Les premiers résultats sur le plasma de quarks et de gluons dans l'expérience CMS du LHC

Lamia Benhabib

Laboratoire le Prince-Ringuet

Séminaire au LPC

25/02/11

+ Plan

- Introduction : Physique des ions lourds
- Quelques faits marquants à RHIC
- Prise de données dans CMS
- Premières observations en Pb+Pb, premières analyses
  - Perte d'énergie du jet dans le milieu "unbalenced jets"
  - Mesure des di-leptons
- Conclusion

+ Physique des ions lourds

- La QCD sur réseau prédit une transition de phase de la matière nucléaire ordinaire vers un état déconfiné : le plasma de quarks et de gluons PQG
  - Température critique (> T_c 170MeV)
  - Densités d'énergies extrêmes (>1GeV/fm^3)
- Cet état de la matière qui aurait existé dans les premiers instants de l'univers est recréé en laboratoire à l'aide des collisions d'ions lourds à des vitesses ultra relativistes
- But : comprendre et étudier les propriétés du PQG

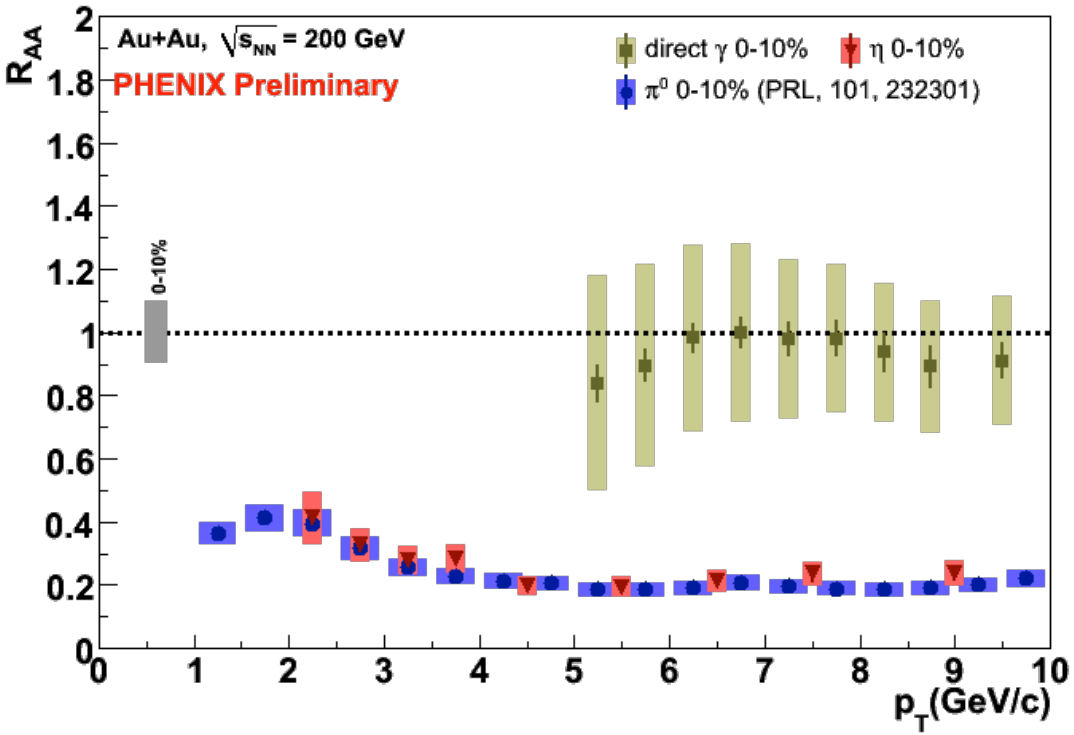
A RHIC, étude du PQG

- Collisions Cu+Cu et Au+Au à $\sqrt{s}$ = 200GeV
- Densité d'énergie de 5GeV/fm^3 bien au delà de la densité critique
- Ecoulement elliptique : comportement collectif des partons
- Modification du taux de production des particules de haut p_T comparé à celui en p+p
- L'énergie du parton issu de la collision est modifiée par la présence d'un milieu fortement couplé : le sQGP

A RHIC, suppression de particules de haut p_T

- Rapport de modification nucléaire

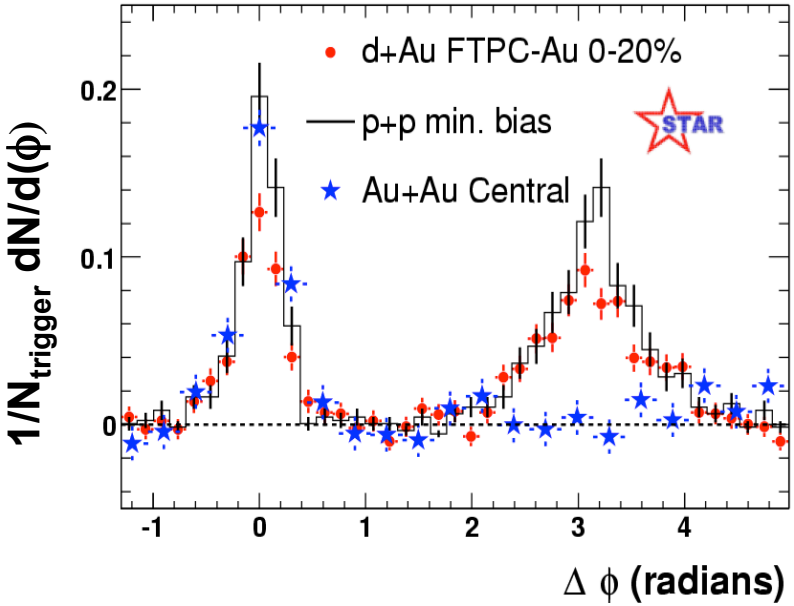
$$R_{AA} = \frac{dN^{AuAu}}{dN^{PP} \times \langle N_{coll} \rangle}$$



- Suppression des hadrons de haut p_T dans les collisions centrales
- Photons peu sensible au milieu

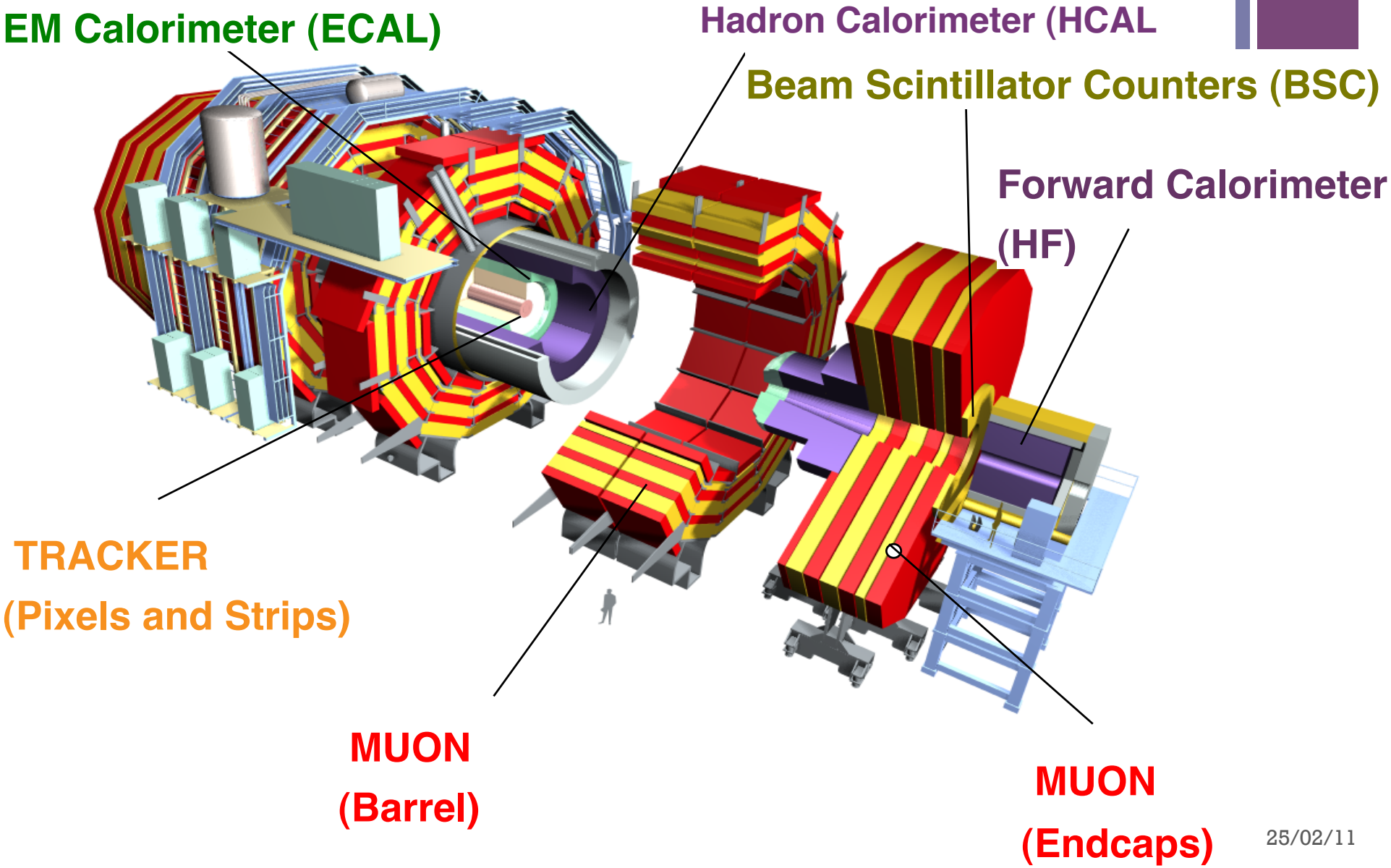
A RHIC, corrélation des hadrons chargés

- Correlation des hadrons chargés
  - $2GeV/c < p_{T,partner} < p_{T,trigger}$
  - $4GeV/c < p_{T,trigger} < 6GeV/c$



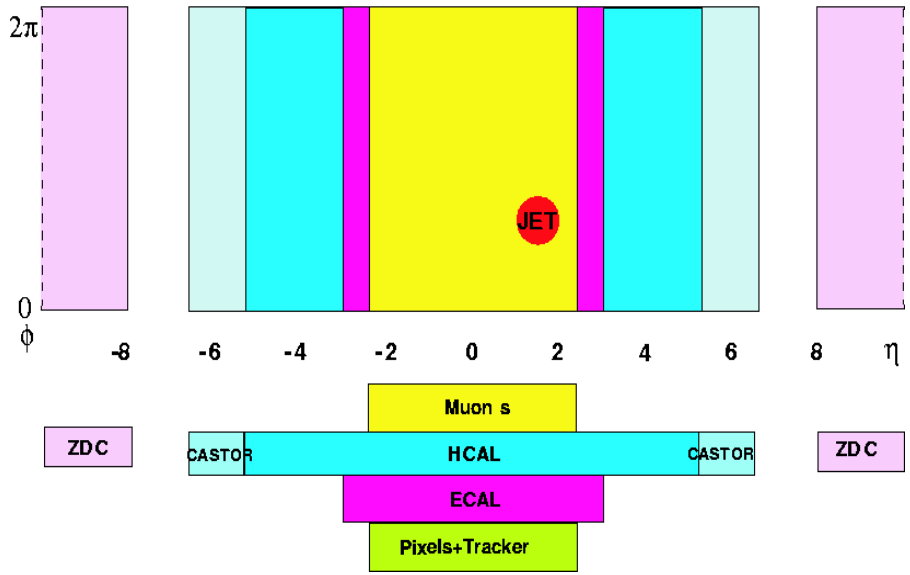
- L'effet du « jet quenching » a été observé pour la première fois à RHIC. Phénomène mieux étudié au LHC car meilleure reconstruction des jets

Au LHC, Compact Muon Solenoid



+ Quelques caractéristiques utiles

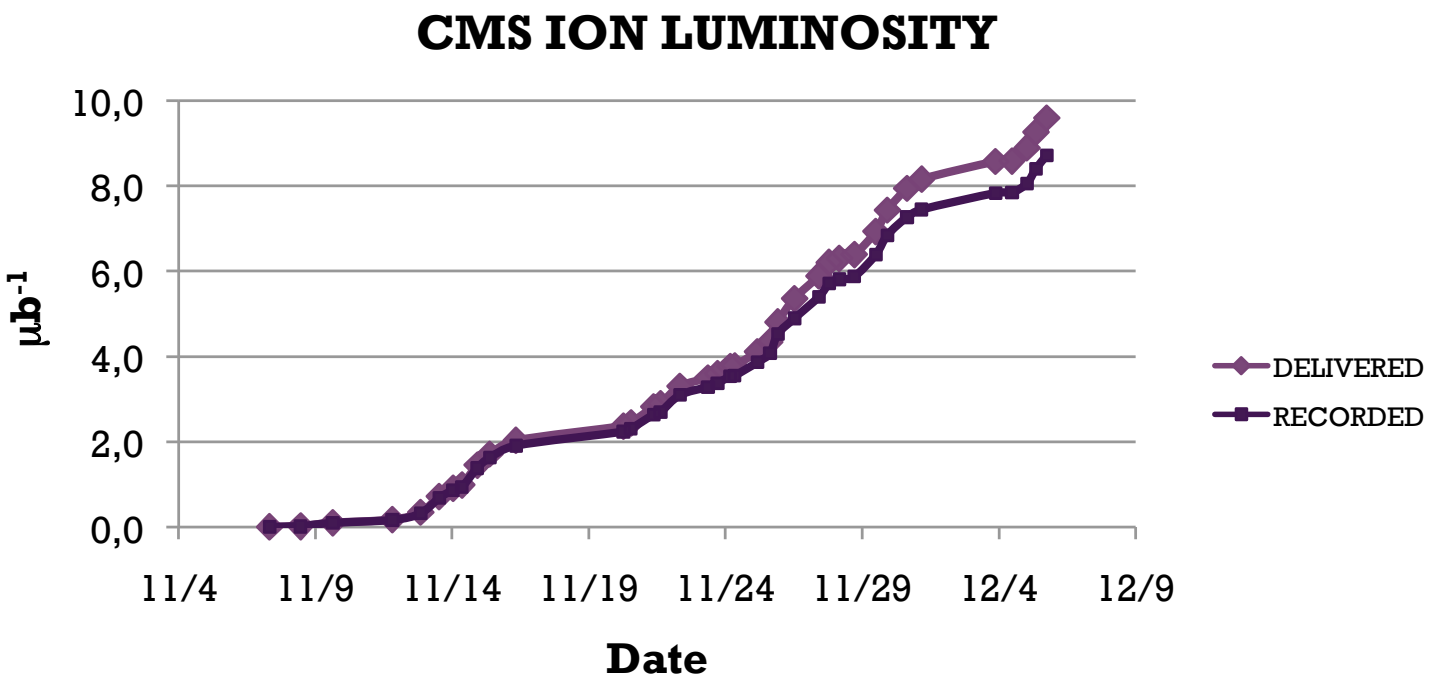
- Grande couverture angulaire



- Champ magnétique important 3.8 T
- Grande bande passante
  - Niveau 1 = Toutes collisions Pb-Pb (≈ 5 kHz)
  - Trigger de haut niveau (HLT) → ≈ 100 Hz

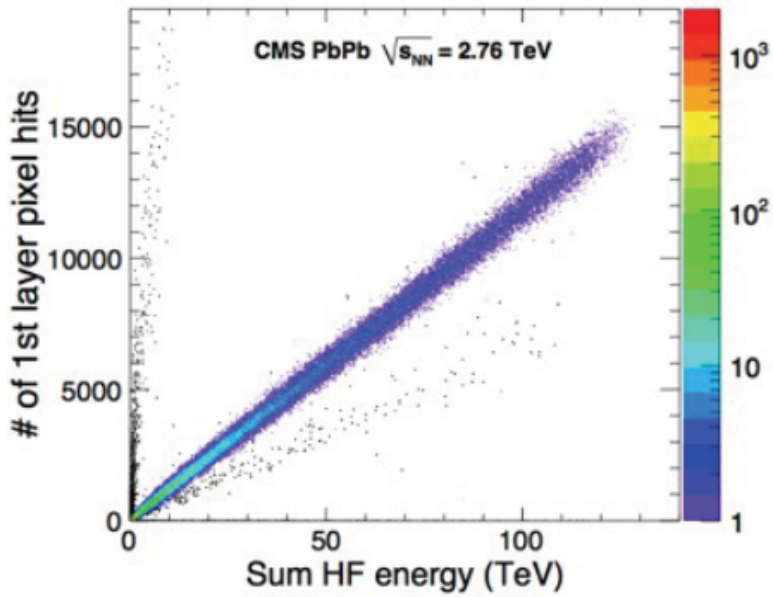
CMS, prise de données

- 8 Novembre, premières collisions Pb-Pb **à 2.76 TeV**
- Une énergie 14 fois plus importante que celle de RHIC
- Luminosité enregistrée : 8.72 μ b^{-1}

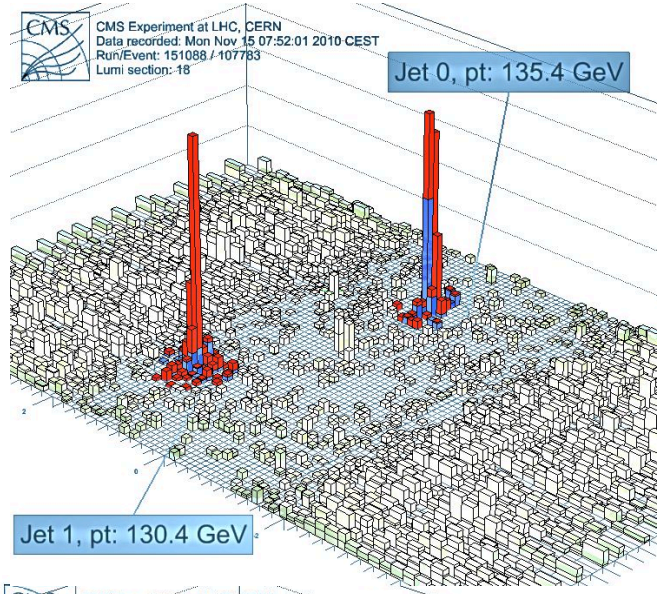


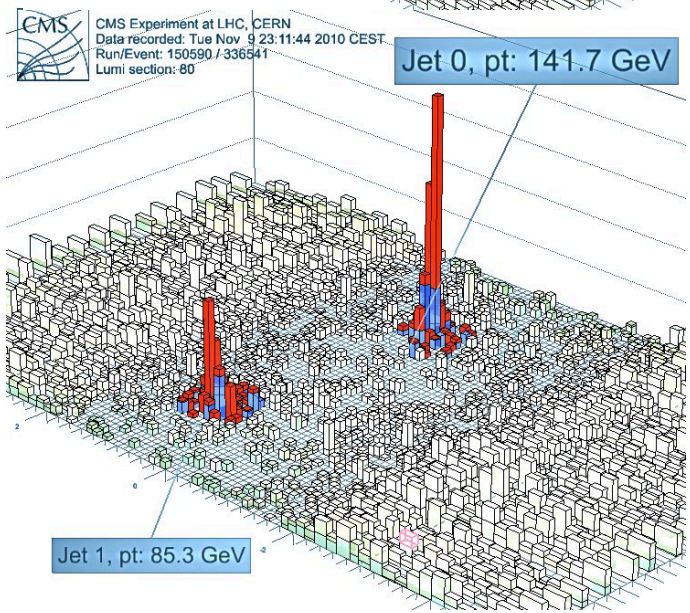
Système de déclenchement et sélection des événements

- Trigger niveau 1
  - Minimum Bias : coïncidence de deux compteurs scintillateurs ou de deux tours HF (efficacité > 97%)
  - Muon : efficacité 94% pour les dimuons de haut p_T
- HLT : Jets, Muons, Photons
- Offline
  - Veto sur le scintillateur de beam halo
  - Au moins 3 tours HF de chaque côté avec un seuil (E > 3 GeV)
  - Reconstruction du vertex avec au moins 2 traces



+ Di-jet dans CMS





arXiv:1102.1957v2 [nucl-ex] 10 Feb 2011

CERN-PH-EP/2011-001
2011/02/10

CMS-HIN-10-004

Observation and studies of jet quenching in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV

The CMS Collaboration*

Abstract

Jet production in PbPb collisions at a nucleon-nucleon center-of-mass energy of 2.76 TeV was studied with the CMS detector at the LHC, using a data sample corresponding to an integrated luminosity of 6.7 μb^{-1}. Jets are reconstructed using the energy deposited in the CMS calorimeters and studied as a function of collision centrality. With increasing collision centrality, a striking imbalance in dijet transverse momentum is observed, consistent with jet quenching. The observed effect extends from the lower cut-off used in this study (jet $p_T = 120$ GeV/c) up to the statistical limit of the available data sample (jet $p_T \approx 210$ GeV/c). Correlations of charged particle tracks with jets indicate that the momentum imbalance is accompanied by a softening of the fragmentation pattern of the second most energetic, away-side jet. The dijet momentum balance is recovered when integrating low transverse momentum particles distributed over a wide angular range relative to the direction of the away-side jet.

Submitted to Physical Review C

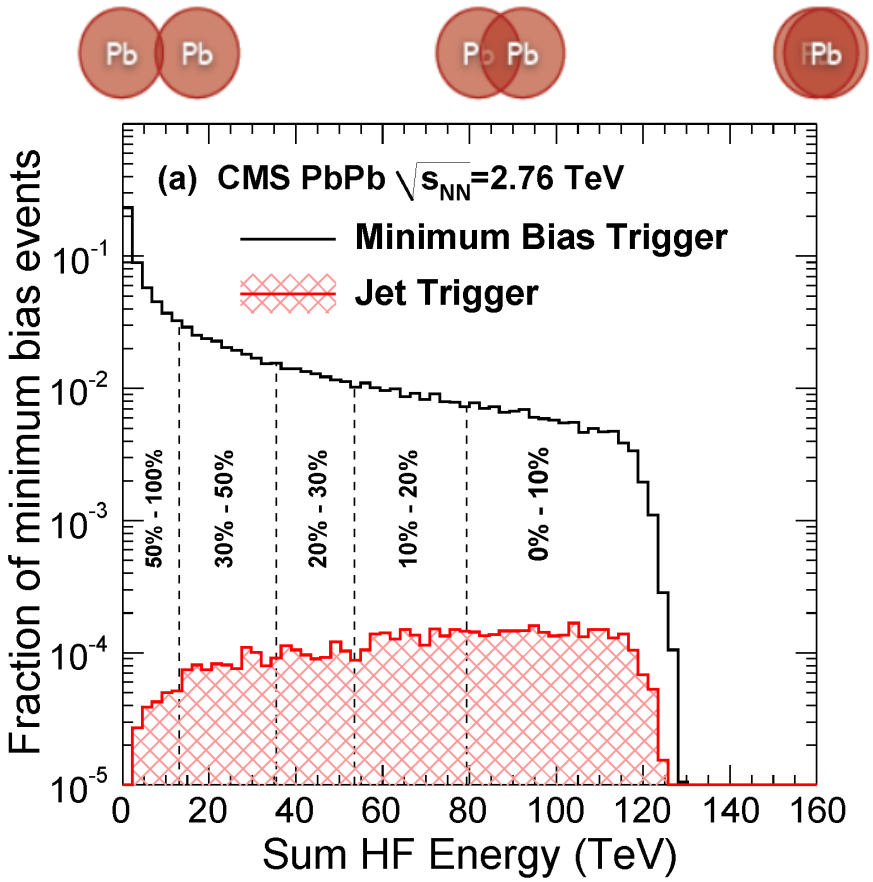
+ Di-jet dans CMS

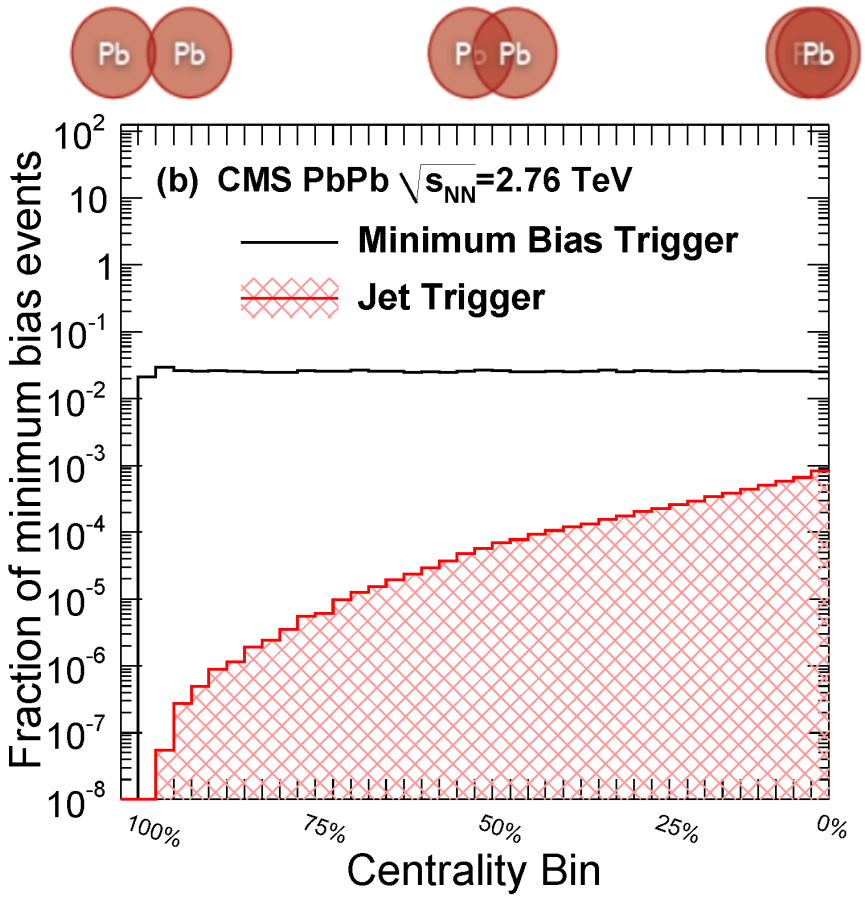
- Classe de centralité utilisées
- Méthode de reconstruction des jets et soustraction du bruit de fond
- Méthode d'analyse
  - Résolution et échelle d'énergie
  - Efficacité de reconstruction de jets
  - Corrélations azimutales
  - Evidence de l'asymétrie des jets
  - Dépendance en p_T du leading jet
  - Fraction des jets balancés
- Où va donc l'énergie ?
  - Corrélations jets-particules
  - p_T manquant

+ En ions lourds, notion de centralité

- La centralité (%) d'une collision est inversement proportionnelle à l'énergie déposée dans HF

- Pour les Jets

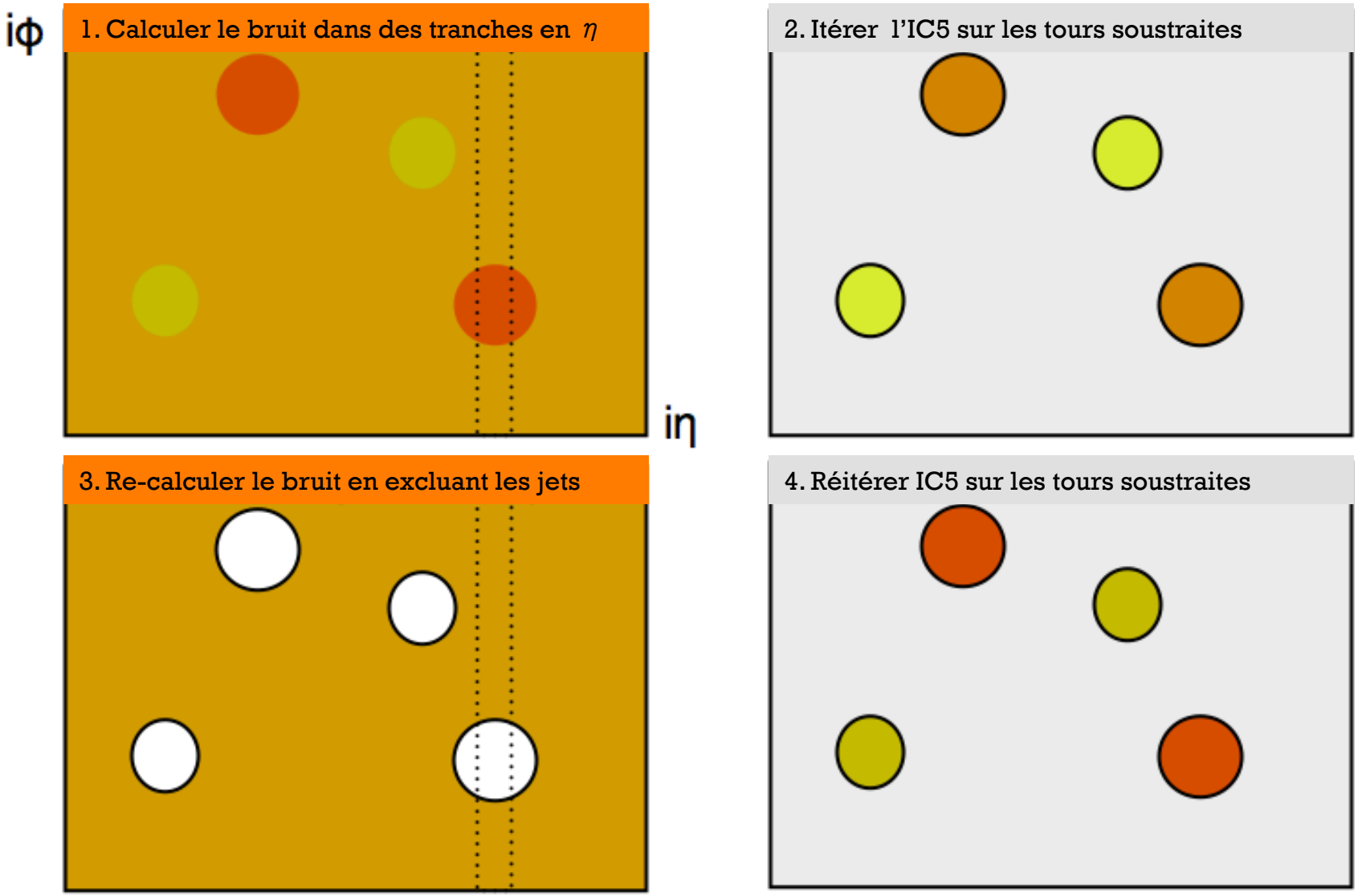




+ Reconstruction des Jets dans CMS

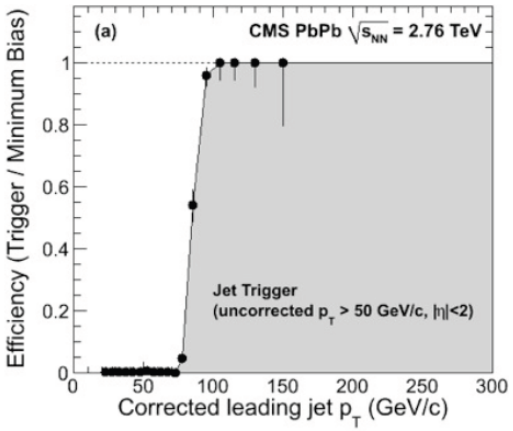
- 2 types de jets reconstruits
  - Jets calorimétrique
    - utilisent le calorimètre électromagnétique ECAL et le calorimètre hadronique HCAL
  - Jets Particle Flow
    - utilisent le trajectographe et les deux calorimètres ECAL et HCAL
- Algorithmes de reconstruction des jets
  - Algorithme du Cone Iteratif IC5 (R=0.5) pour reconstruire les jets calorimétriques avec soustraction du bruit de fond événement par événement (O. Kodolova et al., EPJC (2007))
  - Algorithme du type Anti-k_T pour les Jets Particle Flow (M. Cacciari, G. P. Salam, G. Soyez, JHEP 0804:063,2008.)

Soustraction du bruit de fond



+ Comment explorer l'asymetrie dijet?

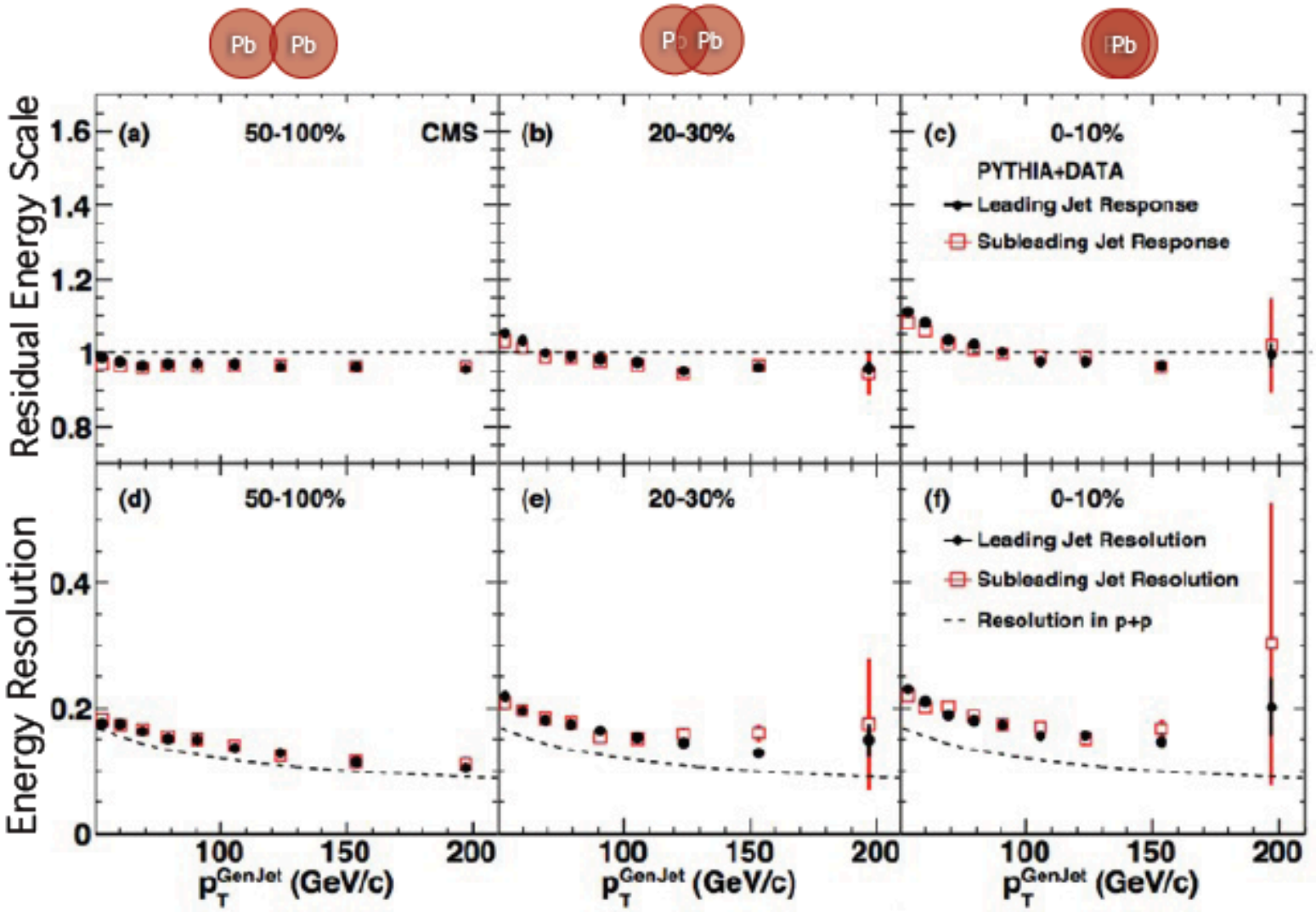
- Sélection des di-jets
  - Leading jet : E_T^{j1} > 120 GeV
    - trigger efficace
  - Sub-leading : E_T^{j2} > 50 GeV
    - Au-dessus des fluctuations du bruit de fond



  - Leading et sub-leading jets possèdent $|\eta| < 2$
  - Sélection des jets dos à dos avec $\Delta\phi > 2\pi/3$
  - $$A_J = \frac{p_T^{j1} - p_T^{j2}}{p_T^{j1} + p_T^{j2}}$$ utilisé pour visualiser le "jet quenching"

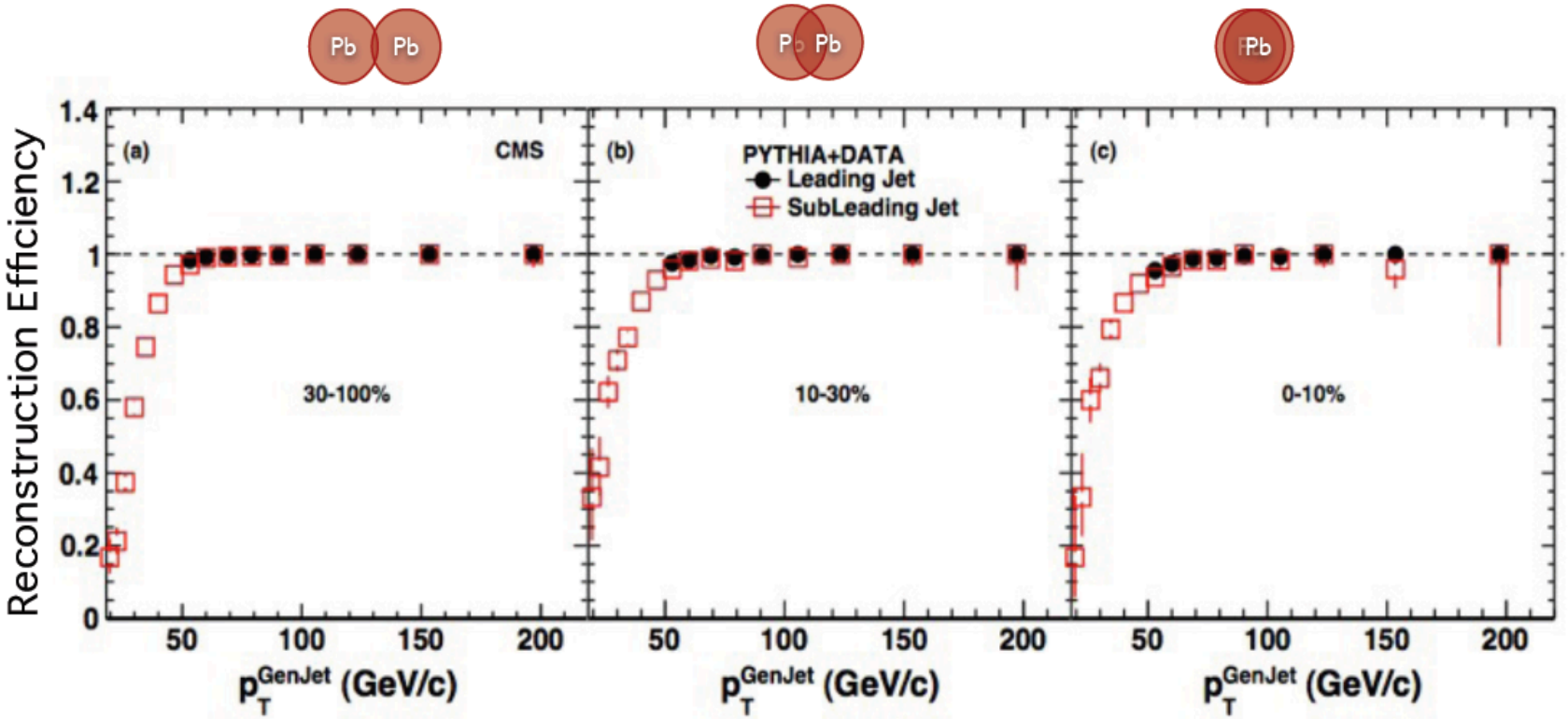
- A quoi comparer?
  - PYTHIA : D6T tune
  - PYTHIA + Données : des événements dijet de PYTHIA superposés à un bruit de fond réel
  - PYTHIA + HYDJET : des événements dijet de PYTHIA superposés à un bruit de fond simulé

+ Résolution et échelle d'énergie



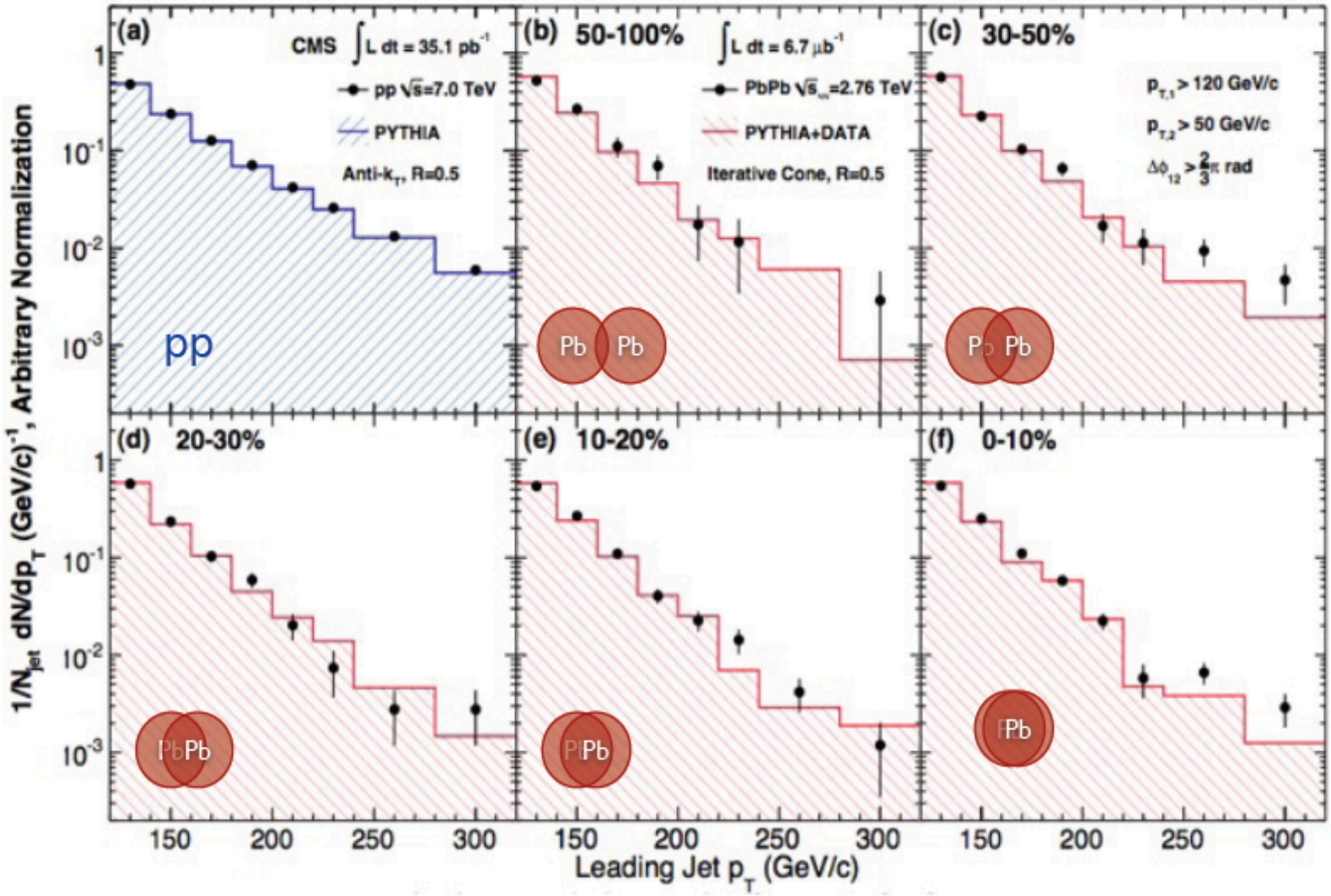
- Pour les événements périphériques l'énergie est légèrement sous-estimée alors qu'elle est surestimée pour les évènements centraux

Efficacité de reconstruction des jets



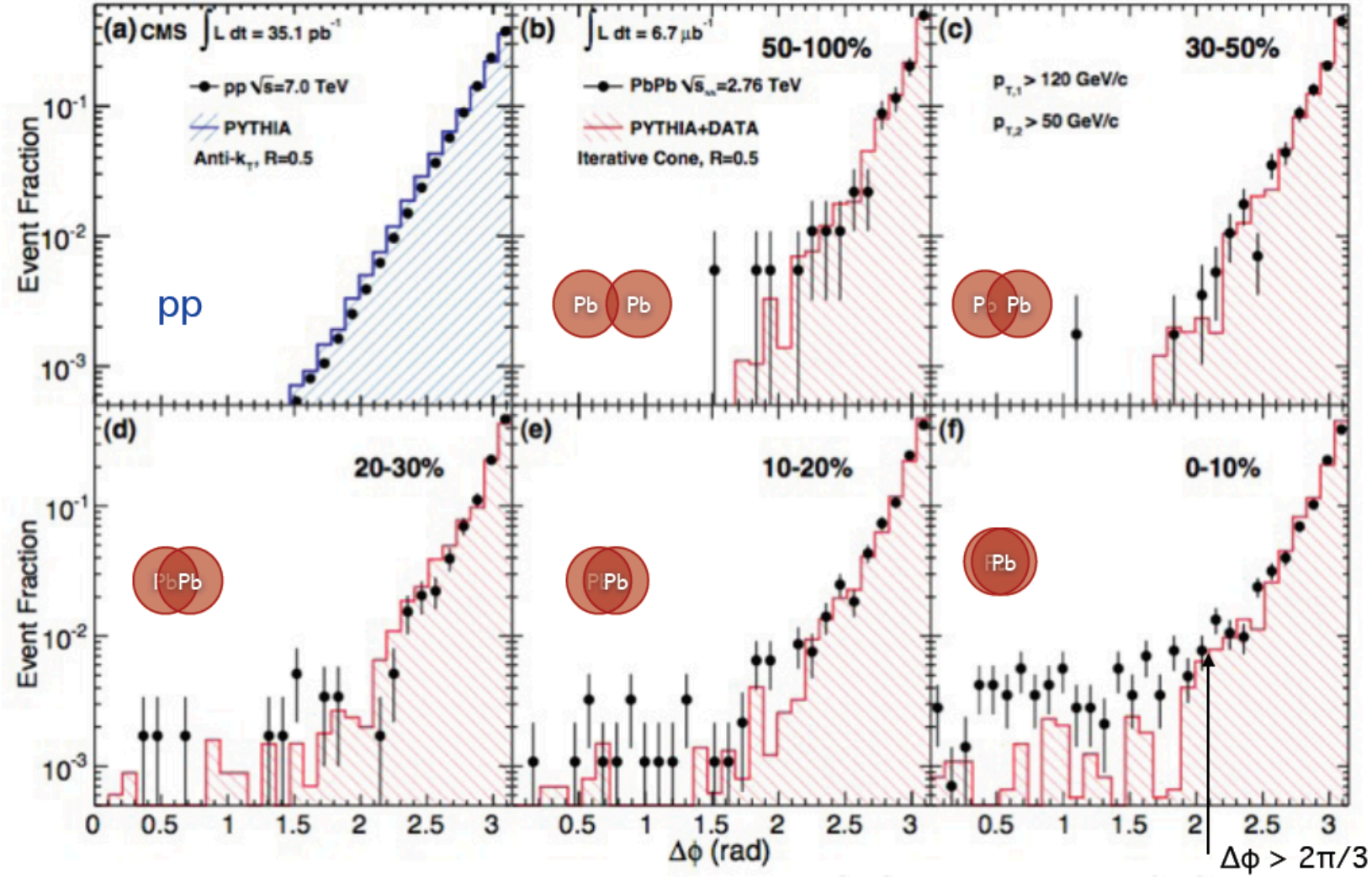
- Efficacité de reconstruction est proche de 100% pour des jets possédant un p_T > 50GeV/c

+ Spectre du leading jet

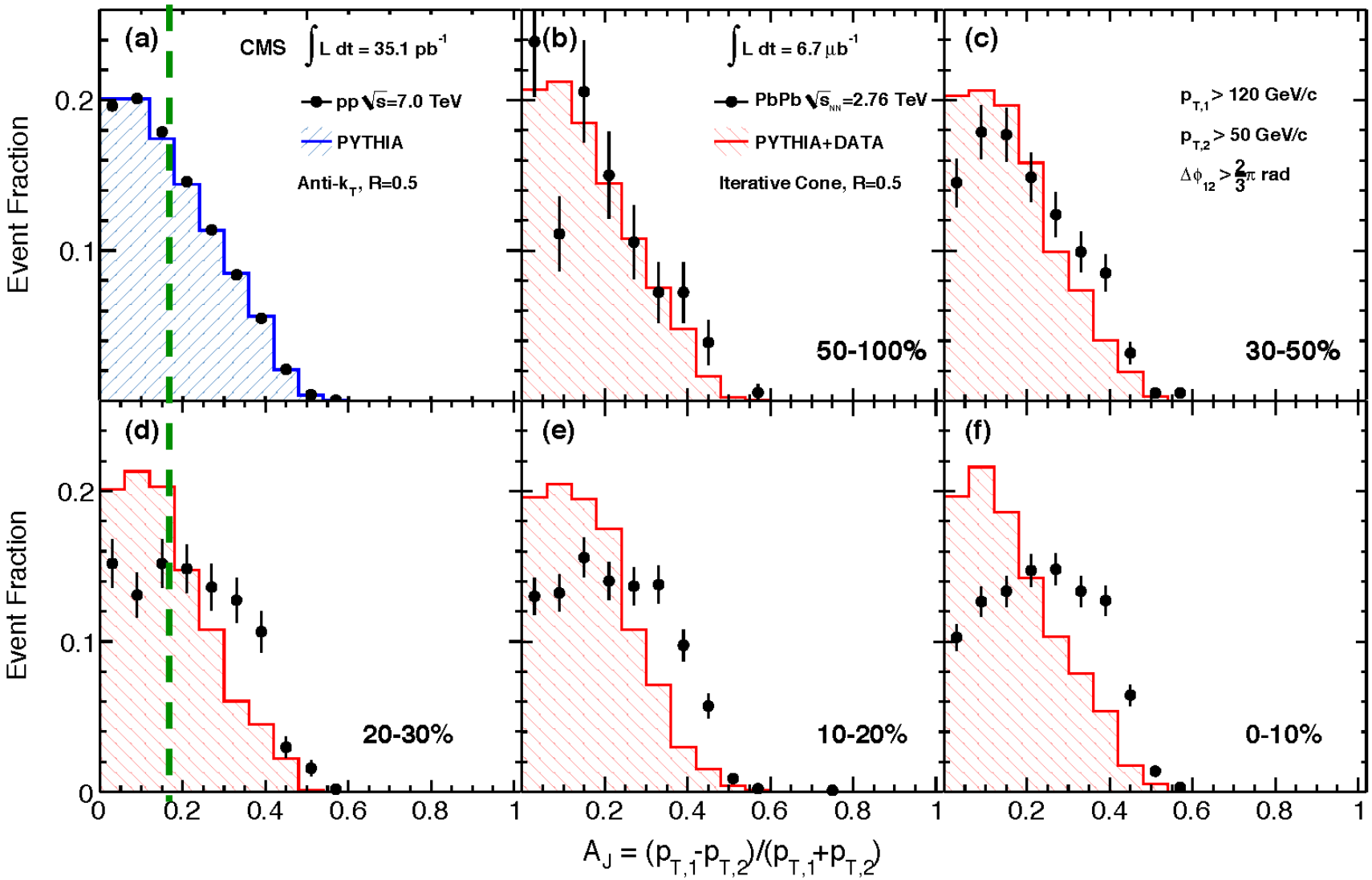


- Le spectre du leading jet est comparable à PYTHIA

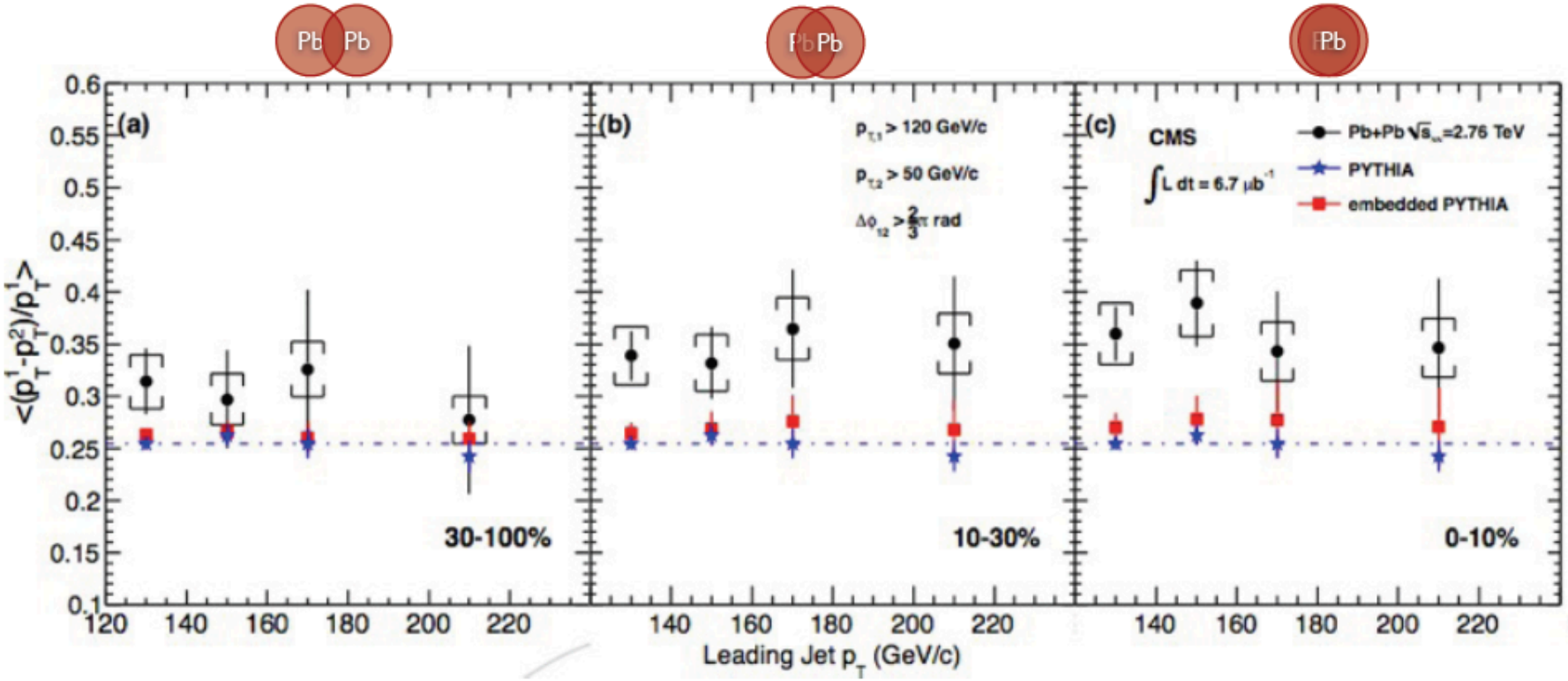
+ Corrélations azimutales



+ Evidence de l'asymétrie des jets



+ Dépendance en p_T du leading jet

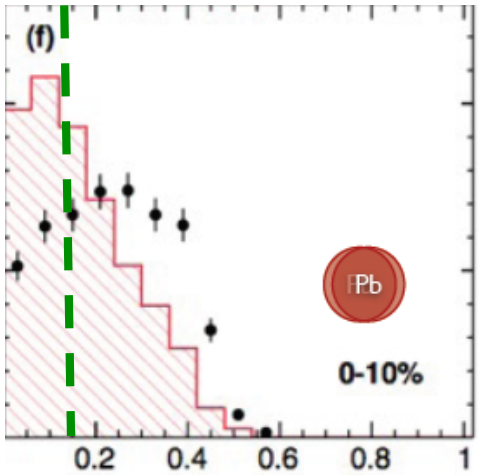


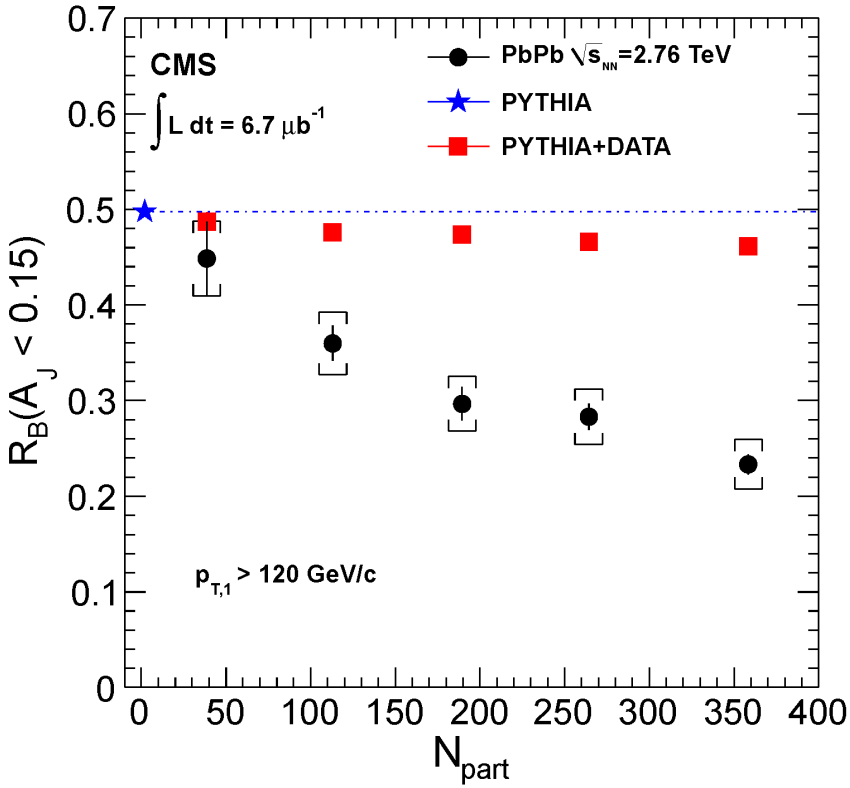
- L'asymétrie en p_T varie peu en fonction du p_T du leading jet

+ Fraction de jets balancés

- R_B représente la fraction des jets >120GeV/c qui trouvent un jet opposé d'énergie proche

  - Aj < 0.15 (médiane pour Pythia)
  - $\Delta\phi > 2\pi/3$





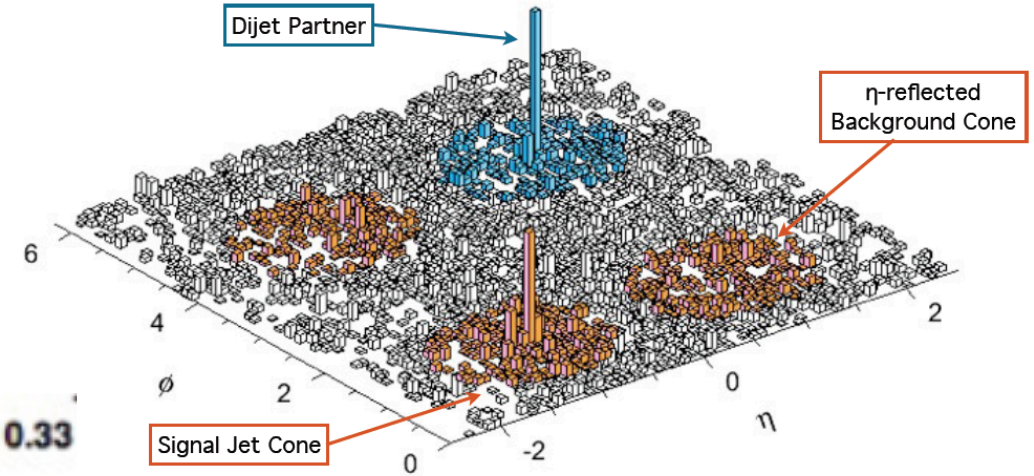
- Suppression des jets d'environ 50% pour les collisions les plus centrales

+ Où va donc l'énergie ?

- Des particules qui n'atteignent pas le calorimètre? Ou bien des particules qui s'échappent du cône?
- Comment le savoir ?
- 2 pistes : les informations du trajectographe, nous permettent de réaliser une étude approfondie
  - Corrélations jets-particules : explorer les propriétés de fragmentation avec les corrélations angulaire entre les traces et les axes des jets avec la soustraction du bruit de fond
  - p_T manquant explorer le p_T manquant sur l'axe du jet dans différentes gammes en p_T

Correlation jet-particule

- Bruit de fond estimé dans un cône de R=0.8 symétrique au single jet en évitant les variations azimutales dues au effets du détecteur et au flot hydrodynamique



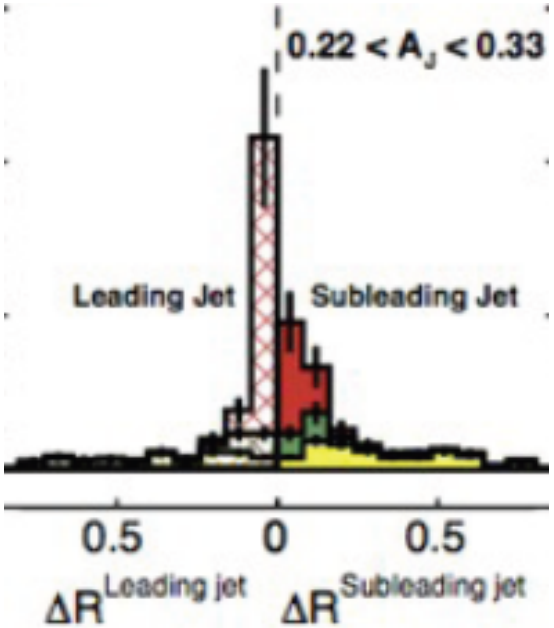
- $0.8 < |\eta| < 1.6$

- Différentes gamme en p_T

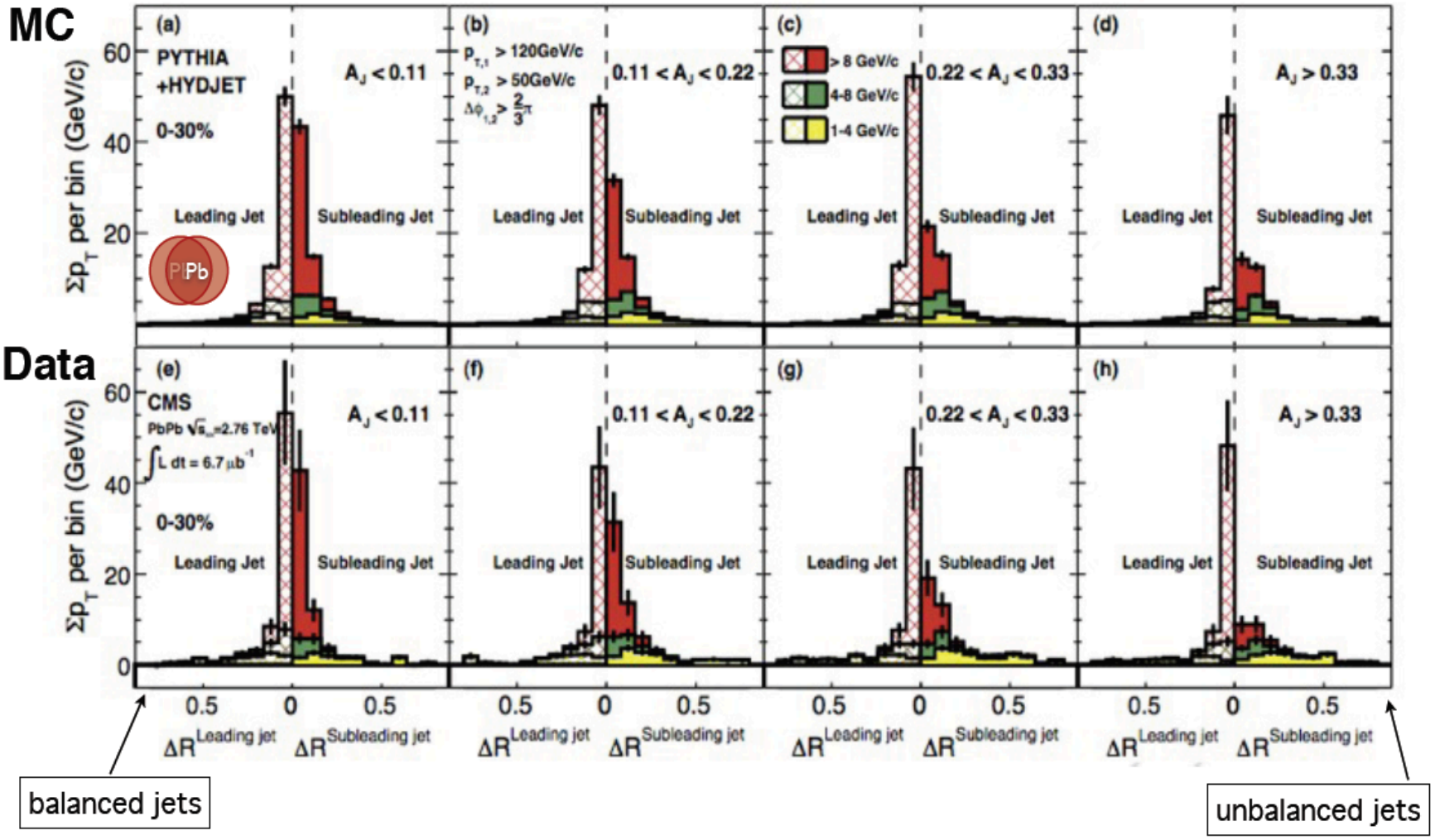
> 8.0 GeV

4.0 – 8.0

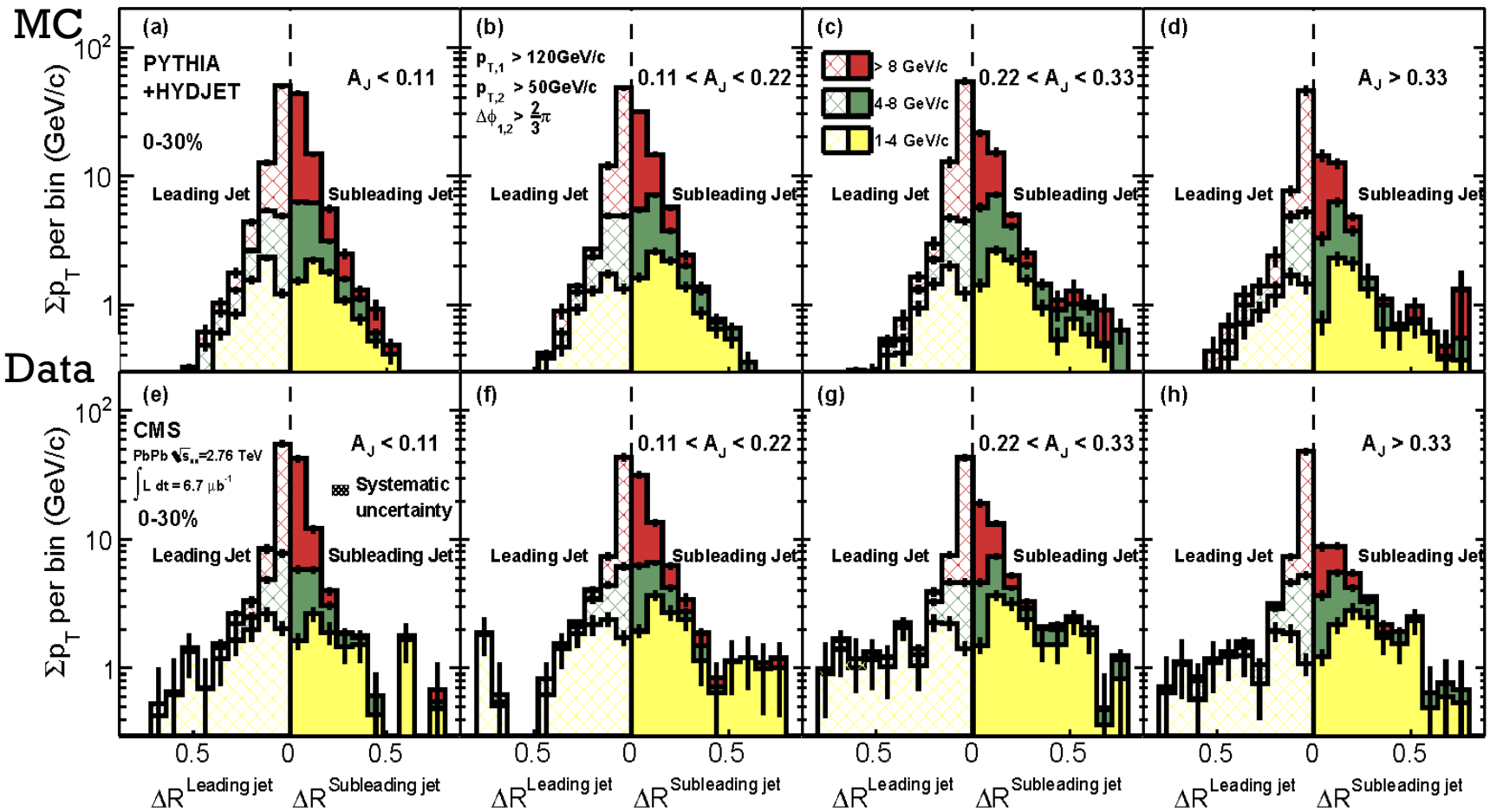
1.0 – 4.0



+ Résultats des correlations jet-particule



Résultats des correlations jet-particule

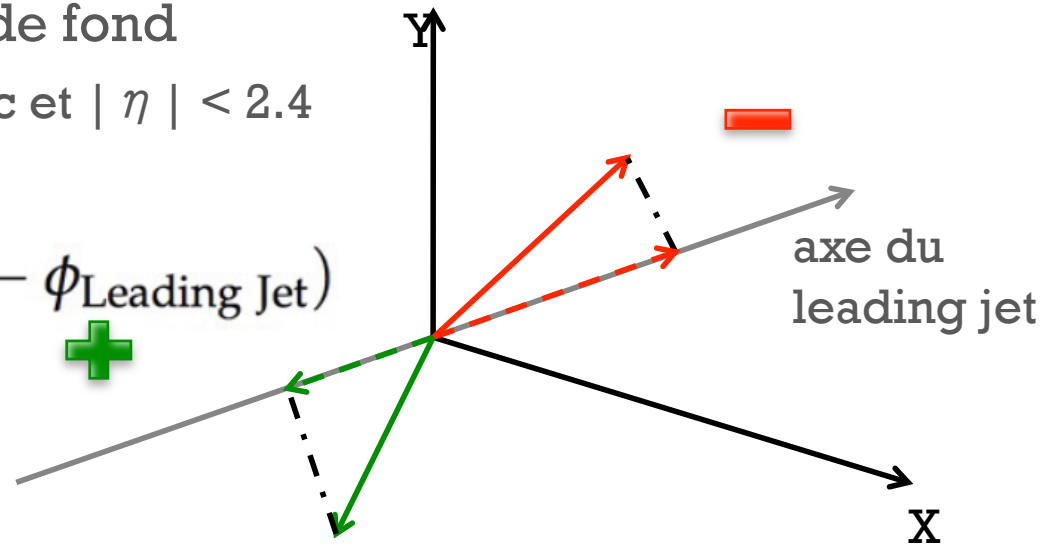


- Dans les données, plus d'énergie portée par les particules de bas p_T<4GeV/c, à grand ΔR

+ p_T manquant

- Projeter le p_T des traces sur l'axe du leading jet et voir ce qui manque pour toutes les traces de $p_T > 0.5$GeV/c et $|\eta| < 2.4$
- Pas de soustraction du bruit de fond
  - Toute traces de $p_T > 0.5$ GeV/c et $|\eta| < 2.4$

$$\not{p}_T^{\parallel} = \sum_{\text{Tracks}} -p_T^{\text{Track}} \cos\left(\phi_{\text{Track}} - \phi_{\text{Leading Jet}}\right)$$



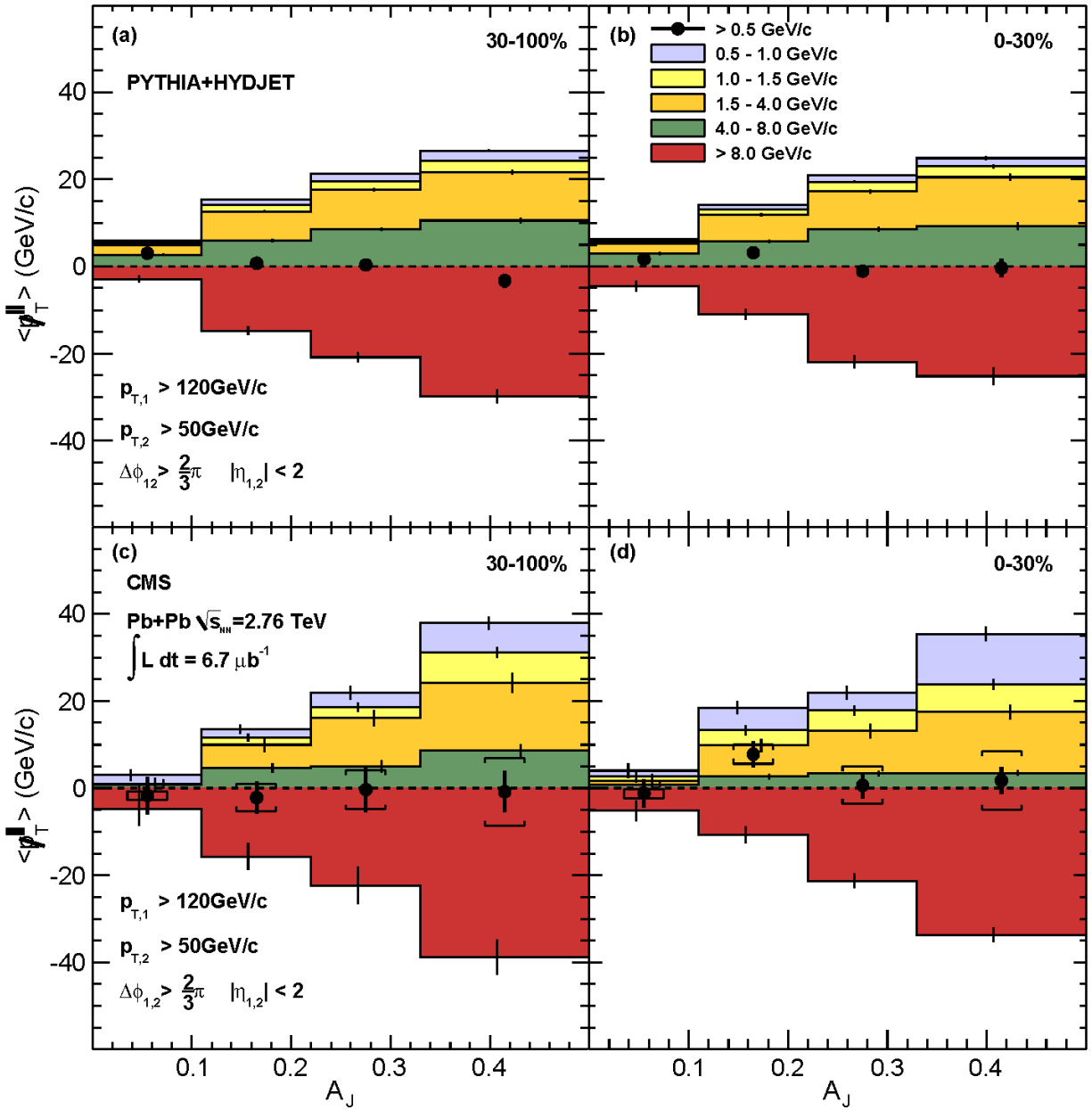
- Dans les différentes gammes en p_T :

0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	2.0 – 4.0	4.0 – 8.0	> 8.0 GeV

+ p_T manquant

MC

Data



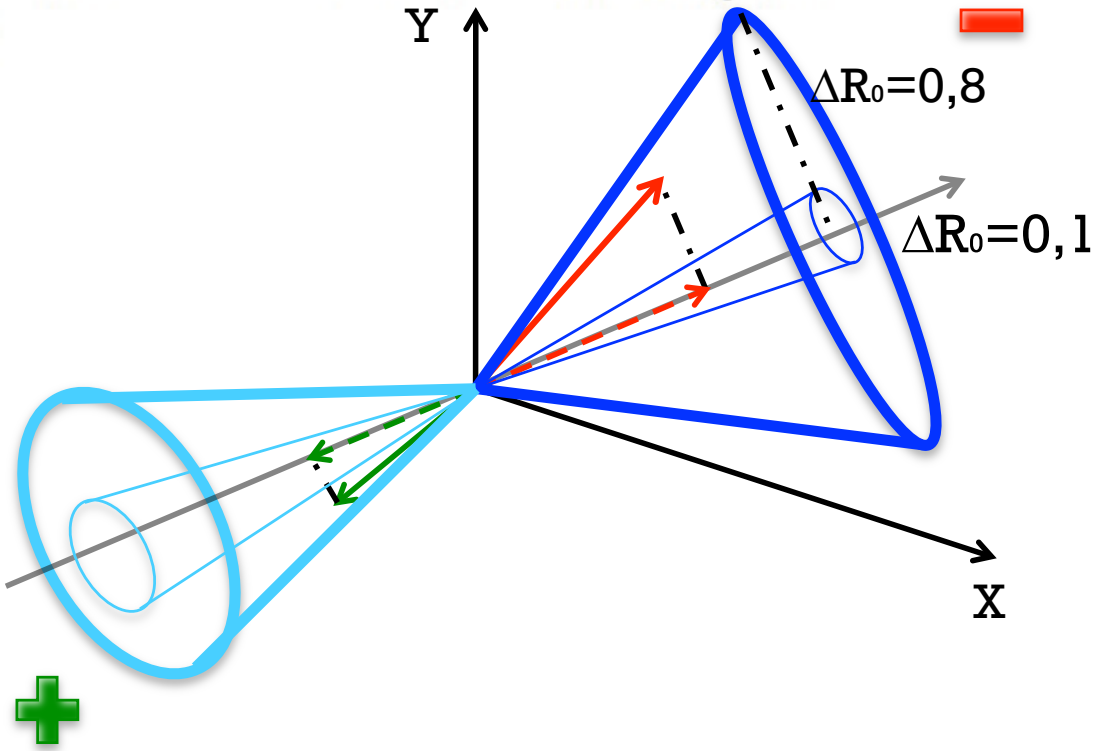
Leading Jet

Jet opposé

Excès de particules de très bas p_T

+ p_T manquant

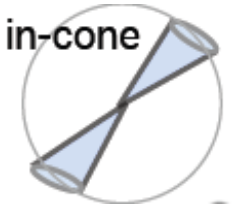
$$\not{p}_T^{\parallel} = \sum_{\text{Tracks}} -p_T^{\text{Track}} \cos\left(\phi_{\text{Track}} - \phi_{\text{Leading Jet}}\right)$$



- Dans les différentes gammes en p_T :

0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	2.0 – 4.0	4.0 – 8.0	> 8.0 GeV

+ p_T manquant

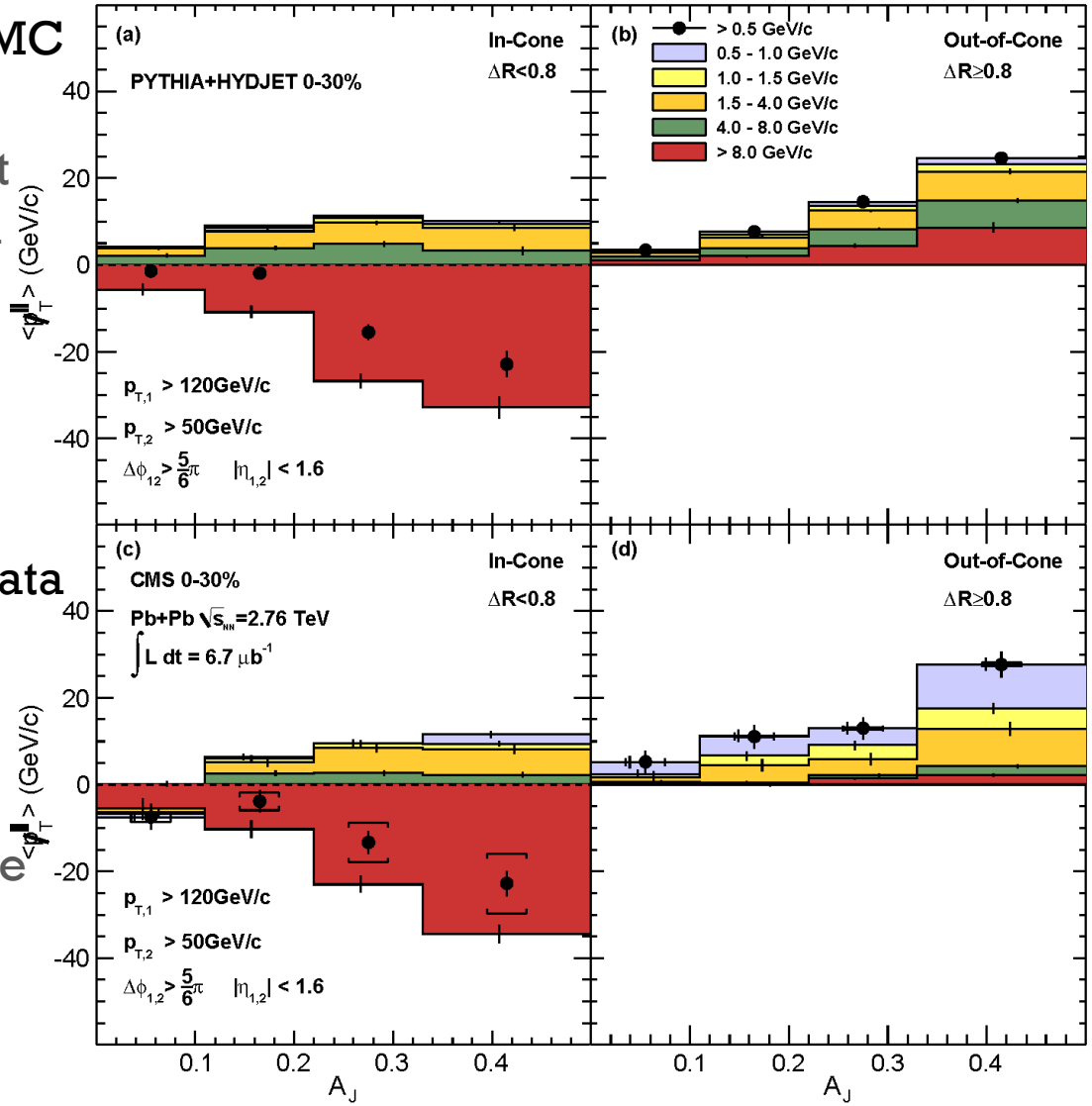


Dans PYTHIA, l 'énergie est aussi trouvée en dehors du cône mais elle est portée par les traces de haut p_T

Dans les données, l 'énergie est trouvée en dehors du cône mais elle est portée par les traces de bas p_T

MC

Data



Leading Jet

Jet opposé

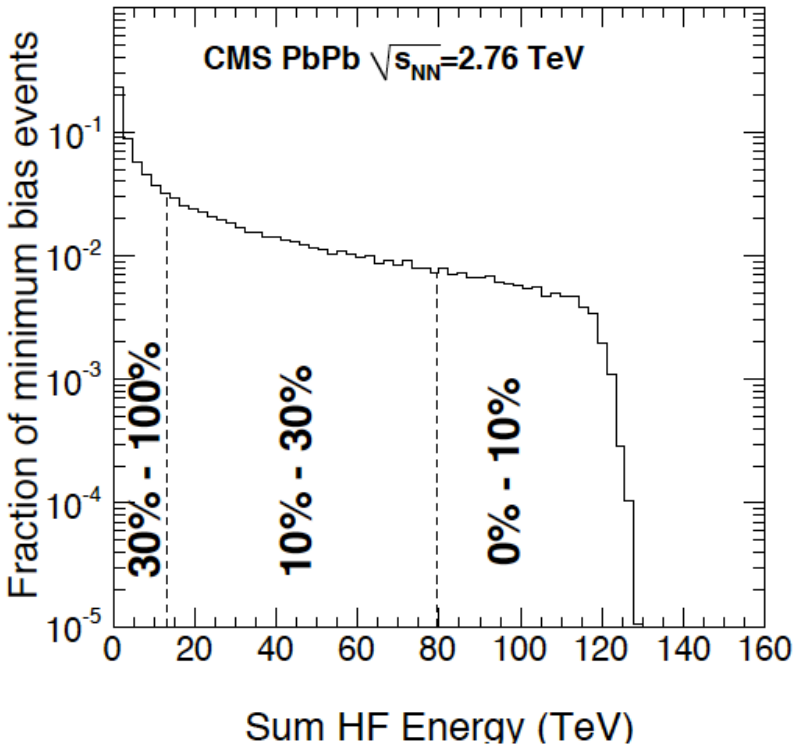
Dilepton dans les ions lourds, motivation

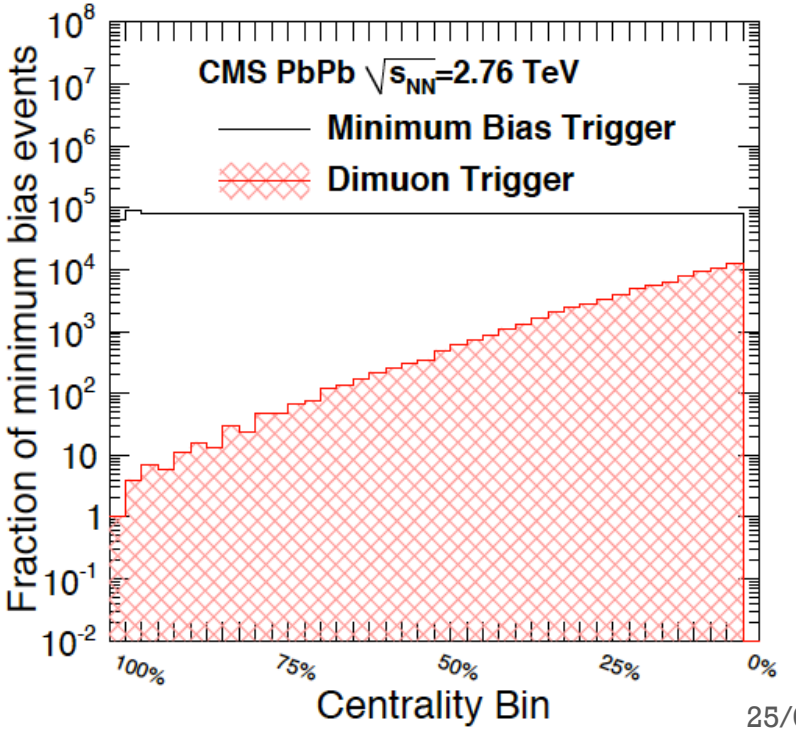
- Le Z n'est pas modifié par le milieu, et représente une bonne sonde pour le PQG
- Une référence pour les quarkonia et aussi pour le jet opposé dans les événements Z-Jet
- Les Υ(1s,2s,3s) pourrait fondre dans le milieu, non étudié à RHIC
- Les J/ψ mal compris à RHIC pourraient être recombiné/augmenté au LHC. ATLAS dit que les J/ψ de grand p_T sont supprimés, mais ne montre pas la séparation de la contribution du B J/ψ http://arxiv.org/abs/1012.5419

En ions lourds
Notion de centralité

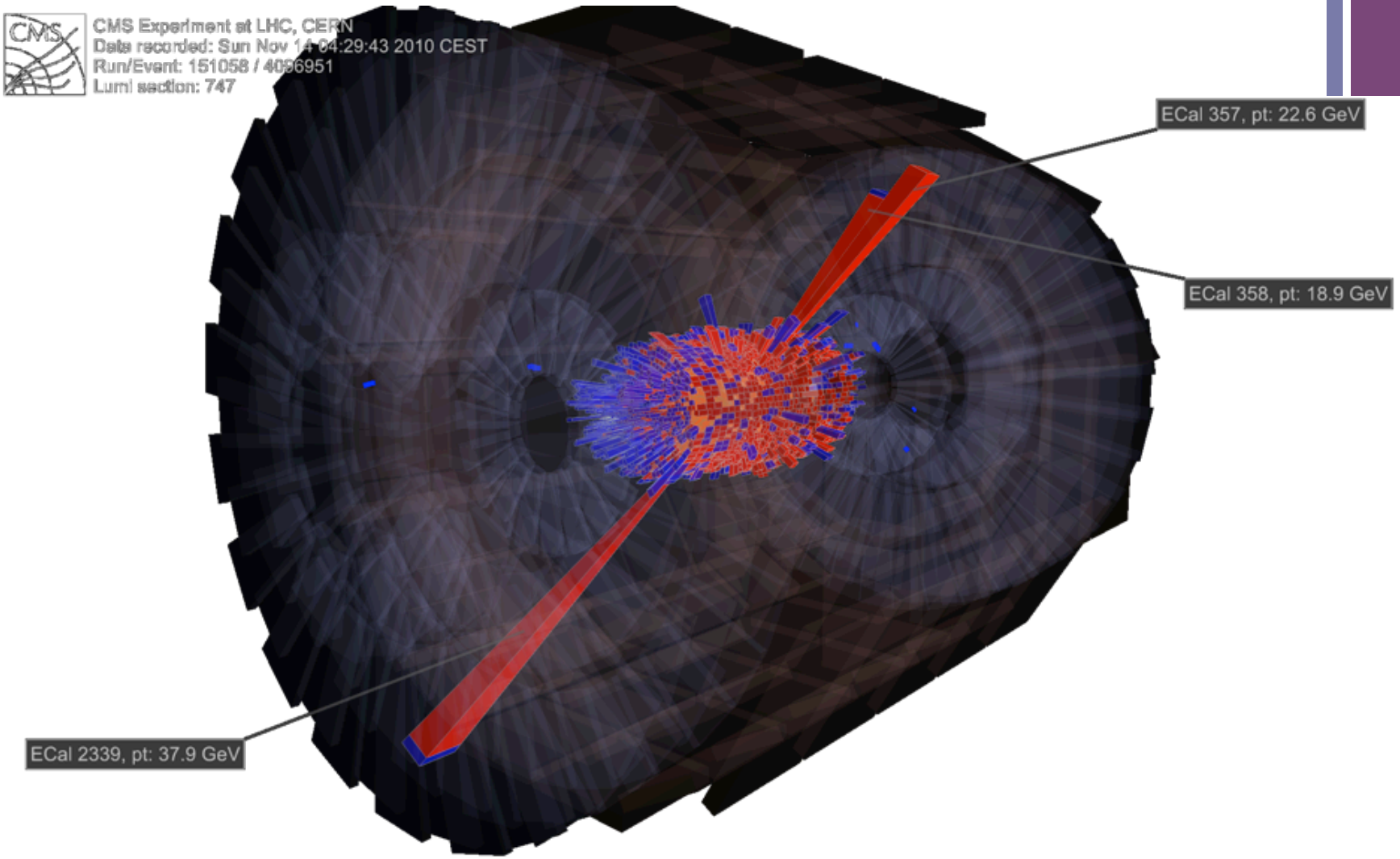
- La centralité d'une collision est inversement proportionnelle à l'énergie déposée dans HF

- Pour les di-leptons



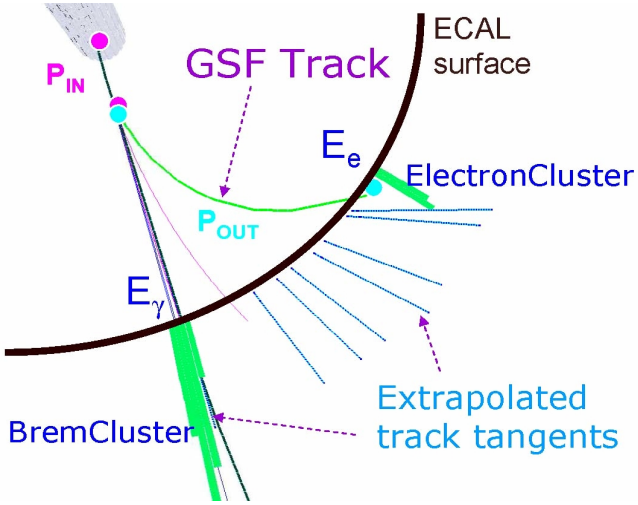


+ $Z \longrightarrow e^+e^-$ en ions lourds



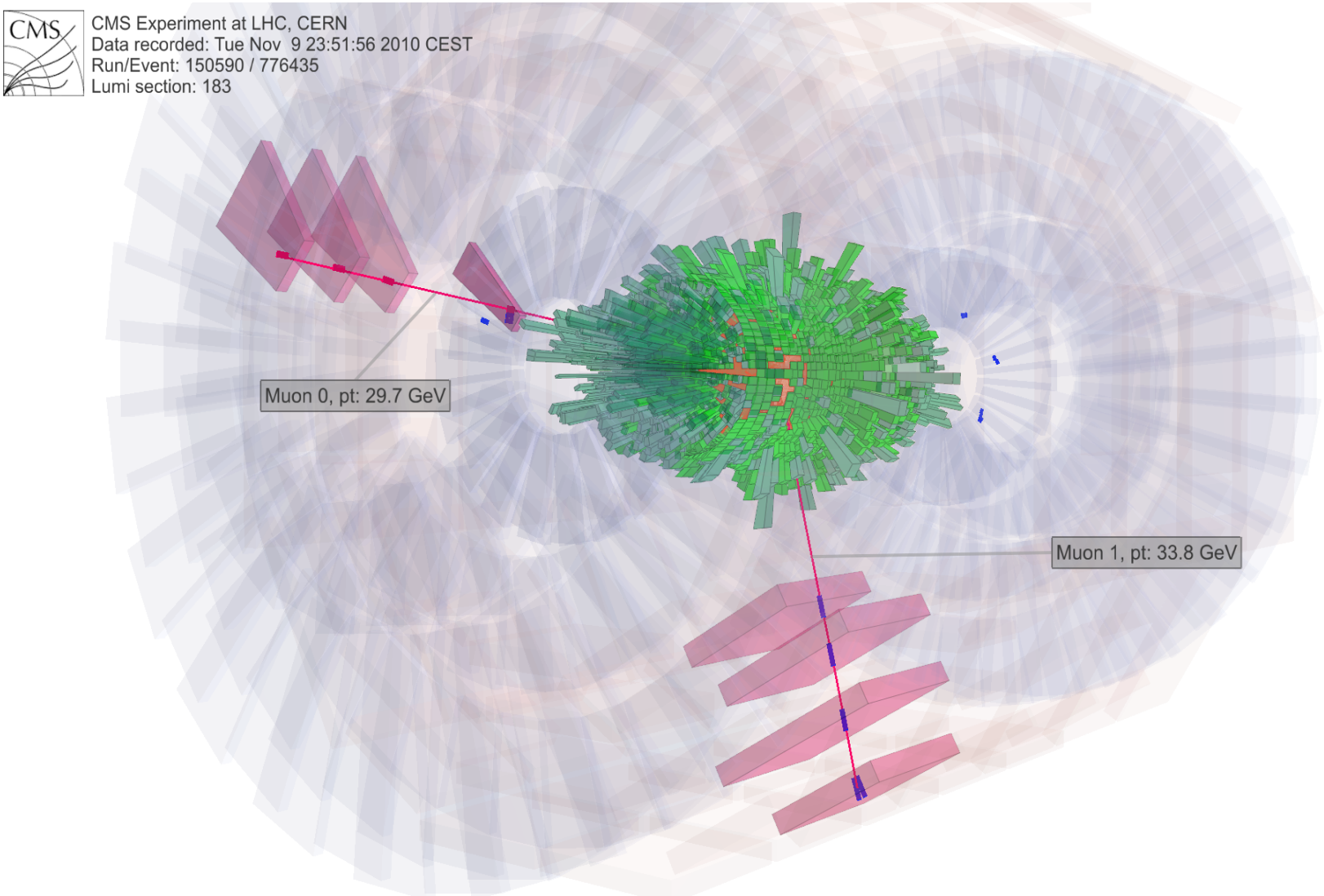
+ Reconstruction des électrons

- Reconstruction des électrons en p+p
  - Difficulté
    - Beaucoup de matière devant Ecal
    - Champs magnétique important 3.8T
  - 2 méthodes de reconstruction
    - Tracker Drien
    - Ecal Drivien



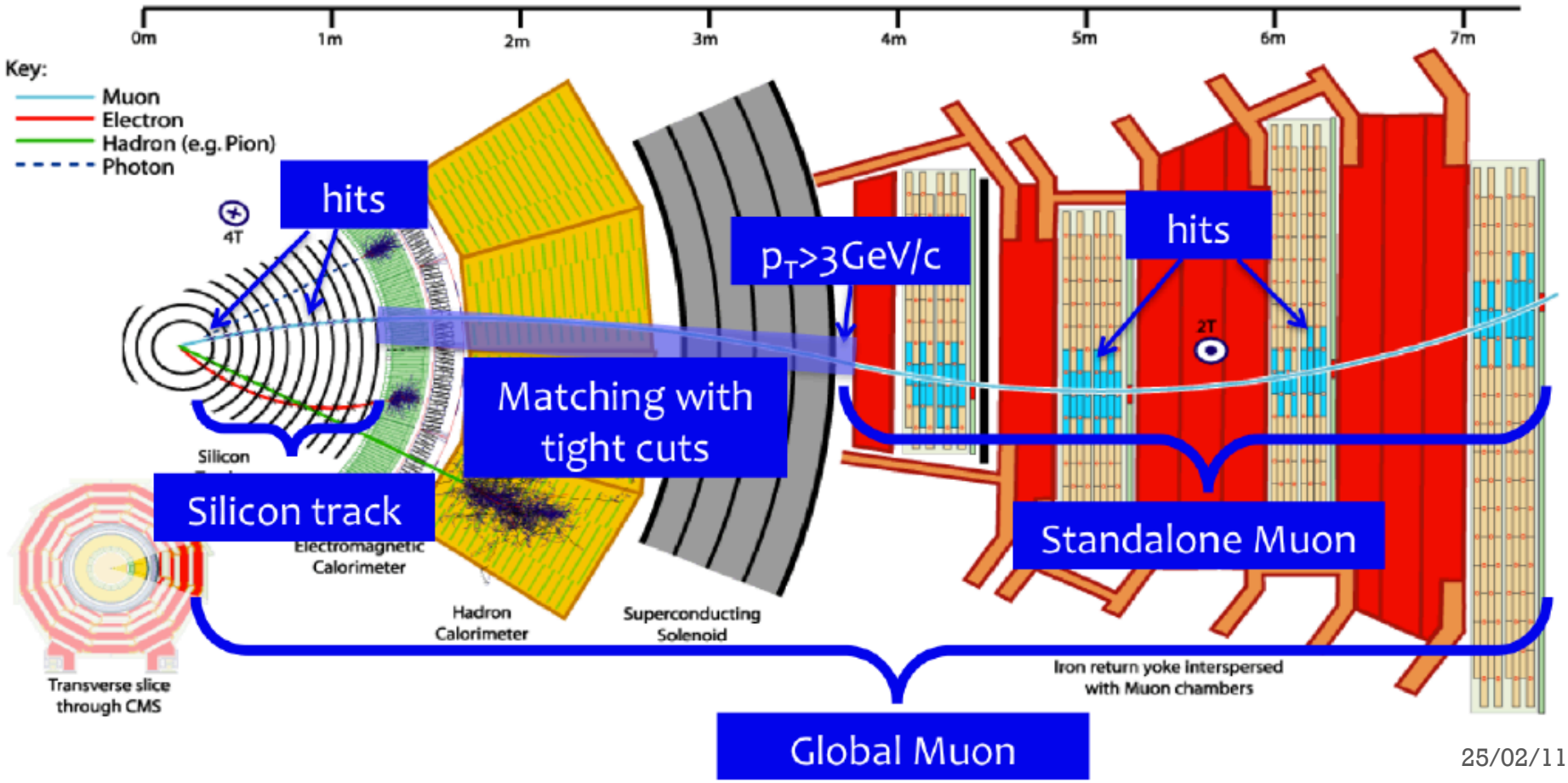
- Reconstruction des électrons dans les ions lourds
  - Difficulté supplémentaire
    - Haute multiplicité des traces rend difficile l'association cluster-trace
  - Méthode
    - Ecal Driven : implémentée dernièrement dans la Reconstruction officielle des ions lourds

+ $Z \rightarrow \mu\ \mu$ en ions lourds



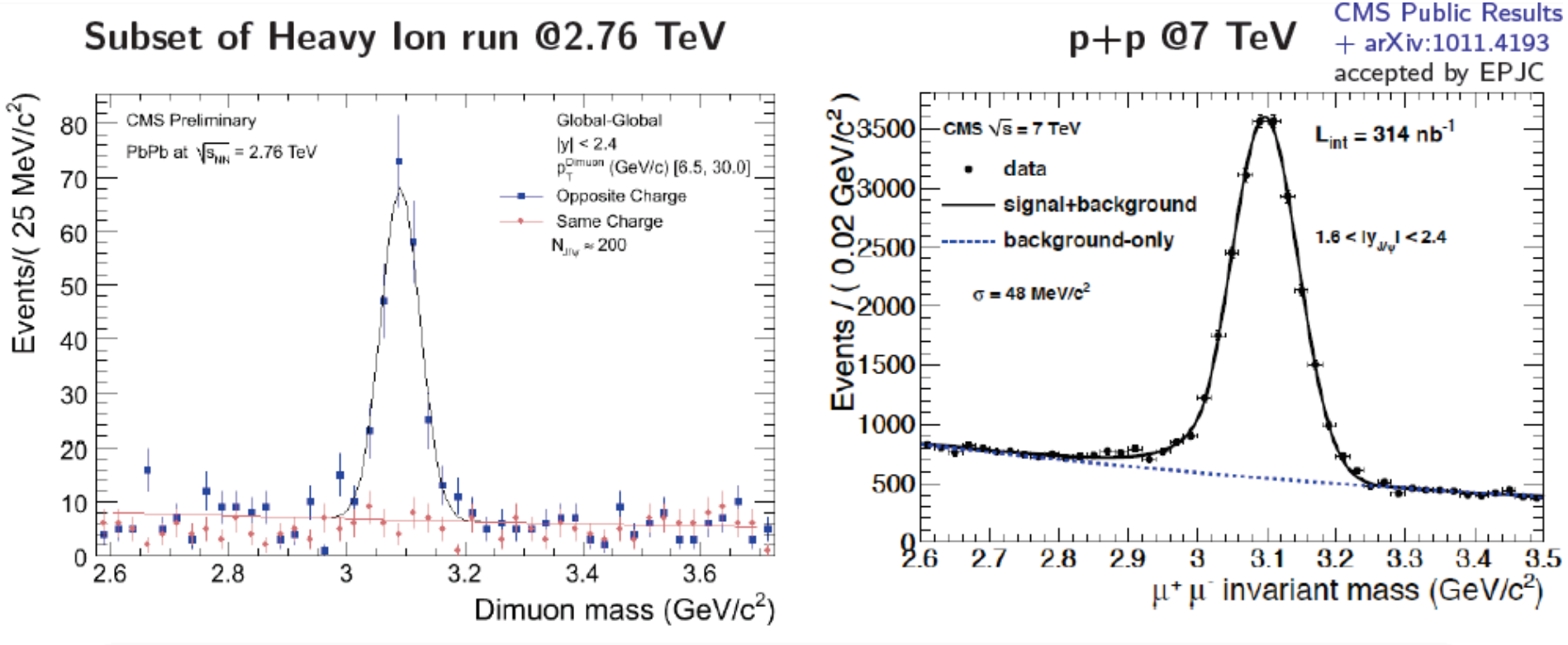
Mesure des dileptons

- Couverture en rapidité $|\eta| < 2.4$
- Excellente résolution en masse pour les dimuons varie avec η
  - $|\eta| < 2.2$ $\sigma^{pp}(J/\Psi) \approx 40 MeV/c^2$
  - $|\eta| \approx 0$ $\sigma^{pp}(J/\Psi) \approx 20 MeV/c^2$



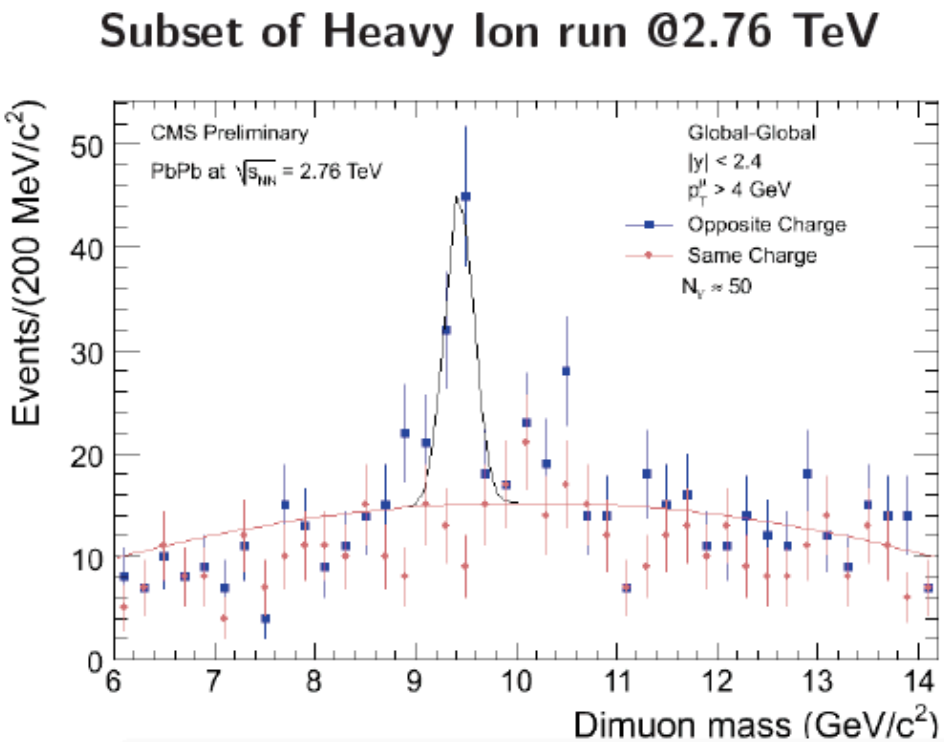
+ J/ψ

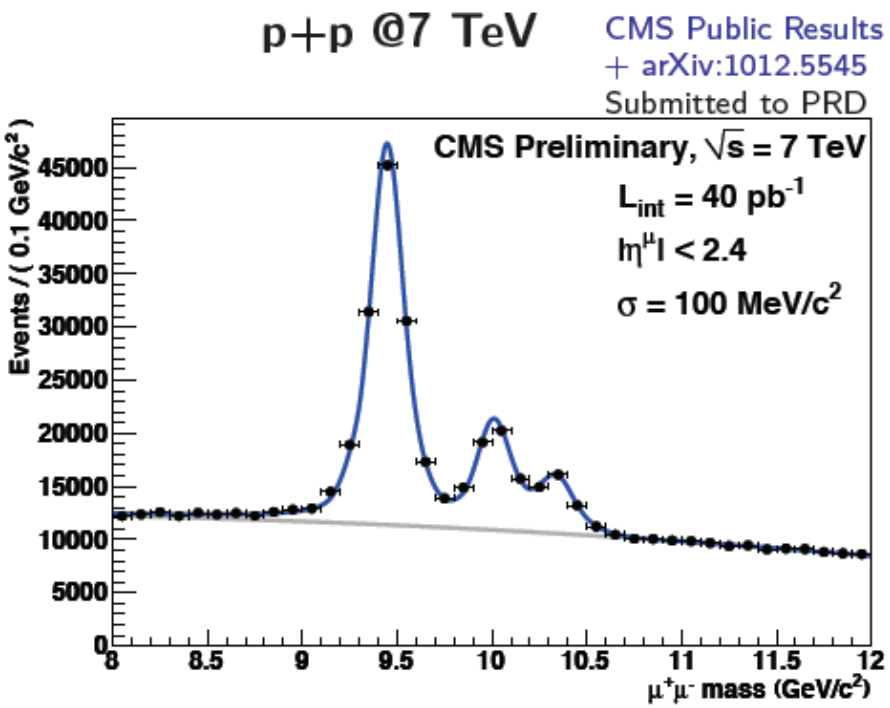
- Une partie des événements ions lourds analysés,
  - $|y| < 2.4$ $p_T^{\mu\mu}$ [6.5,30] GeV/c
- Coupures basiques réduisent le bruit de fond



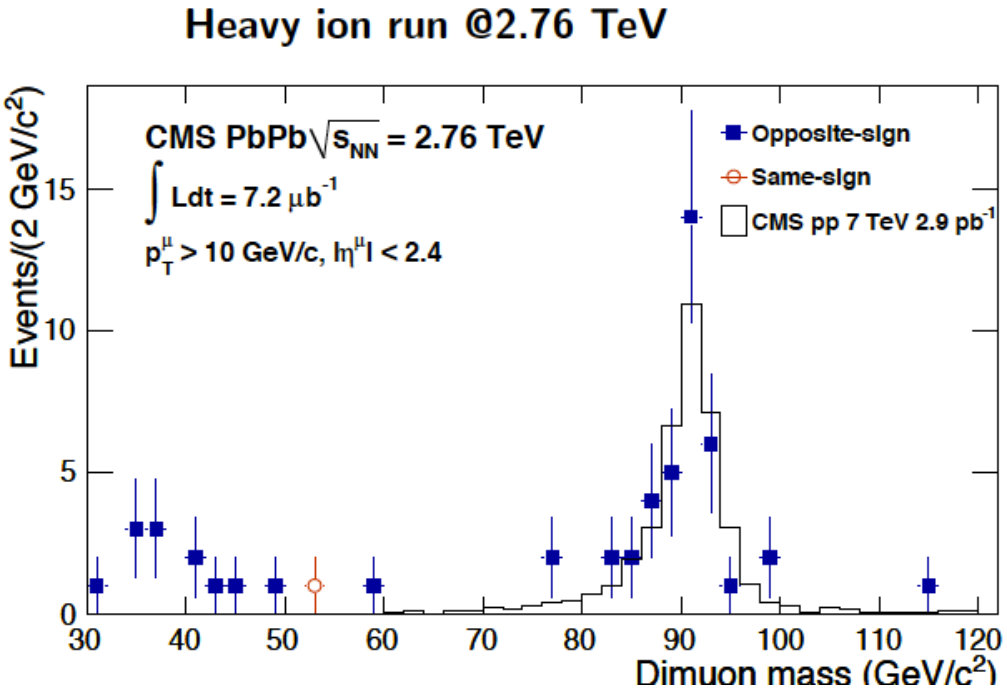
+ Υ

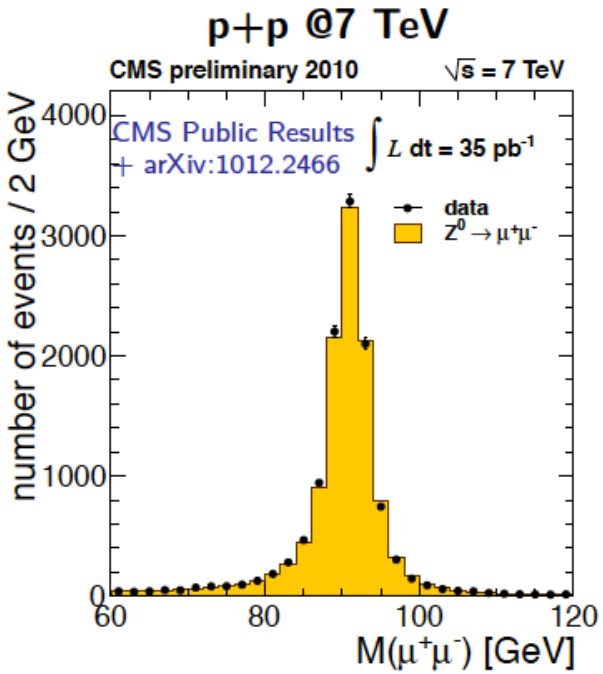
- Une partie des événements ions lourds analysés,
  - $|y| < 2.4$ $p_T^{\mu} > 4$GeV/c
- Bruit de fond plus important que celui du J/Ψ





+ Z





- Tout entre 30-120GeV/c2
- Un événement de même signe dans les 39Z
- Résolution de la masse comparable à pp

+ Mesure de dN/dy

- $dN/dy(|y|<2.0) = N_z/(\alpha\ \varepsilon\ N_{MB}\ \Delta y)$
  - $\alpha\ \varepsilon$: le facteur « acceptance x efficacité » estimé à partir d'événement PYTHIA superposés à des vraies données
  - N_{MB} : nombre d'événement minimum bias
  - $\Delta y = 4$

+ Acceptance et efficacité

- Acceptance cinématique

$$\alpha = \frac{\#(Z)^{|\eta^{\mu}|<2.4, p_T^{\mu}>10\ GeV/c, |y_Z|<2.0, M\in[60,120]GeV/c^2}}{\#(Z)^{|y_Z|<2.0, M\in[60,120]GeV/c^2}}$$

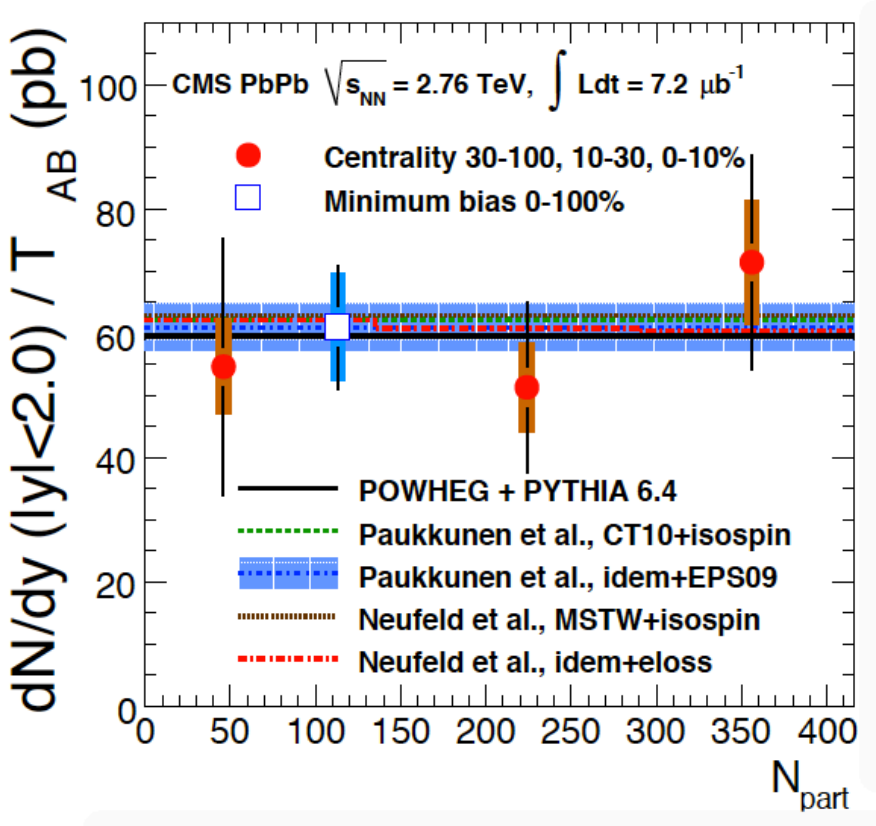
- $\varepsilon_{\text{Trigger}}\ \varepsilon_{\text{reconstruction}}\ \varepsilon_{\text{identification}}$ 67%
- $\varepsilon_{\text{Trigger}}$ 94%
- Efficacité de tracking 76%, tracking beaucoup moins efficacé qu'en p+p
- Reconstruction des muon « stand alone» et matching 98%

+ Erreurs systématiques

- Erreurs systématique : 13%
- De la technique Tag-Probe
  - Tracking : 9.8%
  - Trigger : 4.5%
- Extrapolation de [35-60GeV/c^2]
  - Bruit de fond résiduel : 4%
- Perte des événements
  - Qualité de sélection des muons : 2.6%
- Variation des paramètres de Glauber
  - Sélection des événements MB 3%
- Variation des formes des distributions en fonction de p_T et de y
  - Acceptance : 3%
- Autre (reconstruction des muons, enchâssement…) : 1.5%

+ dN^Z/dy normalisé vs centralité

- $dN/T_{AB} = R_{AA} \cdot d\sigma_{pp}$
- σ_{pp} =64 ± 5 mb à 2.76 TeV
- T_{AB} fonction de recouvrement nucléaire estimée à l'aide du model de Glauber
- Légère dépendance prévue en fonction de la centralité
  - La perte d 'énergie entre les événement périphérique et les événement centraux est estimée à 3%
  - Les effets de shadowing sont sensé être négligeable
- En supposant $d\sigma_{pp}/dy$ = 59.6pb dans $|y| < 2.0$ (prédiction de POWHEG) :



$$R_{AA} = dN_{AA} / (T_{AB} \times d\sigma_{pp}) = 1.00 \pm 0.16 \pm 0.14$$

+ Conclusion

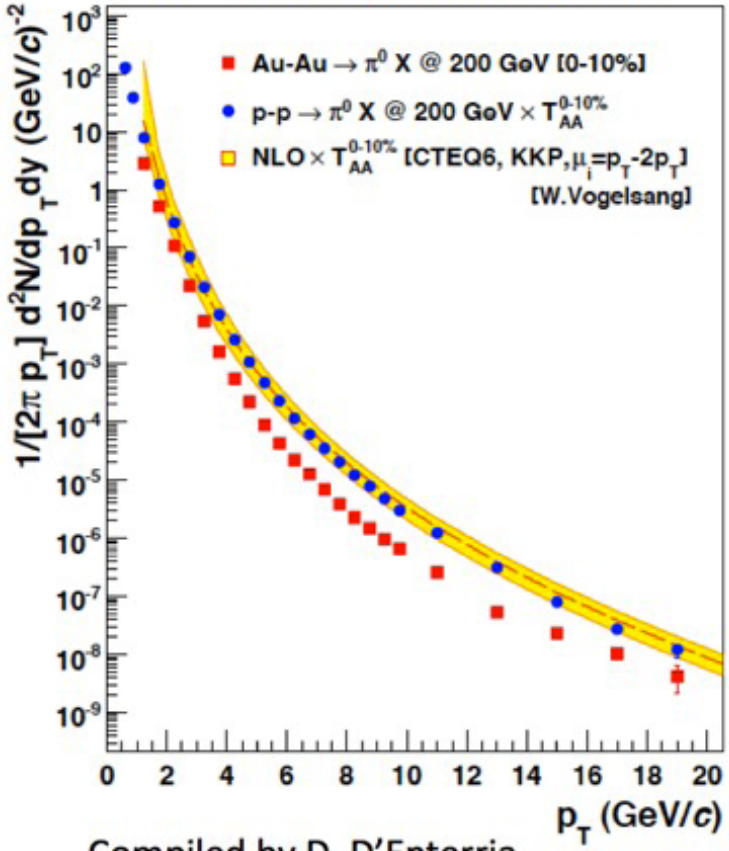
- LHC nous a ouvert les portes vers différentes études du jet-quenching : très bonne identification des di-jets dans un environnement de haute multiplicité
- Ce n'est que le début! Des analyses futures sont en cours : fonction de fragmentation, corrélations gamma-jet et multi-jets
- Mesure des quarkonia dans CMS, le meilleur reste à venir! (études sont en cours)
- Mesure du Z dans CMS, Preprint bientôt disponible
- Interprétations théoriques
- Les résultats peuvent être trouvés ici :
  - https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResults

Backup

A RHIC
Suppression de particules de haut p_T

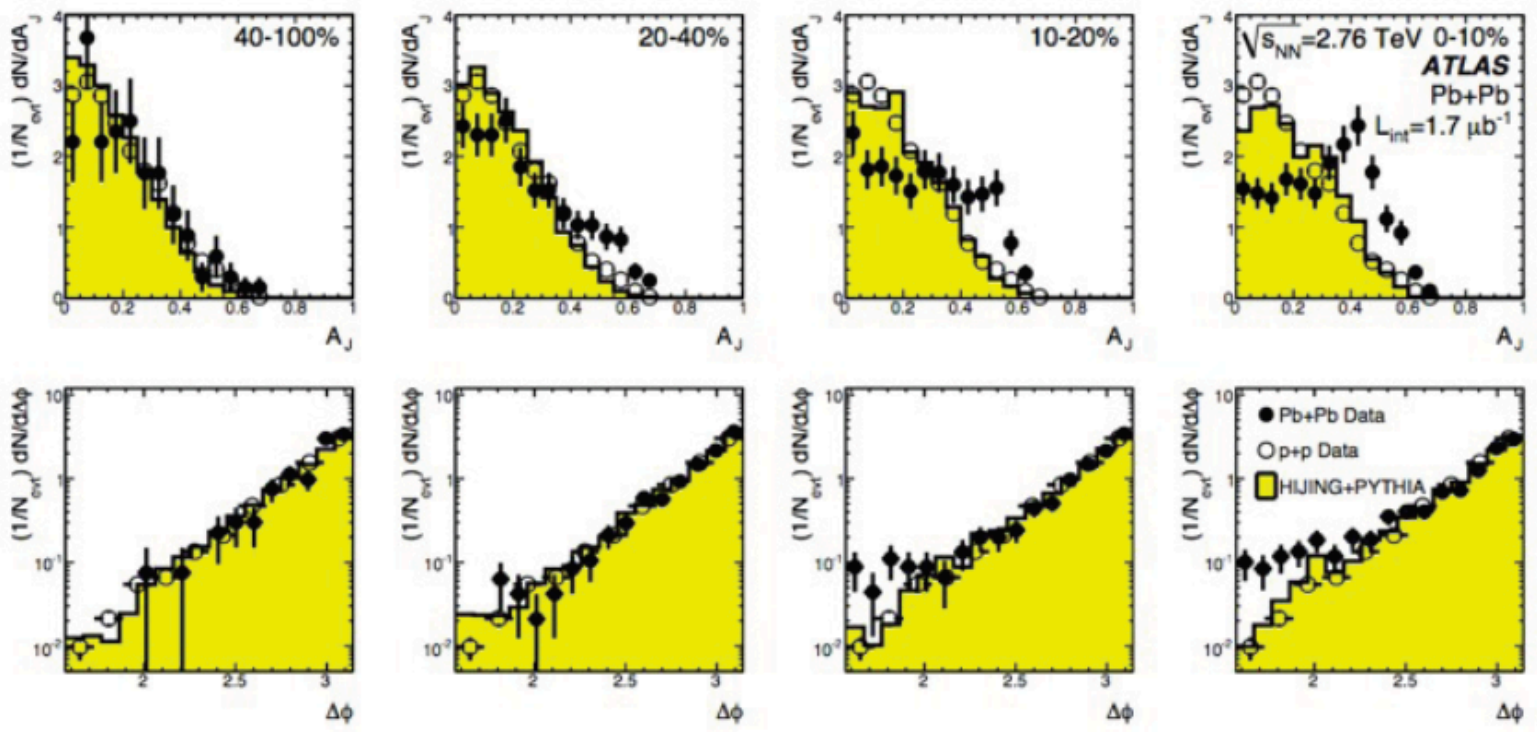
- Section efficace de production de pions neutres en p+p et en Au+Au à $\sqrt{s}$ = 200 GeV

- La suppression des pions neutre est d'un facteur 5 comparée à l'exapolation faîte pour p+p



Compiled by D. D'Enterria
Springer Verlag, Landolt-Boernstein Vol.

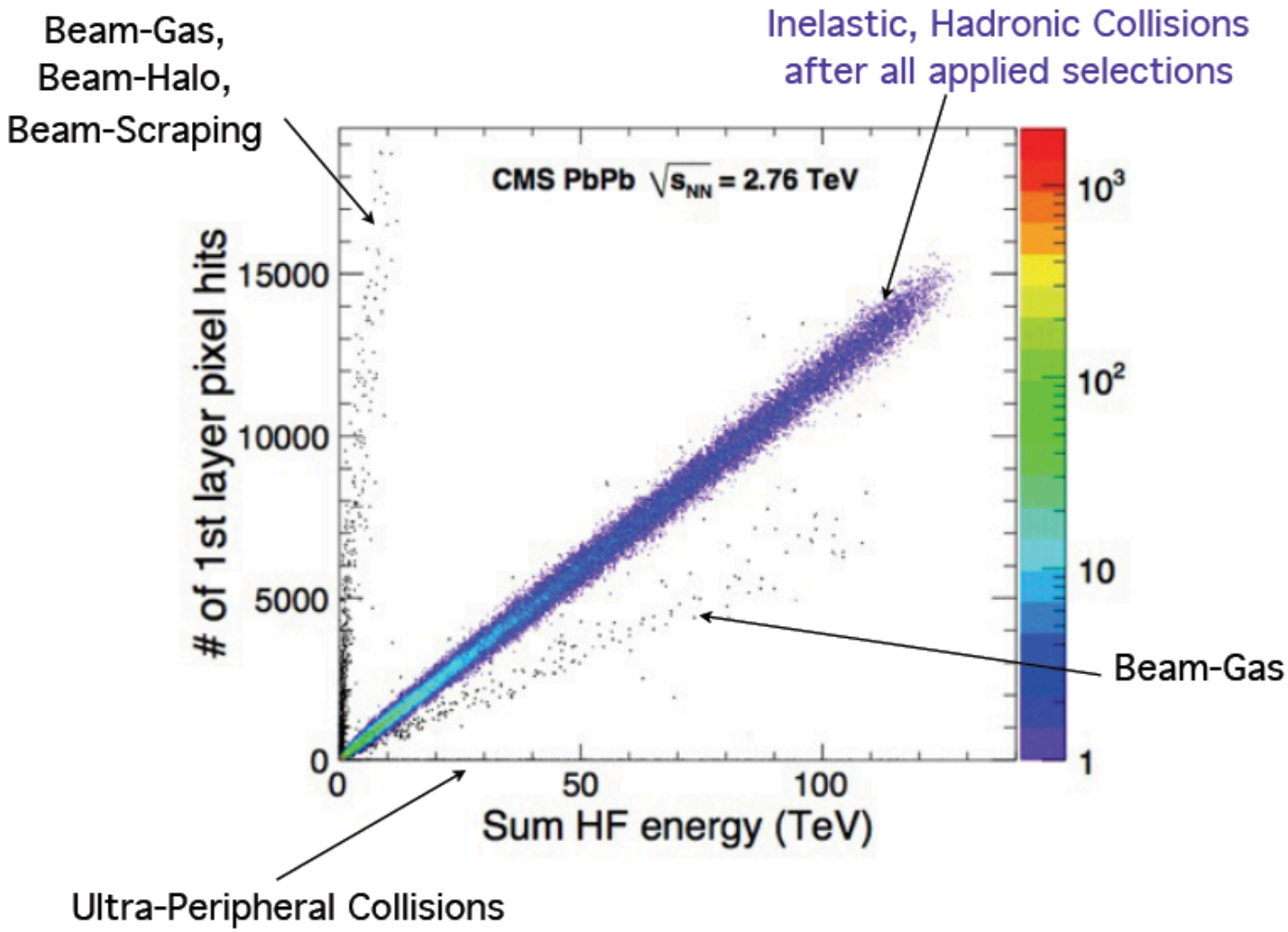
+ Di-jet dans ATLAS



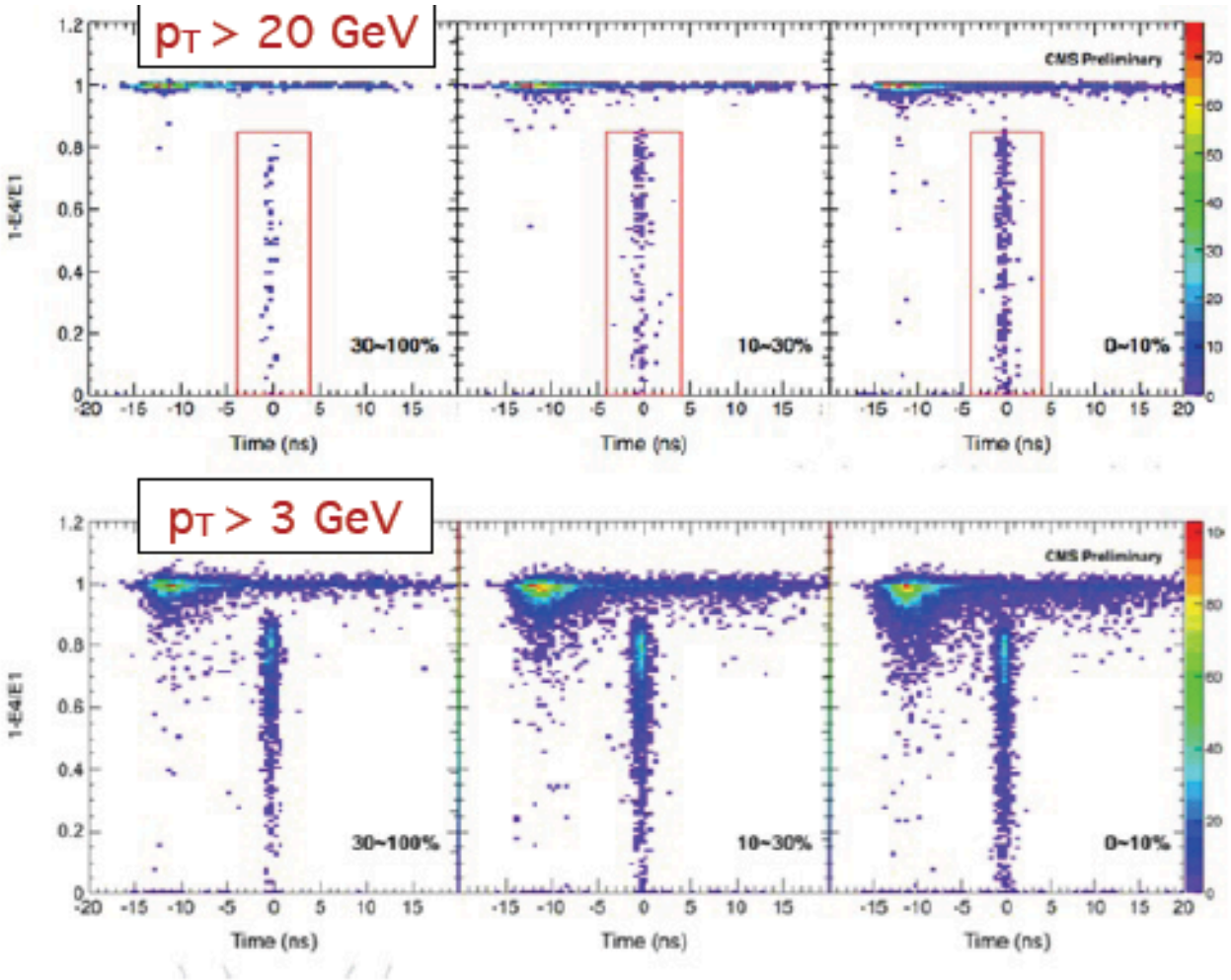
$p_{T,1}$ > 100 GeV
$p_{T,2}$ > 25 GeV
$\Delta\phi_{1,2} > \pi/2$
$|\eta_{jet}| < 2.8$

ATLAS Collaboration, "Observation of a Centrality-Dependent Dijet Asymmetry in Lead-Lead Collisions at sqrt(S_{NN})= 2.76 TeV with the ATLAS Detector at the LHC", *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 252303, arXiv:1011.6182.

+ Sélection d'événements



Spike cleaning



CMS Collaboration, "Electromagnetic calorimeter commissioning and performance with 7 TeV data", *CMS Note* **EGM-10-002** (2010).