



# Physique des premiers ions lourds avec CMS

Raphaël Granier de Cassagnac  
Laboratoire Leprince-Ringuet  
Journées QGP France d'Etretat  
17 septembre 2009



# Avertissement

---

- Catalogue rapide, informatif, du programme de physique des ions lourds de CMS, projeté sur une estimation de la luminosité attendue pour le 1<sup>er</sup> run...
- Attention, nombreuses incertitudes physiques (multiplicités, *shadowing*, bruits de fond...) techniques (luminosité, énergie...) ou temporelles...

« *Premières collisions, probablement mercredi prochain* » Quelqu'un, Étretat, juin 2008

# Avertissement

---

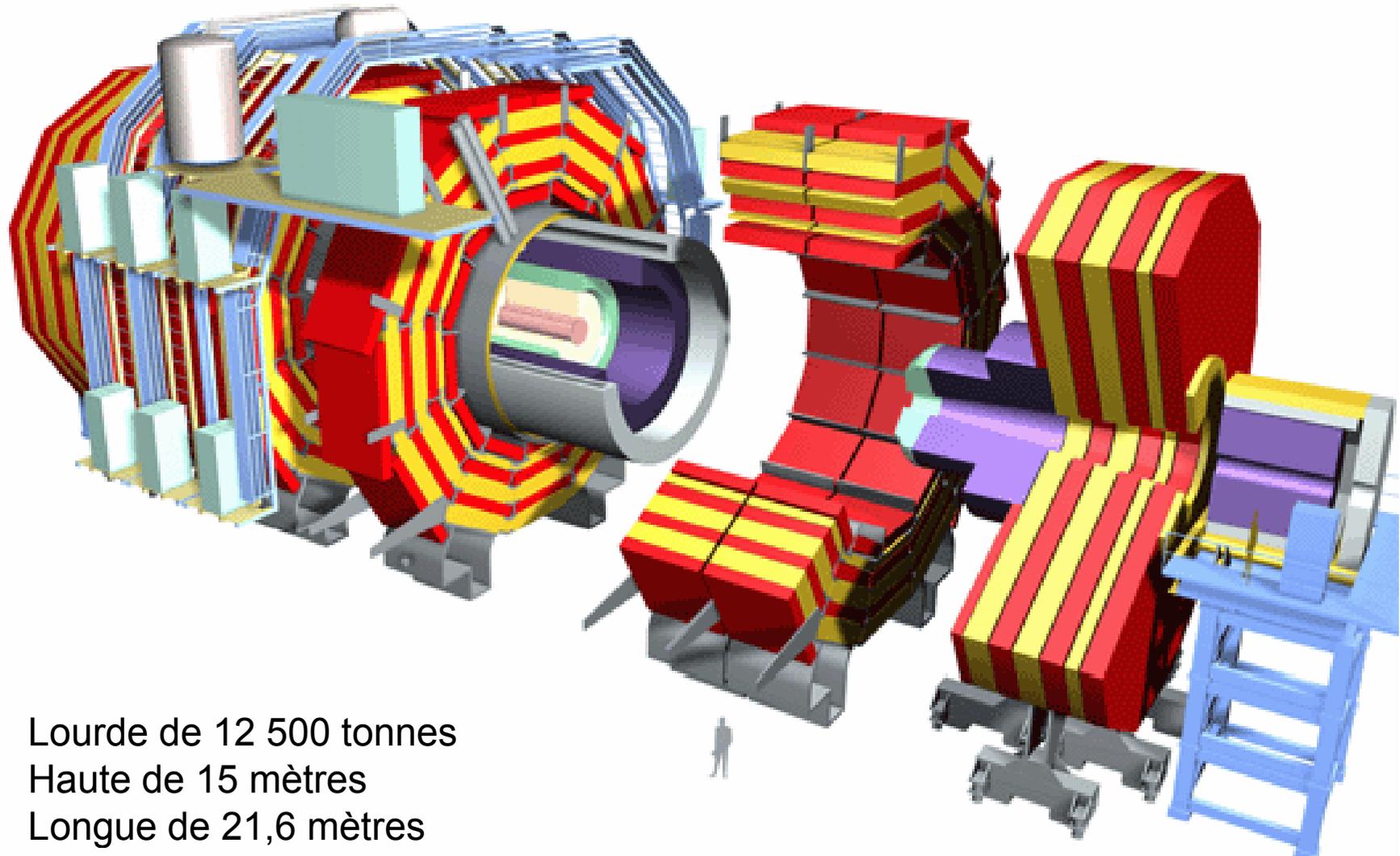
- Néanmoins, les premiers ions lourds pourraient arriver en novembre 2010...
- CMS s'y prépare :
  - 27 mai, revue interne du programme de physique,
    - ainsi que son degré de préparation ;
  - 12 septembre, atelier sur le calcul ;
  - 5 octobre, revue sur le déclenchement ;
  - 14 octobre, atelier sur les détecteurs ;
  - Fin 2009, début 2010, revue sur les détecteurs ;
  - ...

# CONSIDÉRATIONS TECHNIQUES



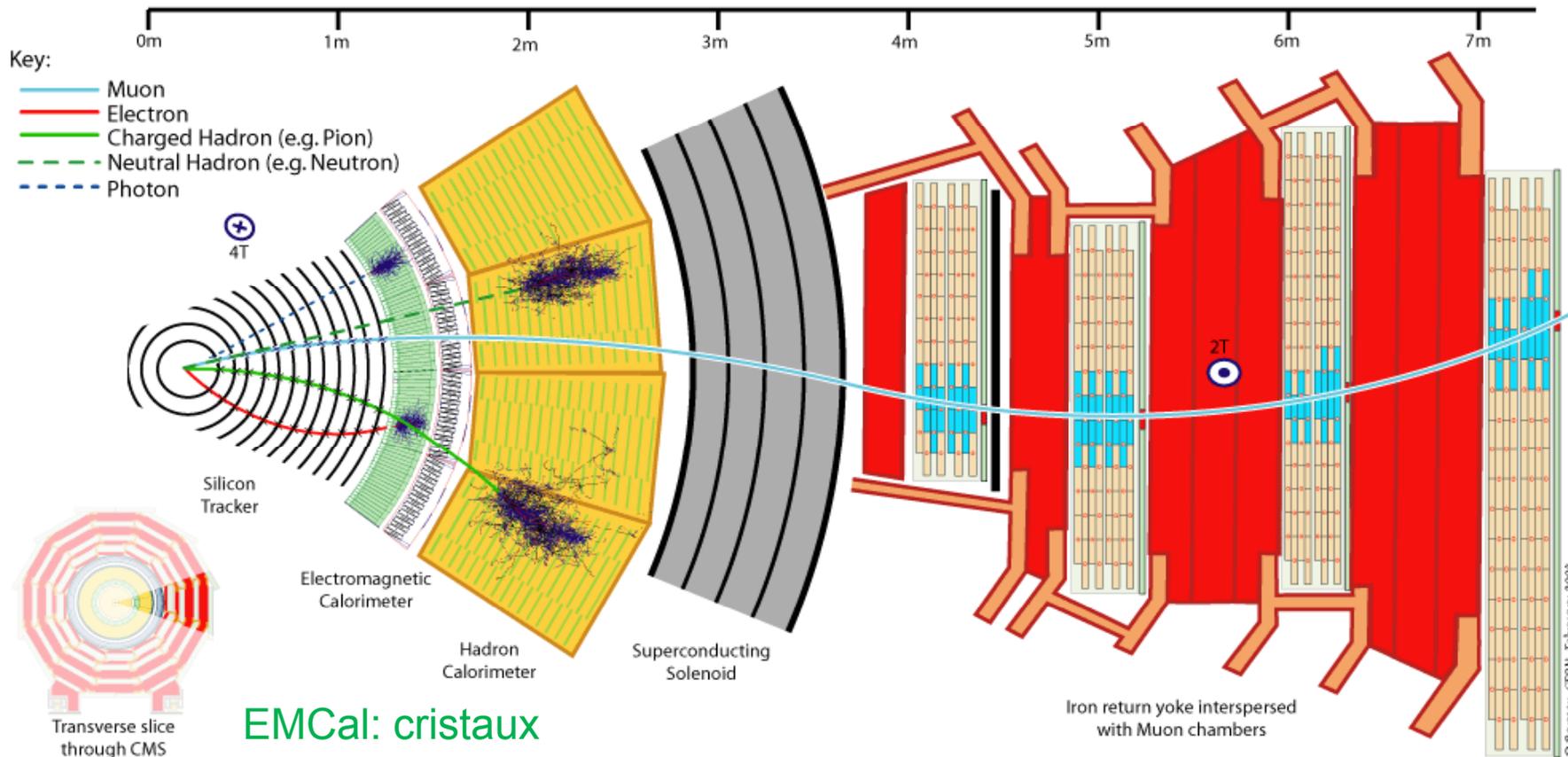
# CMS telle quelle

---



Lourde de 12 500 tonnes  
Haute de 15 mètres  
Longue de 21,6 mètres

# Détection des particules $|\eta| < 2.4$



EMCal: cristaux  
 $\text{PbWO}_4$   $|\eta| < 3$

Muon: drift tubes + RPC  $|\eta| < 2.4$

Silicium: pixels (3)  
 and strips (10)  $|\eta| < 2.4$

HCal: Scintillateur  
 $|\eta| < 5$

+ Extensions à grand angle

# Quelques caractéristiques techniques

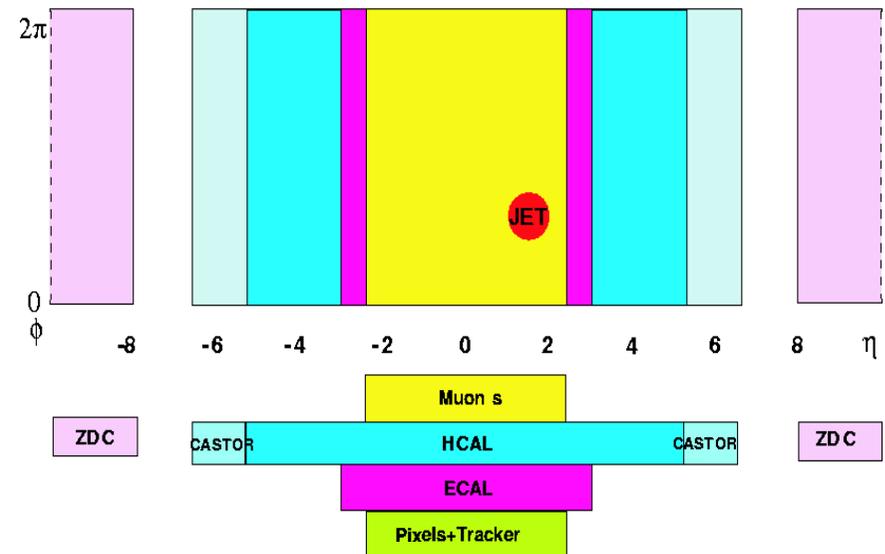
---

## 2. Stratégie de trigger

- Niveau 1 = toutes les collisions Pb-Pb ( $\approx 5$  kHz)
- Trigger de haut niveau (HLT)  $\rightarrow$  10 à 100 Hz

## 3. Champ magnétique de 3.8 Teslas

## 1. Large couverture angulaire



$\rightarrow$  Très haute acceptation, particulièrement à grand  $p_{(T)}$

# Luminosité du premier run



## Key Parameters of "Early" Pb Ion Beam (from LHC Design Report)

Parameter	Units	Early Beam	Nominal
Energy per nucleon	TeV	2.76	2.76
Initial ion-ion Luminosity $L_0$	$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\sim 5 \times 10^{25}$	$1 \times 10^{27}$
No. bunches, $k_b$		62	592
Minimum bunch spacing	ns	1350	99.8
$\beta^*$	m	1.0	0.5 / 0.55
<b>Number of Pb ions/bunch</b>		<b><math>7 \times 10^7</math></b>	<b><math>7 \times 10^7</math></b>
Transv. norm. RMS emittance	$\mu\text{m}$	1.5	1.5
Longitudinal emittance	eV s/charge	2.5	2.5
Luminosity half-life (1,2,3 expts.)	h	14, 7.5, 5.5	8, 4.5, 3
		Only possibility for 2009 or early 2010	Goal for 2-3 years (?) beyond

At full energy, luminosity lifetime is determined mainly by collisions ("burn-off" from ultraperipheral electromagnetic interactions)  $\sigma \approx 520$  J.M. Jowett, Chamonix, 2009

$v_{s_{NN}} = 0.4 \times v_{s_{pp}}$   
de la fin du run 1,  
au mieux 4 TeV  
peut-être 2.8 TeV

→ Hypothèse  
de travail

8 à 80 Mevts

1 to  $10 \mu\text{b}^{-1}$

Pb+Pb	$v_{s_{NN}}$	Max.	Av.
An 1	$\approx 4 \text{ TeV}$	$\approx 150 \text{ Hz}$	$\approx 100 \text{ Hz}$
Nominal	5.5 TeV	$\approx 3 \text{ kHz}$	$\approx 8 \text{ kHz}$

# (Non) stratégie de déclenchement

- An 1 : pas de trigger, on prend tout (min. bias)
- En revanche, tourner les algorithmes dans le HLT pour étiqueter les événements
  - Test pour les runs suivants
  - « Express streams » pour faciliter l'analyse ?
- (Revue le 12 octobre...)

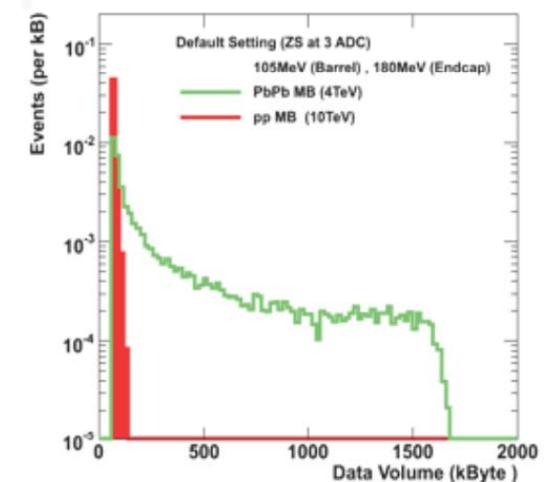
Année nominale, d'après le TDR

Channel	Threshold	Pre-scale	Bandwidth [MByte/s]	Event size [MByte]
min. bias	–	≈ 400	33.75 (15%)	2.5
jet	100 GeV	1	24.75 (11%)	5.8
jet	75 GeV	3	27 (12%)	5.7
jet	50 GeV	25	27 (12%)	5.4
J/ψ	0 GeV/c	1	67.5 (30%)	4.9
Υ	0 GeV/c	1	2.25 (1%)	4.9
γ <sup>prompt</sup>	10 GeV	1	40.5 (18%)	5.8
UPC/forward	–	1	2.25 (1%)	1

# Préparation à la prise de données

---

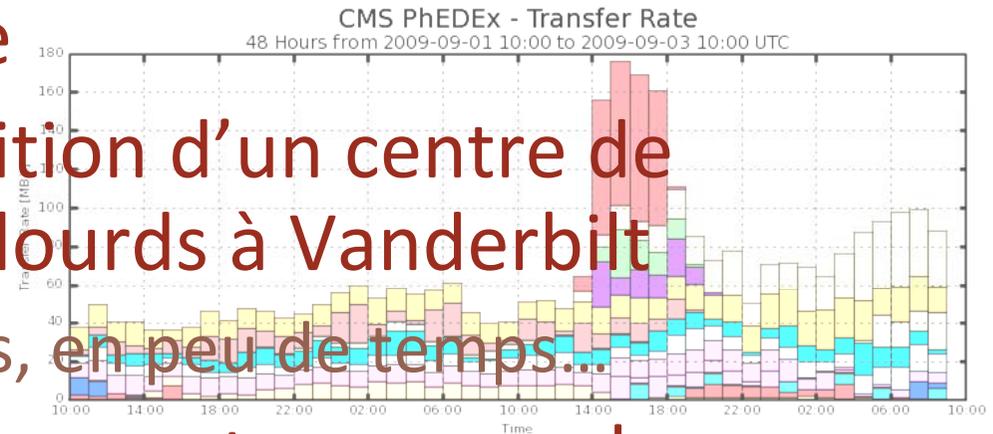
- S'assurer qu'il n'y a pas de problèmes spécifiques aux ions lourds avec les détecteurs et leur acquisition...
- Prise de données hyper similaire à p+p
  - À part peut-être le trajectographe (suppression de zéro déplacée...)
- Quelques calibrations spécifiques
  - Centralité, plan de réaction...
- (atelier le 14 octobre)



# Reconstruction des données

---

- Atelier, 12 septembre
- À long terme: proposition d'un centre de calcul dédié aux ions lourds à Vanderbilt
  - Beaucoup de données, en peu de temps...
- À court terme: modèle exact en cours de définition mais points communs avec p+p
  - Calibration dans la ferme dédiée au CERN (CAF)
  - Première reconstruction au tier-0 du CERN
  - Analyses, simulations (reconstruction ?) dans les tier-2 (Russie, MIT, France ? Brésil ? Turquie ?...)

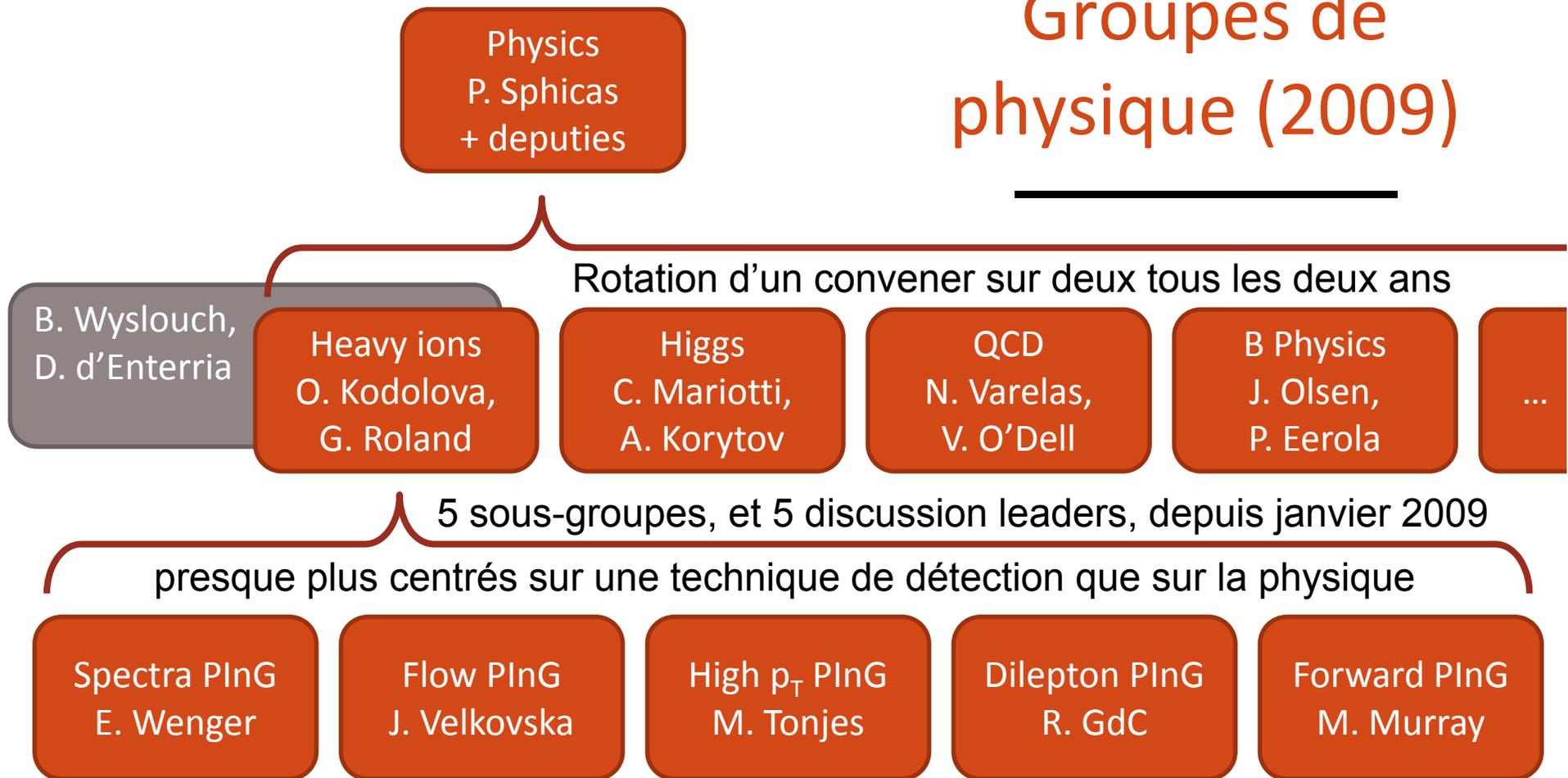




# PROGRAMME DE PHYSIQUE

POINTE PERCEE

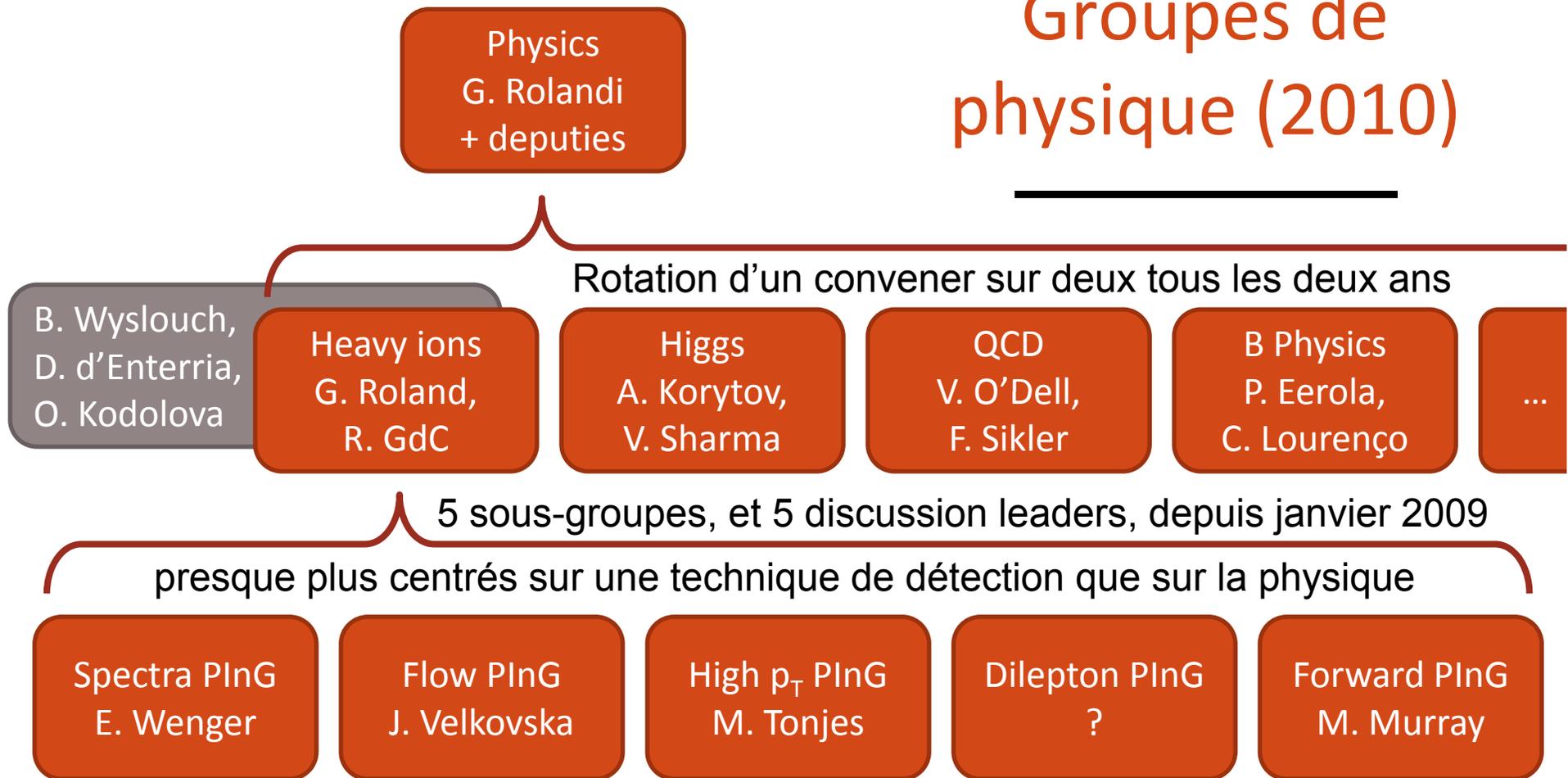
# Groupes de physique (2009)



≈ 100 physiciens, 30-50 très actifs, 20 au CERN

- Concentrés sur les ions lourds (mesures p+p dans d'autres groupes) mais abordent aspects techniques

# Groupes de physique (2010)



≈ 100 physiciens, 30-50 très actifs, 20 au CERN

- Concentrés sur les ions lourds (mesures p+p dans d'autres groupes) mais abordent aspects techniques

# 1. Le PInG « Charged spectra »

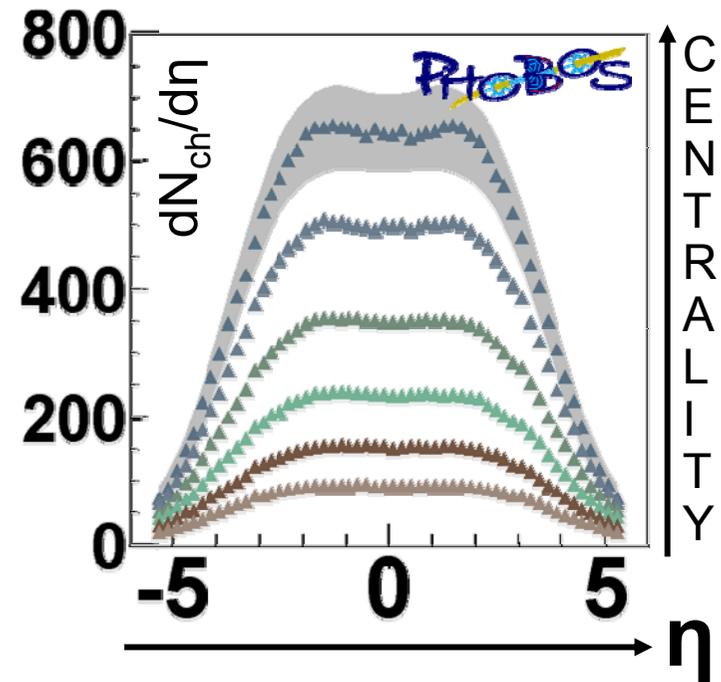
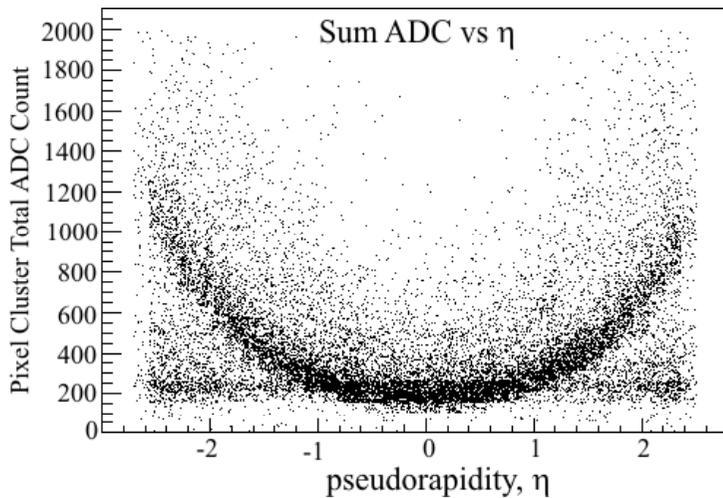
---

Focalisé sur le tracker au silicium...

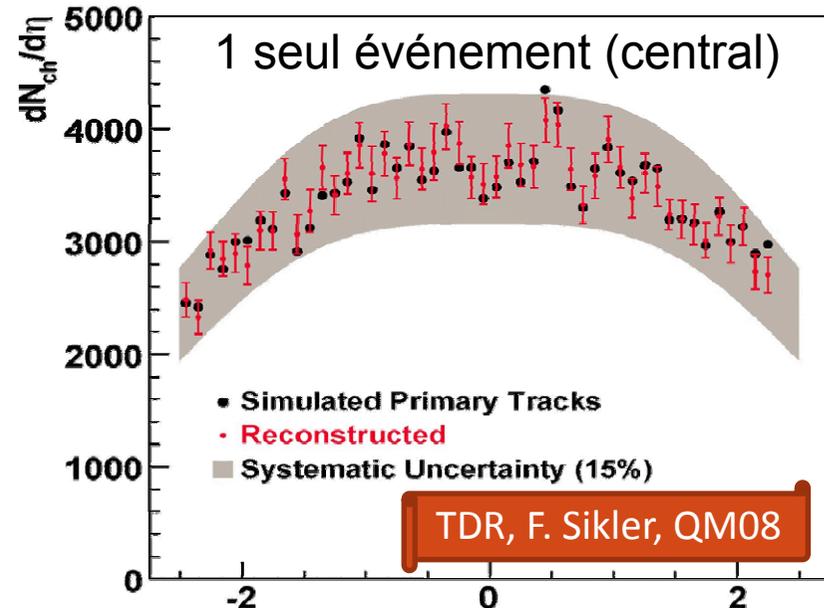
- $dN_{ch}/d\eta$  sur quelques milliers d'événements
- Identification par  $dE/dx$
- Spectre des particules chargés  $\rightarrow 60 \text{ GeV}/c$
- $D \rightarrow K\pi$ 
  - Des tonnes ( $\approx 20$  mille par million d'événements minimum bias de  $p_T > 2 \text{ GeV}/c$ ) avec un rapport signal sur bruit qui diminuera avec  $p_T$  et dépendra fortement de la multiplicité, des coupures, etc.

# Multiplicité $dN_{ch}/d\eta$

- $dN_{ch}/d\eta$  ( $|\eta| < 2.5$ )
  - Coups dans la 1<sup>ère</sup> couche de silicium (4,4 cm)
  - $p_T > 30$  MeV/c
  - 2% d'occupation à  $dN_{ch}/d\eta = 5000$
  - Corrélation ADC /  $\eta$



PRL 91 (2003) 052303

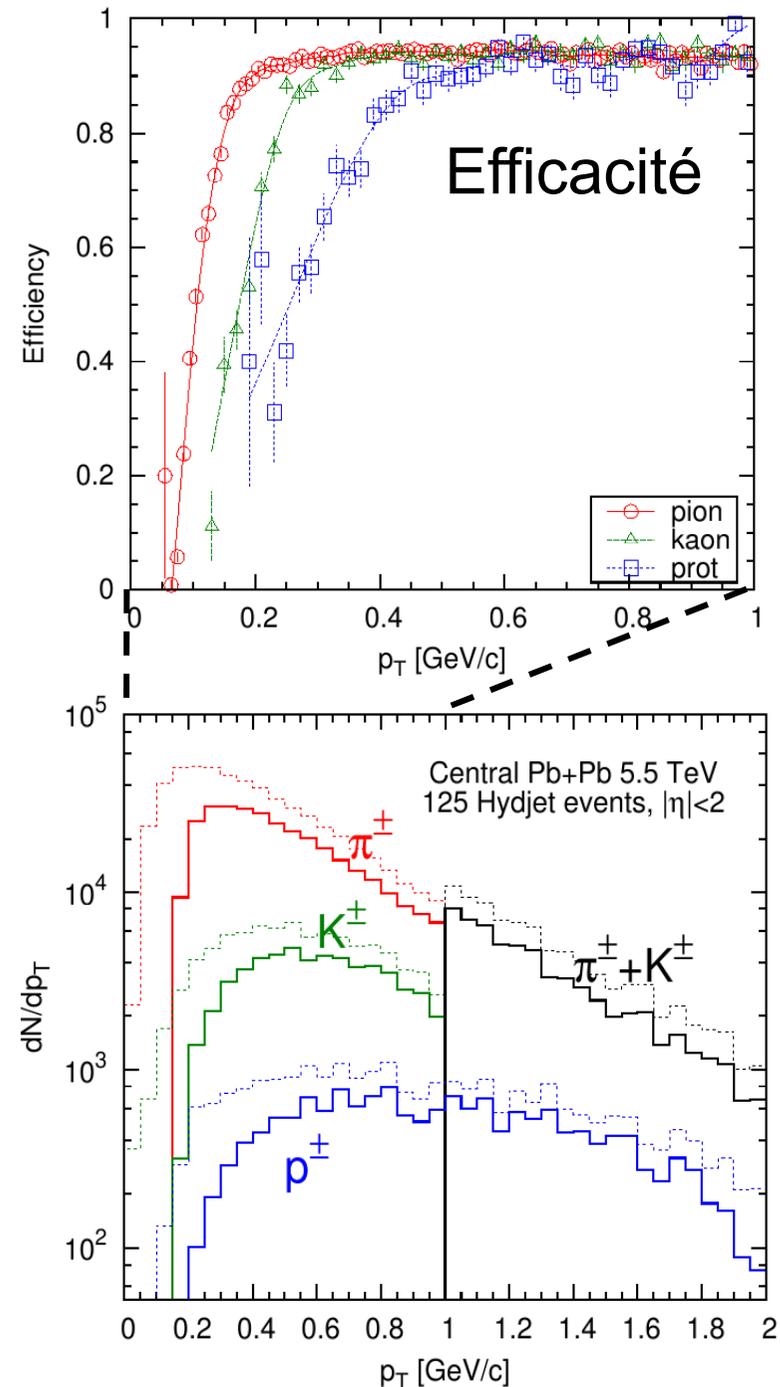


TDR, F. Sikler, QM08

# Identification et spectres à bas $p_T$

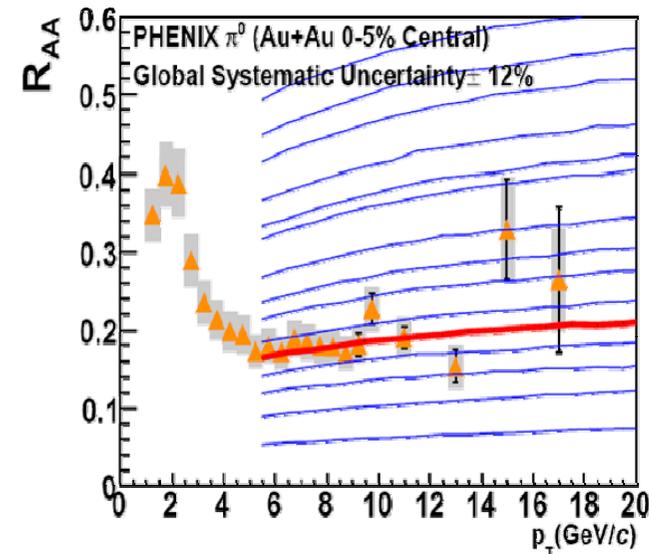
- Tracking dans 3 couches de silicium (66 Mpixels)
  - Occupation < 2%
  - $p_T > 200$  MeV/c
  - Résolution  $p_T$  6 à 10%
  - Fake < 10%
- Identification de pion/kaon/proton
- $dE/dx$ 
  - $\pi/K$  @  $p_T < 1$  GeV/c
  - $p$  @  $p_T < 2$  GeV/c

TDR, F. Sikler, QM08



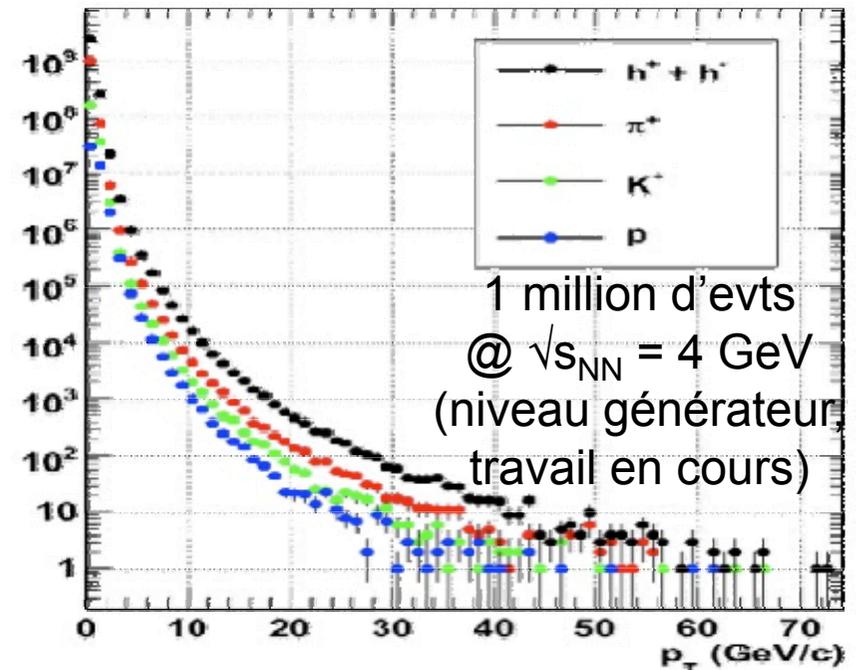
# Spectre des chargées

- $R_{AA}$  mesure phare @ RHIC
- PHENIX  $p_T \rightarrow 20 \text{ GeV}/c$ 
  - Estimation quantitative des propriétés du milieu
    - $dn_{\text{gluons}}/dy = 1400^{+200}_{-375}$
    - (par exemple)
- CMS  $p_T \rightarrow 60 \text{ GeV}/c ?$  (run1)
  - Résolution  $p_T < 1\%$  ( $\eta=0$ )
  - Mesure de densité, coefficient de transport



PHENIX, PRC77(2008)064907

Number of primary tracks in 1M MinBias HYDJET events

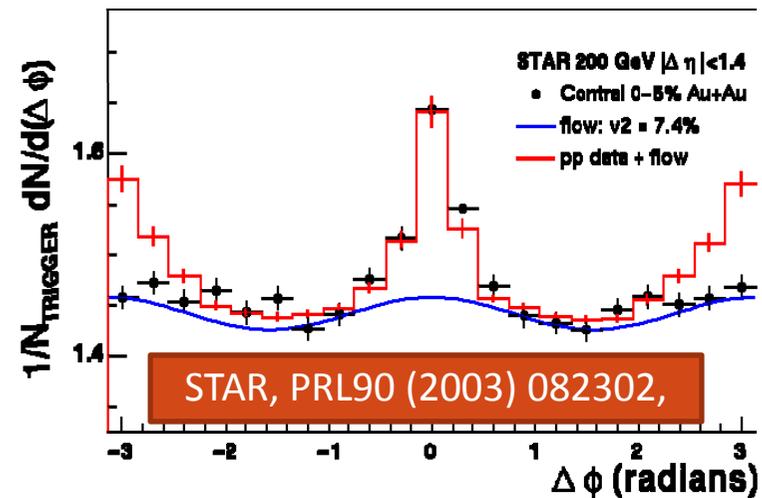


## 2. Le PInG « Correlation and Flow »

Préoccupé par la mesure du plan de réaction...

Premières mesures faisables :

- Flot elliptique (et autres harmoniques) vs  $p_T$ ,  $\eta$ 
  - Mesure du « bulk » accessible avec peu de statistique
- Corrélation azimuthale ( $\Delta\phi$ ) et longitudinale ( $\Delta\eta$ )
  - Le célèbre papier de STAR sur la disparition du jet opposé utilisait 1.5M d'événements centraux

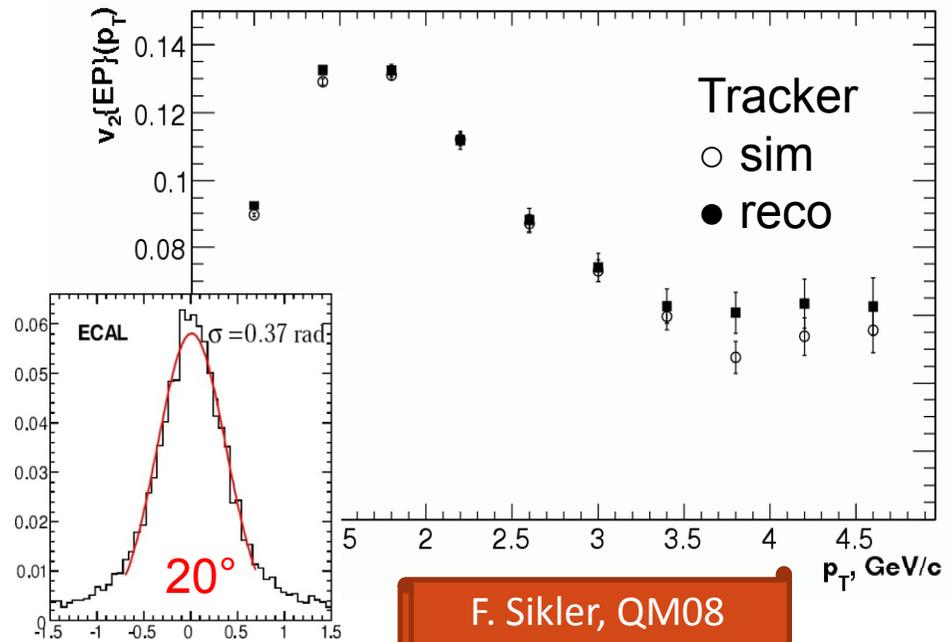
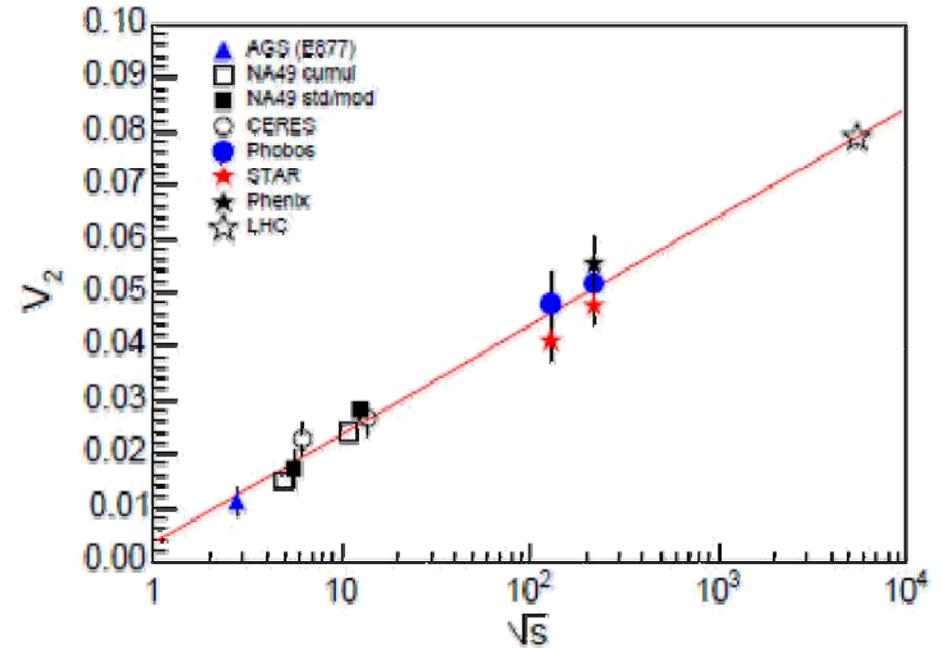


# Flot elliptique

@ RHIC, flot proche de la limite hydro *idéale*, scaling

– Constituants x Excentricité x Énergie cinétique transverse

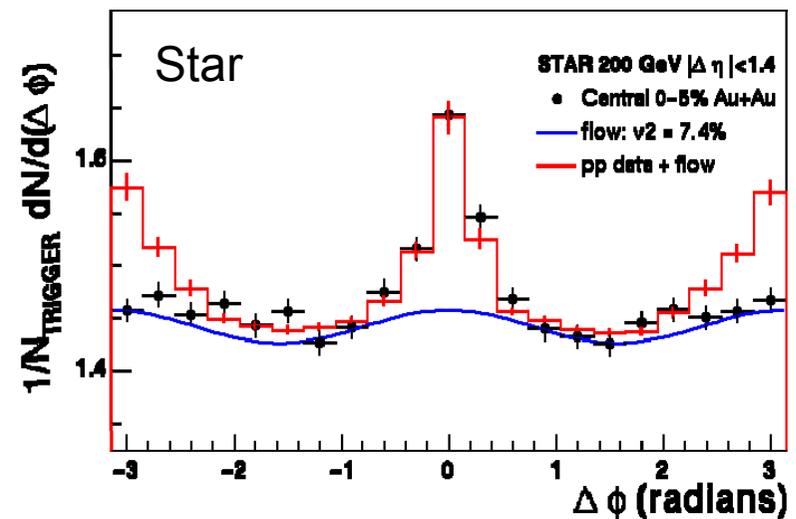
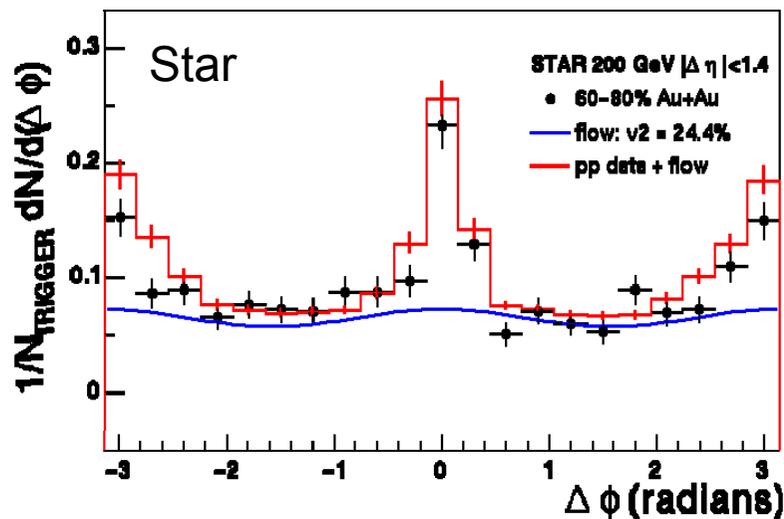
- sQGP liquid  $\rightarrow$  wQGP, gaz ?
- Plan de réaction par exemple dans ECAL
  - $\sigma = 20^\circ$  @  $b = 9$  fm
  - $(dN_{ch}/d\eta = 3000)$
- Mais aussi tracker ou détecteurs vers l'avant
- Également cumulant...



F. Sikler, QM08

# Corrélation de deux hadrons

- On devrait au moins aller à  $p_T > 20$  GeV/c pour la particule de référence (*trigger*)
- Recherche, du *near side*, de l'*away side*, du *ridge*, *mach cones*, etc.
- Soustraction de la contribution du  $v_2$



### 3. Le PInG « High $p_T$ jets and photons »

---

Préoccupé par les aspects calorimétriques  
(ECAL, HCAL)

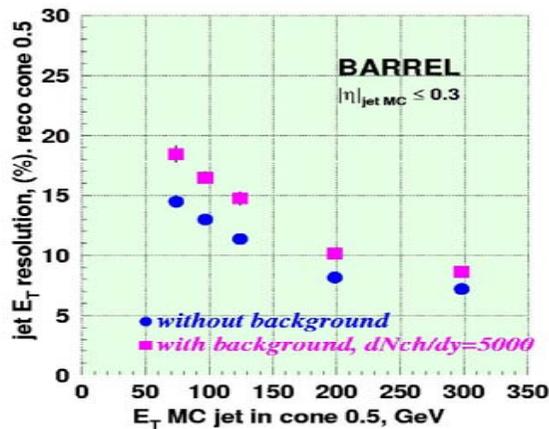
Indispensables pour les mesures de :

- $\langle E_T \rangle$ ,  $dE_T/d\eta$  (bulk, pas de problèmes de stat.)
- Correlation et fragmentation des jets (dijets...)
- Photons isolés

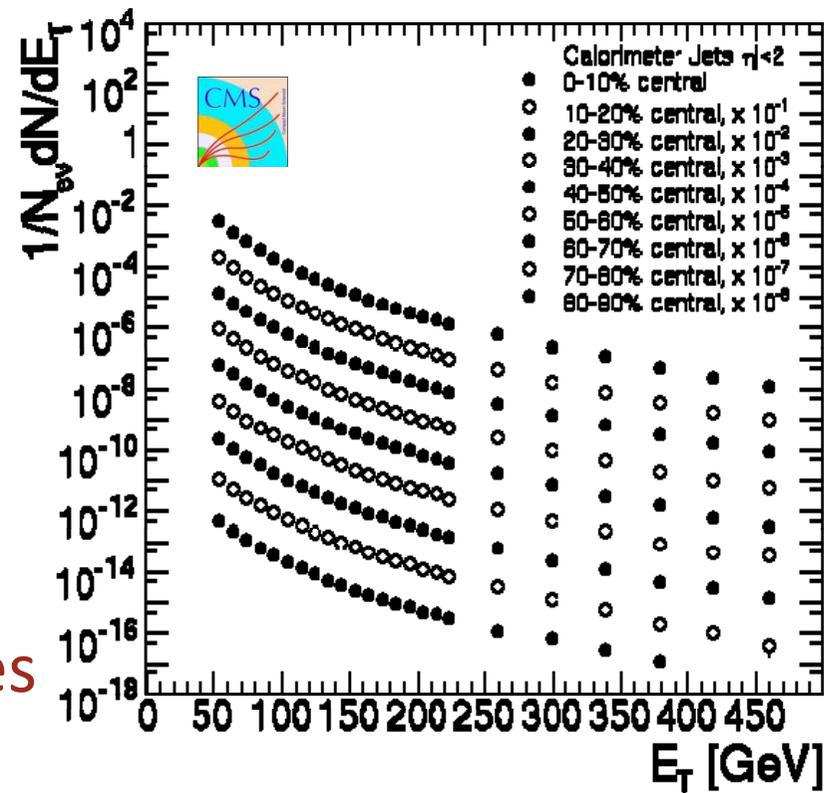
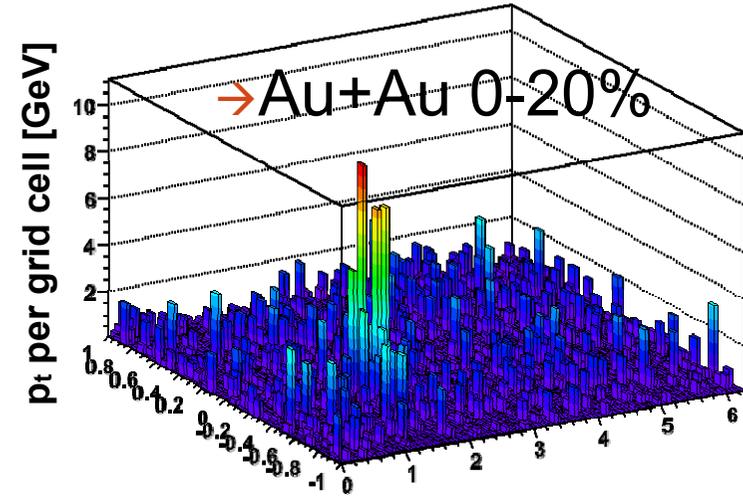
Signal type:	$\gamma$ +jet $p_T > 70$ GeV	jets $E_T(\text{parton}) > 100$ GeV	Direct $\gamma$ $p_T > 25$ GeV
Pb+Pb 4 TeV, $3 \mu\text{b}^{-1}$ (24M ev.)	O(10) 	5,000	450
Pb+Pb 5.5 TeV, $0.5 \text{nb}^{-1}$	4,200 HIN-07-002	$1.5 \times 10^6$ HI PTDR	$4.3 \times 10^5$ HI PTDR

# Reconstruction des jets

- Difficile à RHIC ! Mais STAR →
- CMS nominale → 0,5 TeV
  - $E_T > 50$  GeV
  - 6 millions de jets
  - Résolution 10-20%



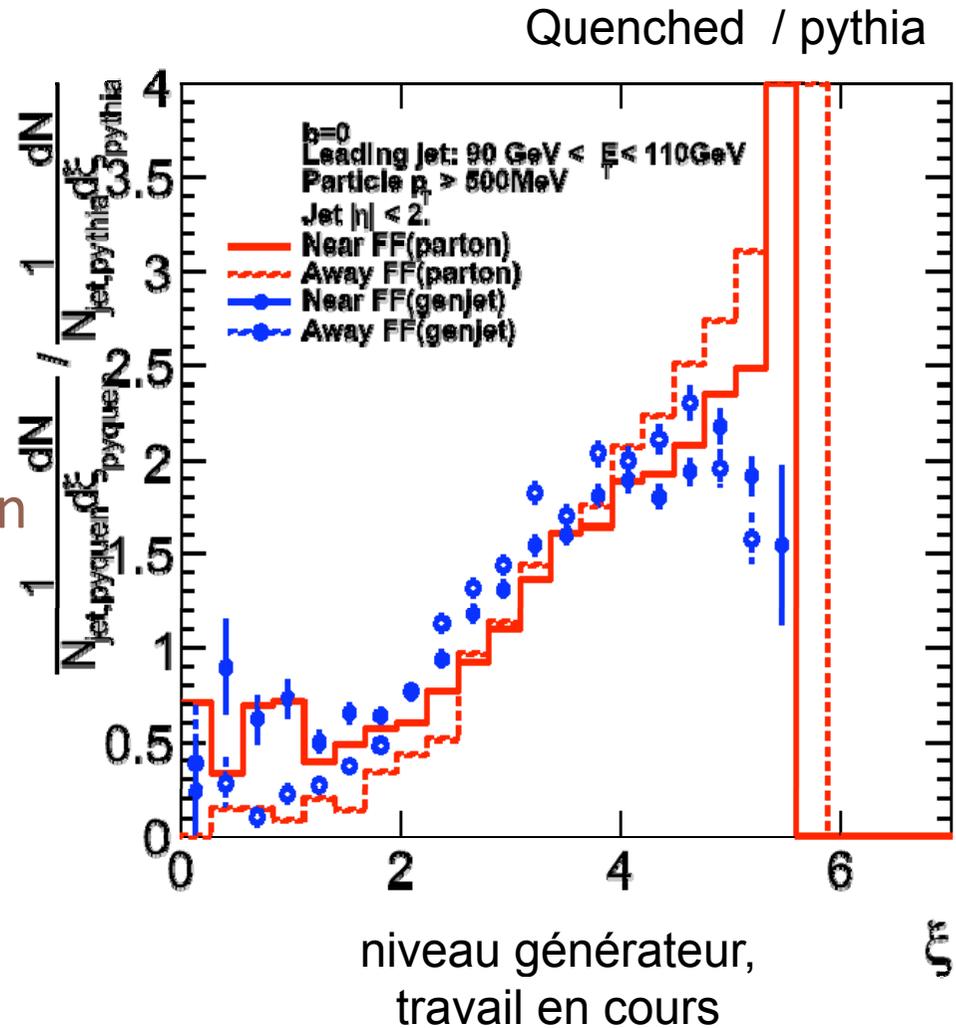
- Études nouvelles et détaillées du jet quenching

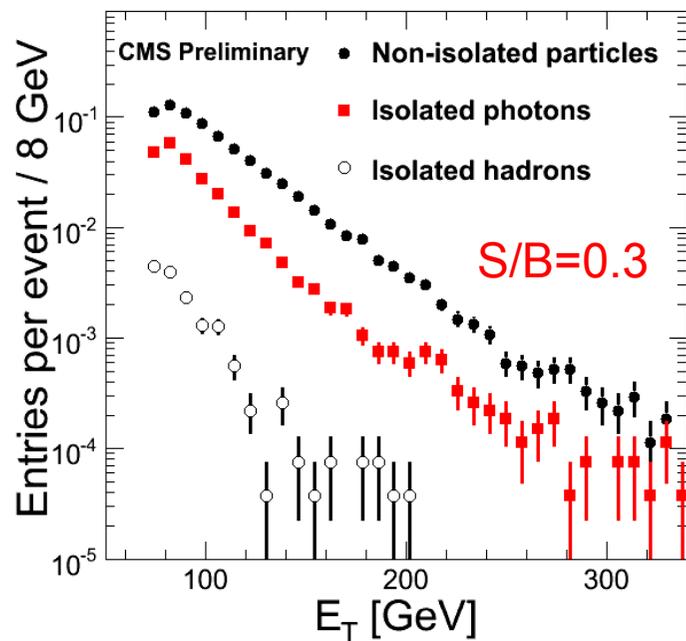


Pb-Pb 0,5 nb<sup>-1</sup>

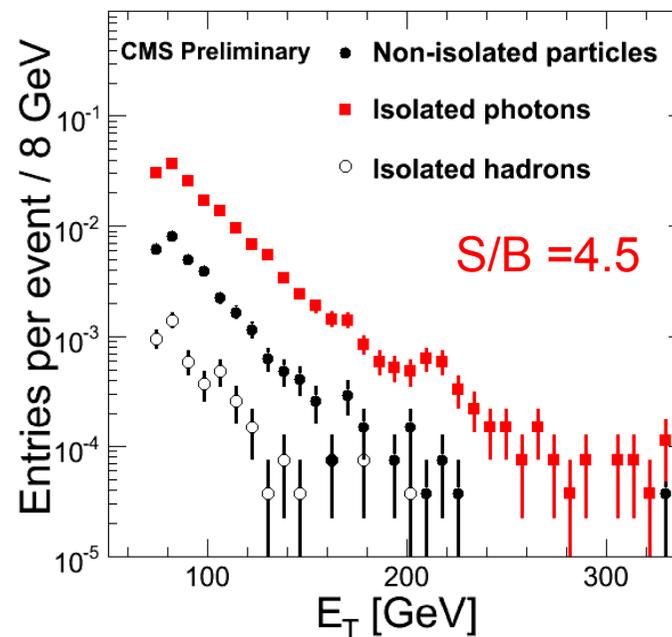
# 1<sup>er</sup> regard aux fonctions de fragmentation ?

- $\gamma$ -jet a priori inaccessible au 1<sup>er</sup> run
- Exemples de ce qu'on pourrait faire
  - Comparer near and away side fragmentation functions...
- Analyse difficile
- Le détail dépendra crucialement des données (pp)...





Photon



Ecal cluster distributions in the most central 10% PbPb collisions

- Analyse multivariables
  - (21 dont forme des clusters Ecal,
  - isolation Hcal, tracker...)
- Efficiency = 60%, Fake = 3.5%, S/B=4.5
- Première étape vers les études  $\gamma$ -jet

C. Loizides, QM08

## 4. Le PInG « Dilepton »

---

C. Silvestre

Préoccupé par tout ce qui concerne les muons

- Pas d'électrons pour l'instant...

N'importe quoi de visible dans le spectre dimuon, pour 1 à 10  $\mu\text{b}^{-1}$

- 20 to 200  $Z^0$  (grand S/B)
- 300 to 3000  $J/\psi$  (avec  $S/B > 0.6$ )
- 40 to 400  $Y$  (mais S/B pourrait être 0.07)

Complexité  
croissante

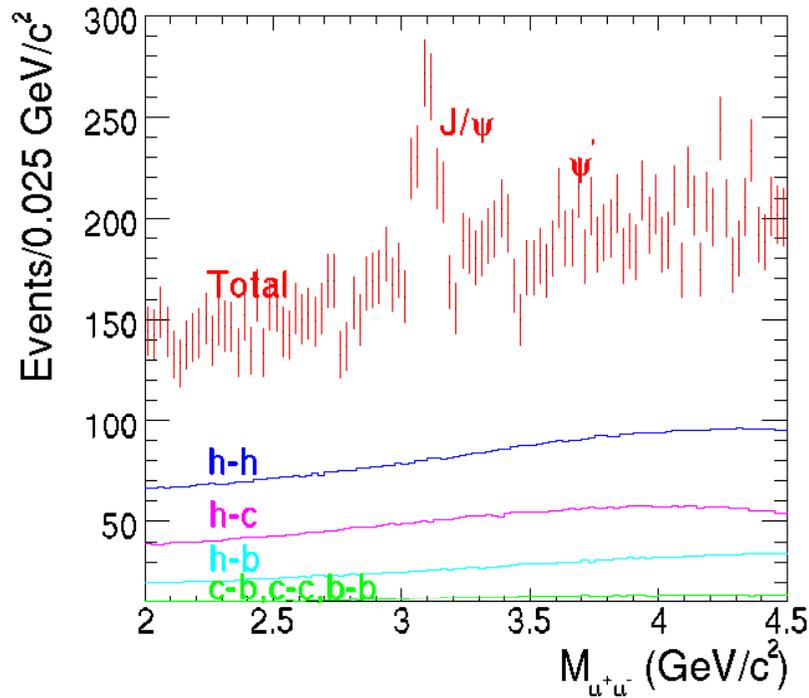
Larges incertitudes théoriques : 5.5 TeV,  
mécanismes de production, shadowing EKS  
(ici), no anomalous effects...

# Quarkonia : le pire des scenarios



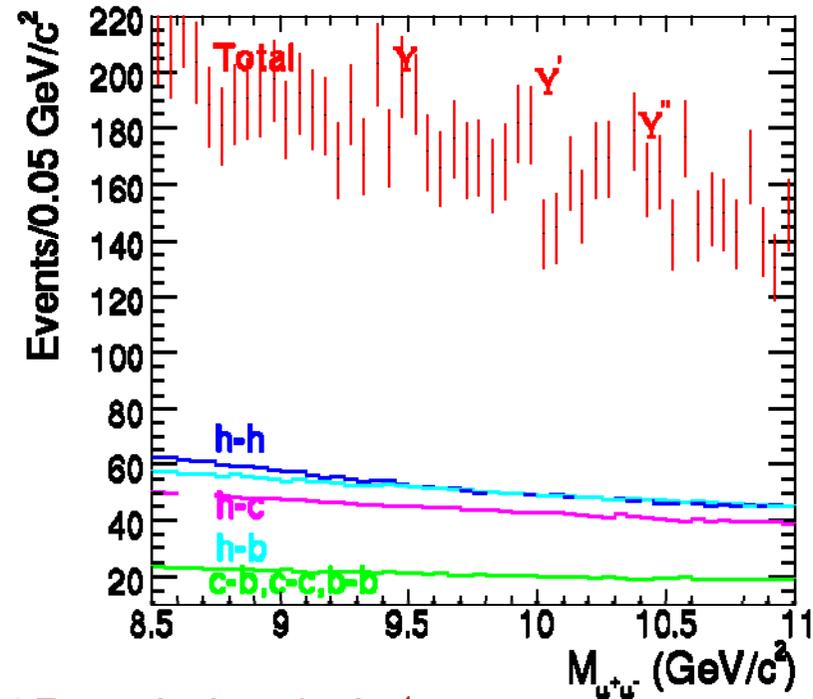
Charmonia,

$\sigma = 35 \text{ MeV}/c^2$  for  $|\eta| < 2.4$



Bottomonia,

$\sigma = 90 \text{ MeV}/c^2$  for  $|\eta| < 2.4$

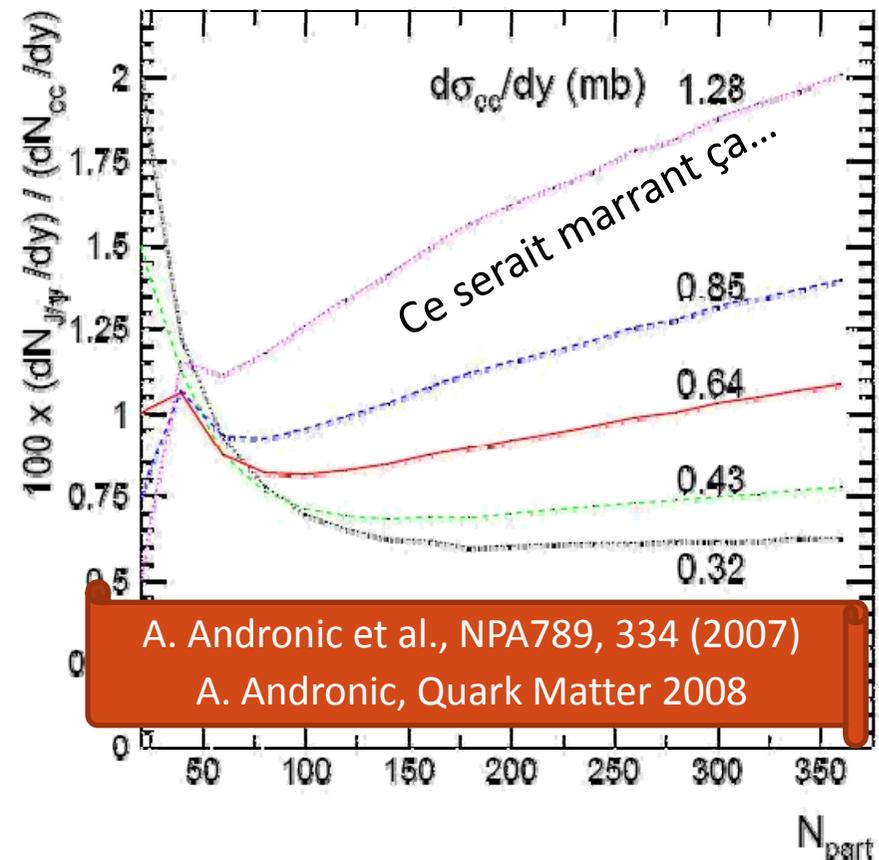


TDR scaled to  $1 \mu\text{b}^{-1}$ ,  
 $|\eta| < 2.4$ ,  $dN_{\text{ch}}/dy = 5000$   
 (no anomalous suppression)

# Transparent pour Louis...

- « Le principal problème à RHIC, ce sont les effets froids »
  - Vrai pour les quarkonia, faux pour le jet quenching
- « Au LHC, il faut une stratégie pour comprendre les effets froids »
  - Vrai, mais à mon avis, on ne comprendras pas mieux qu'à RHIC...
  - Plus de shadowing/saturation
  - Pas la même énergie + asymétrie
  - Plus de feed-downs (contributions des B)
  - etc.
- Mais il reste plusieurs chances
  - Rapport charme fermé / ouvert
  - Rapport des différentes résonances
  - Recombinaison ?

- Si la recombinaison gagne → *unambiguous signature* !
  - Une seule façon de le savoir...
- Un exemple de prédiction



# 5. Forward

---

- (désolé, pas le temps)



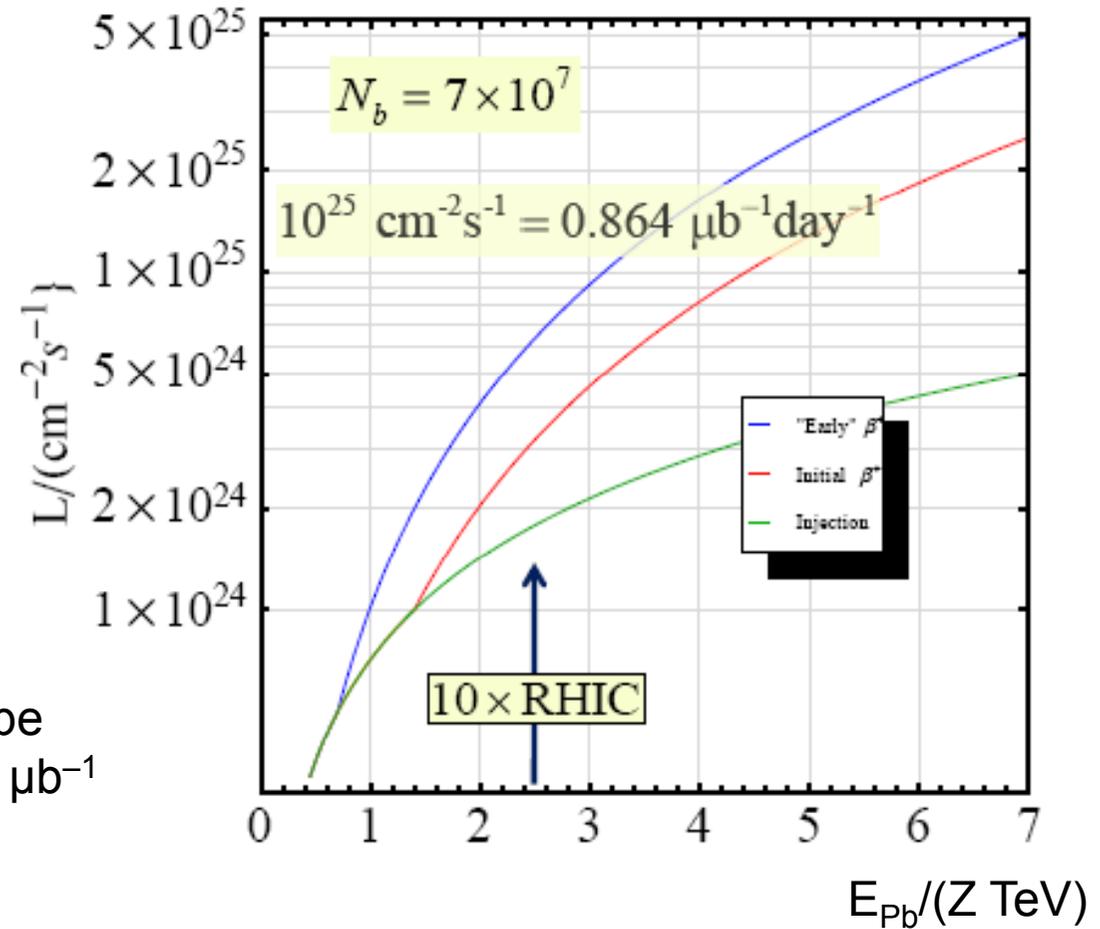
Conclusions ?

Y a du potentiel !  
Y a du boulot !

That's all folks

Back up slides...

# Luminosité initiale

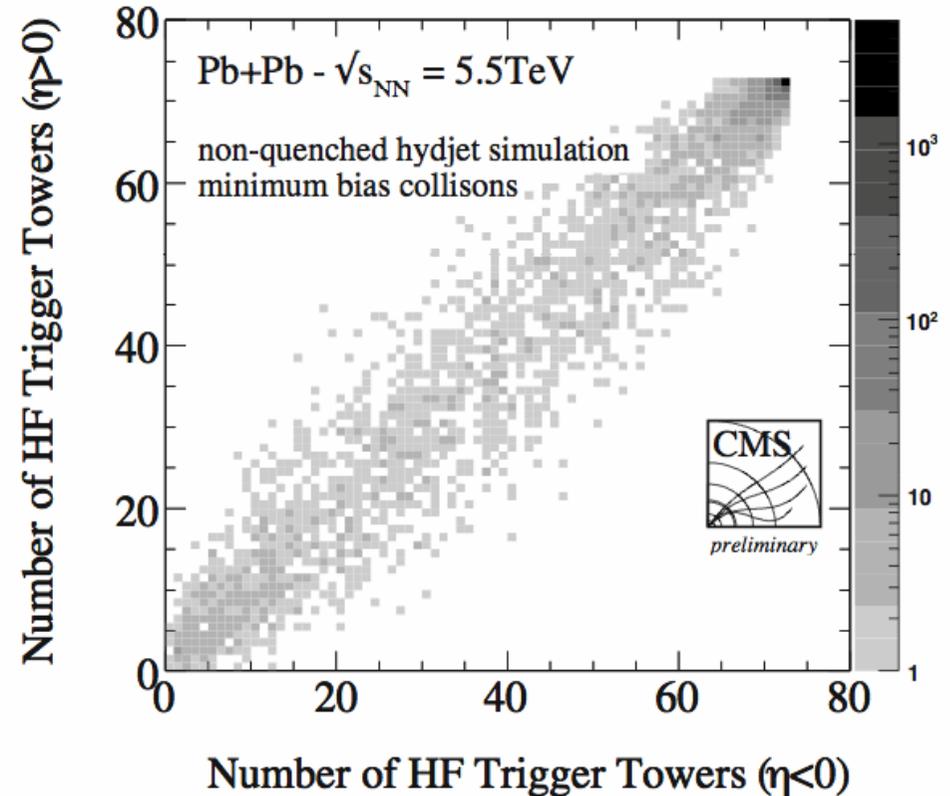


With initial squeeze, we can hope to attain initial physics goal of  $1 \mu\text{b}^{-1}$  in a few days for  $E > 4 Z \text{ TeV}$ .

J.M. Jowett, Chamonix, 2009

# Minimum bias trigger

- **Objectif**
  - Définir une « collision »
  - Essentiel pour mesurer la section efficace « minimum bias »
  - Incertitudes systématiques sur plusieurs observables
- **Implémentation**
  - Trigger de niveau 1 fondé sur le nombre de tour au dessus du seuil dans le calorimètre hadronique vers l'avant ( $3 < |\eta| < 5$ )



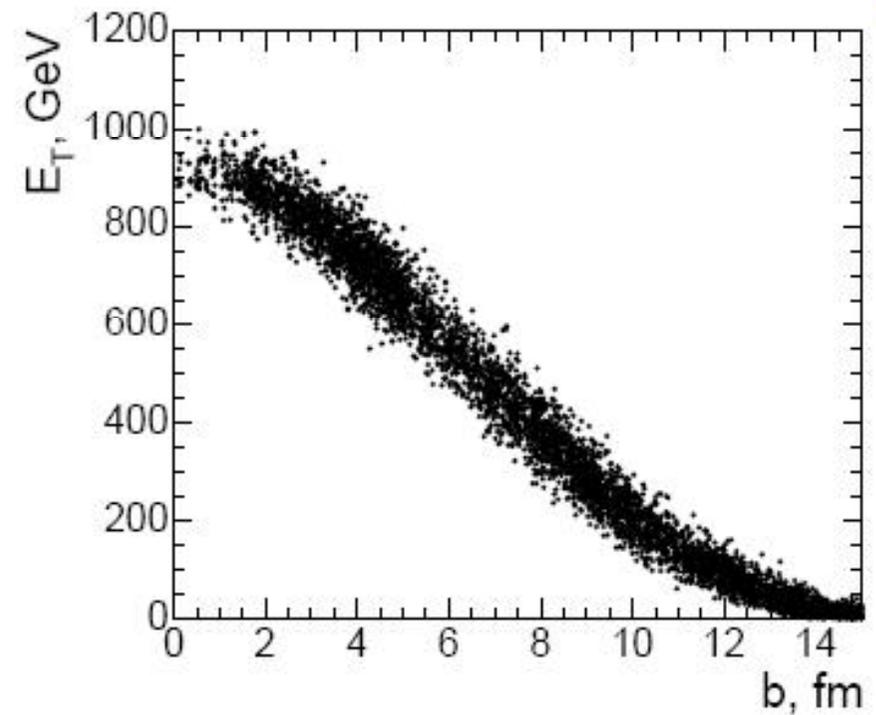
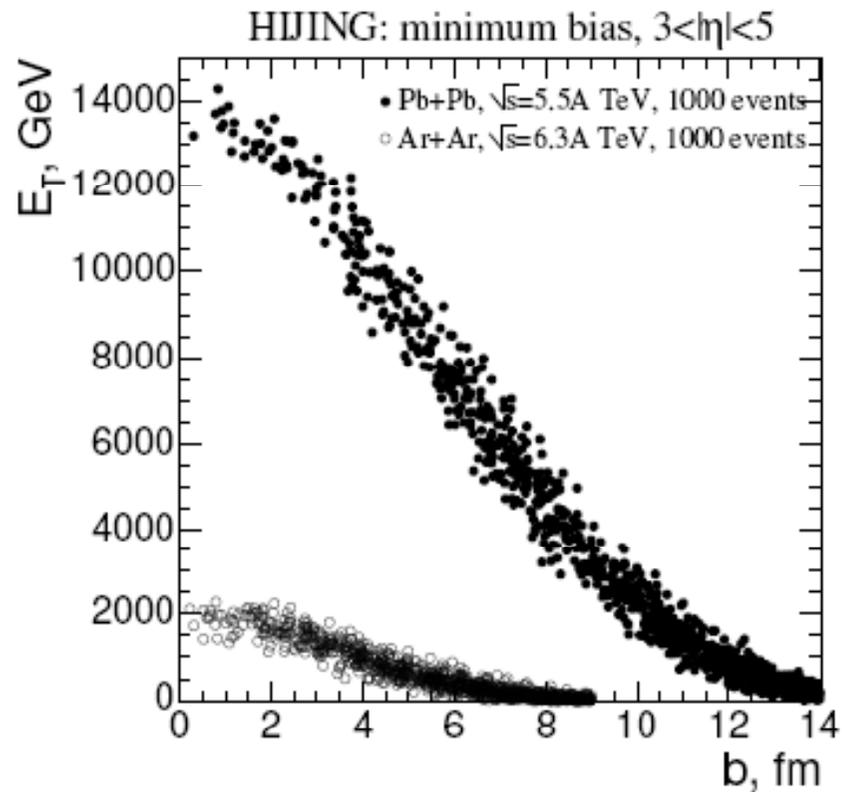
HF Trigger Tower Threshold (Compressed Energy $E_T >$ )	Efficiency (%)	
	HF(P)>0 AND HF(P)>0	HF(P)>4 AND HF(P)>4
0	99.8	97.4
1	97.6	91.9
4	87.8	79.7

# Centralité

---

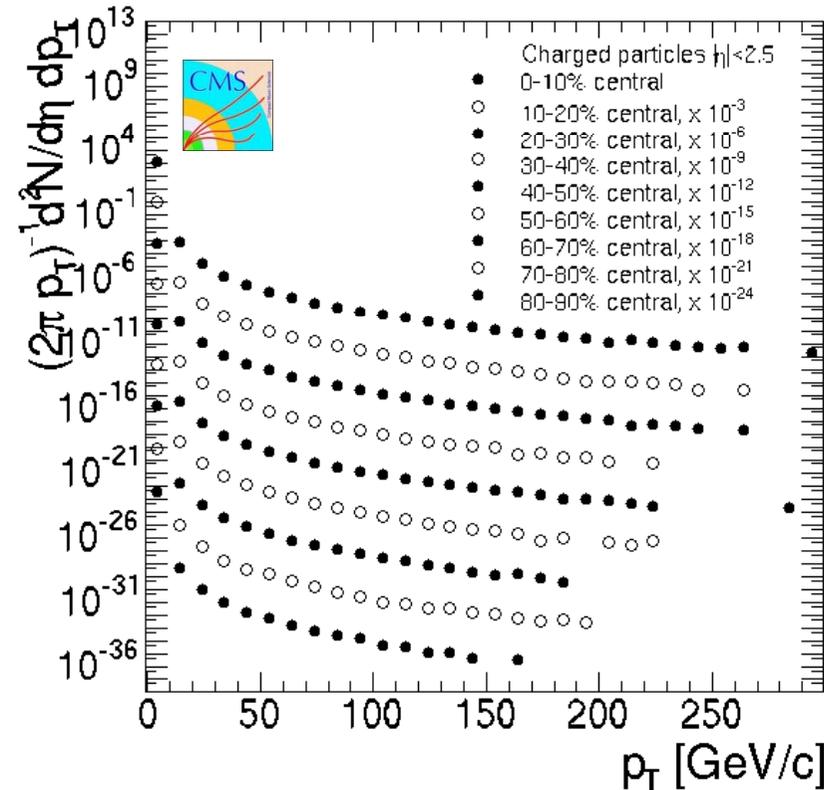
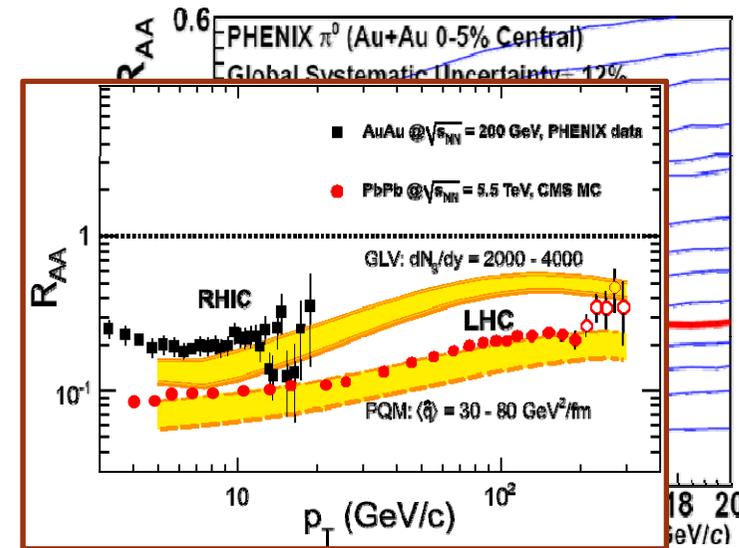
Dans calorimètre hadronique vers l'avant (HF)  $3 < |\eta| < 5$

Dans CASTOR  $5.3 < |\eta| < 6.7$



# Hadron de grand $p_T$

- Mesure phare @ RHIC
- PHENIX  $p_T \rightarrow 20 \text{ GeV}/c$ 
  - Estimation quantitative des propriétés du milieu
    - $dn_{\text{gluons}}/dy = 1400^{+200}_{-375}$
    - (par exemple)
- CMS  $p_T \rightarrow 300 \text{ GeV}/c$ 
  - Résolution  $p_T < 1\%$  ( $\eta=0$ )
  - Mesure de densité, coefficient de transport



PHENIX, PRC77(2008)064907

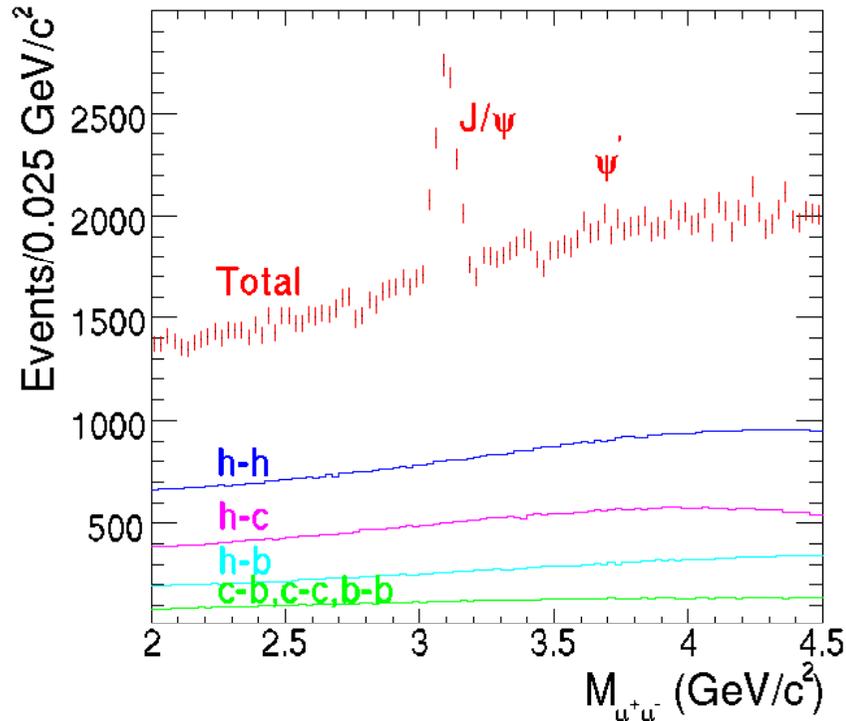
Pb-Pb 0,5 nb<sup>-1</sup>

# Quarkonia : un meilleur scenario



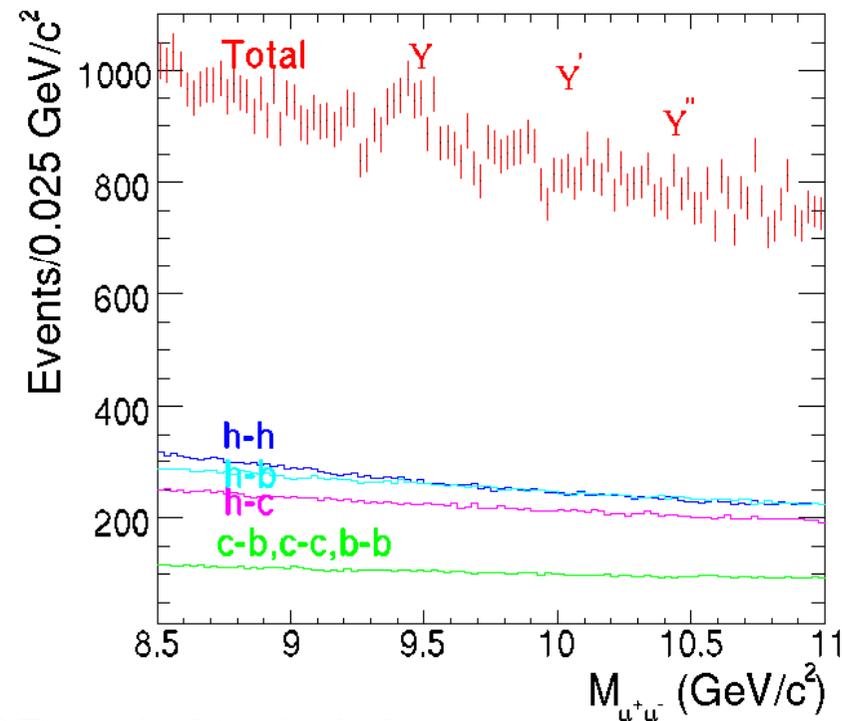
## Charmonia,

$\sigma = 35 \text{ MeV}/c^2$  for  $|\eta| < 2.4$



## Bottomonia,

$\sigma = 90 \text{ MeV}/c^2$  for  $|\eta| < 2.4$



TDR scaled to  $1 \mu\text{b}^{-1}$ ,  
 $|\eta| < 2.4$ ,  $dN_{\text{ch}}/dy = 5000$   
 (no anomalous suppression)



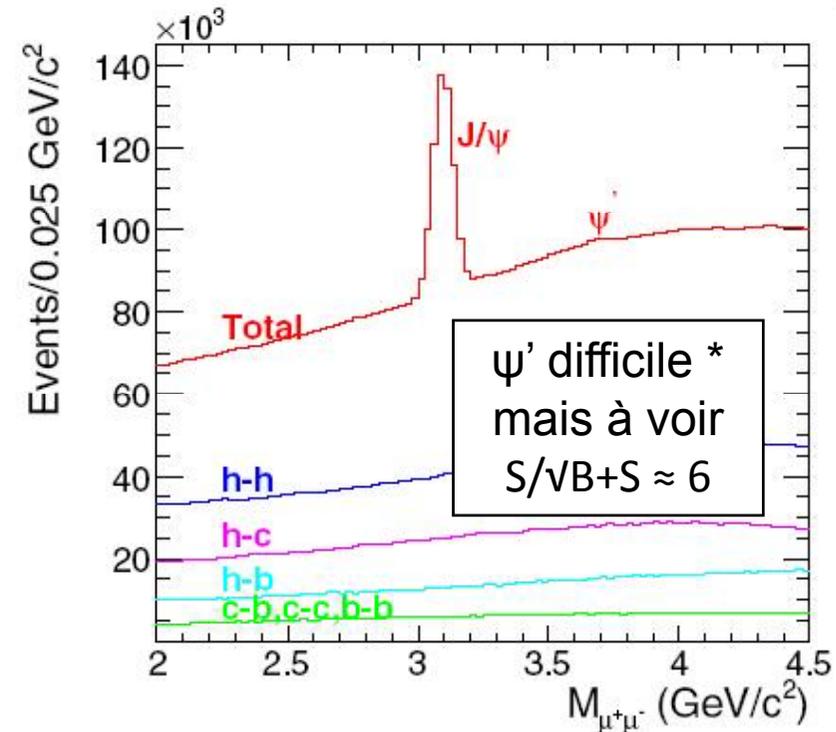
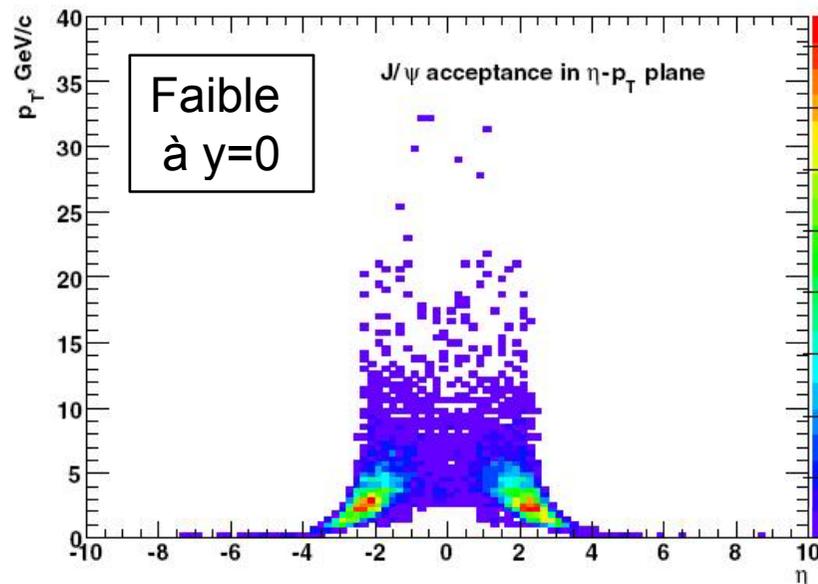
# Des J/ψ dans CMS ?

Estimation (sans suppression)

≈ 150000 pour 0,5 nb<sup>-1</sup> (un mois)

S/B ≈ 0,6 \*

Résolution ≈ 35 MeV/c<sup>2</sup>

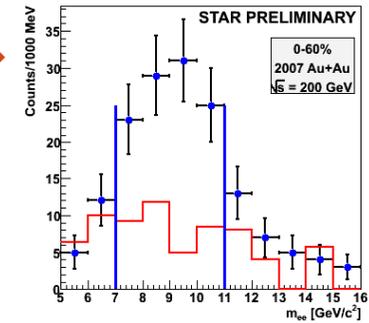


\* pour  $dN_{ch}/d\eta|_{\eta=0} \approx 5000$ , J/ψ dans  $|\eta| < 2,4$  (pessimiste)

D. Dutta, QM08



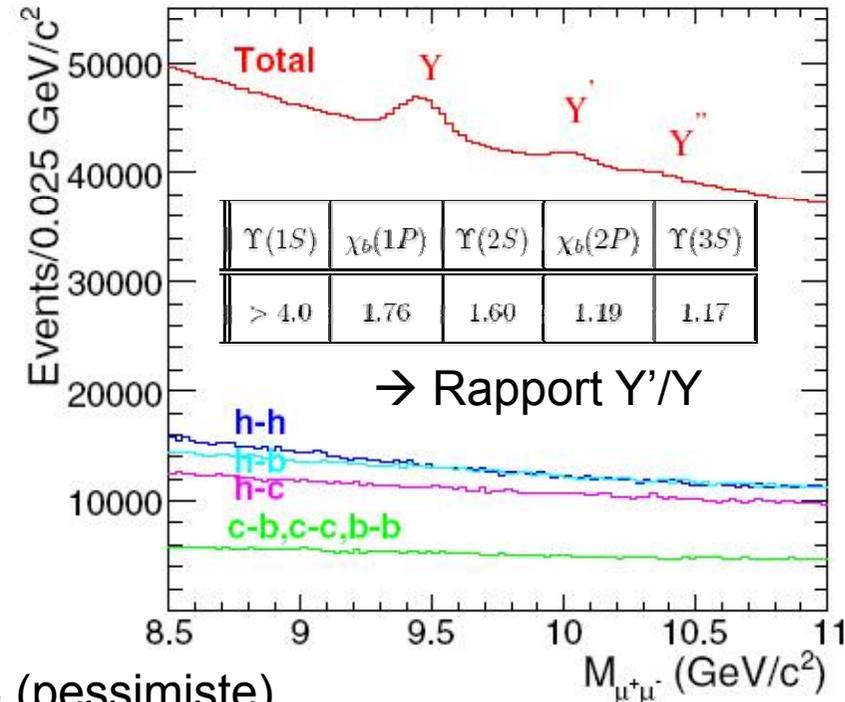
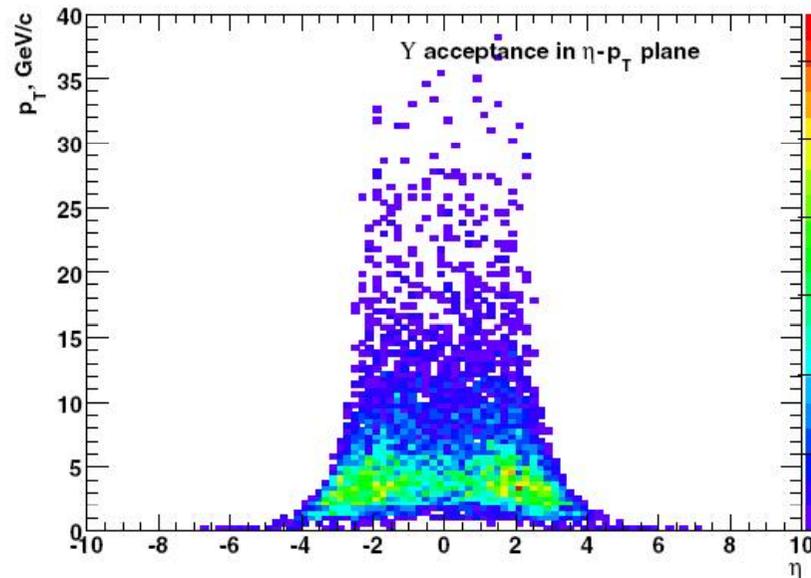
# Des Y dans CMS ? New story →



Estimation (sans suppression)  
20 000 pour  $0,5 \text{ nb}^{-1}$  (un mois)

$S/B \approx 0,07$  \*

Résolution<sup>†</sup>  $\approx 86 \text{ MeV}/c^2$



Pb-Pb  $0,5 \text{ nb}^{-1}$

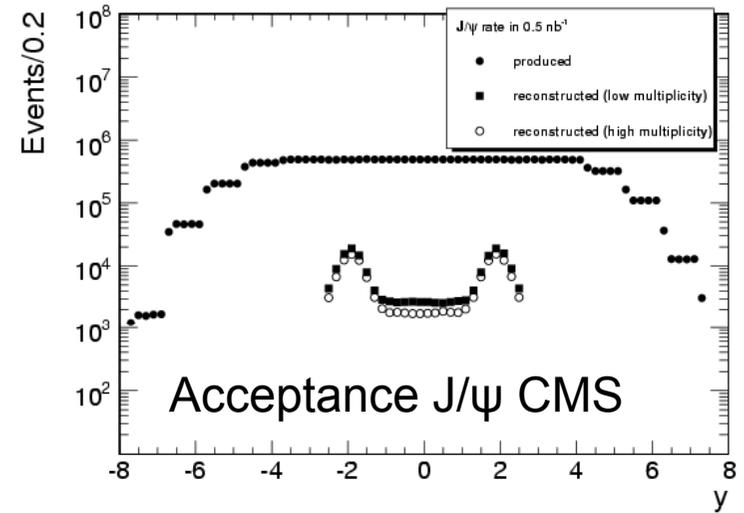
\* pour  $dN_{ch}/d\eta|_{\eta=0} \approx 5000$ , Y dans  $|\eta| < 2,4$  (pessimiste)

†  $54 \text{ MeV}/c^2$  à rapidité centrale  $|\eta| < 0,8$

D. Dutta, QM08

# Mérites comparés

- $J/\psi$ : complémentaire en  $y$
- Upsilon: CMS mieux placé



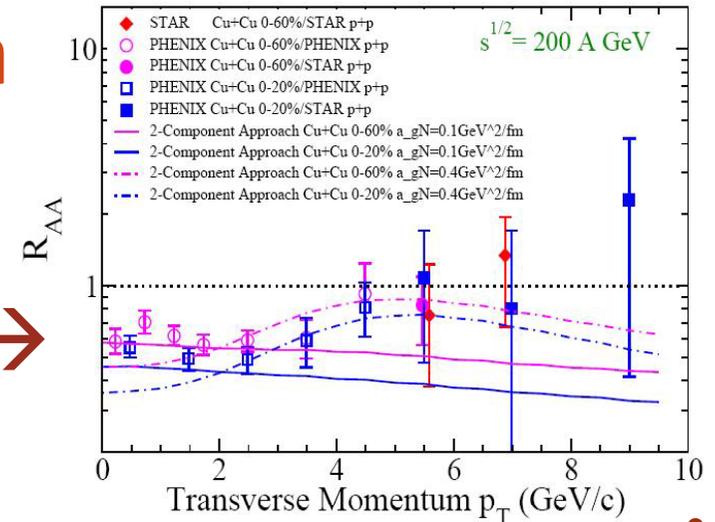
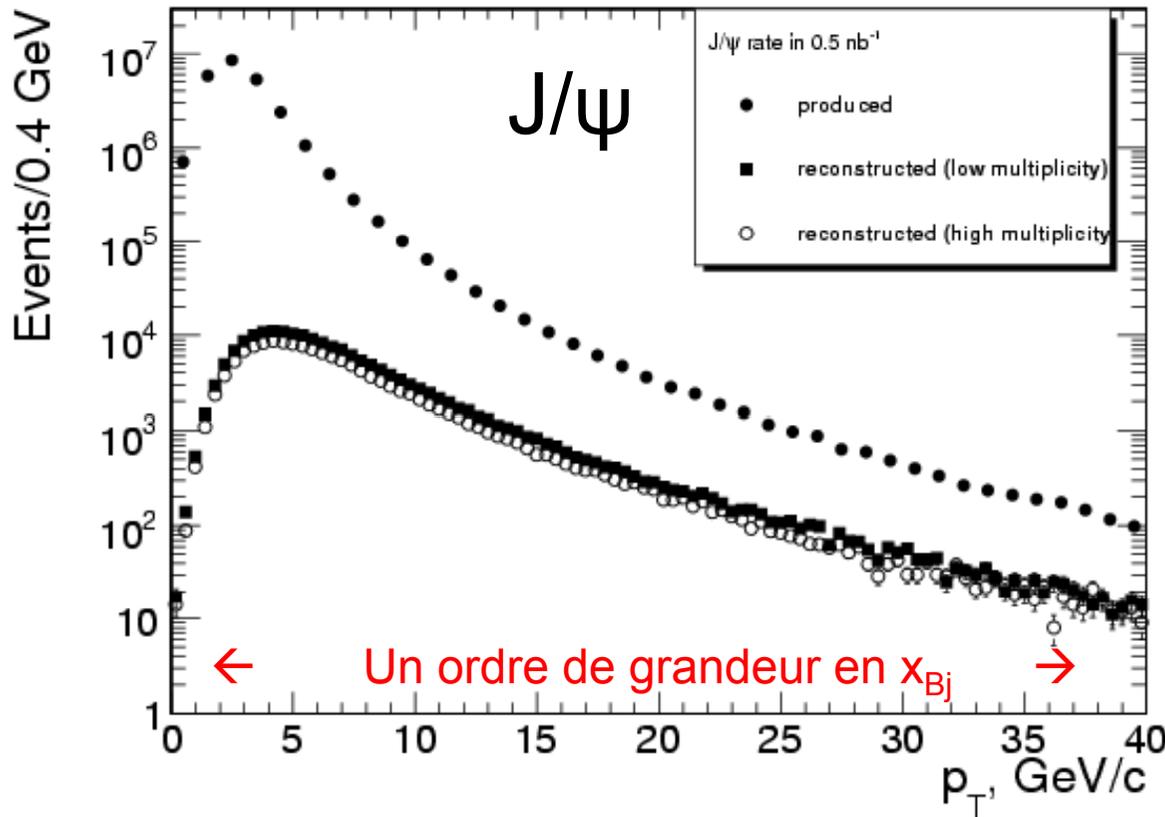
Signal	ALICE	$ \eta $	CMS	$ \eta $	ATLAS	$ \eta $
$J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$	677,000	2.5 – 4	184,000	< 2.4	8,000 – 100,000	< 2.5
$J/\psi \rightarrow e^+e^-$	121,100	< 0.9				
$\psi' \rightarrow \mu^+\mu^-$	18,900	2.5 – 4	$\approx 3,700$ (10 $\sigma$ ) ?		1,400 – 1,800	< 2.5
$\psi' \rightarrow e^+e^-$						
$\Upsilon \rightarrow \mu^+\mu^-$	9,600	2.5 – 4	37,700	< 2.4	15,000 (21,200)	< 2.0 (< 2.5)
$\Upsilon \rightarrow e^+e^-$	1,800	< 0.9				
$D^0 \rightarrow K^\pm\pi^\mp$	13,000	< 0.9				

Pb-Pb 0,5 nb<sup>-1</sup>

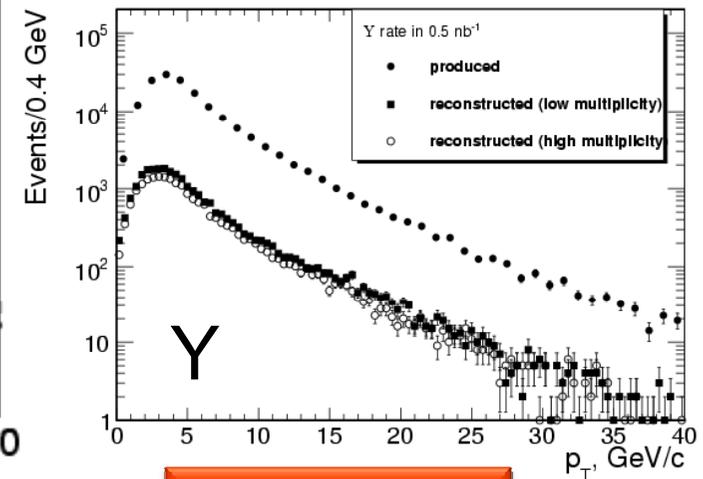
Frawley, Ullrich, Vogt, Phys Rept 462 (2008) 125

# Portée en $p_T$ des quarkonia

@ RHIC, péniblement à 8 GeV/c →



Rapp & Zhao, arxiv:0806.1231

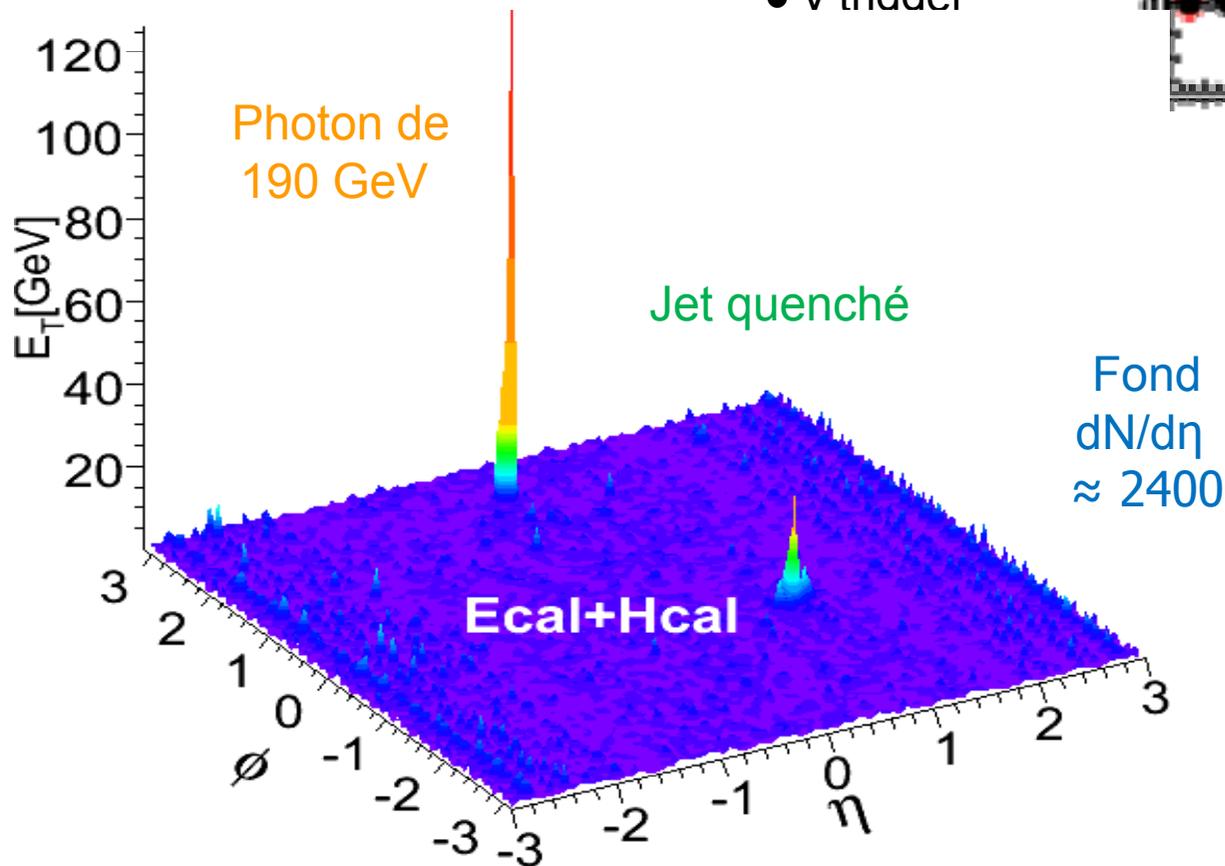


Pb-Pb  $0.5 \text{ nb}^{-1}$

# Gamma-jet (1/2)

C. Loizides, QM08

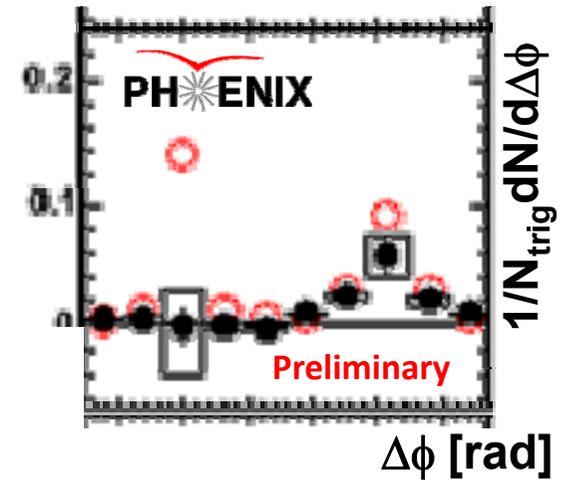
- Difficile à RHIC ! →
- Dans CMS ↓



M. NGuyen



Exemple: p+p  
Trigger 7-9 GeV  
Assoc 2-3 GeV  
○  $\pi^0$  trigger  
● v trigger

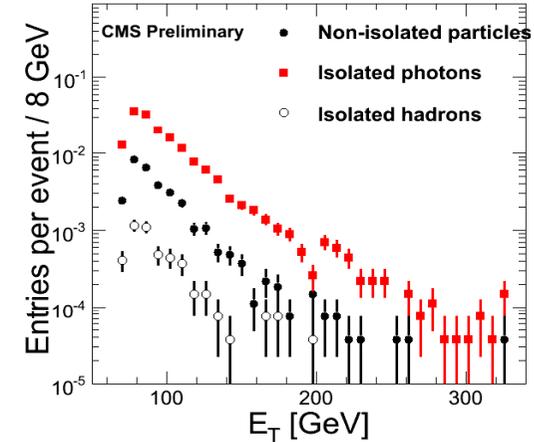


# Gamma-jet (2/2)

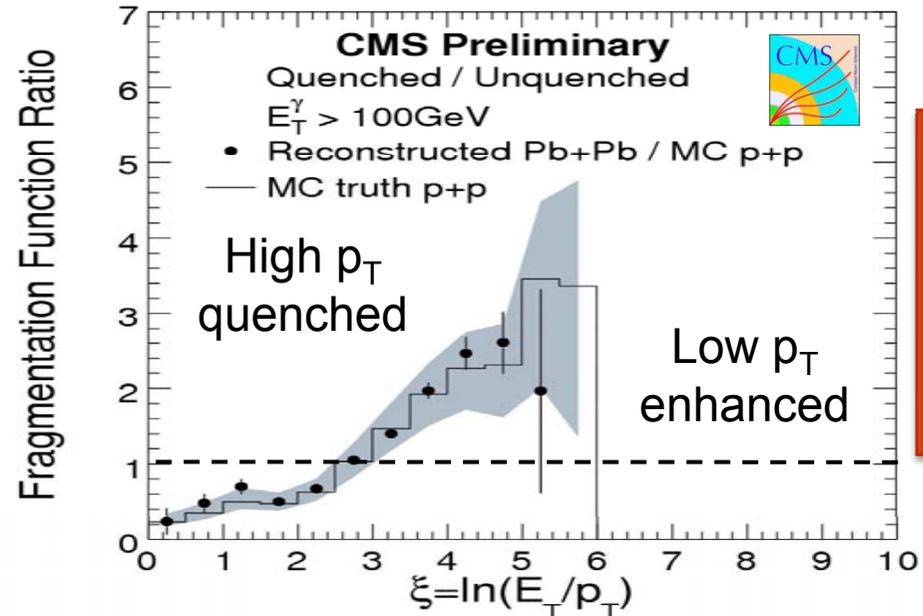
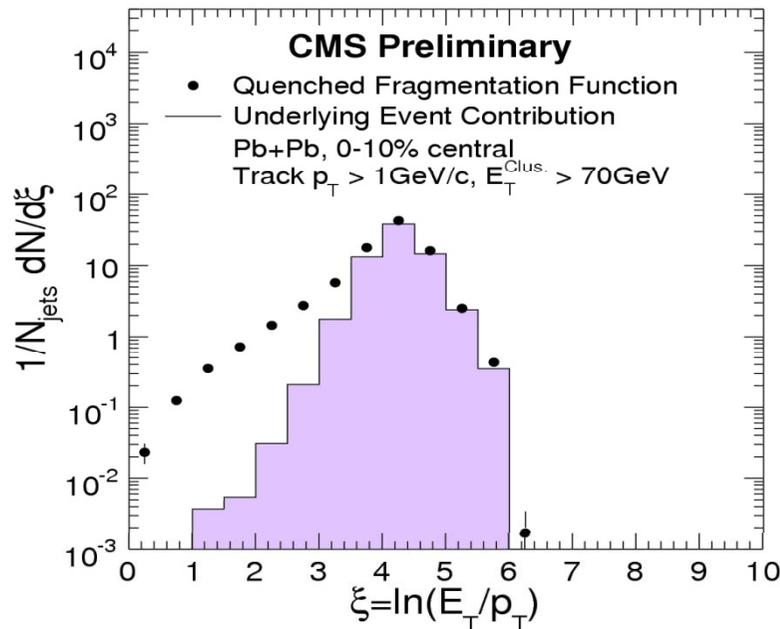
C. Loizides, QM08

- Photon Id (21 variables, de forme, isolation) →
- Événement sous-jacent soustrait ( $\Delta\phi=90^\circ$ ) ↓

S/B = 4.5  
 Fake ~ 3.5%  
 Eff ~ 60%



- Fonctions modifiées de fragmentation



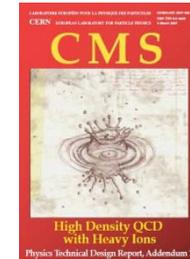
Pb-Pb 0,5 nb<sup>-1</sup>

# Plus de nombres...

$dN_{ch}/d\eta _{\eta=0}, \Delta\eta$	S/B	N(J/ $\psi$ )	S/B	N( $\Upsilon$ )	N( $\Upsilon'$ )	N( $\Upsilon''$ )
2500, $ \eta  < 2.4$	1.2	184 000	0.12	26 000	7300	4400
2500, $ \eta  < 0.8$	4.5	11 600	0.97	6400	2000	1200
5000, $ \eta  < 2.4$	0.6	146 000	0.07	20 300	5900	3500
5000, $ \eta  < 0.8$	2.8	12 600	0.52	6000	1800	1100

$dN_{ch}/d\eta _{\eta=0}, \text{PbPb centrality}$	S/B	N(J/ $\psi$ )	S/B	N( $\Upsilon$ )
2500, 0–10% (central)	0.9	72 000	0.1	9200
2500, 15–50% (semicentral)	1.5	100 000	0.2	15 000
2500, 60–100% (peripheral)	6.7	10 400	0.9	1600
5000, 0–10% (central)	0.5	50 000	0.04	6200
5000, 15–50% (semicentral)	0.6	85 000	0.08	12 000
5000, 60–100% (peripheral)	2.5	11 000	0.4	1600

ΦTDR, add.1



# Et j'en passe...

- Ultraperipheral collisions, en particulier
  - $\Upsilon \rightarrow e^+ e^-, \mu^+ \mu^-$
- $B \rightarrow J/\psi$ , vertex  $50 \mu\text{m}$
- Dimuons de haute masse
  - $B B$
- $Z^0, Z^0$ -jet
- ...

