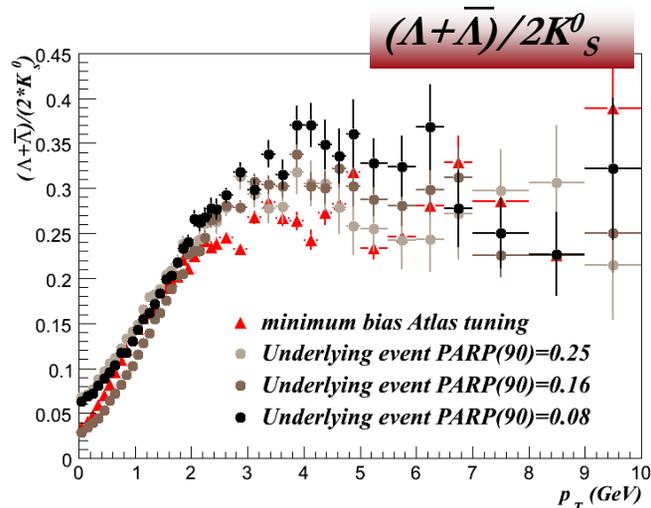
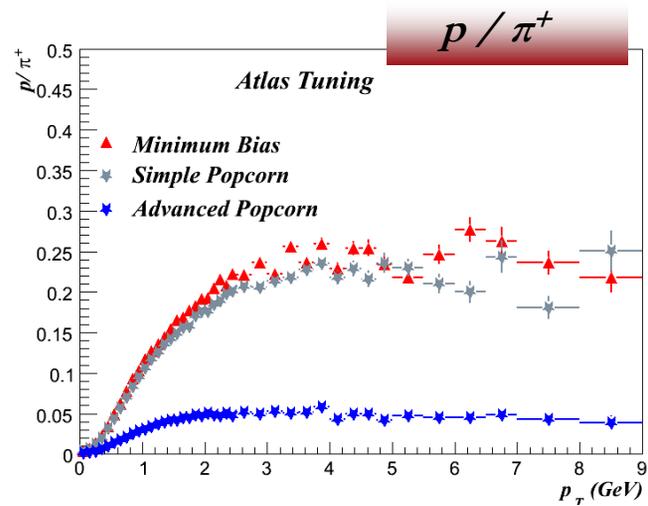
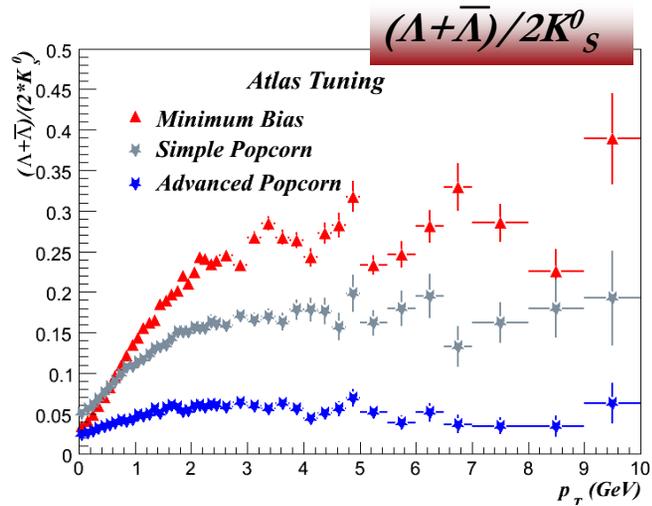
➤ Comme vu précédemment, le modèle advanced popcorn produit plus de mésons que de baryons

# Rapport particule/antiparticule, $-1 < \eta < 1$



Aucune asymétrie entre la production de particules et d'antiparticules

# Rapport baryon/méson, $-1 < \eta < 1$





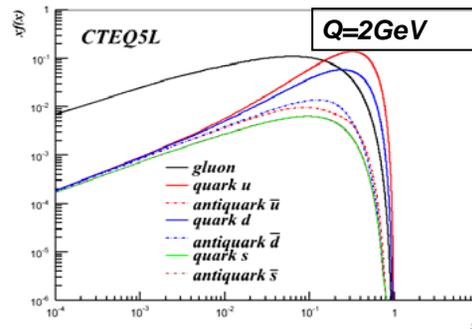
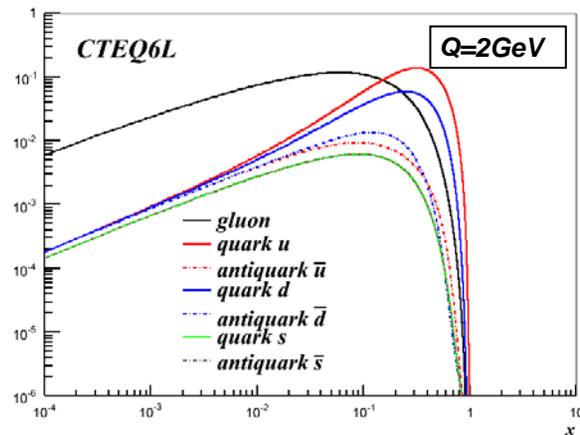
# Pythia 6.3: ce qui change

➤ Principaux changements liés aux descriptions du Minimum Bias et de l'Underlying event. Nouveau traitement

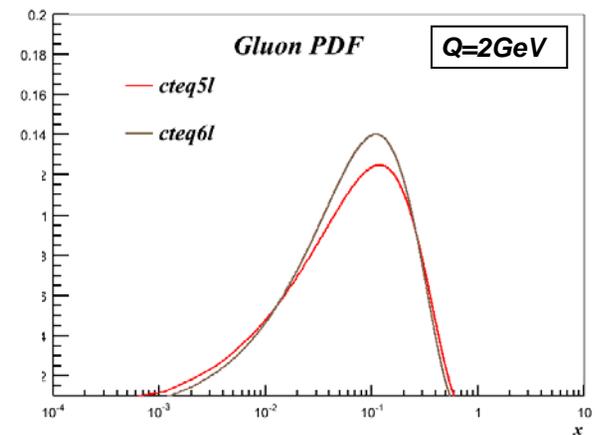
- des interactions multiples
- des radiations ISR et FSR
- des beam remnants

➤ Utilisation des fonctions de distribution de particules (pdf) CTEQ6L en remplacement de CTEQ5L, selon « l'accord des Houches » hep-ph/0604120

$xf(x)$



$x^{5/3}f(x)$

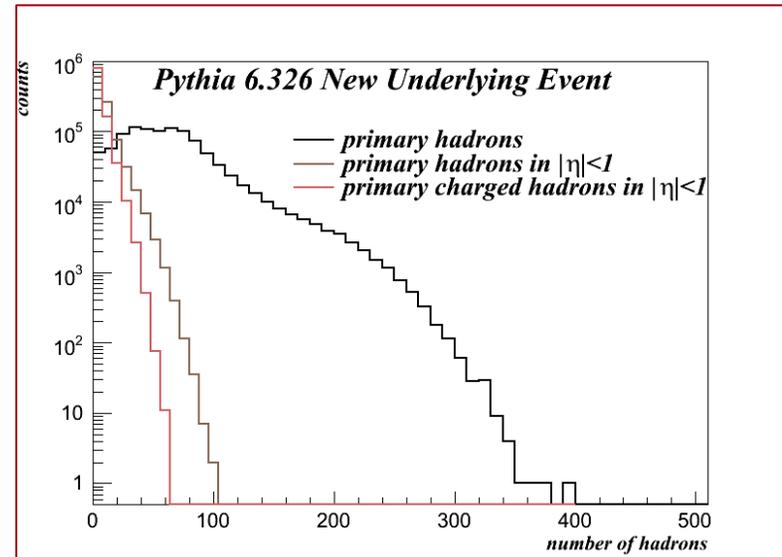
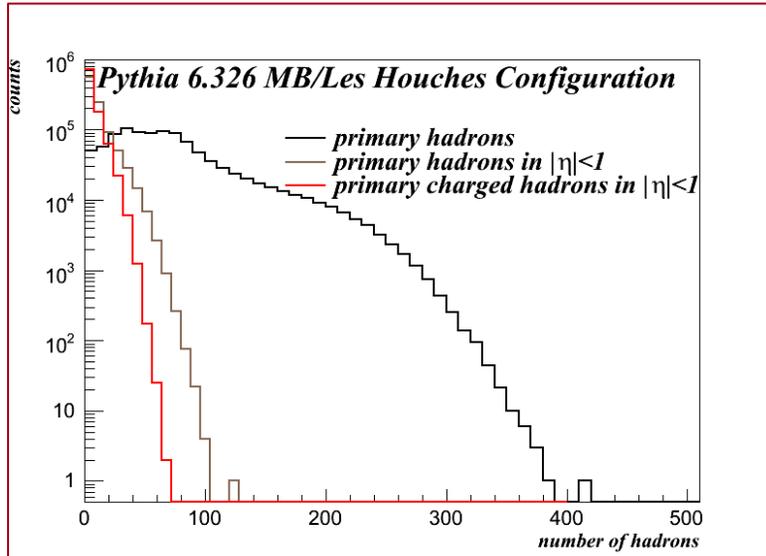


Principal changement lié à la pdf des gluons

# Pythia 6.3: les paramètres

Switchs	Min-bais	New Underlying event	Comments
MSTP(51)	kCTEQ6L	kCTEQ6L	PDF set
MSTP(52)	2	2	Not default pdf
MSTP(68)	1	1	
MSTP(70)	2	2	
MSTP(81)	1	1	Multiple interaction
MSTP(82)	4	4	Double gaussian model
MSTP(88)	1	1	Choice of baryon production model
<b>Parameters</b>			
PARP(67)	4	4	Regulate ISR activity
PARP(71)	4	4	Regulate FSR activity
PARP(82)	2.3	2.6	(GeV) $p_{T_{\min}}$ at ref. energy
PARP(83)	0.5	0.5	Core density in proton matter distribution
PARP(84)	0.5	0.3	Core radius
PARP(85)	0.9	0.9	Regulate gluon prod mechanism
PARP(86)	0.95	0.95	Regulate gluon prod mechanism
PARP(89)	1800	1800	Energy scale (TeV) used to calcule $p_{T_{\min}}$
PARP(90)	0.2	0.24	Power of the $p_{T_{\min}}$ energy dependance

# Multiplicité des descriptions min-bias & new underlying event

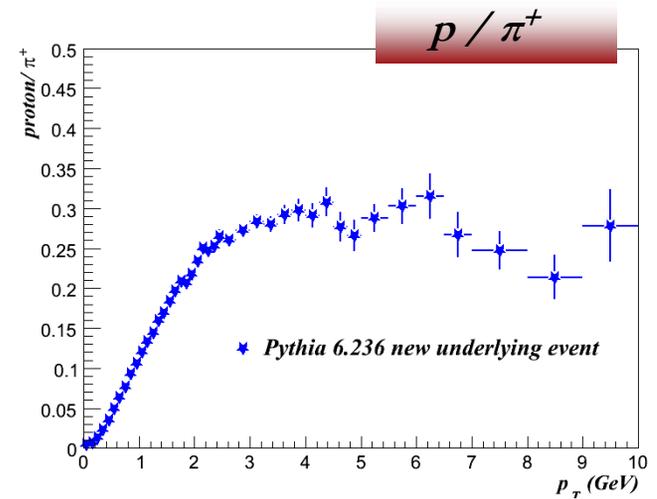
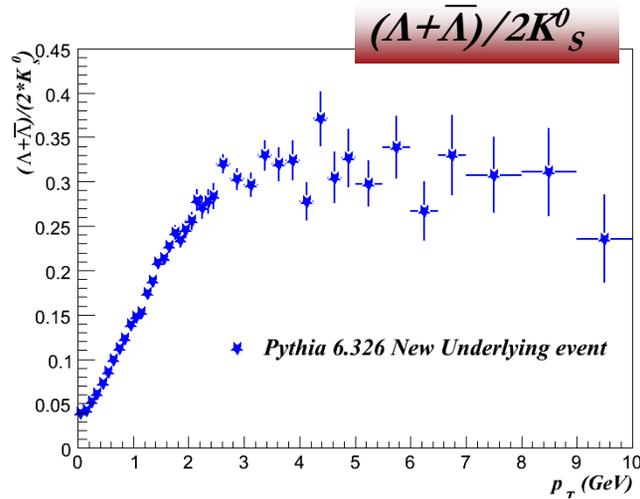
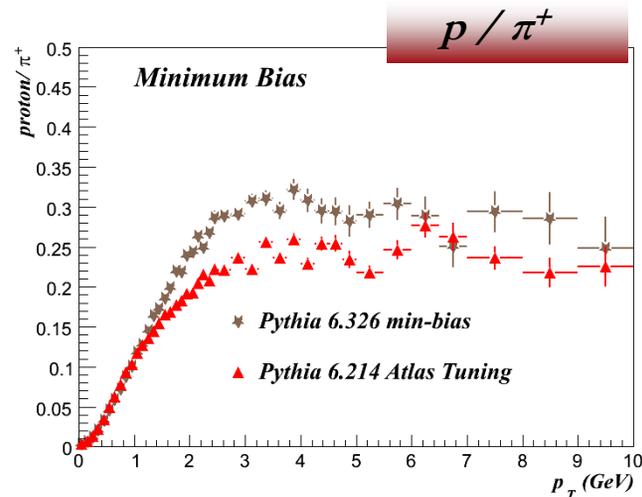
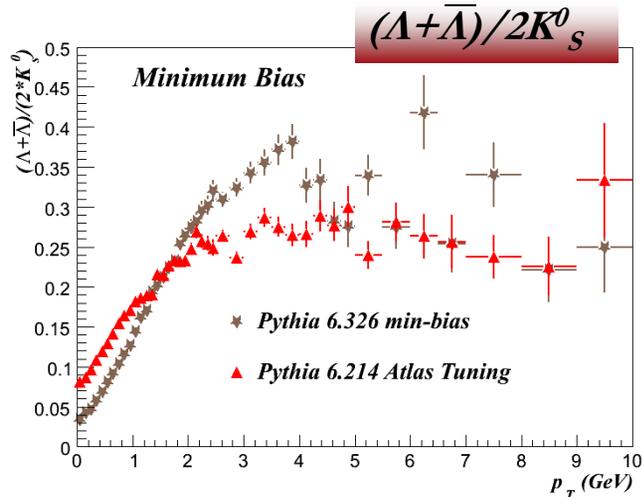


Les multiplicités des deux descriptions sont quasi identiques



un seul jeu de paramètre semble alors maintenant être suffisant pour décrire la physique à bas et haut  $p_T$ .

# Rapport baryon/méson, $-1 < \eta < 1$



# Conclusion

## Deux jeux de paramètres sont utilisés dans Pythia:

- « Minimum Bias » optimisé pour la description des phénomènes à haut  $p_T$ .
- « Underlying Event » pour la description de la région des bas  $p_T$ .

## Ces descriptions sont-elles suffisantes pour expliquer la production de baryons aux impulsions transverses intermédiaires ?

Nécessité d'approfondir encore la description de la région des bas  $p_T$  dans Pythia.

- Diminuer, jusqu'à une certaine limite, la valeur du paramètre PARP(90) dans l'underlying event peut aider à atteindre l'amplitude attendue du rapport baryon/méson.
- Des améliorations apportées par Pythia 6.3 avec la configuration des Houches
  - description de la physique des bas et haut  $p_T$  avec un seul jeu de paramètres
  - mais amplitude du rapport baryon/méson encore faible.

**Les premières mesures de particules étranges dans les collisions pp seront un outil majeur pour comprendre les mécanismes de production baryonique et tester la validité de la coalescence.**