

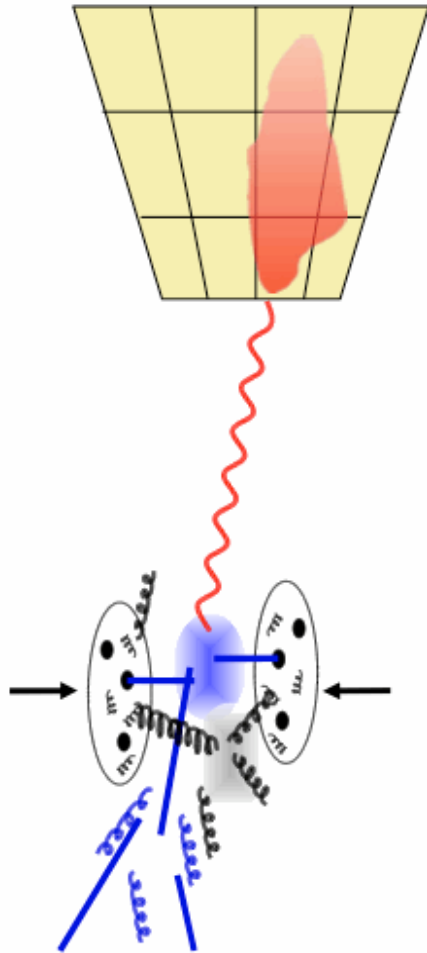


Etude de la production de photons prompts isolés avec le calorimètre EMCal d'ALICE au LHC

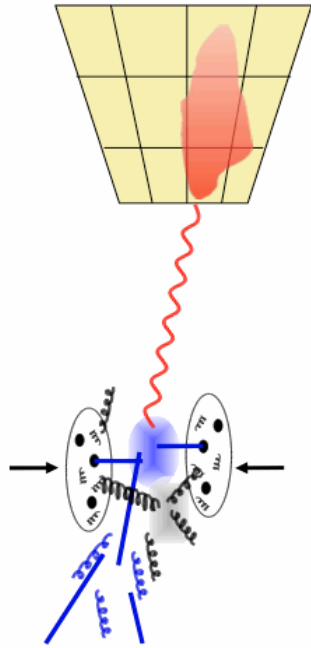
Raphaëlle ICHOU, LPSC

Seminaire LPSC Grenoble
31 mars 2011

Plan



1. Motivations **physiques**
2. L'expérience **ALICE** et son calorimètre électromagnétique
3. **L'isolement** des photons
4. **Mesure** du spectre de photons isolés en collisions p-p à 14 TeV (simulations)
5. Conclusions et perspectives



MOTIVATIONS PHYSIQUES

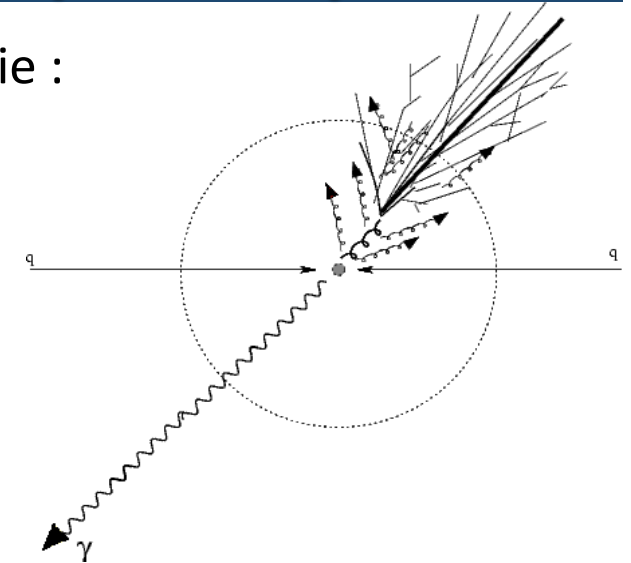
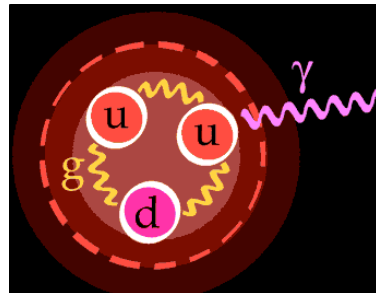
Les photons de grand p_T en collisions proton-proton

Etude des collisions proton-proton (p-p) à grande énergie :

- Caractériser le **Modèle Standard**
- Nouvelle physique ?

Les photons γ = particules électromagnétiques formées dans les collisions des **quarks** (q) et **gluons** (g) :

- Etudier la théorie de l'**interaction forte** (interaction entre les q et g dans le proton) décrite par la **QCD**.
- Sonder la matière : structure des q et g dans le proton



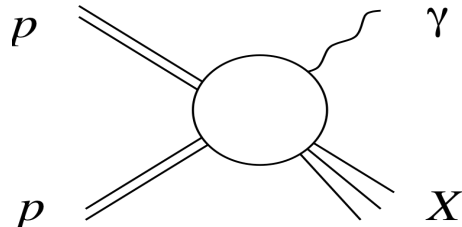
Three Generations of Matter (Fermions)

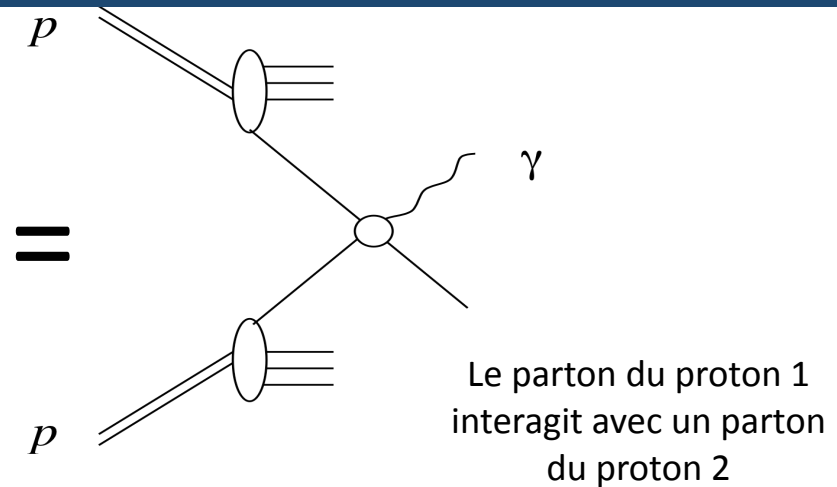
	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	up	charm	top	photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	down	strange	bottom	gluon
	< 2.2 eV	< 0.17 MeV	< 15.5 MeV	< 1 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	Z
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	electron	muon	tau	W
				weak force

Quarks (left), Leptons (left), Bosons (Forces) (right)

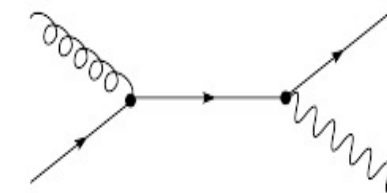
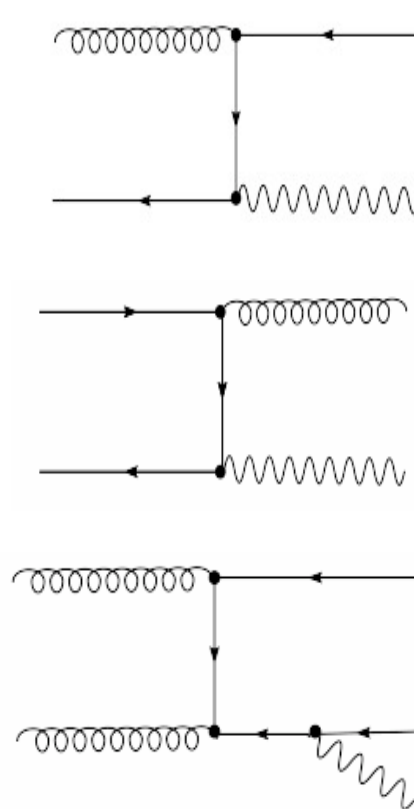
En comparant aux prévisions de la QCD perturbative

Production de photons prompts en collisions p-p

$$p + p \rightarrow \gamma + X =$$


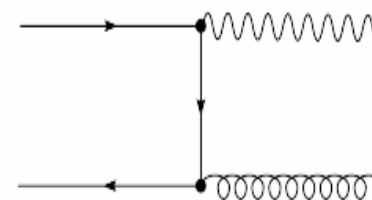


= direct

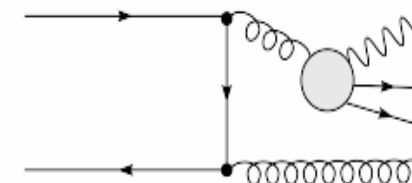


Compton

+



Annihilation

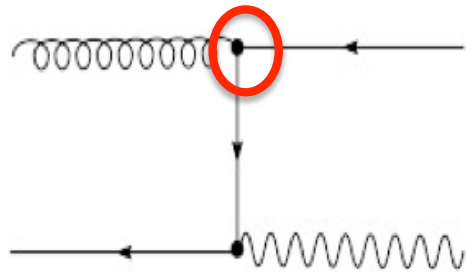


+ ...
termes d'ordre
supérieur en α_s

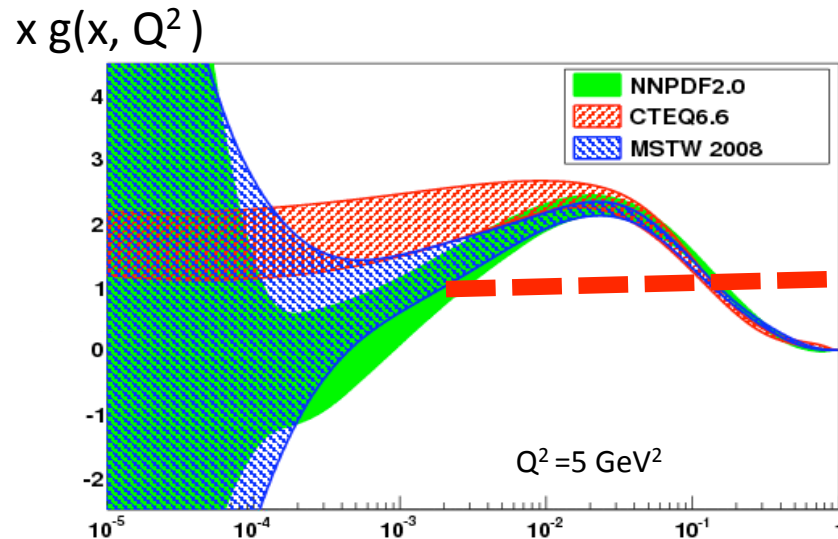
+ fragmentation

Intérêt des γ prompts en collisions p-p

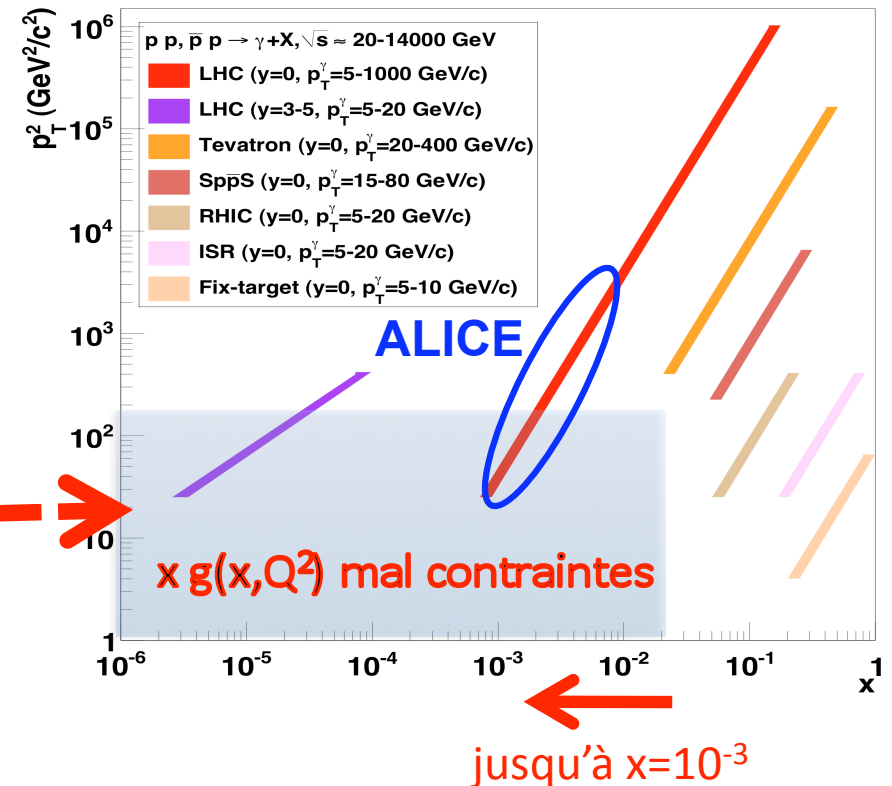
1. Etudier la **QCD perturbative** à des énergies encore inégalées
2. Contraindre les **distributions partoniques** à petit x :



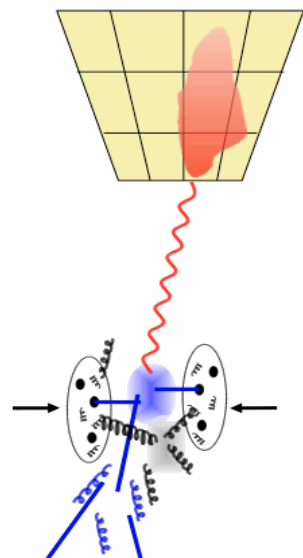
$$x \approx \frac{2p_T}{\sqrt{s}}$$



Plan (x, Q^2) accessible par les photons :



3. **Aussi : référence** pour la production de photons dans le plasma de quarks et de gluons (QGP) en **collisions A+A** (ALICE)

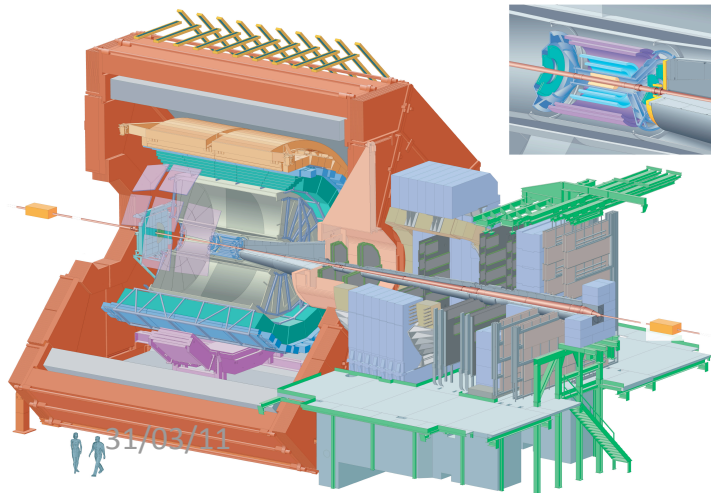
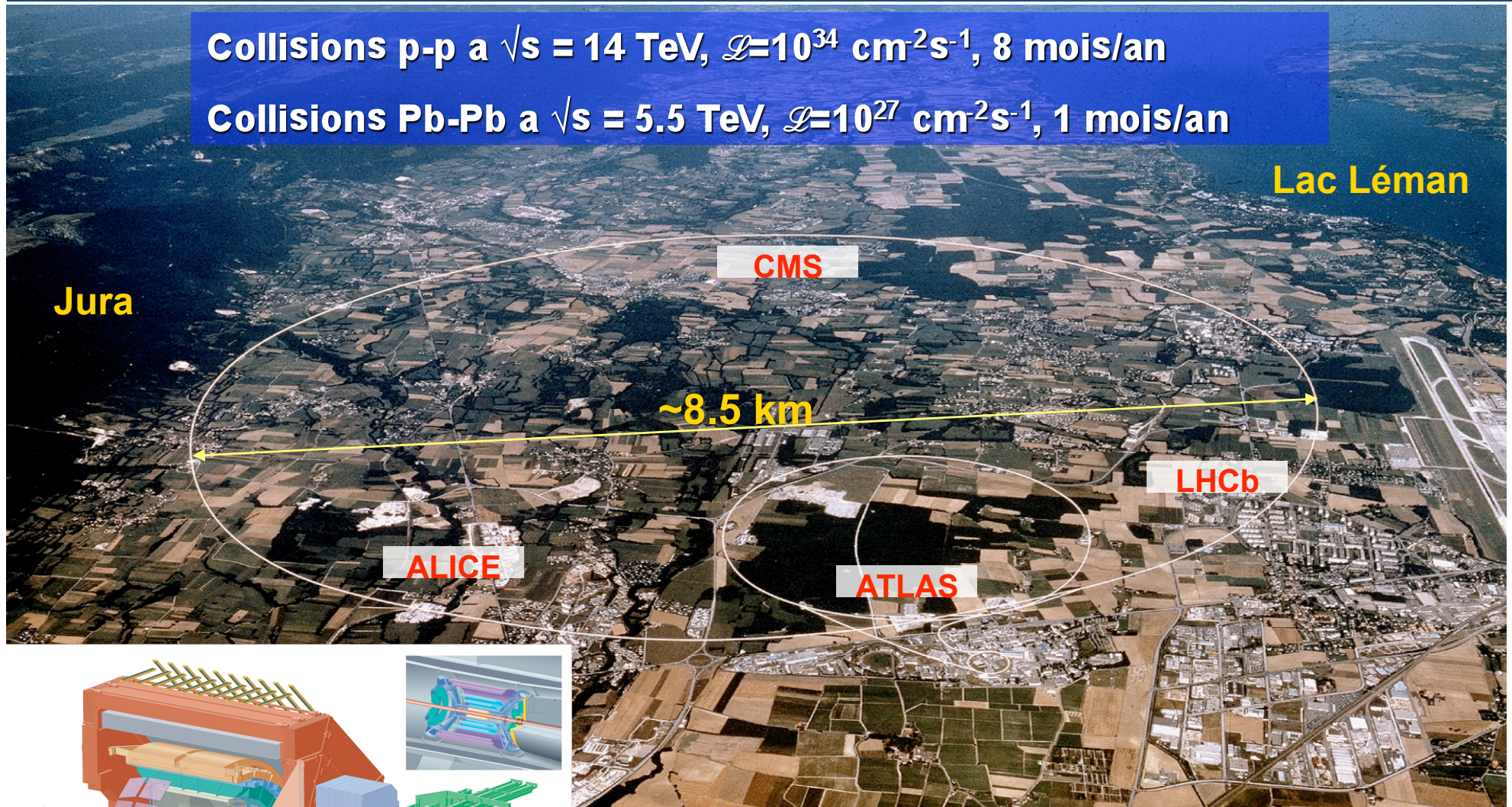


L'EXPERIENCE ALICE ET SON CALORIMÈTRE EMCAL

ALICE (A Large Ion Collider Experiment) au LHC

Collisions p-p a $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$, $\mathcal{L}=10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, 8 mois/an

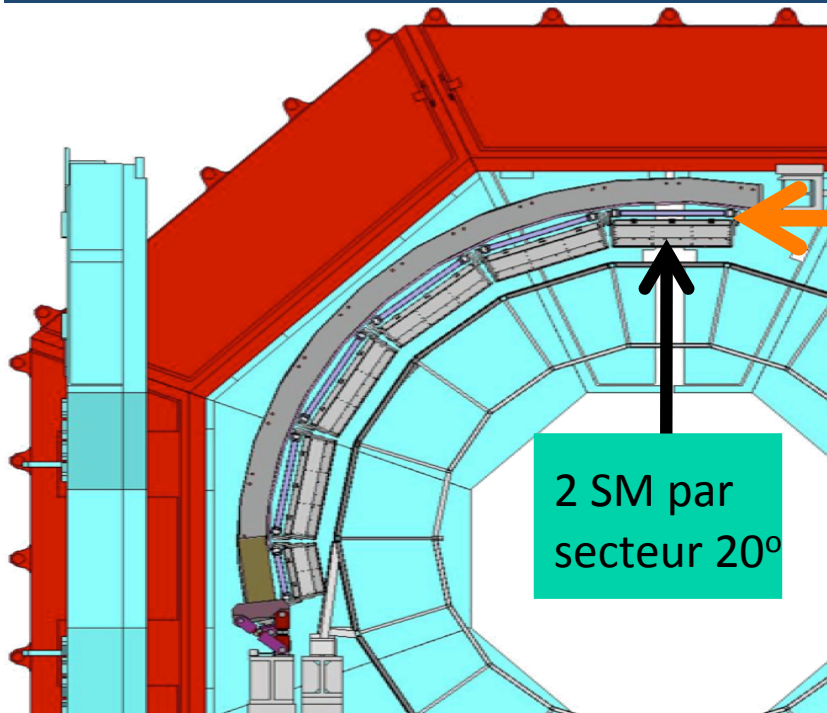
Collisions Pb-Pb a $\sqrt{s} = 5.5 \text{ TeV}$, $\mathcal{L}=10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, 1 mois/an



ALICE : dédiée a l'étude

- du QGP (collisions Pb-Pb)
- de la QCD (collisions p-p)

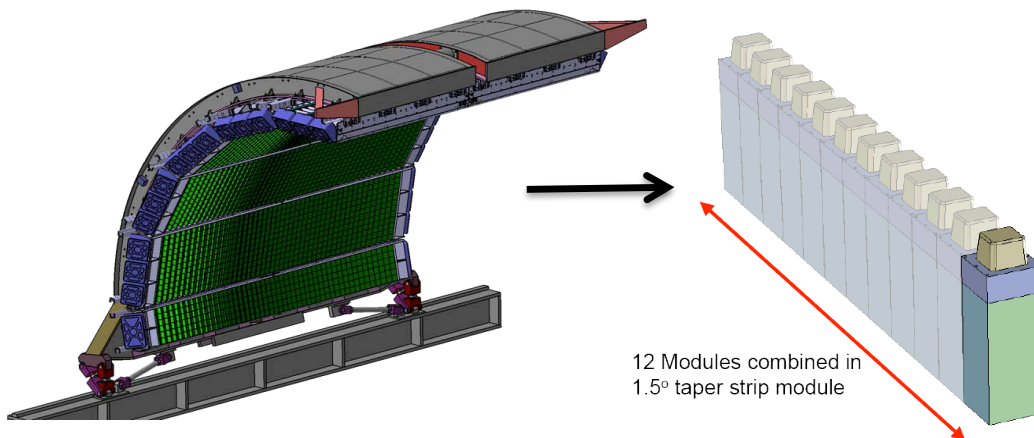
EMCal (Calorimètre ElectroMagnétique) dans ALICE



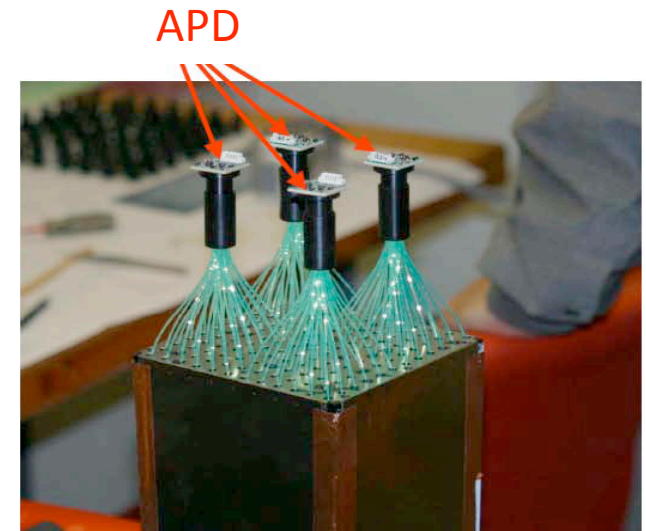
2 SM par
secteur 20°

EMCal

- 10 Super-Modules (SM)
- $\Delta\phi = 100^\circ$, $|\eta| < 0.7$
- Résolution en énergie $\sim 10\%/ \sqrt{E}$
- A environ 4.5 m du point d'interaction
- Granularité : $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.014 \times 0.014$



EMCal = 10 Super Modules



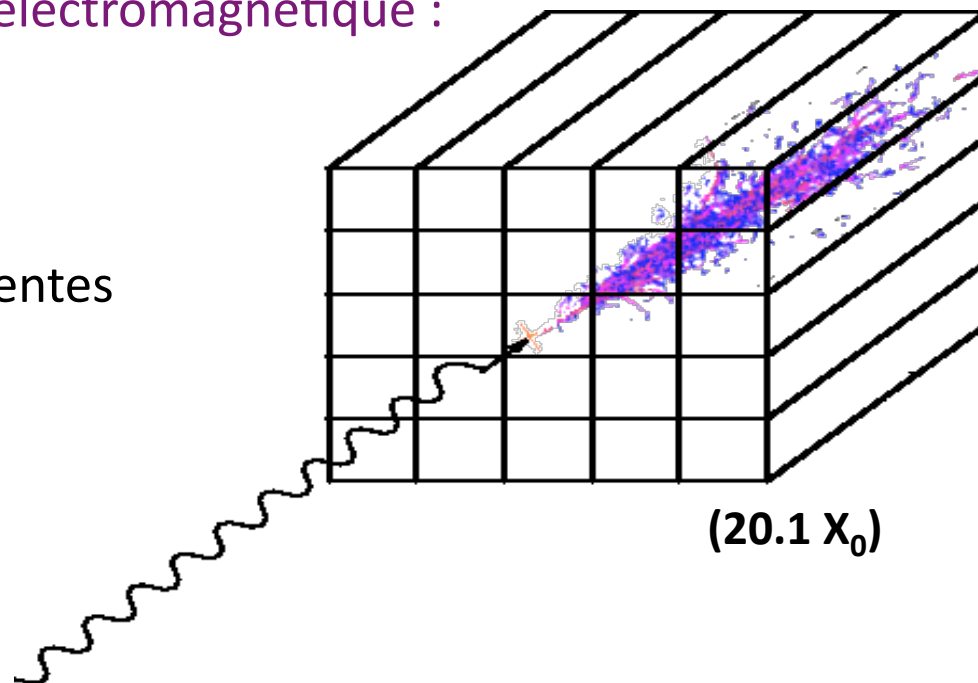
- 77 couches de 1.76mm Sci et 1.44mm Pb
- Surface = 6x6 cm²
- Lecture via fibres optiques

Détection et reconstruction des γ dans EMCal

Gerbe électromagnétique :

Algorithme de clusterisation :

1 cluster = ensemble de tours adjacentes (possédant un côté commun) dont l'énergie est supérieure à **100 MeV**.



Discrimination des particules chargées :

Pas de particule chargée associée dans le système de trajectographie

Efficacité d'association cluster-trace $\approx 80\%$ pour les électrons

→ 1^{er} lot de « photons » = clusters neutres

Etalonnage de l' énergie dans EMCal (masse π^0)

EMCal dans ALICE :

- Prise de données de 2009 :

p-p @ 900 GeV

- Prise de données de 2010 :

p-p @ 7 TeV

Pb-Pb @ 2.76 TeV

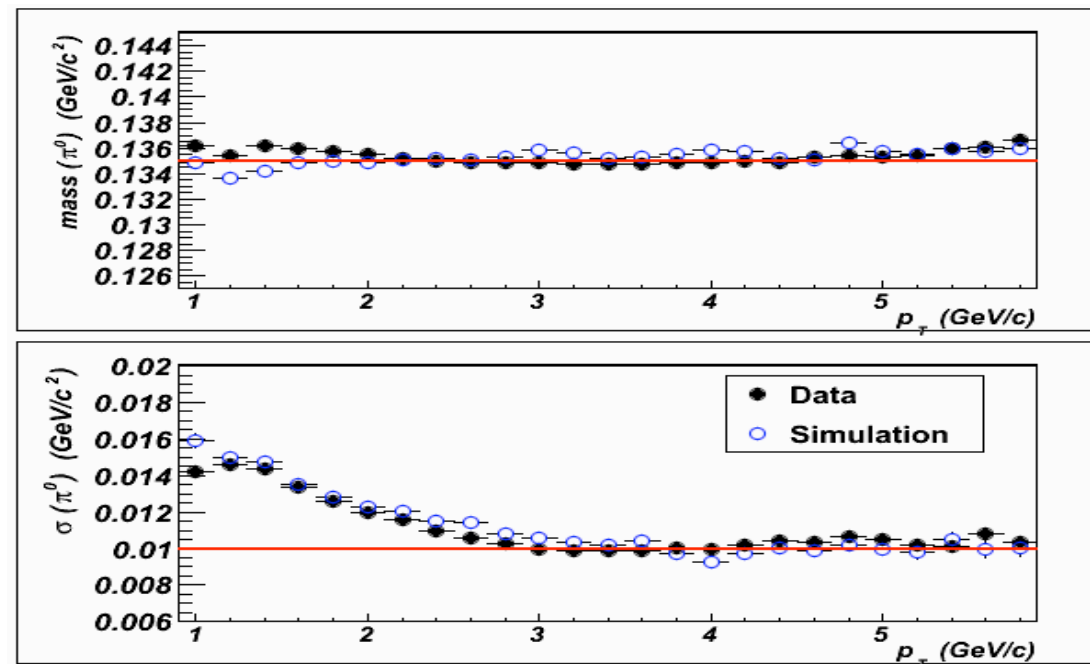
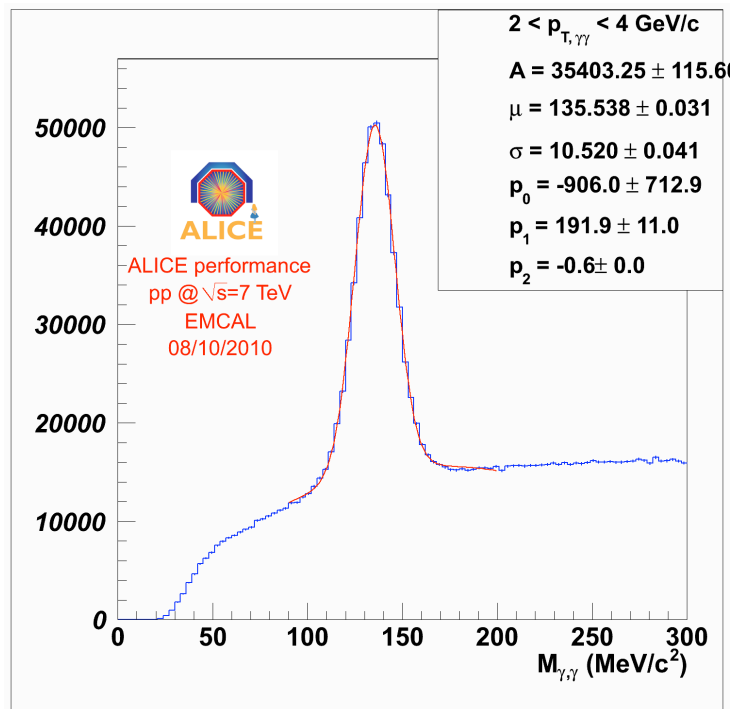
4 Super-
Modules

- Prise de données de 2011 :

p-p @ 2.76 TeV et 7 TeV

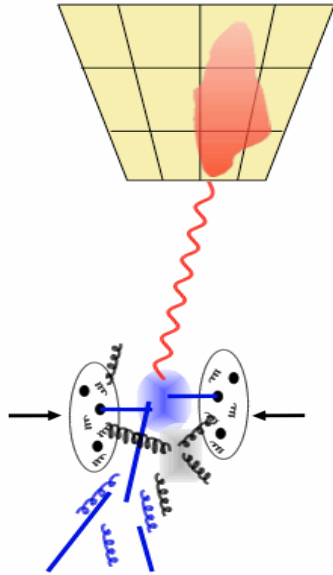
10 Super-Modules

Détermination de la position et de la largeur du pic de masse du π^0 en fonction du p_T du π^0 :



Echelle d'énergie
d'EMCal (calibration)

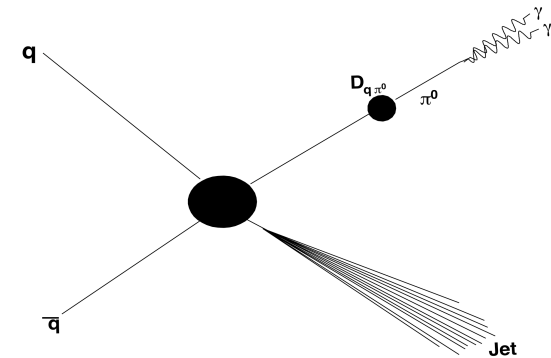
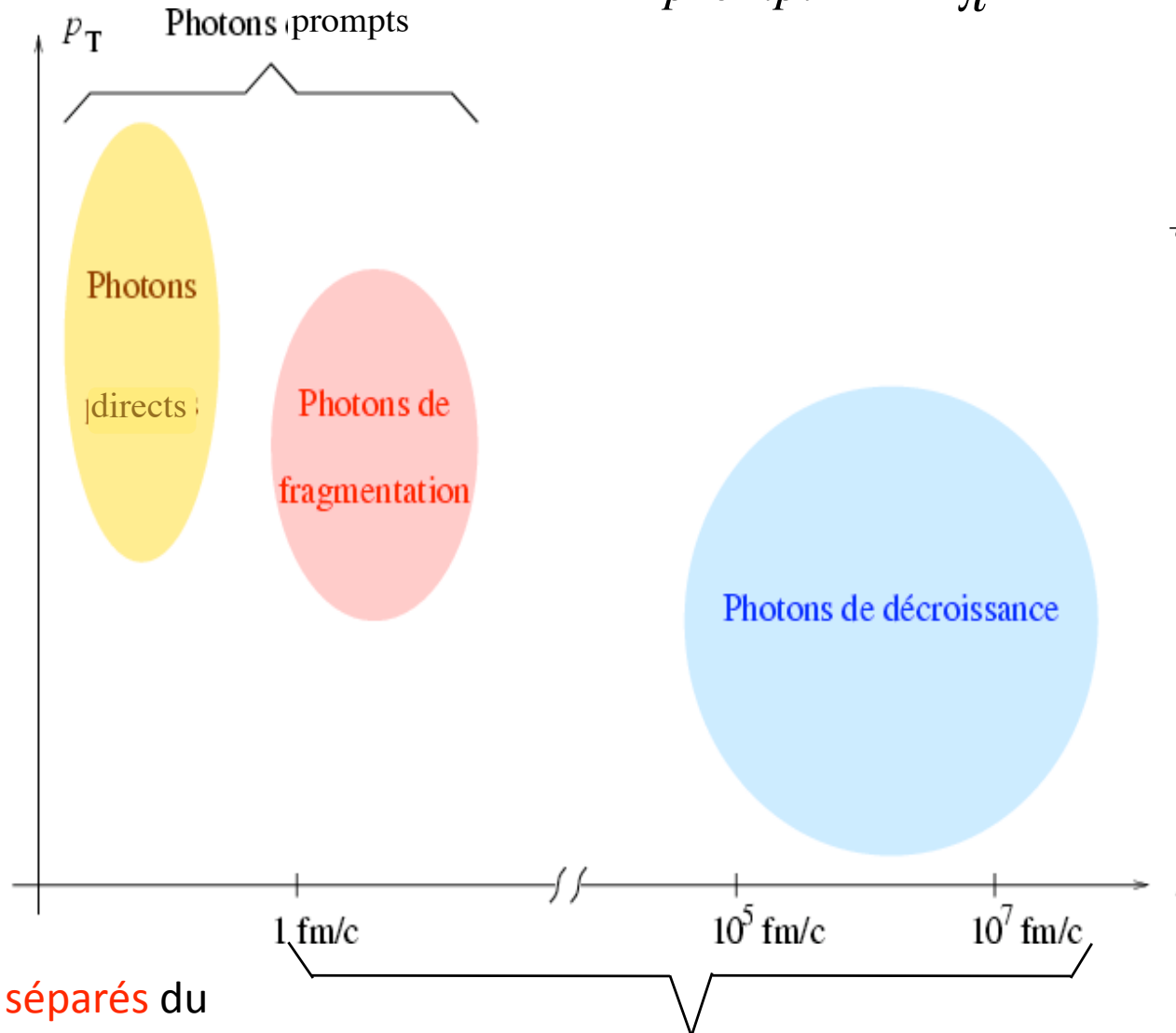
Résolution en énergie
d'EMCal



L'ISOLEMENT DES PHOTONS

Les sources de photons

$$\gamma = \gamma_{prompt} + \gamma_{\pi^0}$$

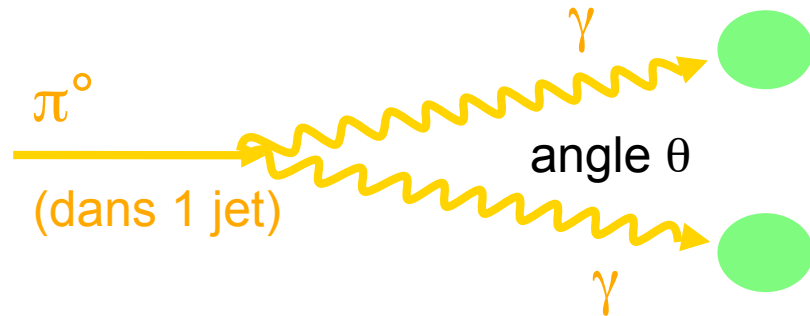


Emis **séparés** du
bruit de fond
hadronique

Emis **dans un jet, accompagnés** d'un
important bruit de fond hadronique

Problématique: photon ou pion neutre ?

$$\gamma = \gamma_{prompt} + \gamma_{\pi^0}$$

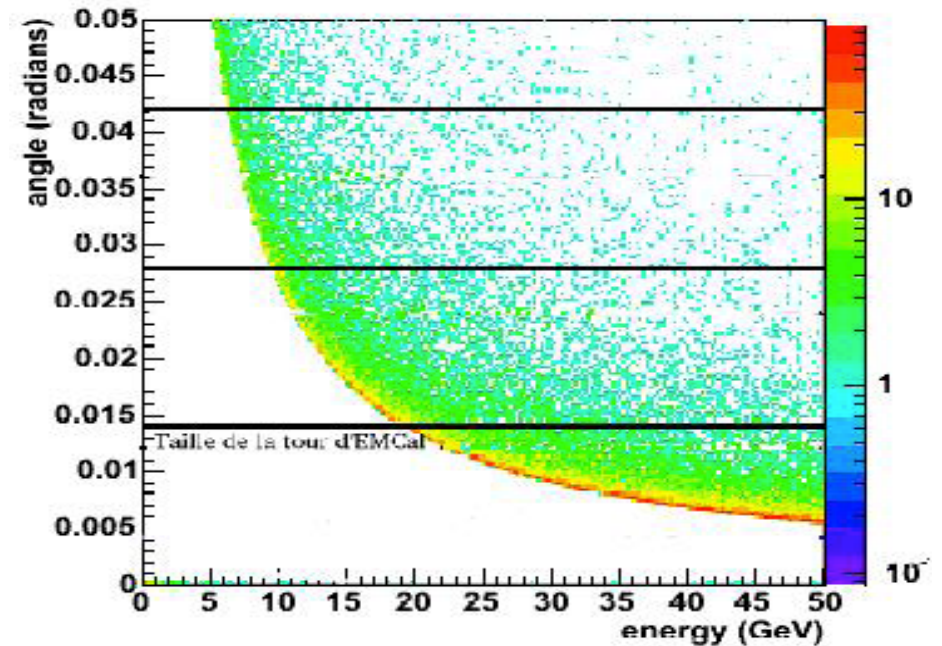


$\gamma\gamma$ se superposent au-delà de $p_T \sim 30$ GeV/c
(indifférenciables dans EMCal !)

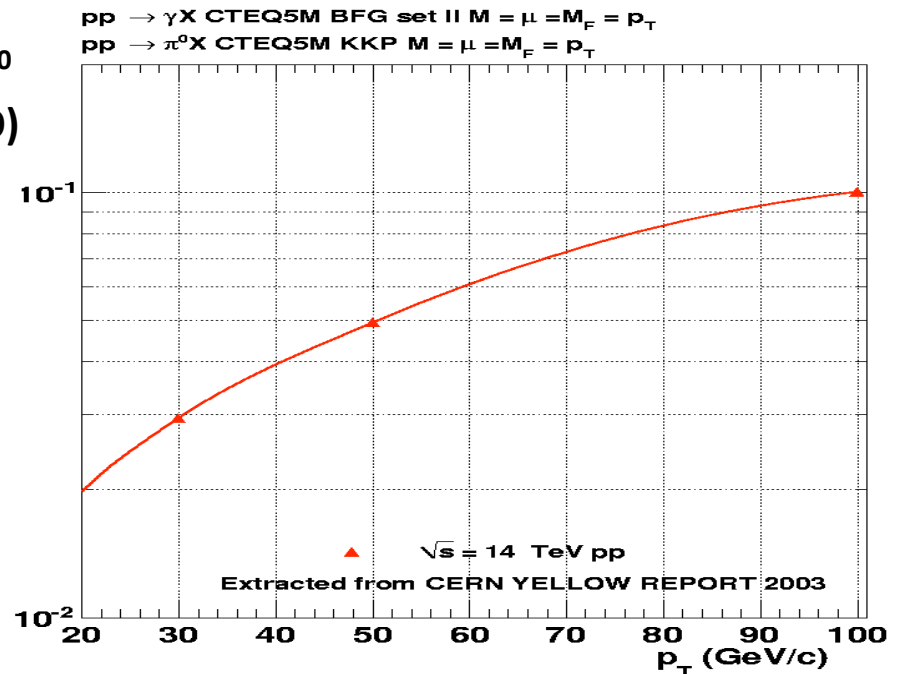


Très grand bruit dû
aux photons venant du π^0 :

10-100 fois plus de π^0 que de γ prompts !



γ / π^0
(NLO)



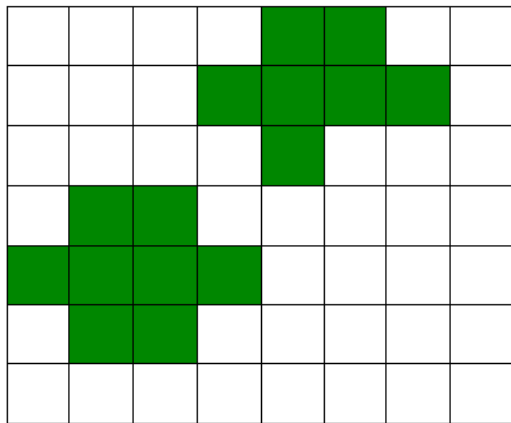
Problématique: photon ou pion neutre ?

$p_T < \sim 8 \text{ GeV/c}$

Clusters séparés

→ Analyse de
masse invariante

$\pi^0(\text{jet}) \longrightarrow \gamma \gamma$



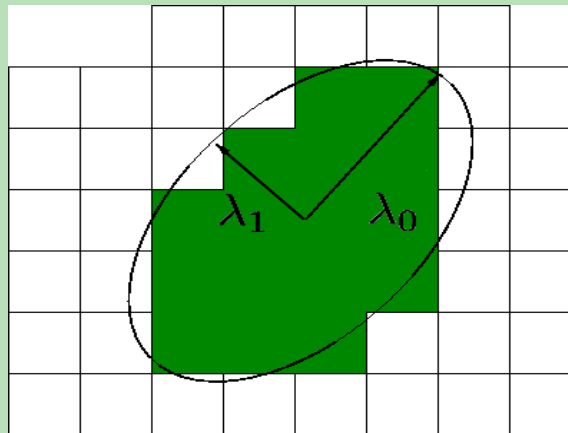
31/03/11

$8 \sim < p_T < \sim 45 \text{ GeV/c}$

Clusters se superposant
Forme de gerbe asymétrique

→ Analyse de la
forme de la gerbe (PID)

$\pi^0(\text{jet}) \longrightarrow \gamma \gamma$

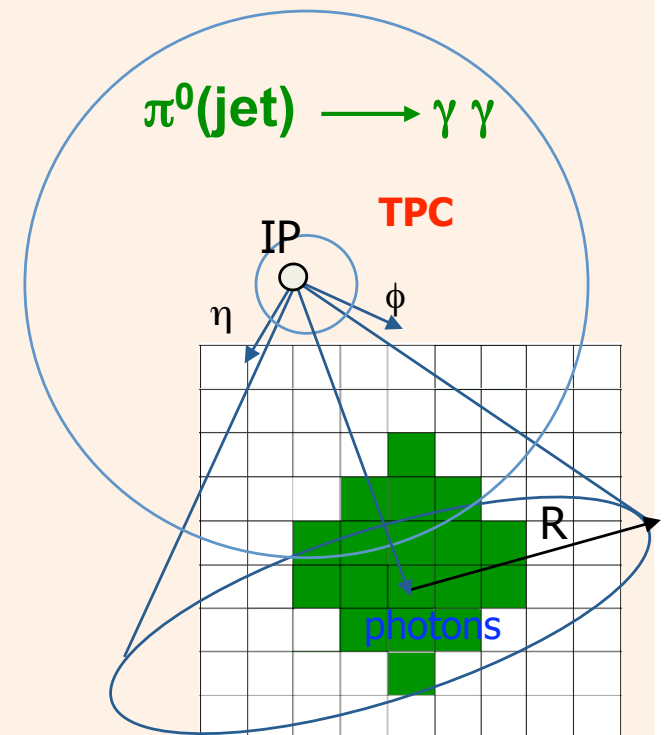


Seminaire LPSC -- Raphaëlle Ichou

$p_T > 45 \text{ GeV/c}$ (EMCal)

Clusters confondus
Forme de gerbe sphérique :

→ Méthode **d'isolement**
dans un cône



15

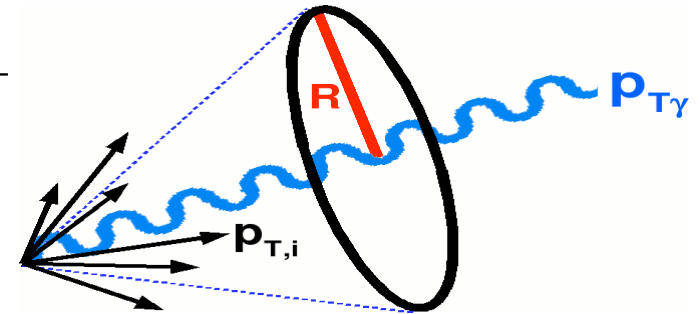
L'isolement des photons

Méthode :

Un **photon** est défini comme **isolé** si la somme des p_T des hadrons dans un cône de rayon **R** autour de la direction du γ est inférieure à **fraction ε** du p_T du photon :

$$R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$$

$$\sum_i p_{T_i} \leq \varepsilon \cdot p_{T_\gamma}$$



Objectifs :

- **Réduire** les **photons du π^0** : sélectionner les vrais photons
- **Réduire** photons de fragmentation : **accéder** aux γ **directs**

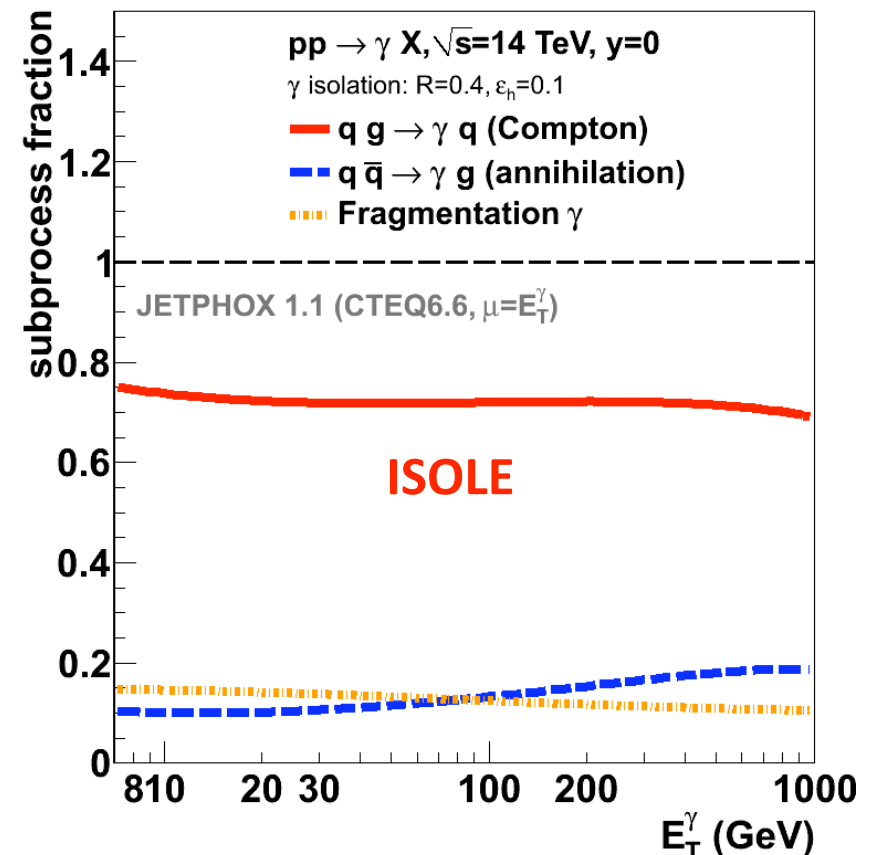
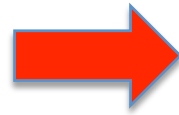
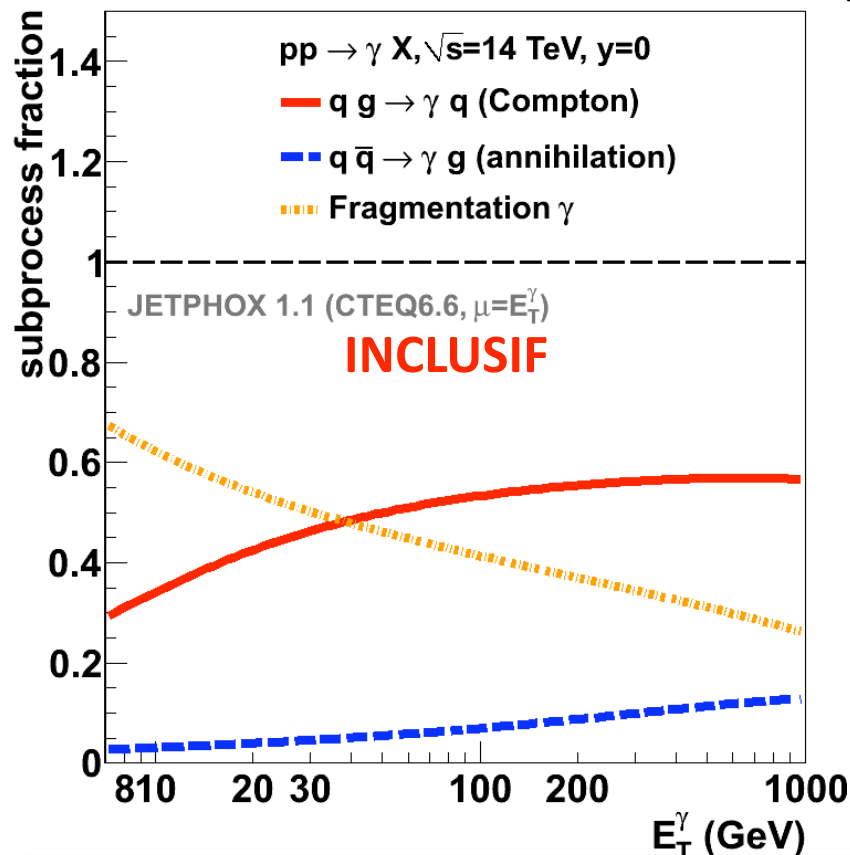
Isolement optimisé :

- **R le plus grand possible** (contraintes d'acceptance)
- **ε le plus petit possible** (contraintes de l'évènement p-p sous-jacent ou UE)

Choix : $R = 0.4$; $\varepsilon = 0.10$

Composantes de γ avec et sans isolement

JETPHOX : programme QCD au NLO



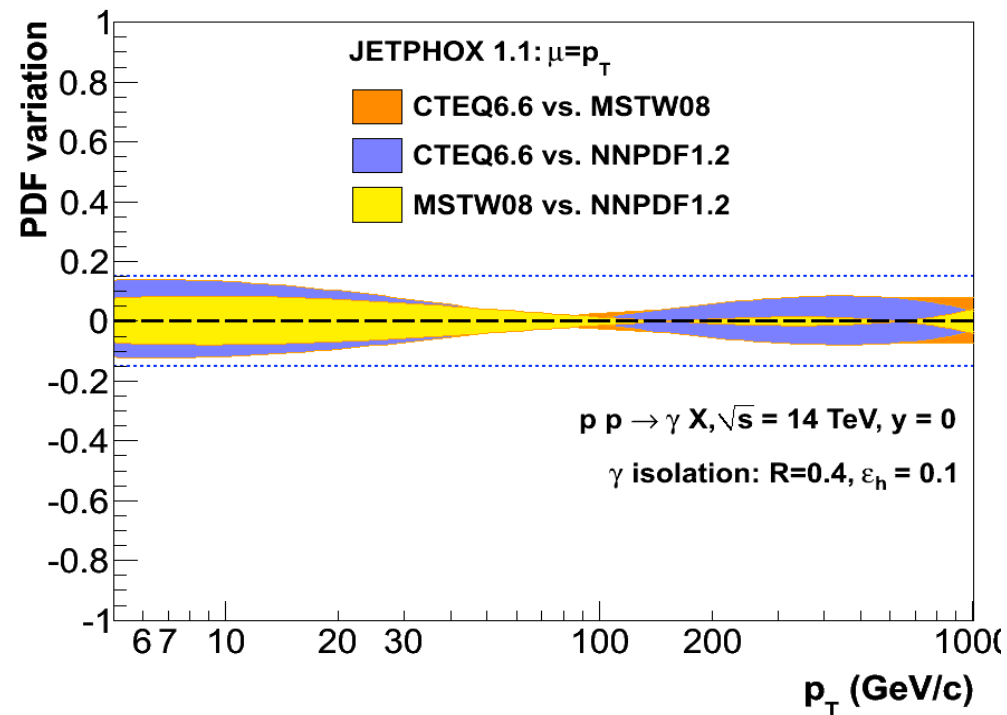
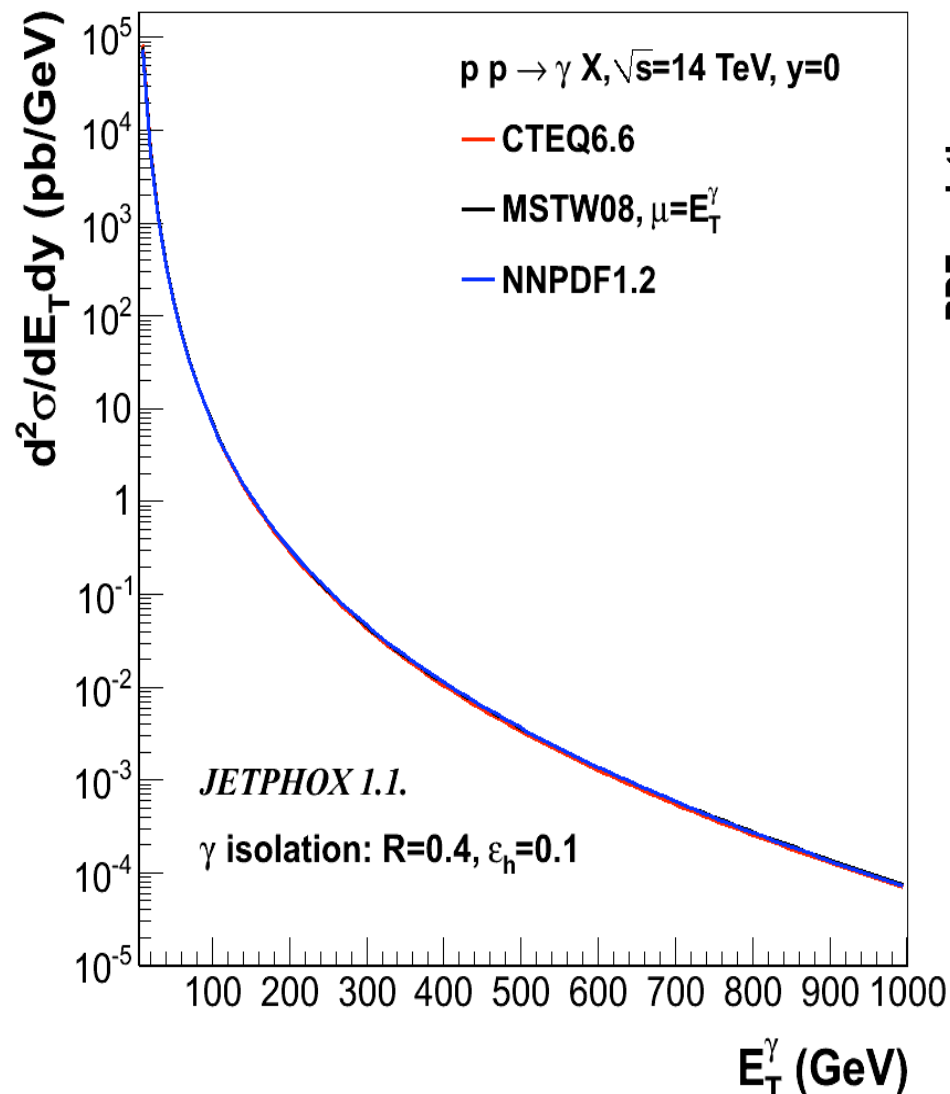
INCLUSIF :

- La composante de **fragmentation** domine à bas p_T .
- Au dessus de ~ 35 GeV, le processus **Compton** domine.

ISOLEMENT :

- Augmentation de la contribution **Compton** dans l'échantillon.
- Forte diminution de la contribution de fragmentation.

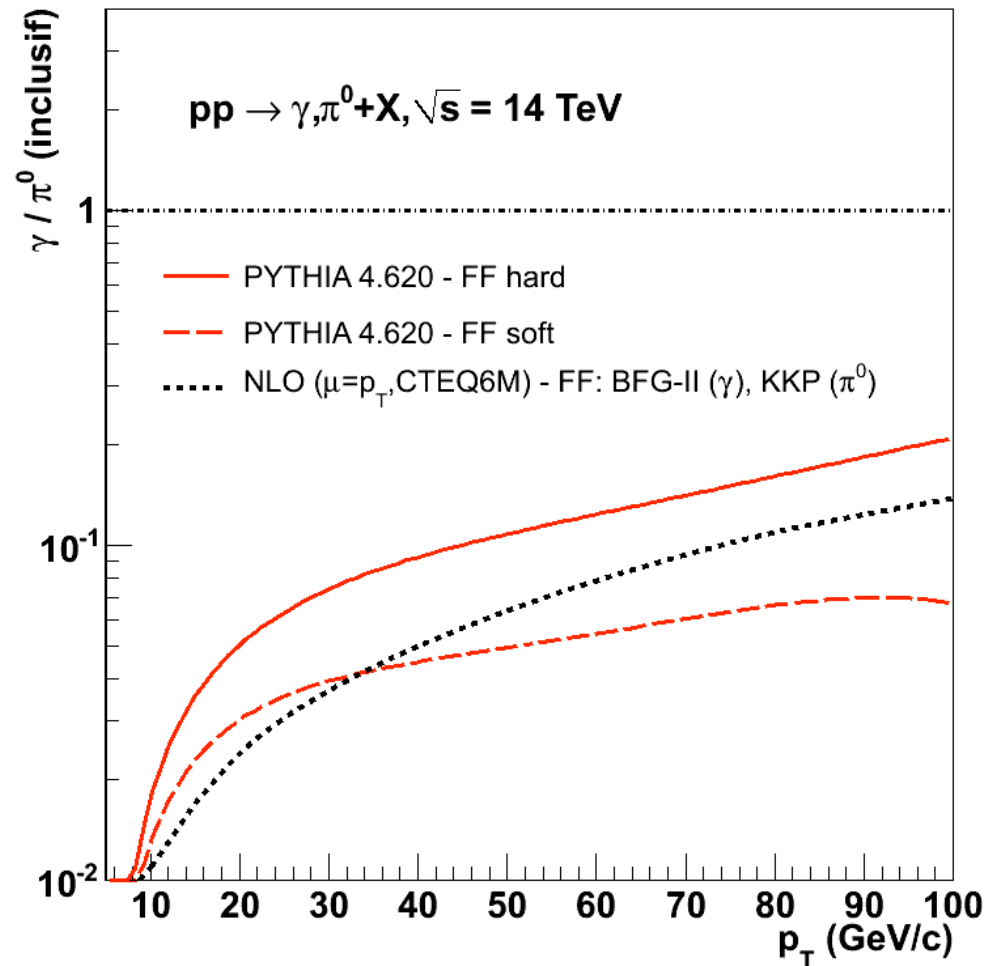
Sensibilité des γ isolés aux PDF



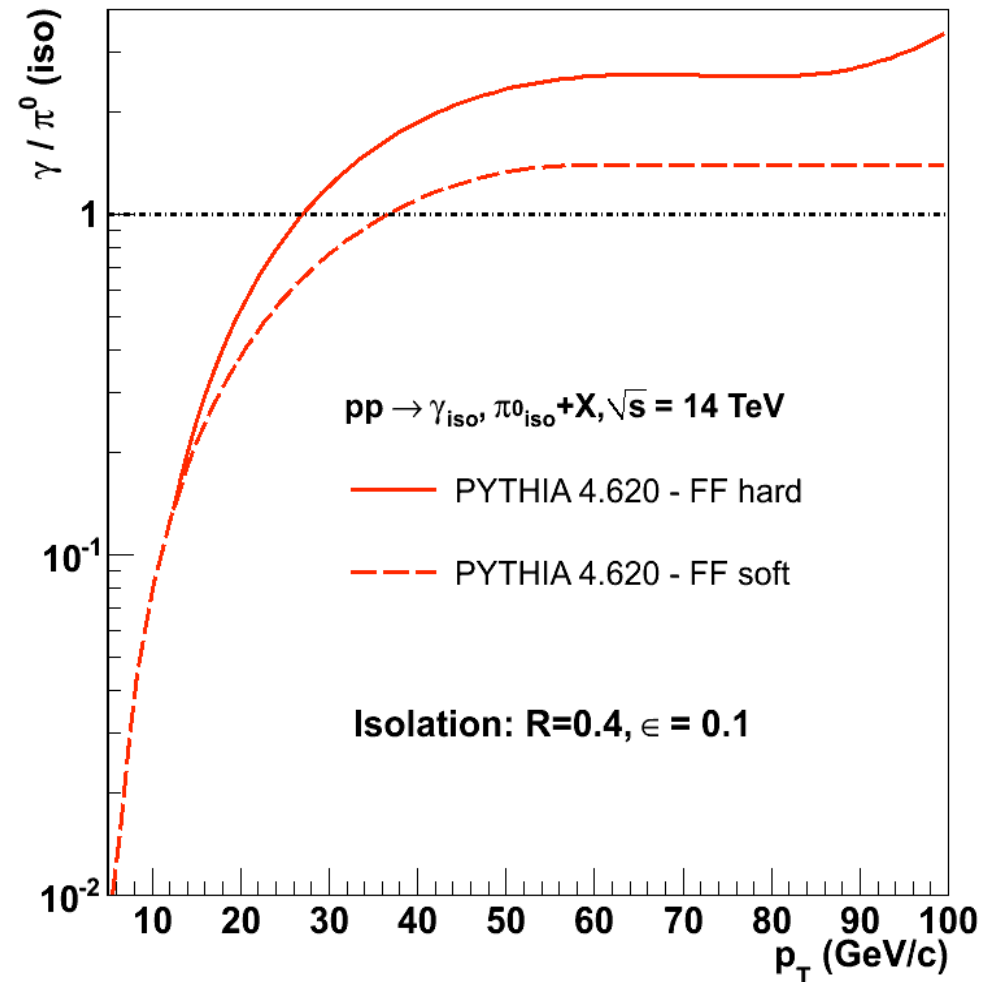
15% de variation maximale de la section efficace, due au choix de la PDF

Voir : *R. Ichou et al. arXiv:1005.4529 [hep-ph] Phys.Rev.D82:014015,2010.*

Le signal sur bruit avec et sans isolement

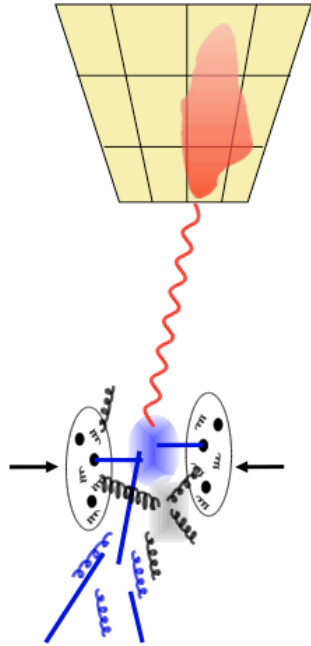


$S/B \sim 1\% - 20\%$



$S/B^{\text{iso}} > 1$ au-delà de $\sim 30 \text{ GeV/c}$

**Rapport amélioré (facteur 20)
grâce aux coupures d'isolement**



MESURE DU SPECTRE DE PHOTONS ISOLES EN P-P A 14 TEV

Description de la méthode

$$E \frac{d^3 \sigma^{iso \gamma}}{d^3 p} = \frac{1}{2\pi p_T} \frac{1}{p(\gamma | \gamma)} \left[\frac{N_{cluster}^{iso} id \gamma}{L \times \varepsilon_{iso} \times \varepsilon_{reco} \times A \times \Delta y \times \Delta p_T} - p(\gamma | \pi^0) \frac{d\sigma^{iso \pi^0}}{dp_T} \right]$$

$p_T = [10-100] \text{ GeV}/c$

signal-plus-bruit

bruit

- **Reconstruction, identification** et **isolement** des γ événement par événement.

- **Soustraction** statistique du bruit de fond résiduel des π^0 **isolés** (PYTHIA)

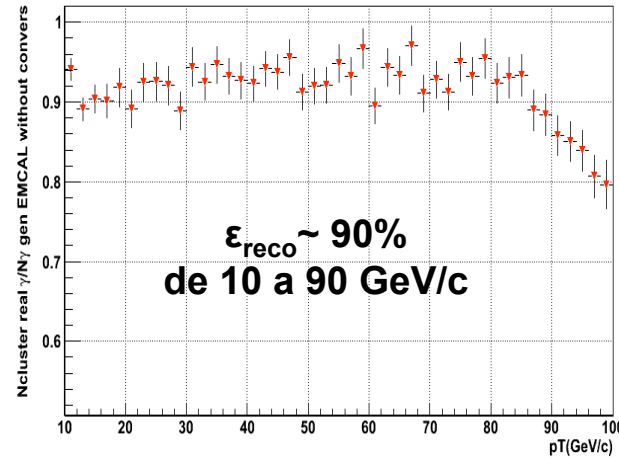
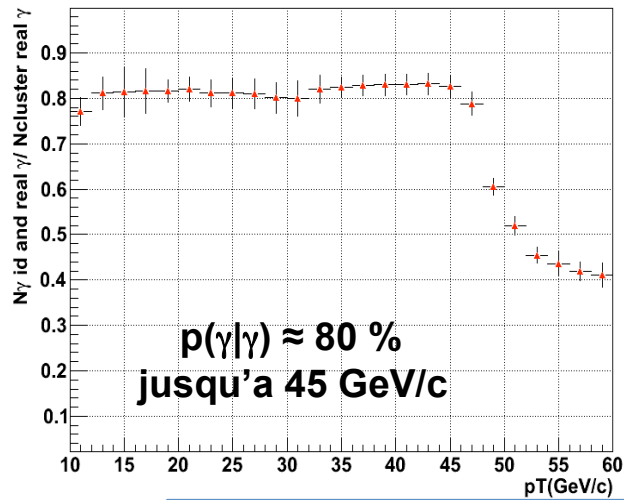
+ Corrections :

- Efficacités d'identification, isolement, reconstruction
- Acceptance :

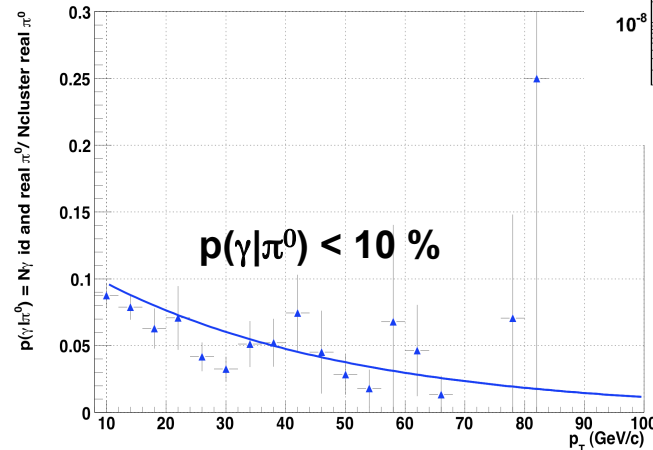
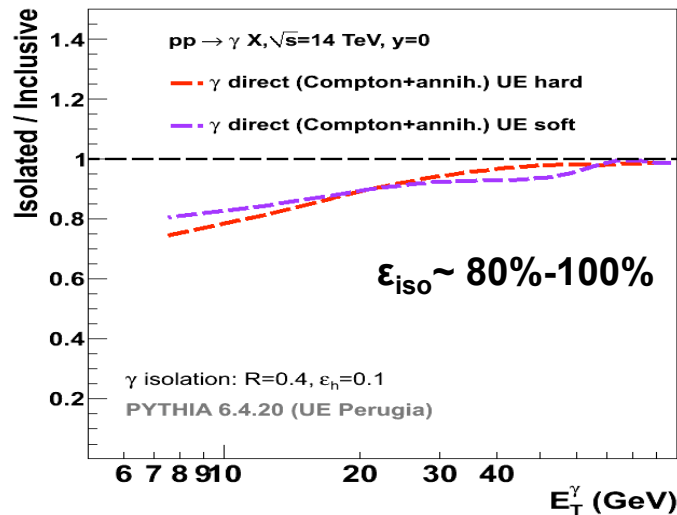
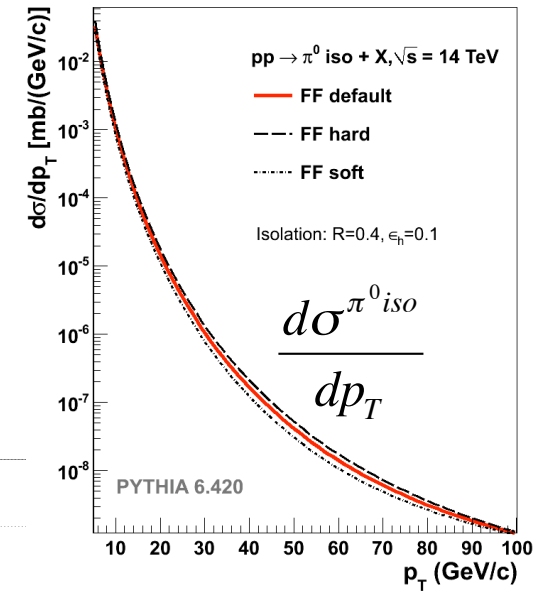
$$A = \Delta\eta \cdot \Delta\varphi \text{ (EMCAL + coupure fiduciaire)} / 2\pi = 10\%$$

Calcul de la section efficace (sim :PYTHIA+GEANT)

$$E \frac{d^3 \sigma^{iso \gamma}}{d^3 p} = \frac{1}{2\pi p_T} \frac{1}{p(\gamma | \gamma)} \left[\frac{N_{cluster}^{iso} id \gamma}{L \times \varepsilon_{iso} \times \varepsilon_{reco} \times A \times \Delta y \times \Delta p_T} - p(\gamma | \pi^0) \frac{d\sigma^{iso \pi^0}}{dp_T} \right]$$

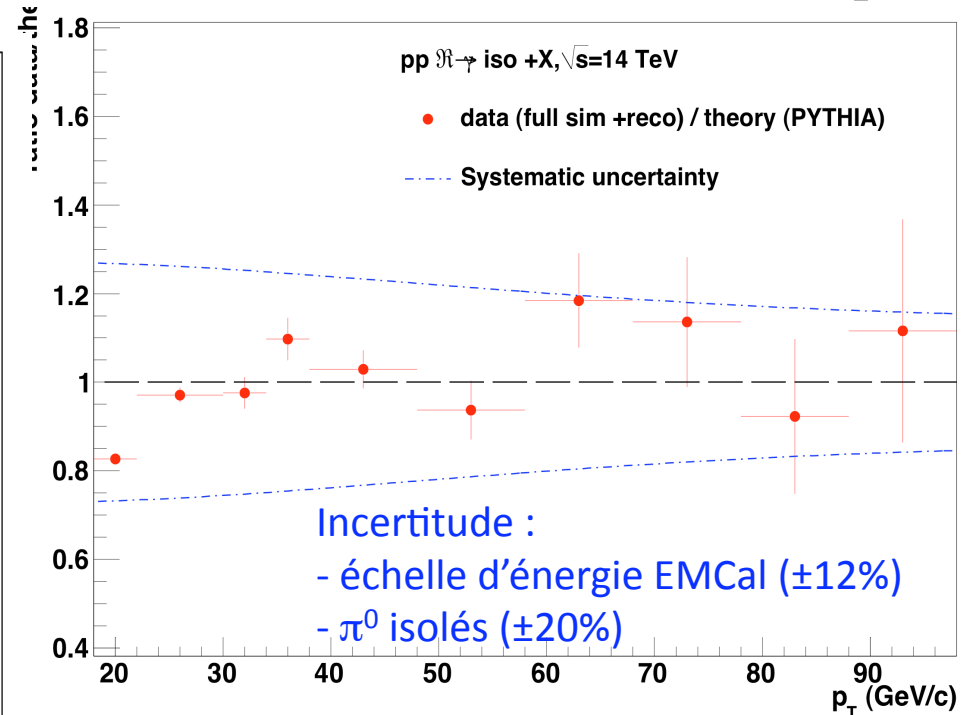
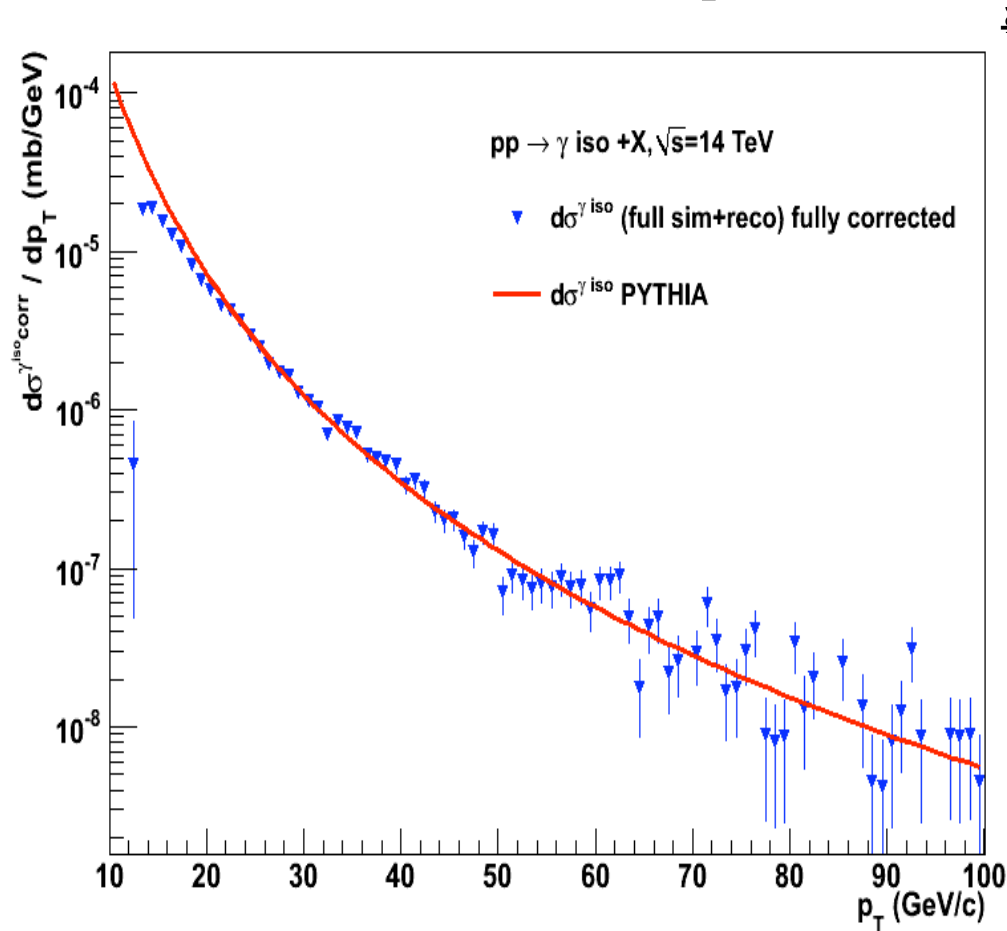


$$p(\gamma | \gamma) \times A \times \varepsilon_{reco} \times \varepsilon_{iso} \approx 0.8 \times 0.1 \times 0.9 \times 0.9 \approx 6\%$$



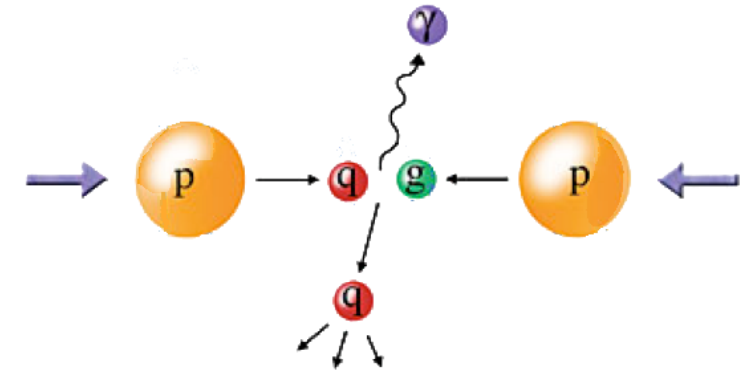
Spectre final de γ^{iso} reconstruit et corrigé

$$E \frac{d^3 \sigma^{\text{iso } \gamma}}{d^3 p} = \frac{1}{2\pi p_T} \frac{1}{p(\gamma | \gamma)} \left[\frac{N_{\text{cluster}}^{\text{iso}} \text{id } \gamma}{L \times \varepsilon_{\text{iso}} \times \varepsilon_{\text{reco}} \times A \times \Delta y \times \Delta p_T} - p(\gamma | \pi^0) \frac{d\sigma^{\text{iso } \pi^0}}{dp_T} \right]$$



Bon accord avec le spectre d'entrée,
 dans les barres d'erreur statistiques et
 systématiques
→ Validation de la méthode

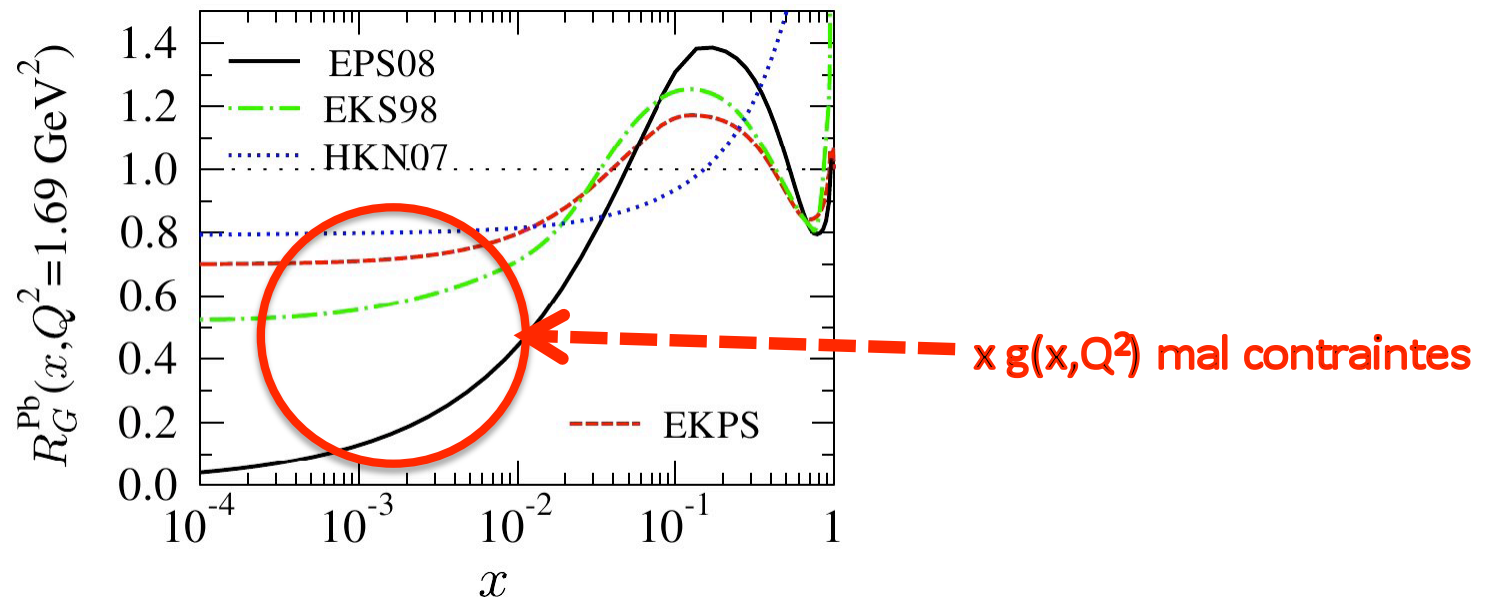
Conclusion générale



- **Intérêt de l'étude des photons prompts en p-p :**
 - Etudier la QCD perturbative au LHC
 - Contraindre les distributions de gluons dans le proton.
 - Référence pour la production de photons en Pb-Pb
- **Etudes théoriques :**
 - Contributions des sous-processus avec et sans isolement : γ^{iso} Compton dominant
 - Sensibilité du spectre de γ^{iso} aux PDF : variations de $\pm 15\%$.
 - Signal (γ^{iso}) et bruit (π^{iso}) : S/B amélioré d'un facteur 20 avec isolement
- **Section efficace finale de γ^{iso} à 14 TeV à mi-rapacité (simulations) :**
 - Application événement par événement de coupures d'identification (forme de la gerbe) et d'isolement des γ
 - Corrections + soustraction statistique du bruit résiduel des π^0 isolés.
 - Incertitude dominée par la contamination des π^0 isolés et l'échelle d'énergie d'EMCal

Perspectives

- Mesure des **photons directs en p-p et Pb-Pb** sur les **données** :
 - Appliquer cette méthode sur p-p @ 7 TeV et Pb-Pb @ 2.76 TeV
 - p-p, Pb-Pb: **bruit (π^{iso})** extrait directement des données.
 - Pb-Pb : **π^0 supprimés** (x4), mais **UE énorme** (50 GeV dans R=0.4)
- Quantification (NNPDF) de l'effet d'**inclure les données de photons isolés** dans les **fits globaux** pour améliorer la **PDF gluon**.
- Etude de la **sensibilité des photons isolés** en collisions **Pb-Pb** aux **PDF nucléaires (nPDF)**.



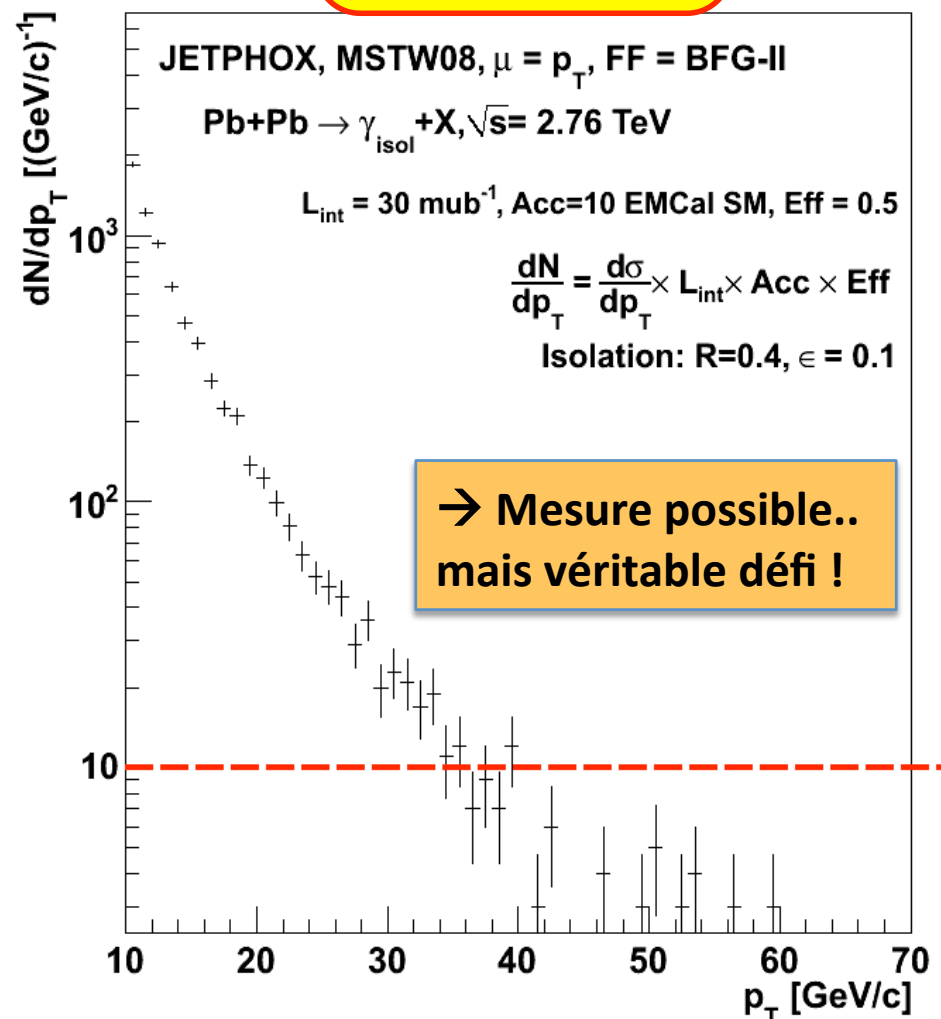
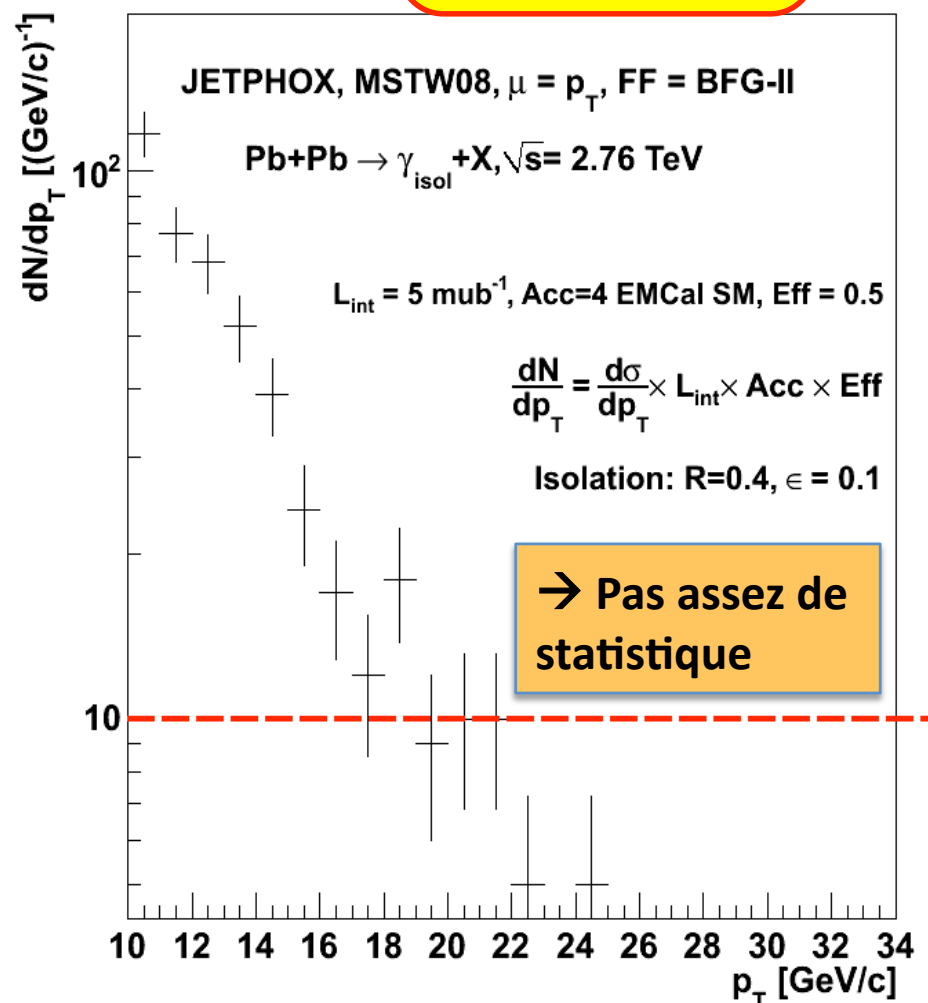
- Etude des **corrélations γ -jet** (jet quenching en Pb-Pb): **jet en coïncidence dans DCAL**



Statistiques de γ^{iso} en Pb-Pb

Pb-Pb 2010
@2.76 TeV :
 $p_{T\text{max}} = 20 \text{ GeV}/c$

Pb-Pb 2011
@2.76 TeV :
 $p_{T\text{max}} = 35 \text{ GeV}/c$

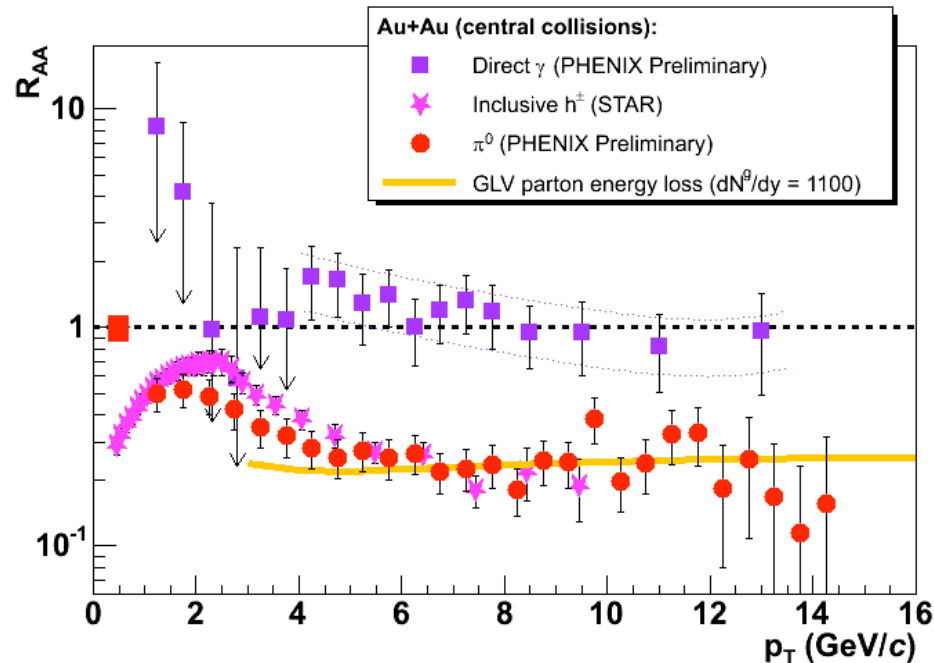




Merci !

Intérêt des γ prompts en collisions p-p

1. Référence pour la production de photons en collisions A+A :



$$R_{AA} = \frac{1}{T_{AA}} \frac{d^2 N^{AA} / dp_T d\eta}{d^2 \sigma^{pp} / dp_T d\eta}$$

$$\text{avec } T_{AA} = \frac{\langle N_{coll} \rangle}{\sigma_{pp}^{inel}}$$

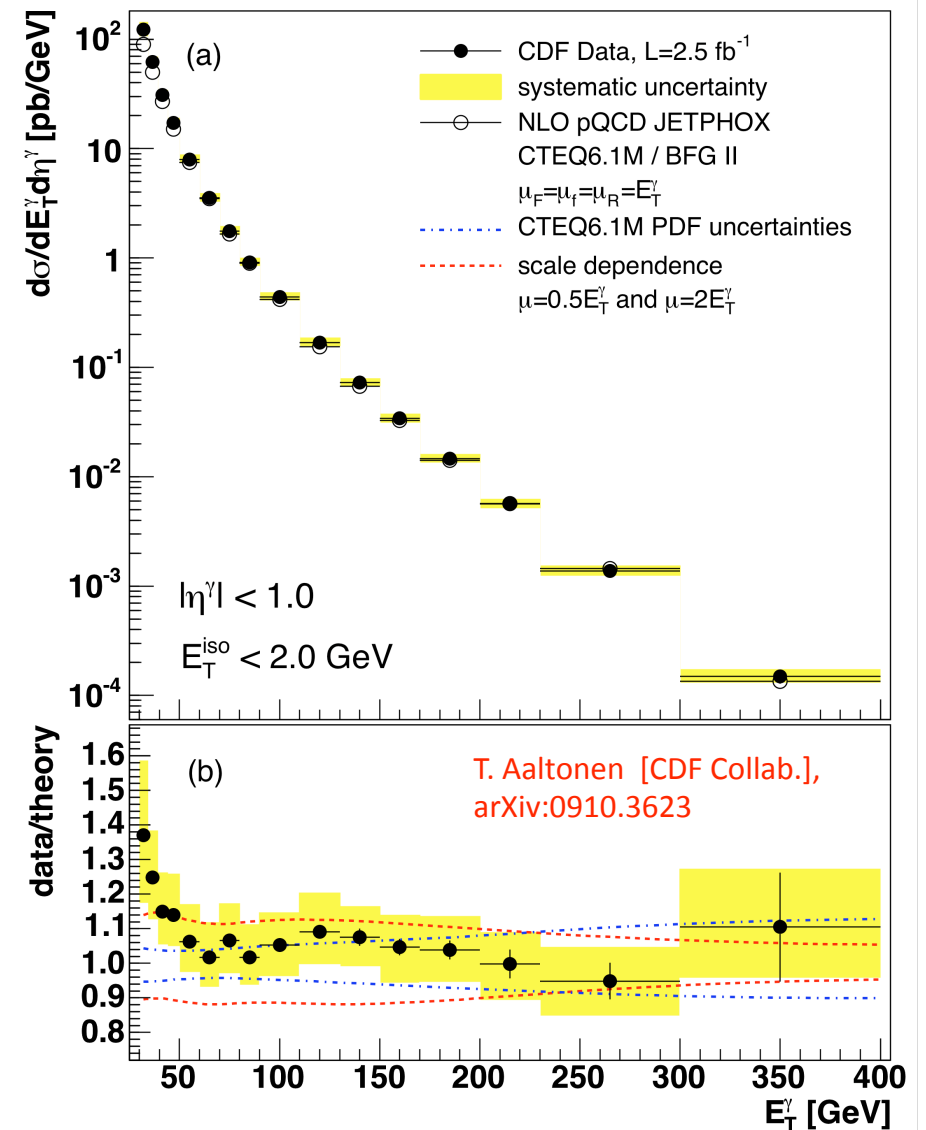
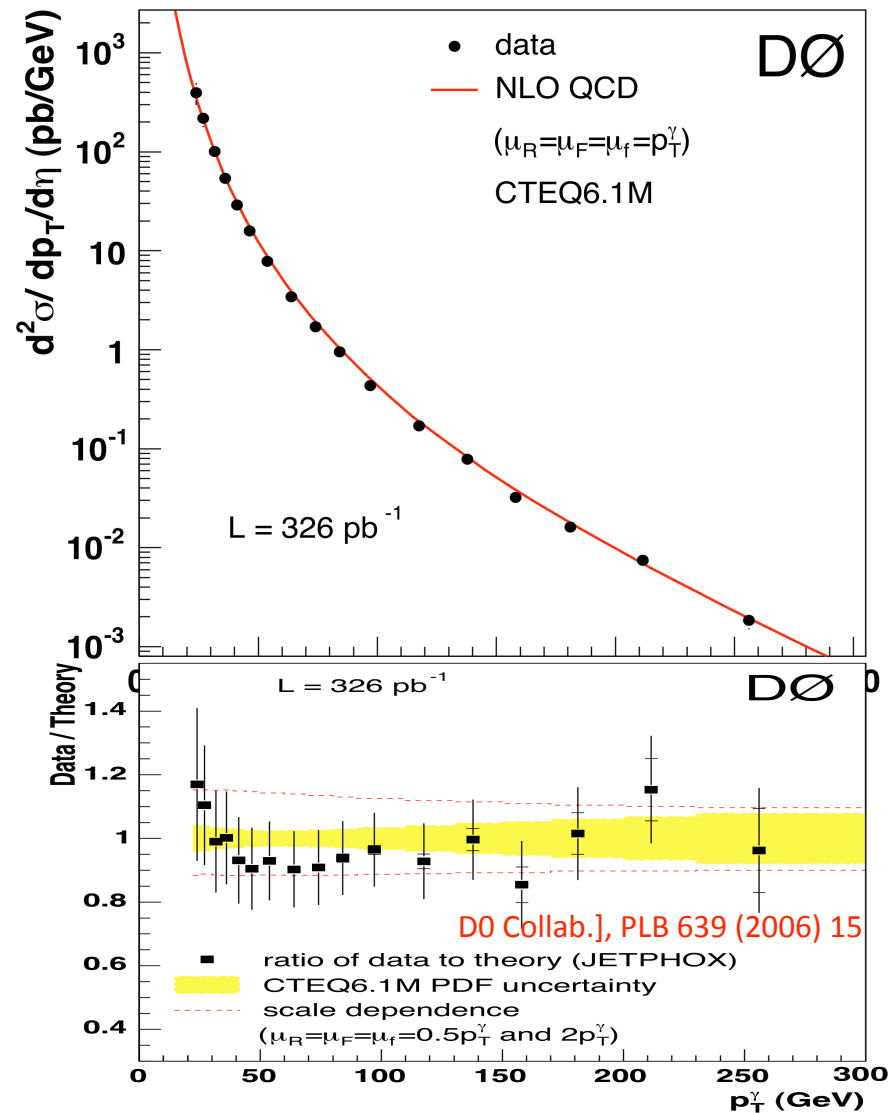
- Si $R_{AA} = 1$, aucune suppression dans le milieu
- Si $R_{AA} \neq 1$, la production en p+p n'est pas une superposition exacte de celle en A+A

$$R_{AA}^{\gamma} \approx 1 \quad (\text{au RHIC pour } p_T > 4 \text{ GeV/c})$$

Les photons : bonne sonde du milieu créé en A+A (le Plasma de Quarks et de Gluons)

→ Mesure en p+p préalable nécessaire pour servir de référence

Mesures récentes de photons isolés



Au Tevatron : bon accord données/théorie(NLO) avec CTEQ6.1M
(dans les barres d'erreur systématiques et statistiques)

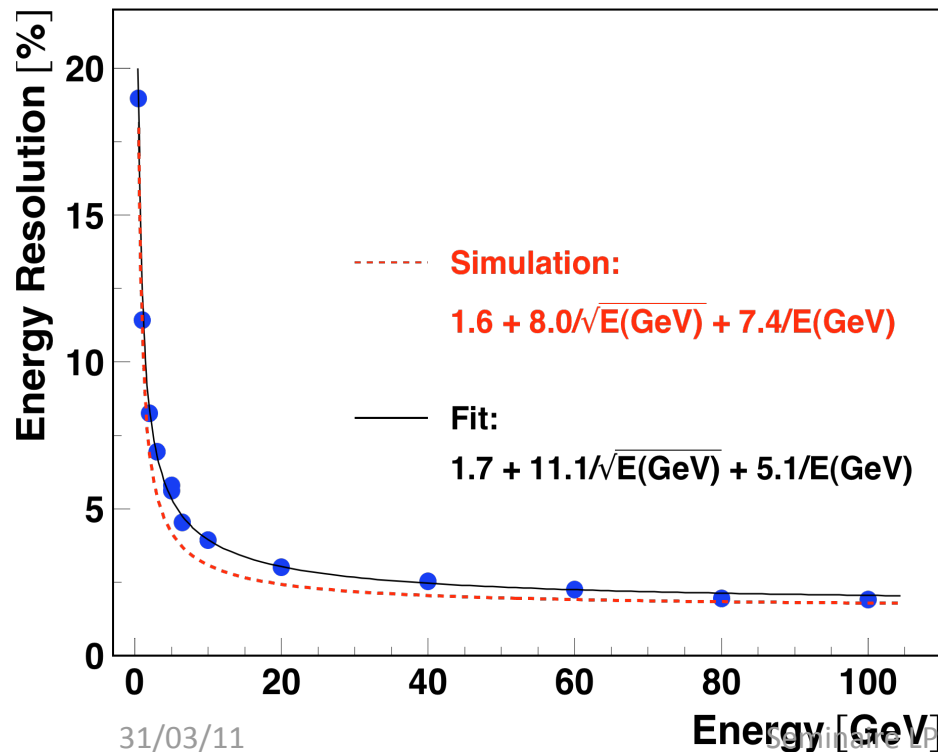
Résolution en énergie

Elle est paramétrée comme : $\frac{\Delta E}{E} = a \oplus \frac{b}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{c}{E(\text{GeV})}$

a = effets systématiques

b = effets intrinsèques du détecteur

c = bruit électronique sur toutes les tours du cluster



Résolution en énergie obtenue :

$$\frac{\Delta(E)}{E} \approx \frac{11.1\%}{\sqrt{E}} \oplus 1.7\%$$

A 10 GeV : $\Delta E = 0.5 \text{ GeV}$

A 100 GeV : $\Delta E = 3 \text{ GeV}$

Fraction de γ et π^0 isolés

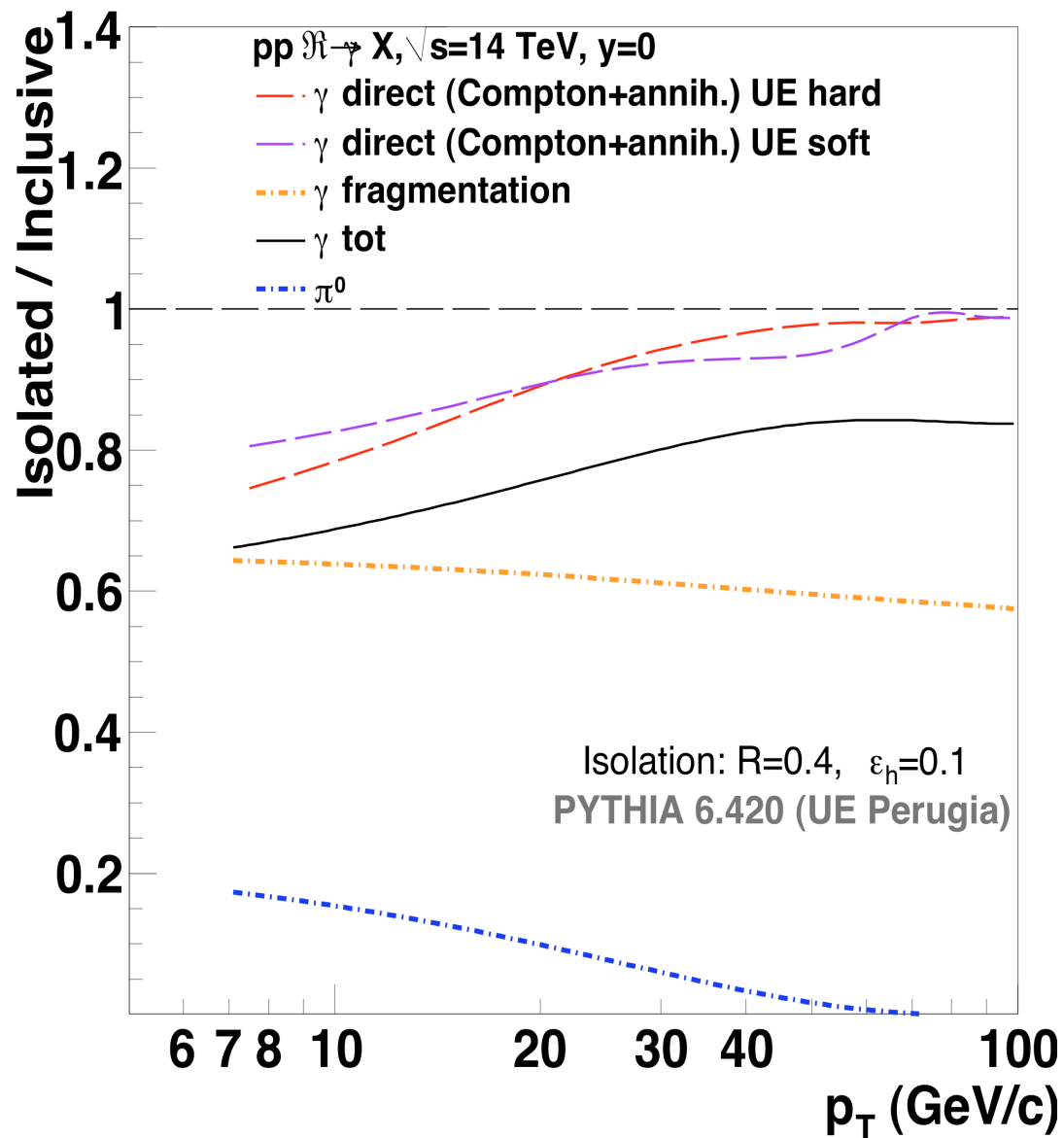
PYTHIA

PYTHIA 6.420 : (hard et soft)

UE Perugia **hard** :

+ de ISR/FSR,

- de MPI & rémanents

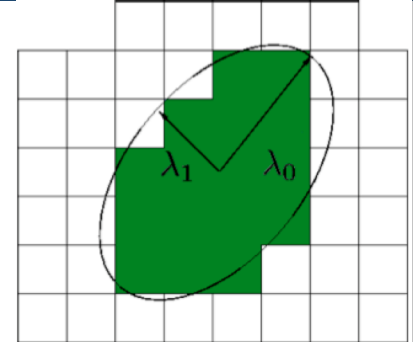


- **80%-100%** des photons Compton et d'annihilation
- **60%** des photons de fragmentation
- **70%-85%** du lot total de photons
- **De 20% à moins de 5%** des π^0

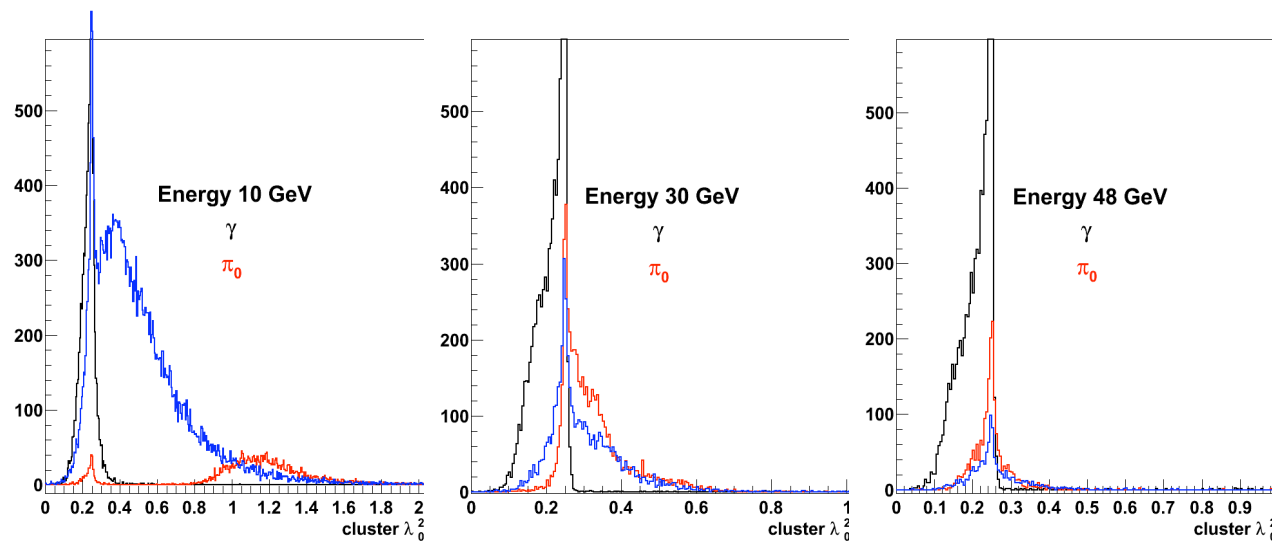
Identification des γ

✓ La méthode de la forme de la gerbe (ou SS: Shower Shape) :

Les clusters des photons du π^0 commencent à se recouvrir
Au-delà de ~ 10 GeV/c : **1 cluster allongé**.



- Détermination pour chaque cluster (selon son λ_0^2 et énergie E) issu d'une particule i : $P(\lambda_0^2 | i)$

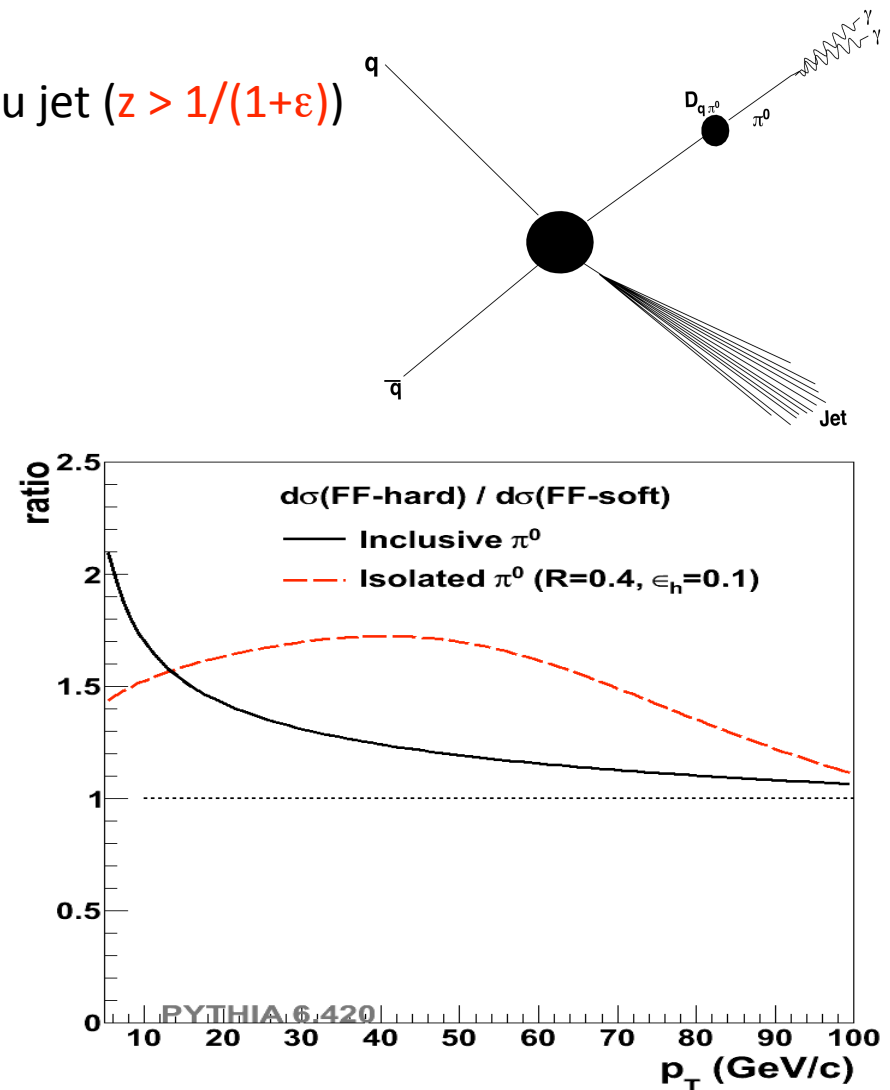
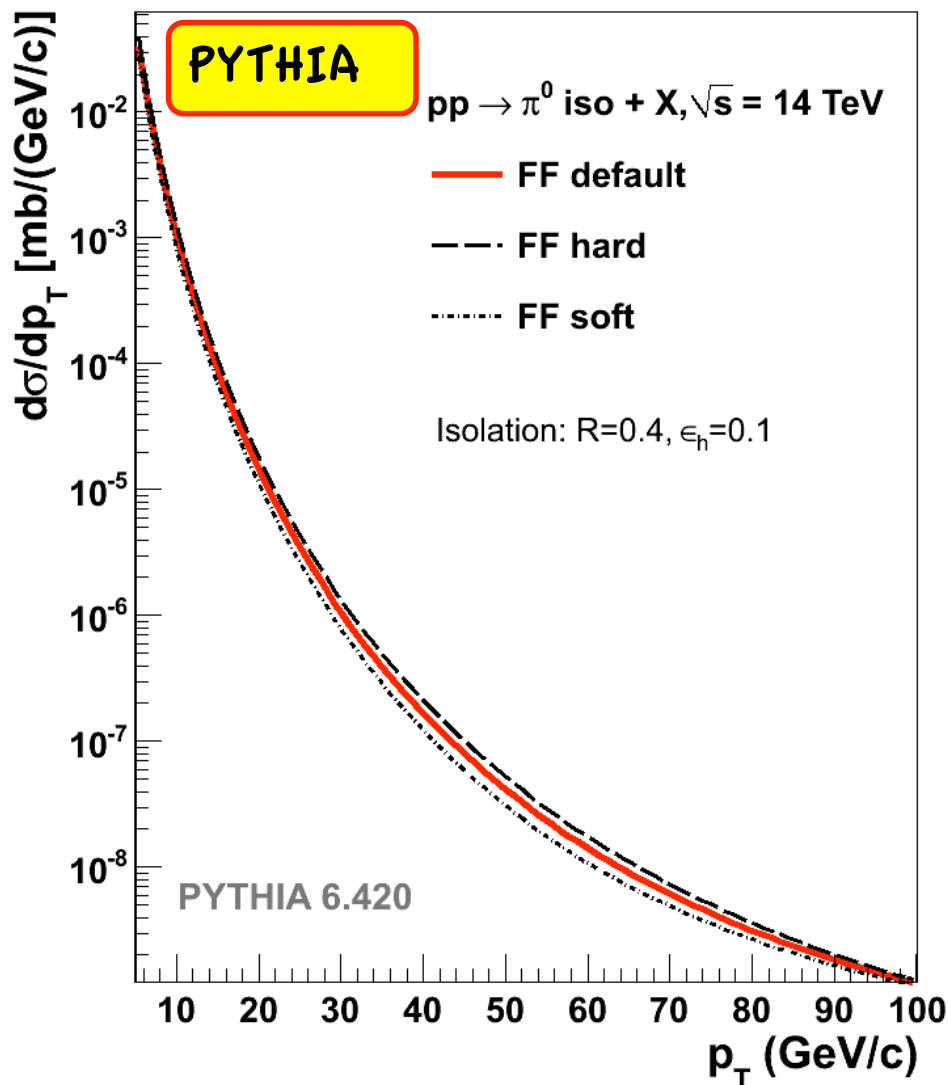


- **Poids** assigné en fonction du $P(\lambda_0^2 | i)$ à cette énergie :
$$W(i) = \frac{P(\lambda_0^2 | i)P(cluster | i)}{\sum_s P(\lambda_0^2 | s)P(cluster | s)}$$
- **Identité** = le + grand poids

Le bruit des π^{iso} de grand z

Bruit de fond majeur :

π^0 emportant une grande fraction z de l'énergie du jet ($z > 1/(1+\epsilon)$)



Selon le **choix de la FF** : jusqu' à $\pm 70\%$ d'incertitude sur le spectre de π^0 isolés.

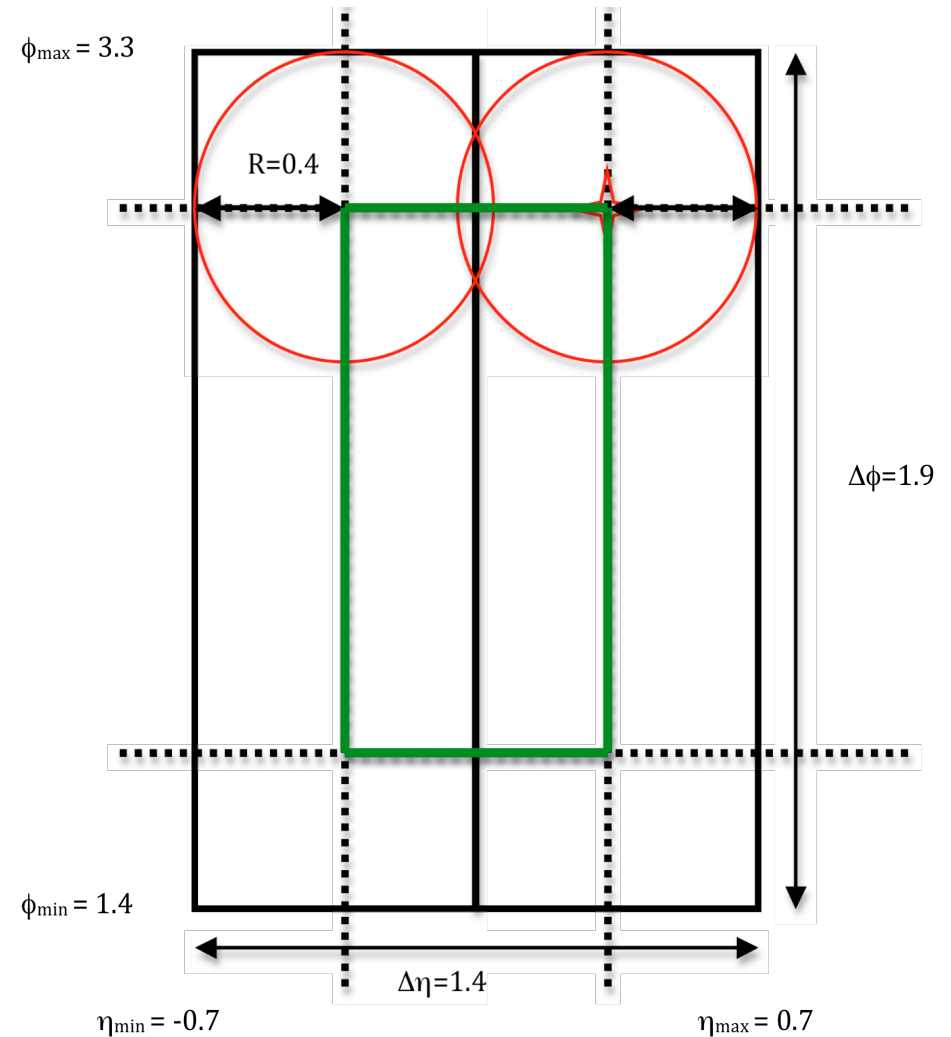
Isolement et coupure fiduciaire

Photon *candidat* :

- Photon *identifié* ($E > 10$ GeV)
- Acceptance fiduciaire $\Leftrightarrow R=0.4$:
 $-0.3 < \eta < 0.3$ et $1.8 < \Phi < 2.9$
 $\rightarrow (\Delta\eta = 0.6 \text{ et } \Delta\Phi = 1.1)$

Acceptance fiduciaire, normalisée par l'acceptance totale à mi-rapacité pour 1 unité de rapidité :

$$A = \frac{A_{fid}}{A_{tot}} = \frac{0.6 \times 1.1}{2\pi} \approx 0.1$$



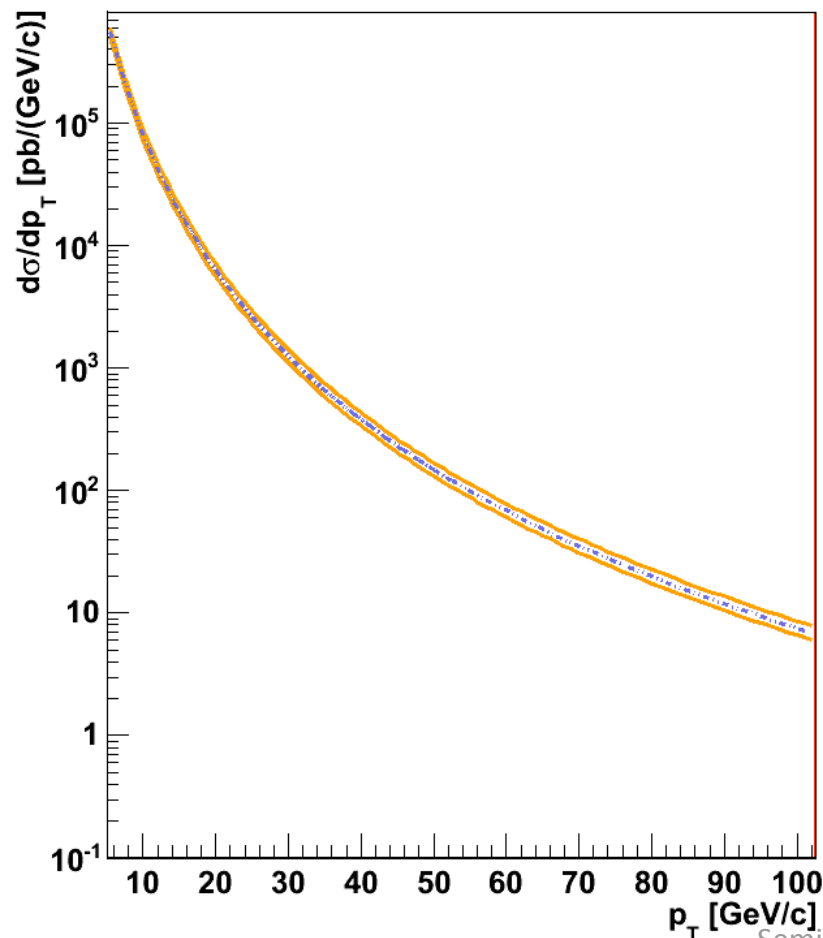
Echelle d'énergie d'EMCal

Principale source d'erreur d'un calorimètre :

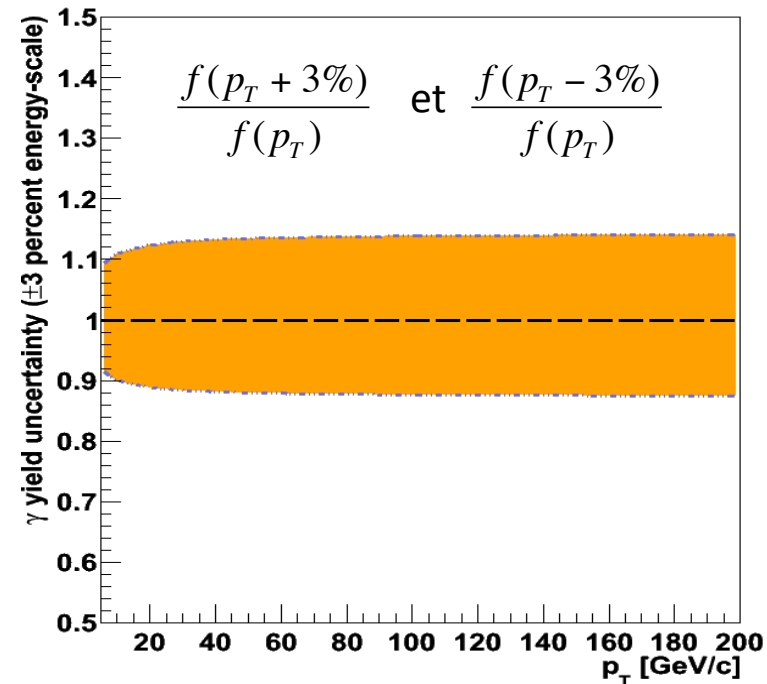
liée au calibrage de l'échelle d'énergie du calorimètre : précision avec laquelle on mesure E ($\approx 3\%$).

Spectre théorique au NLO, ajusté par un « Hagedorn » :
$$f(p_T \pm \Delta p_T) = \frac{1}{(1 + \frac{p_T \pm \Delta p_T}{p_0})^n}$$

3 spectres pour : p_T , $p_T+3\%$, $p_T-3\%$:



3% d'incertitude sur l'échelle d'énergie (p_T)



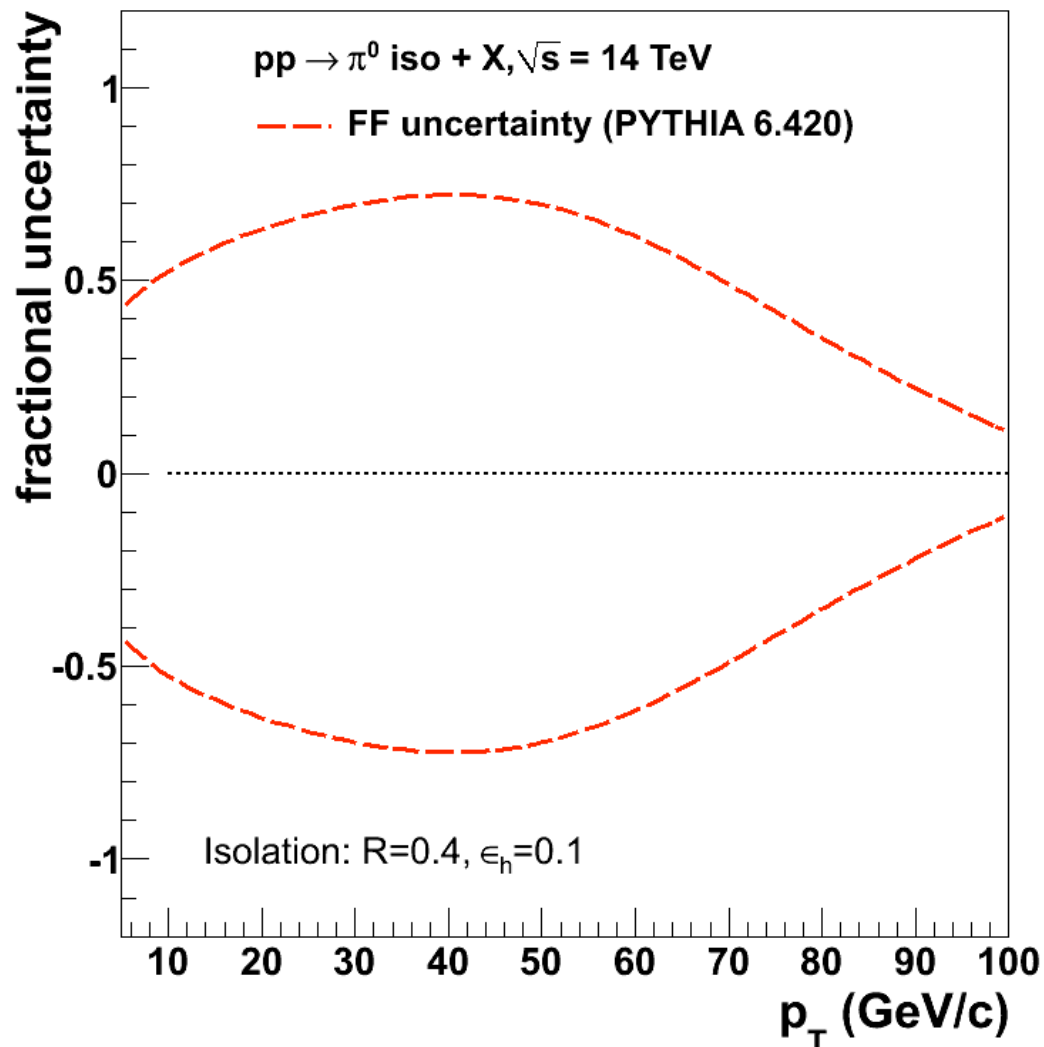
+/-12% d'incertitude sur le spectre de γ^{iso}

FF des π^0 isolés

Autre importante source d'erreur :

Liée à l'[incertitude sur la section efficace de \$\pi^0\$ isolés](#), due au choix de la FF.

= Rapport des sections efficaces FF hard/FF soft :

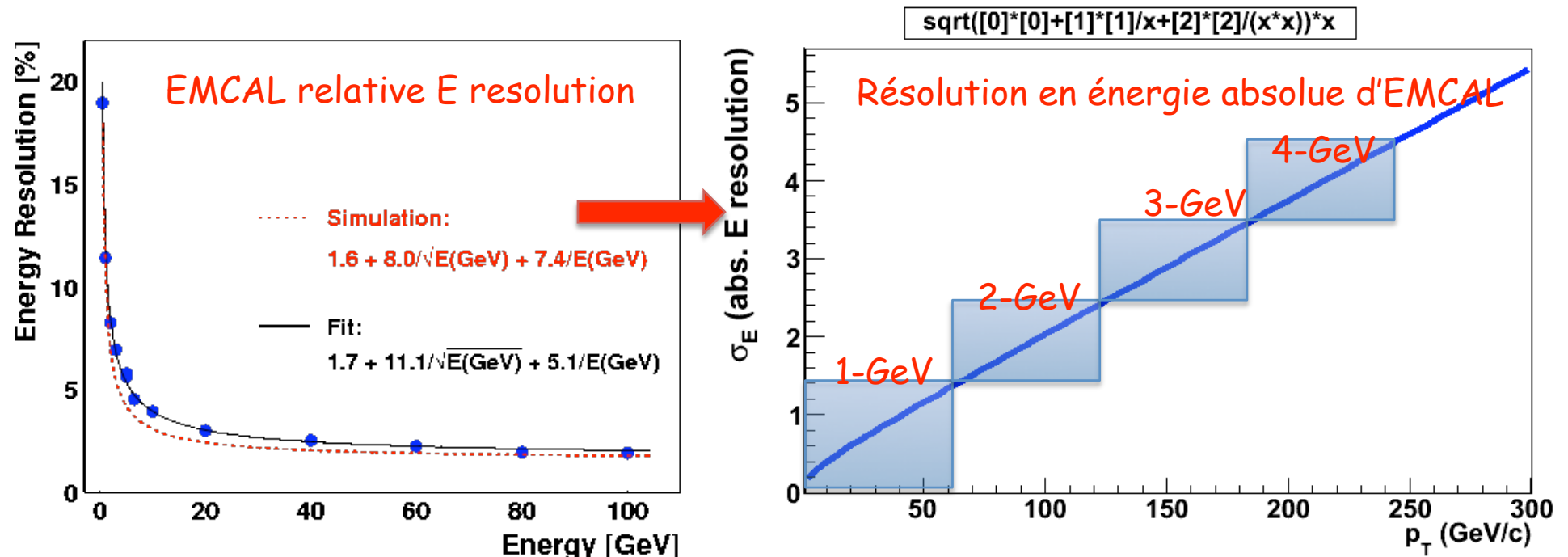


Jusqu'à $\pm 70\%$ d'incertitude systématique sur le spectre de π^0 isolés.

Mais erreur propagée au spectre de γ^{iso} pondérée par $p(\gamma|\pi^0) < 0.1$:
Jusqu'à 20% d'incertitude propagée sur le spectre de γ^{iso}

Correction de 'smearing'

La résolution en énergie d'EMCAL peut entraîner un décalage de quelques GeVs dans le spectre en p_T reconstruit, pour une distribution piquée, dans le cas de grands intervalles en p_T .



Si la statistique le permet, l'échantillonnage en p_T du spectre de photons est de :
1-GeV en-dessous de $p_T = 70$ GeV/c, 2-GeV/c pour $p_T = 60$ -120 GeV/c

La taille des bins est suffisamment fine : la correction de smearing sera négligée.

Autres erreurs et propagation

$$F \pm \Delta F = (F_1 \pm \Delta F_1) - (F_2 \pm \Delta F_2)$$

$$F_1 = \frac{N(\text{clusters iso. et id. } \gamma)}{p(\gamma|\gamma) \times A \times L \times \varepsilon_{reco} \times \varepsilon_{iso} \times 2\pi p_T \times \Delta p_T \times \Delta \eta}$$

$$F_2 = \frac{p(\gamma|\pi^0)}{p(\gamma|\gamma) \times 2\pi p_T} \frac{d\sigma^{\pi^0}_{iso}}{dp_T}$$

$$\sigma_{F_1} = \sqrt{\sigma_{p(\gamma|\gamma)}^2 + \sigma_A^2 + \sigma_L^2 + \sigma_{\varepsilon_{iso}}^2 + \sigma_{\Delta p_T}^2} \sim 15\%.$$

$$\sigma_{F_2} = \sqrt{\sigma_{p(\gamma|\gamma)}^2 + \sigma_{p(\gamma|\pi^0)}^2 + \sigma_{\sigma^{\pi^0}_{iso}}^2} \sim \sqrt{\sigma_{\sigma^{\pi^0}_{iso}}^2} \sim \sigma_{\sigma^{\pi^0}_{iso}} \sim 10 - 70\%$$

Type	Sources	Incertitude systématique	Incertitude propagée sur spectre
Echelle d'énergie	incertitude calibration EMCAL	3%	12%
Soustraction de π^0 isolés	incertitude sur FF parton $\rightarrow \pi^0$	10% – 70%	5% – 20%
Corrections de PID	différentes coupures utilisées	5%	5%
Luminosité intégrée	scan de Van der Meer	5%	5%
Efficacité d'isolement	incertitude description de l'UE	5%	5%
Acceptance	zones mortes, diffs. GEANT-réel	1%	1%
TOTAL			15% – 30%

TABLE 6.1 – Liste des différentes incertitudes systématiques, ordonnées par ordre d'importance, sur les termes intervenant dans le calcul de la section efficace différentielle en p_T de photons isolés.

Erreurs systématiques et propagation

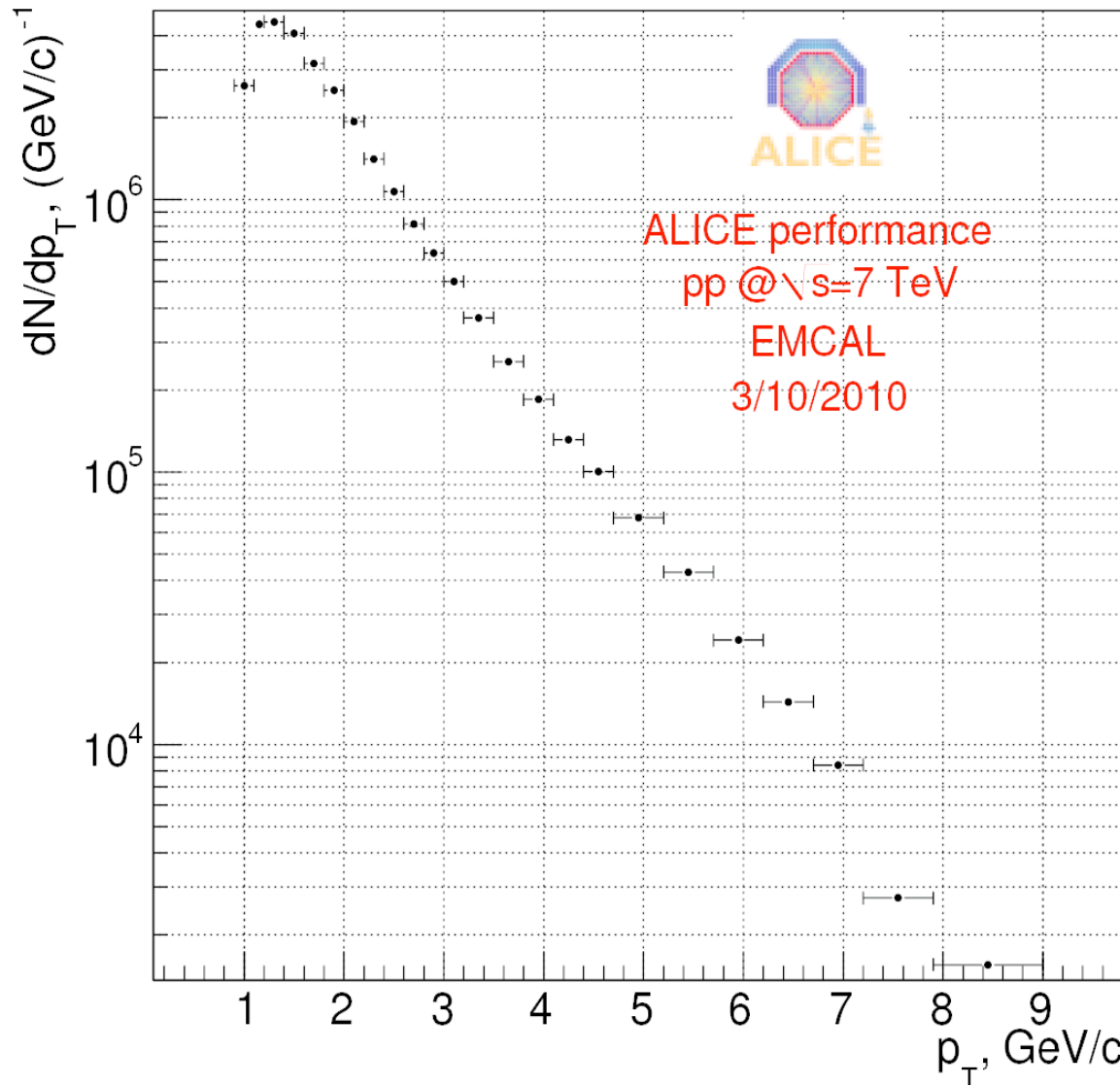
Incertitudes propagées sur le spectre de γ^{iso} corrigé :

1. **Echelle d'énergie** : $\pm 12\%$ (en prenant 3% d'incertitude sur le calibrage)
2. **Luminosité** (Scan de Van-der-Meer): $\pm 5\%$ (2^e année de prise de données)
3. ϵ_{iso} : **Incertitude sur l' 'efficacité' d'isolement** : $\pm 5\%$ (différence entre UE-hard et UE-soft)
4. **Autres incertitudes** sur les corrections d' efficacité : environ $\pm 5\%$
5. **Section efficace π^0 isolés** : différence entre hard-soft avec PYTHIA : $\pm 10-70 \%$

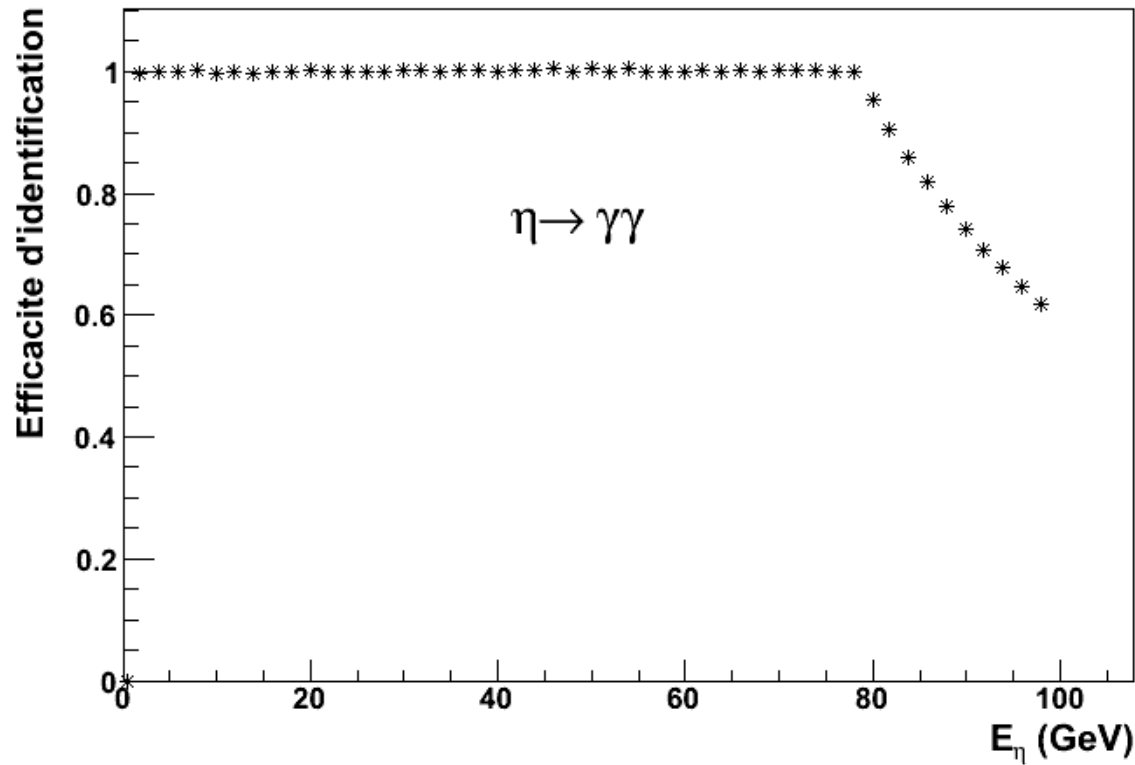
TOTAL (addition en quadrature) : $\sim 30-20\%$

Spectre du π^0 dans EMCal a 7 TeV

Raw π^0 vs p_T



Bruit de fond des η



Les η sont identifiables
(par calcul de la masse
invariante) jusqu'à ~ 80
GeV dans EMCal