

# Julien BOLMONT

Docteur de l'Université Montpellier II  
Ingénieur en instrumentation

## Recherche d'un signal de Gravitation Quantique avec les sources astrophysiques variables

ou

Les sources astrophysiques comme laboratoires de physique fondamentale

# Parcours



# Parcours

ENSICAEN, 1999 - 2002

Formation d'ingénieur

Instrumentation,...

# Parcours

ENSICAEN, 1999 - 2002

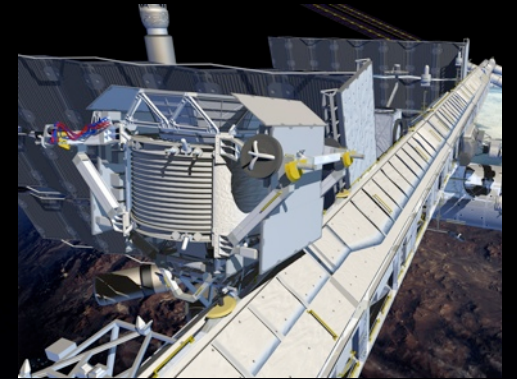
Formation d'ingénieur

Instrumentation,...

Thèse, LPTA, 2002 - 2005

Astronomie  $\gamma$  - BE

AMS-02, HETE-2  
Analyse - Simulation



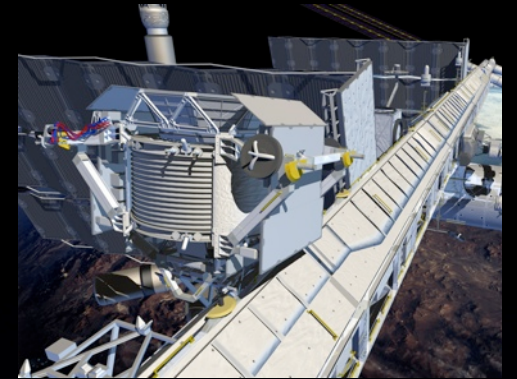


# Parcours

ENSICAEN, 1999 - 2002

Formation d'ingénieur

Instrumentation,...



Thèse, LPTA, 2002 - 2005

Astronomie  $\gamma$  - BE

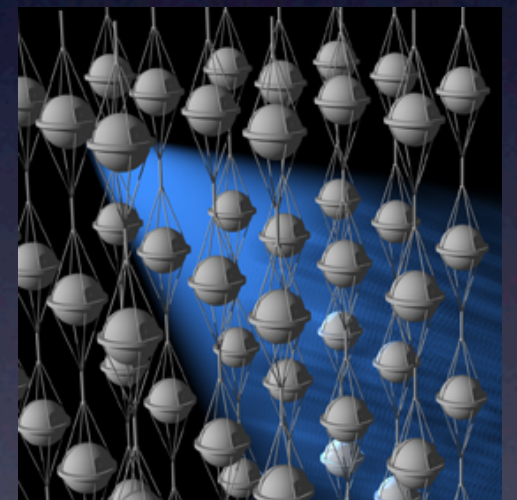
AMS-02, HETE-2  
Analyse - Simulation



Postdoc, DESY, 2005 - 2008

Astronomie  $\nu$

AMANDA/IceCube  
Instrumentation - Simulation



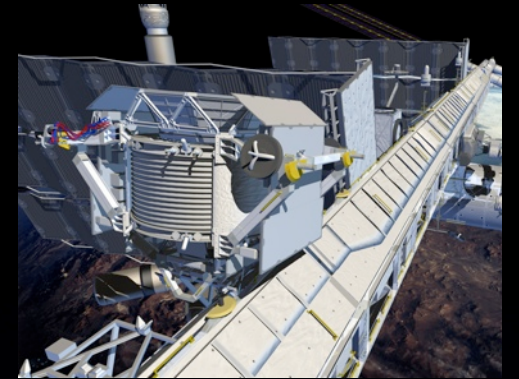


# Parcours

ENSICAEN, 1999 - 2002

Formation d'ingénieur

Instrumentation,...



Thèse, LPTA, 2002 - 2005

Astronomie  $\gamma$  - BE

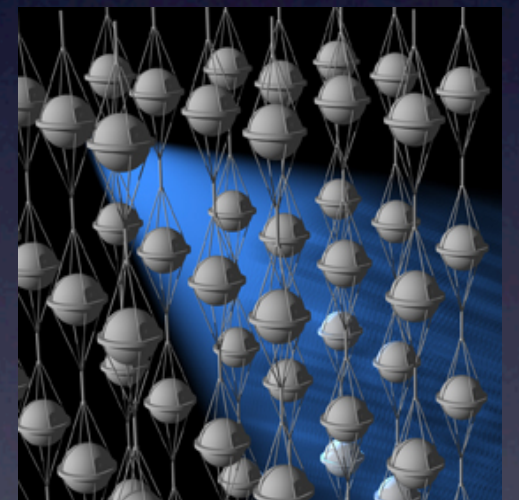
AMS-02, HETE-2  
Analyse - Simulation



Postdoc, DESY, 2005 - 2008

Astronomie  $\nu$

AMANDA/IceCube  
Instrumentation - Simulation



Postdoc, LPNHE, depuis 09/2008...

Astronomie  $\gamma$  - HE

H.E.S.S., CTA  
Analyse - Instrumentation





# Parcours

ENSICAEN, 1999 - 2002

Formation d'ingénieur

Instrumentation,...



Thèse, LPTA, 2002 - 2005

Astronomie  $\gamma$  - BE

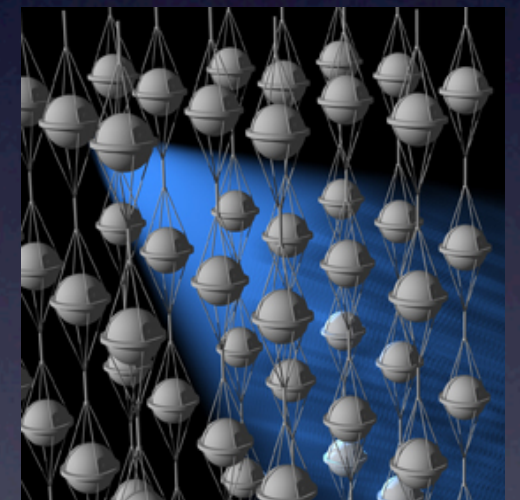
AMS-02, HETE-2  
Analyse - Simulation



Postdoc, DESY, 2005 - 2008

Astronomie  $\nu$

AMANDA/IceCube  
Instrumentation - Simulation



Postdoc, LPNHE, depuis 09/2008...

Astronomie  $\gamma$  - HE

H.E.S.S., CTA  
Analyse - Instrumentation

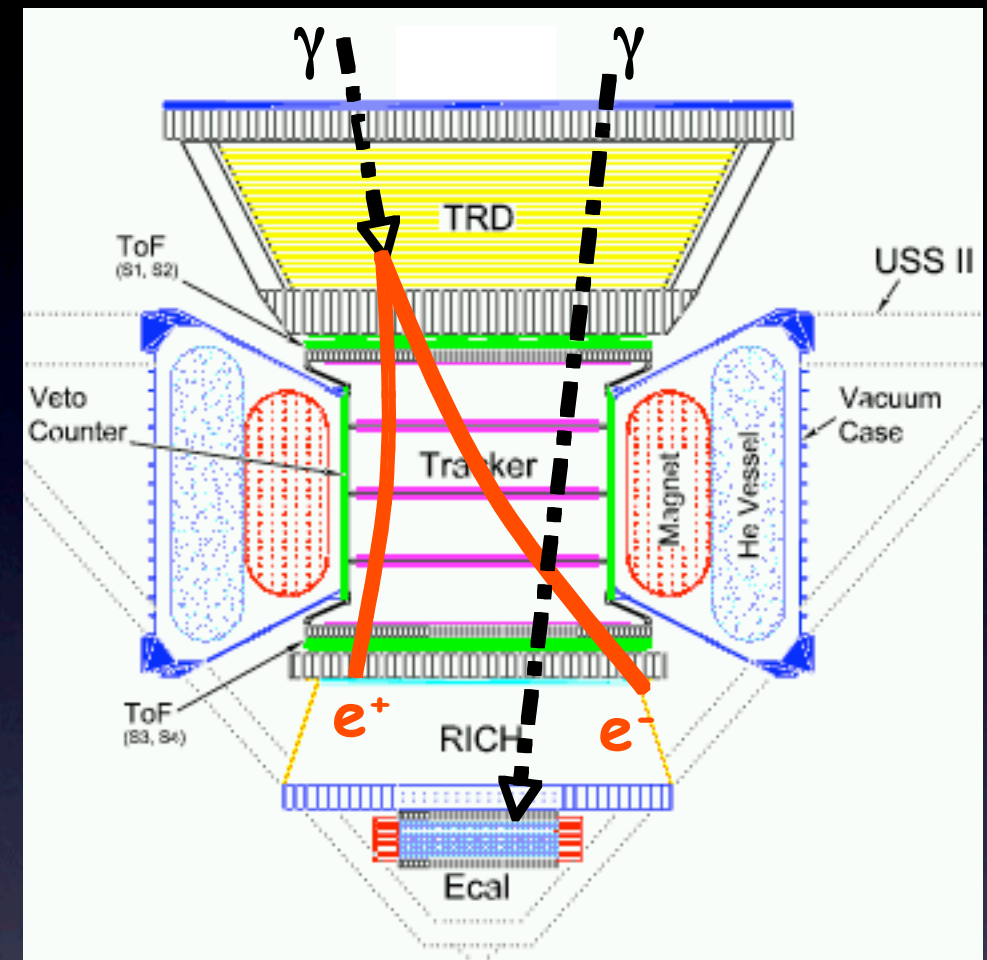
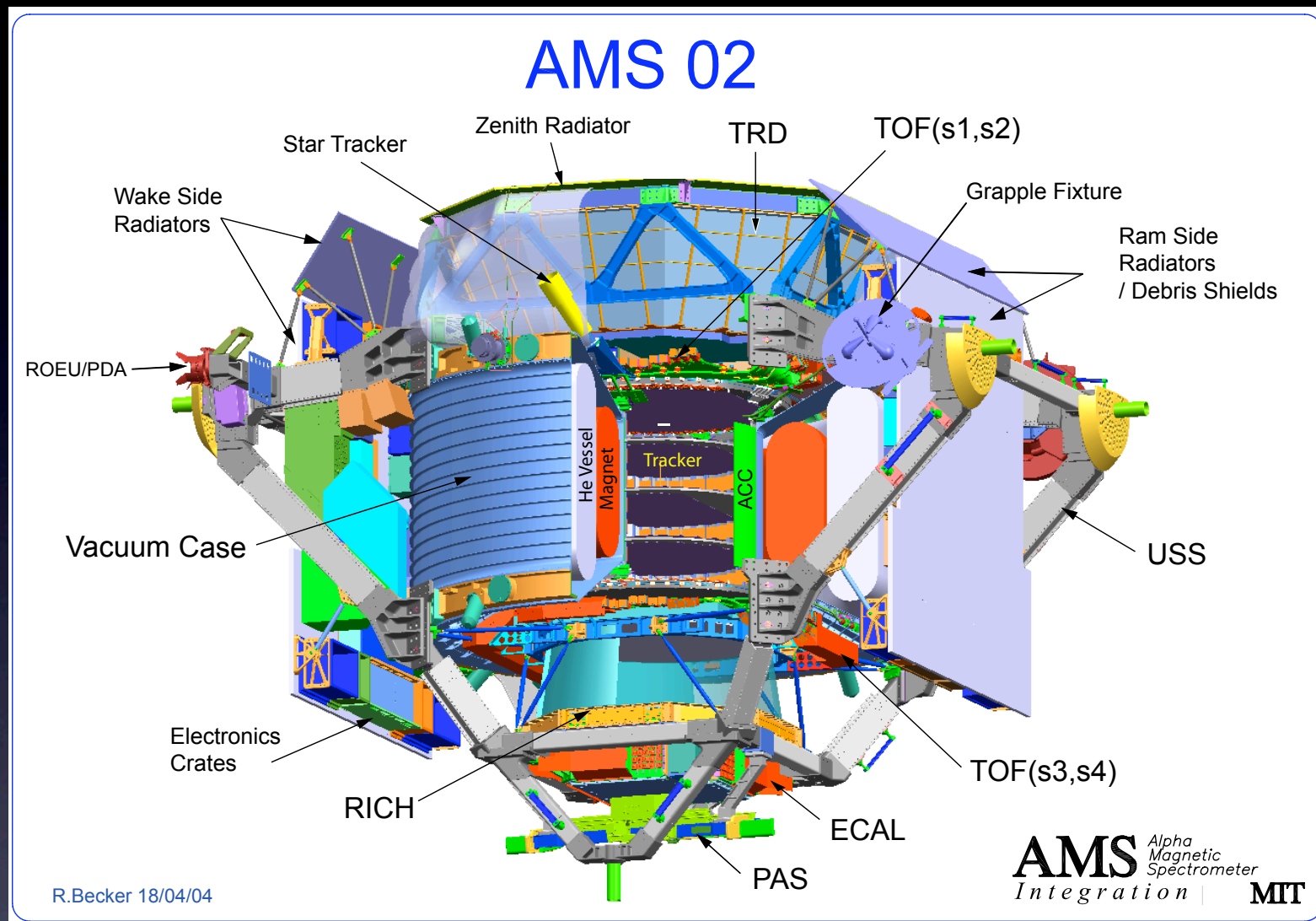


Thématique

Les sources astrophysiques  
comme laboratoires de  
physique fondamentale...



# AMS-02



## ● Activités :

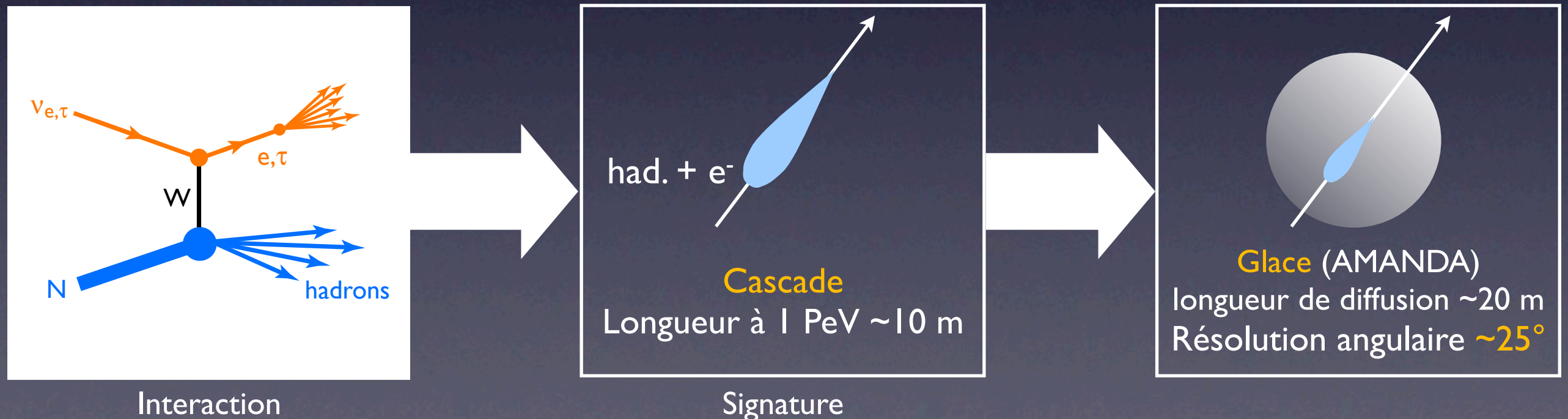
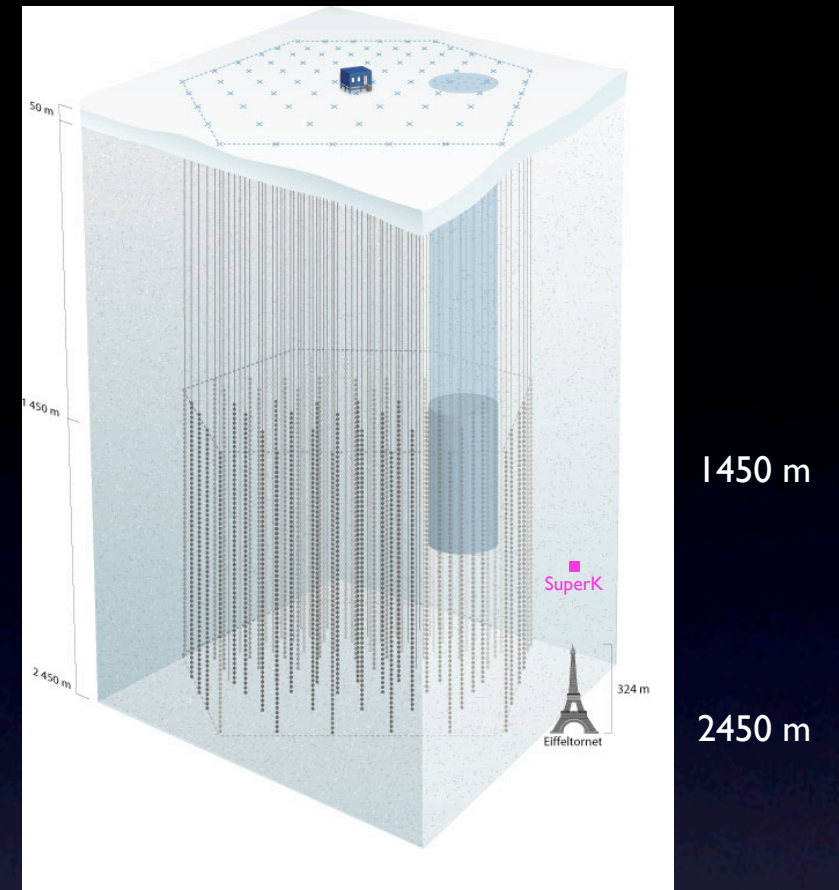
- Tests de calibrage du calorimètre électromagnétique
- Développement d'un logiciel de simulation rapide pour la détection des gamma
- Prédictions pour différents types de sources gamma et pour un halo de matière noire SUSY



# IceCube

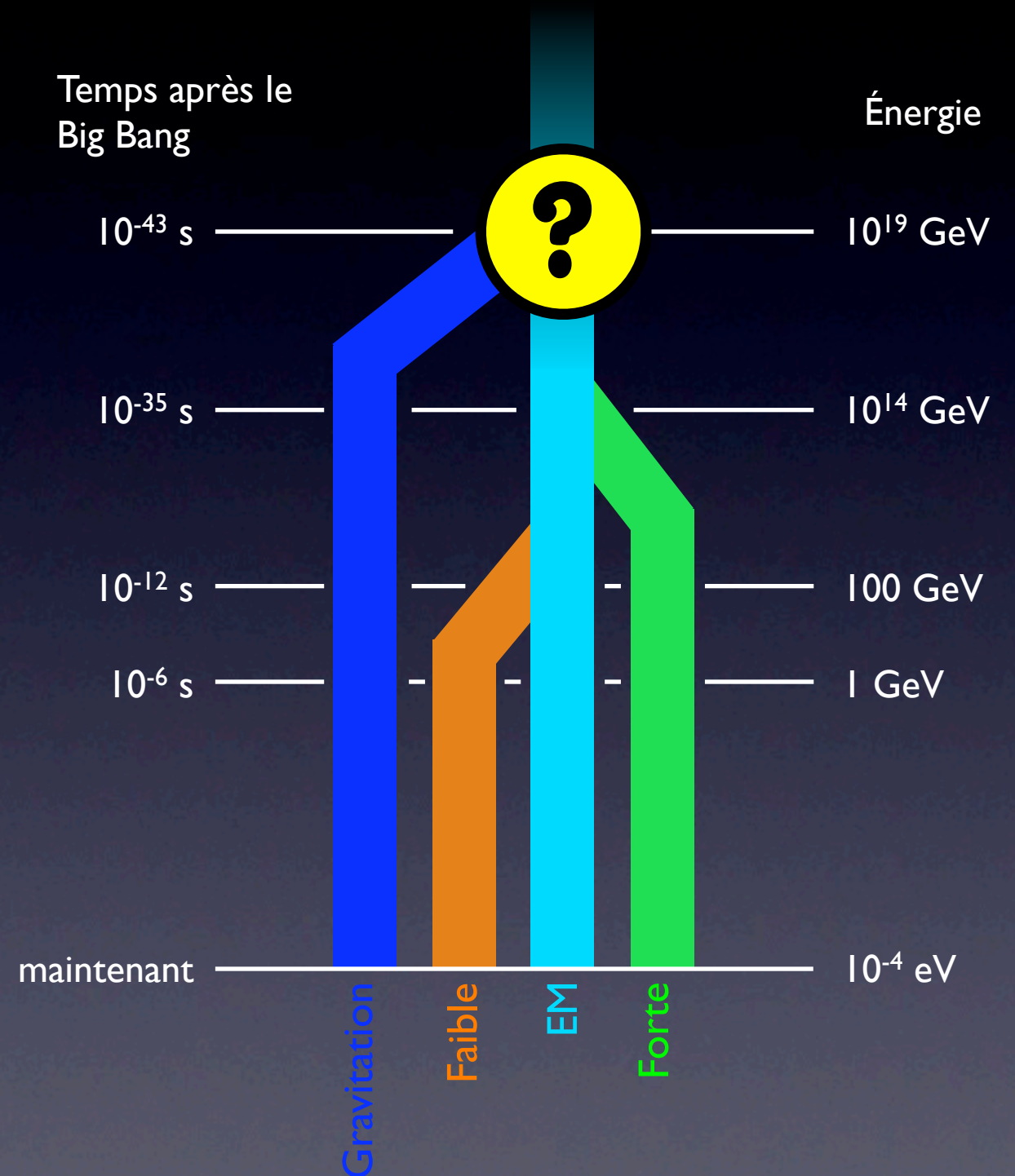
- Activités:

- **Instrumentation** : responsabilité des tests des modules optiques à DESY.
- **Simulation** : étude des cascades en régime LPM. Développement d'une version de CORSIKA fonctionnant dans l'eau. Prise en compte de l'allongement des cascades dans la simulation d'IceCube.



# Gravitation Quantique

- Gravitation Quantique : un même cadre théorique pour la gravitation et la TQC
- Deux approches principales:
  - Théorie des cordes
  - Gravitation Quantique à boucles
- L'aspect le plus exploré actuellement :
  - ▶ Violation de la symétrie de Lorentz



Voir par ex. L. Smolin, *Three Roads to Quantum Gravity*, Basic Books, 2001 - G. Amelino-Camelia, arXiv:0806.0339



# Décalage temporel

- Les effets de QG pourraient apparaître à  $E_{QG} \sim O(E_P = 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV})$
- $v(E) = c / n(E)$
- Des photons d'énergies différentes voyagent à des vitesses différentes
- L'effet est petit mais est cumulé sur les grandes distances de propagation  
→ utilisation de sources **variables** et **distantes** (GRBs, éruptions d'AGN)
- Deux photons d'énergies  $E_1$  et  $E_2$  **émis au même moment** sont détectés à des temps  $t_1$  et  $t_2$ .  
Au premier ordre :

$$\Delta t = \frac{\Delta E}{E_{QG} H_0} \int_0^z dz' \frac{(1 + z')}{\sqrt{\Omega_m (1 + z')^3 + \Omega_\Lambda}}$$

$$\Delta t = t_1 - t_2$$

$$\Delta E = E_1 - E_2$$

$$\Omega_\Lambda = 0.7$$

$$\Omega_m = 0.3$$

# Décalage temporel

- Les effets de QG pourraient apparaître à  $E_{QG} \sim O(E_P = 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV})$
- $v(E) = c / n(E)$
- Des photons d'énergies différentes voyagent à des vitesses différentes
- L'effet est petit mais est cumulé sur les grandes distances de propagation  
→ utilisation de sources **variables** et **distantes** (GRBs, éruptions d'AGN)
- Deux photons d'énergies  $E_1$  et  $E_2$  **émis au même moment** sont détectés à des temps  $t_1$  et  $t_2$ .  
Au premier ordre :

$$\Delta t = \frac{\Delta E}{E_{QG} H_0} \int_0^z dz' \frac{(1 + z')}{\sqrt{\Omega_m (1 + z')^3 + \Omega_\Lambda}}$$

$$\Delta t = t_1 - t_2$$

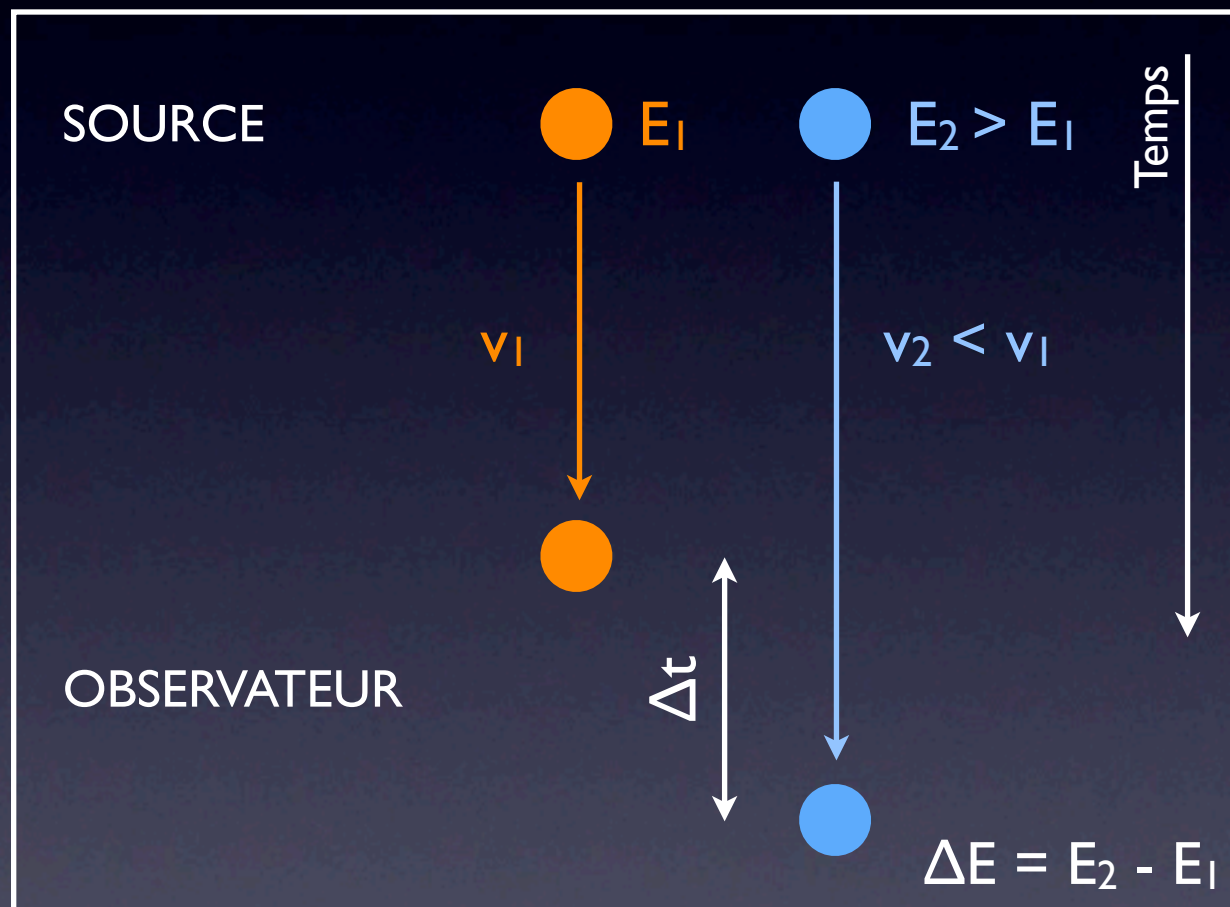
$$\Delta E = E_1 - E_2$$

$$\Omega_\Lambda = 0.7$$

$$\Omega_m = 0.3$$



# Effets de GQ et effets sources

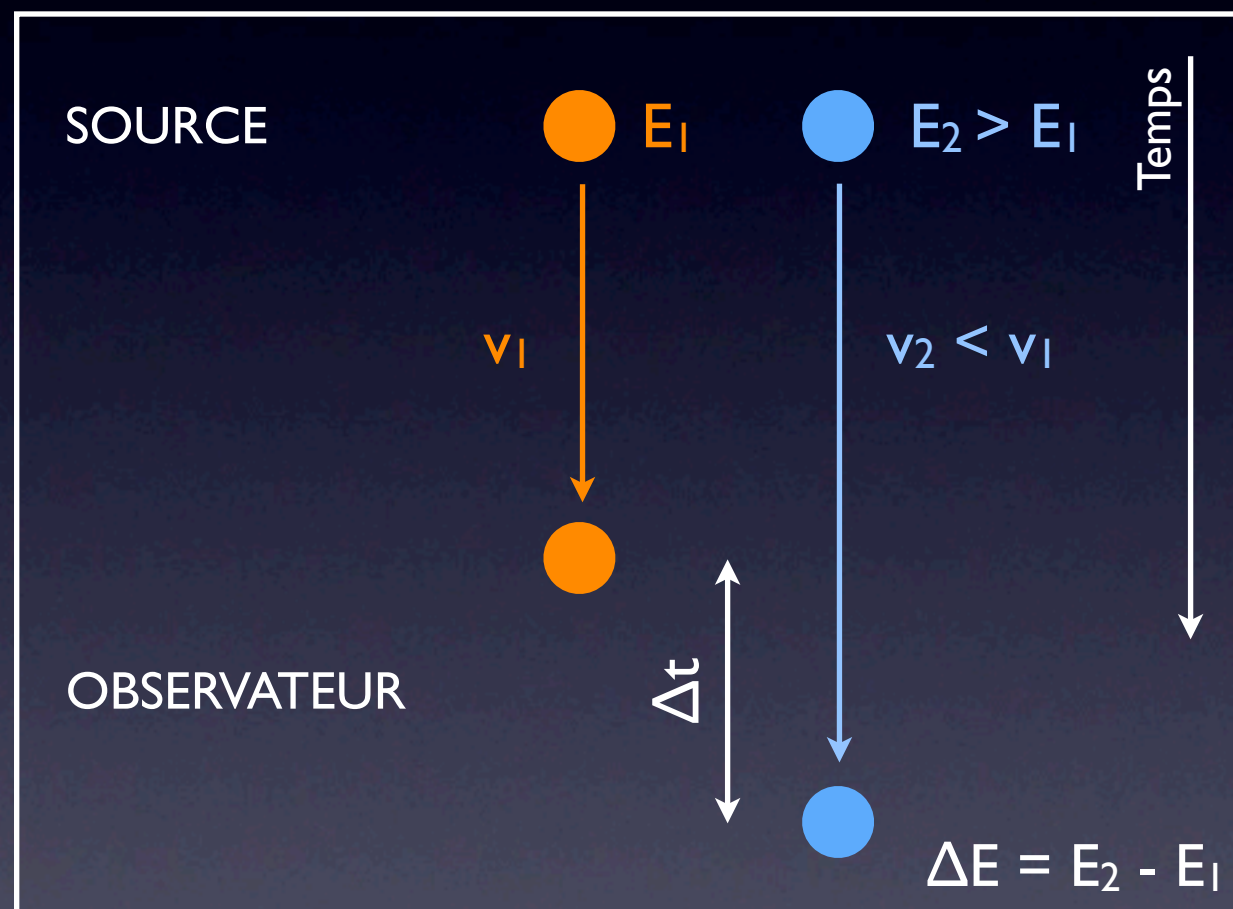


Effet de QG

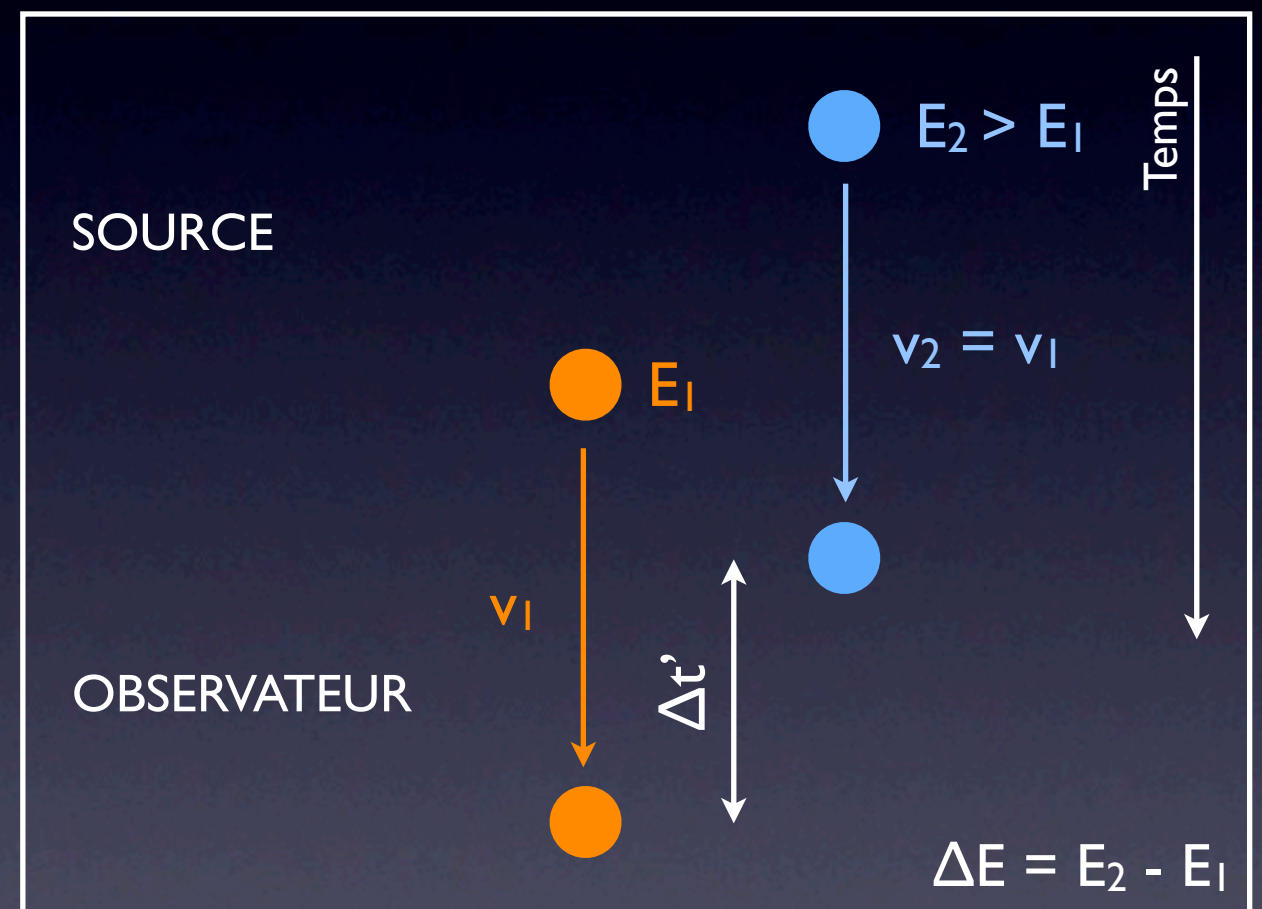
Propagation → Effet VIL

# Effets de GQ et effets sources

- **Problème** : Les processus d'émission peuvent introduire un effet temporel !
- Il faut distinguer les deux effets → études de populations



Effet de QG



Effet Source

Propagation → Effet VIL

Emission → Effet Source



# HETE-2

## 2000-2006

- But : localisation rapide des GRBs ( $\sim 250$  vus,  $\sim 80$  localisés,  $\sim 20$  avec  $z$ )
- Gamme d'énergie étendue : 0.5-600 keV (soft & medium X-rays +  $\gamma$ -rays)
- WXM, SXC, FREGATE
- FREGATE:
  - Gamme d'énergie : 6-400 keV
  - Surface effective : 160 cm<sup>2</sup>
  - Champ de vue : 70°
  - Résolution temporelle : 6.4  $\mu$ s
  - Résolution en énergie à 122 keV :  $\sim 12\%$
- 15 GRBs avec mesure du redshift ( $0.16 < z < 3.37$ ) ET données photon/photon...





# HETE-2

## 2000-2006

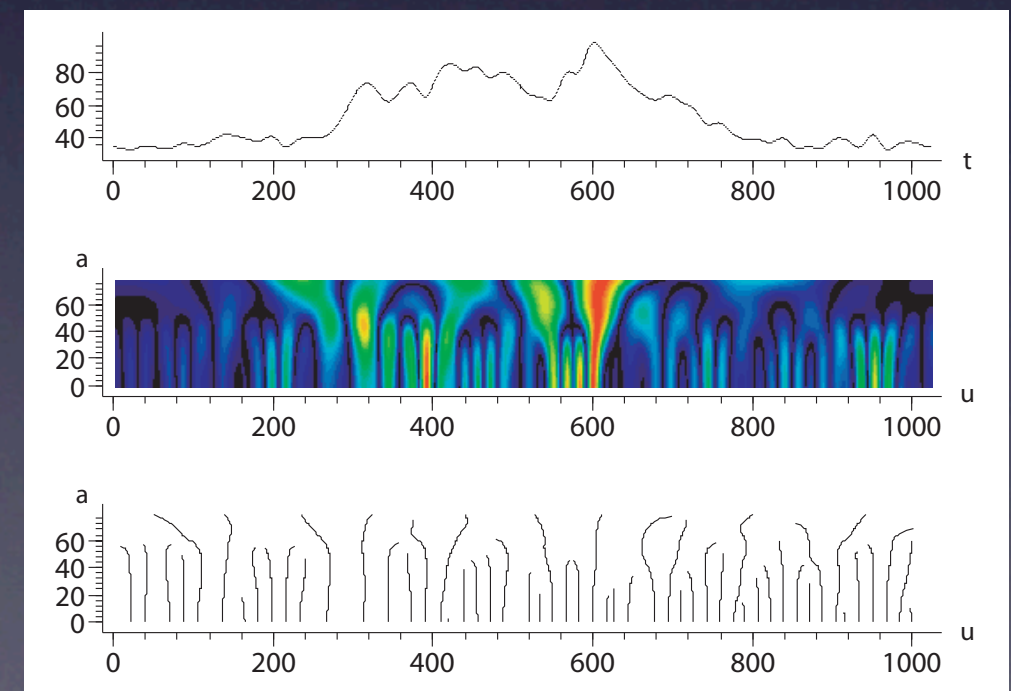
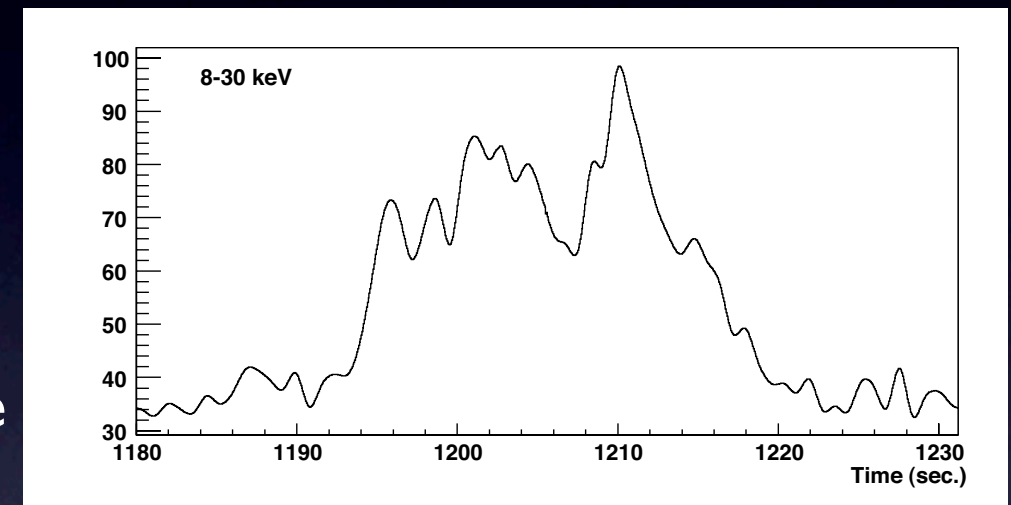
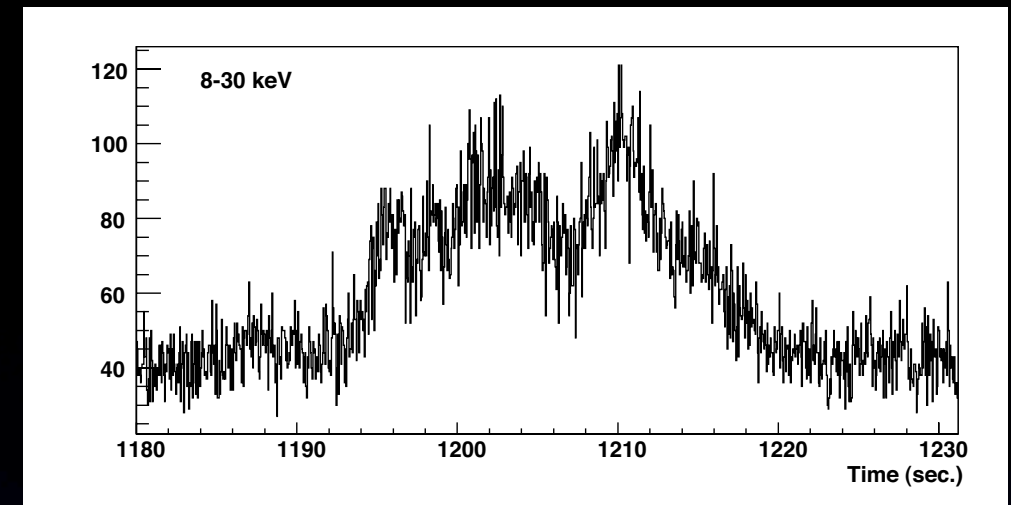
- But : localisation rapide des GRBs ( $\sim 250$  vus,  $\sim 80$  localisés,  $\sim 20$  avec  $z$ )
- Gamme d'énergie étendue : 0.5-600 keV (soft & medium X-rays +  $\gamma$ -rays)
- WXM, SXC, FREGATE
- FREGATE:
  - Gamme d'énergie : 6-400 keV
  - Surface effective : 160 cm<sup>2</sup>
  - Champ de vue : 70°
  - Résolution temporelle : 6.4  $\mu$ s
  - Résolution en énergie à 122 keV :  $\sim 12\%$
- 15 GRBs avec mesure du redshift ( $0.16 < z < 3.37$ ) ET données photon/photon...





# La méthode

- Inspiré par
  - J. Ellis *et al.*, A&A 402 (2003) 409
  - J. Ellis *et al.*, Astropart. Phys. 25 (2006) 402
- Choix des bandes d'énergie
- Débruitage des courbes de lumière avec la transformée en ondelettes discrète
- Recherche des extrema avec la transformée en ondelettes continue
- Association d'un extremum BE avec un extremum HE pour former une paire
- Pour chaque GRB, calcul du décalage moyen  $\langle \Delta t \rangle$
- Etude de  $\langle \Delta t \rangle$  en fonction  $z$
- Test du modèle avec une fonction de  $\chi^2$



# Choix des bandes d'énergie

- 14 scénarios
- Scénario = choix des bandes d'énergie hautes et basses
- Pour chaque GRB, 14 valeurs différentes de  $\langle \Delta E \rangle$

Scénario	Bande 1	Bande 2	$\langle \Delta E \rangle$ moyen *
#1	20-35	60-350	117.6
#2	8-30	60-350	127.2
#3	8-20	60-350	130.2
#4	8-20	30-350	85.0
#5	8-30	30-350	82.0
#6	8-20	40-350	102.8
#7	8-30	40-350	99.8
#8	8-40	40-350	97.9
#9	20-35	40-350	90.1
#10	8-20	50-350	116.9
#11	8-30	50-350	113.9
#12	8-40	50-350	112.0
#13	8-50	50-350	110.4
#14	20-35	50-350	104.2

\* Moyenne pour tous les GRBs  
Toutes les énergies sont données en keV



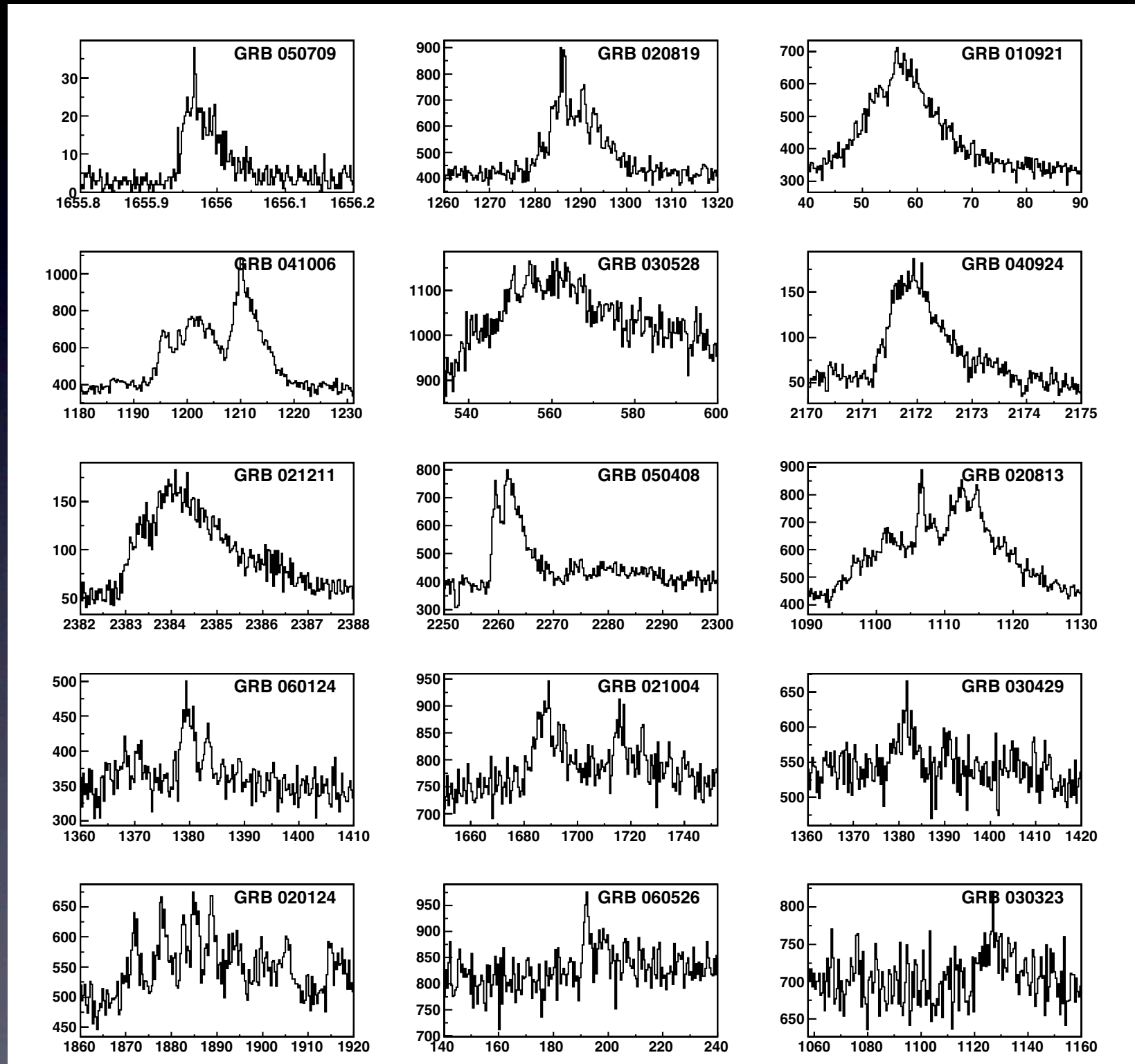
# Choix des bandes d'énergie

- 14 scénarios
- Scénario = choix des bandes d'énergie hautes et basses
- Pour chaque GRB, 14 valeurs différentes de  $\langle \Delta E \rangle$

Scénario	Bande 1	Bande 2	$\langle \Delta E \rangle$ moyen *
#1	20-35	60-350	117.6
#2	8-30	60-350	127.2
#3	8-20	60-350	130.2
#4	8-20	30-350	85.0
#5	8-30	30-350	82.0
#6	8-20	40-350	102.8
#7	8-30	40-350	99.8
#8	8-40	40-350	97.9
#9	20-35	40-350	90.1
#10	8-20	50-350	116.9
#11	8-30	50-350	113.9
#12	8-40	50-350	112.0
#13	8-50	50-350	110.4
#14	20-35	50-350	104.2

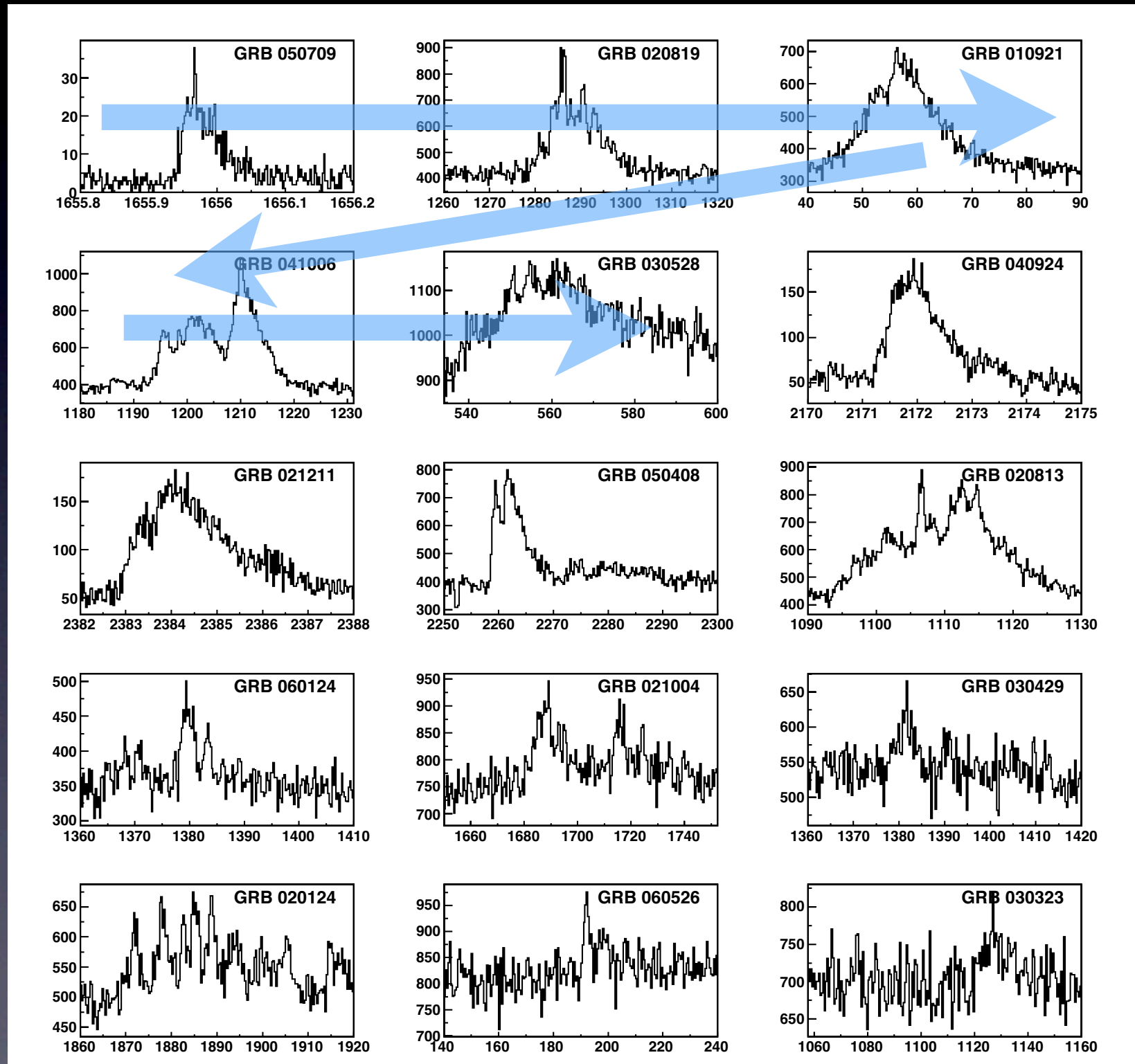
\* Moyenne pour tous les GRBs  
Toutes les énergies sont données en keV

# Les données

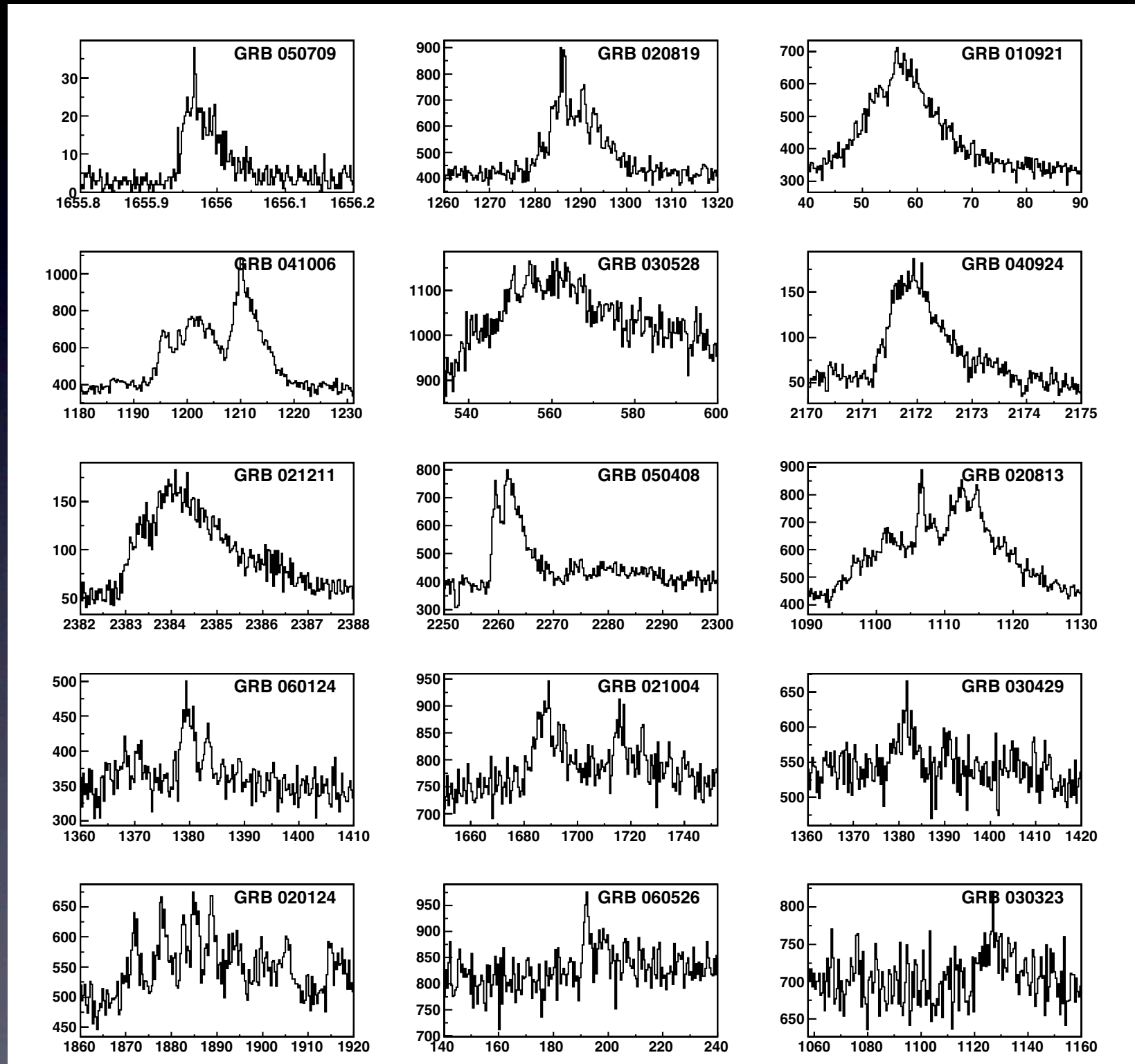




# Les données



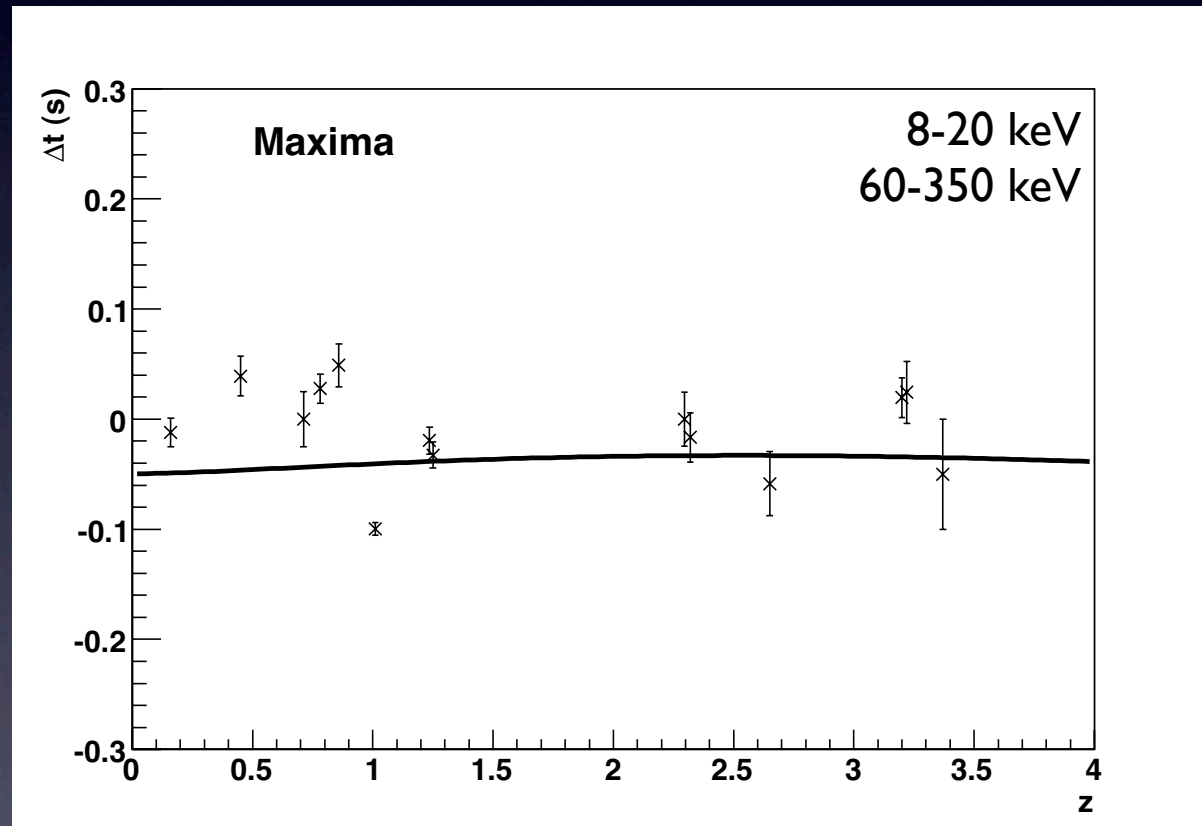
# Les données



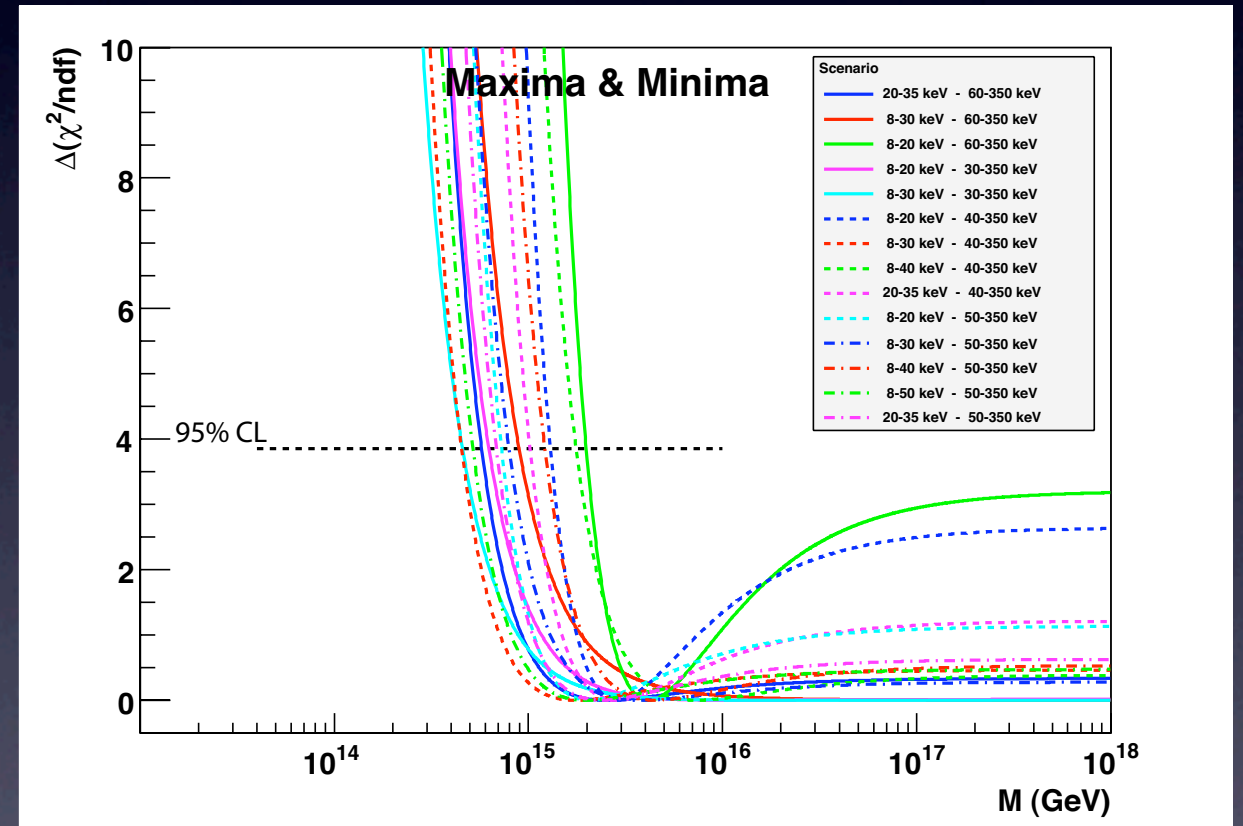


# Résultats avec HETE-2

- Ecart temporel moyen en fonction du redshift
- Test du modèle avec une fonction de vraisemblance



$$E_{QG} > 2 \times 10^{15} \text{ GeV}$$

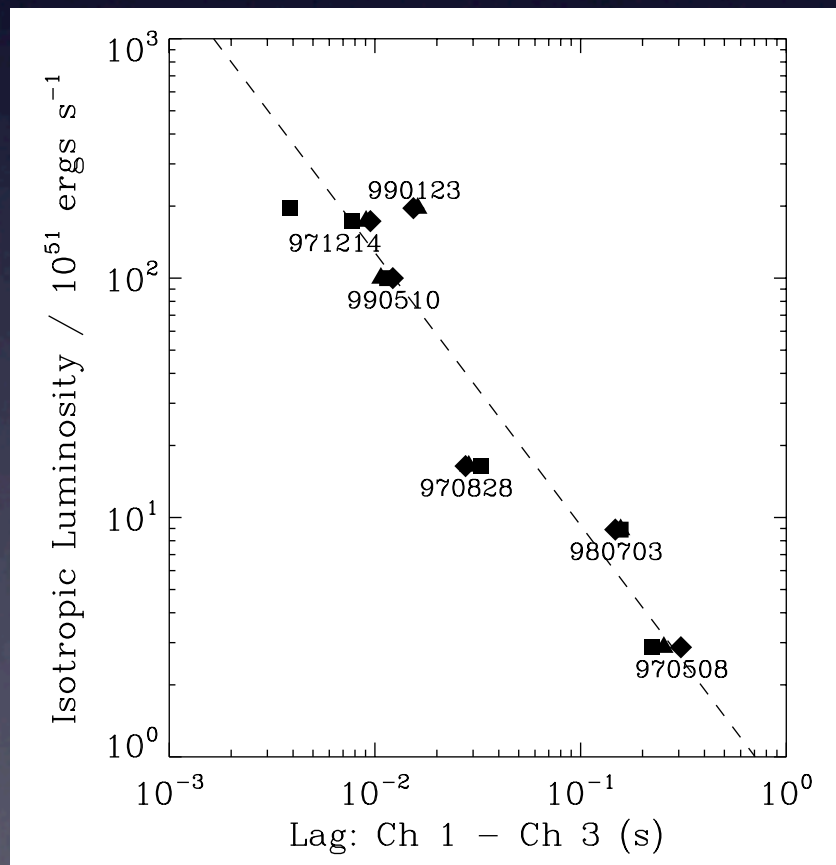


Résultats publiés dans ApJ 676, 532 (2008)

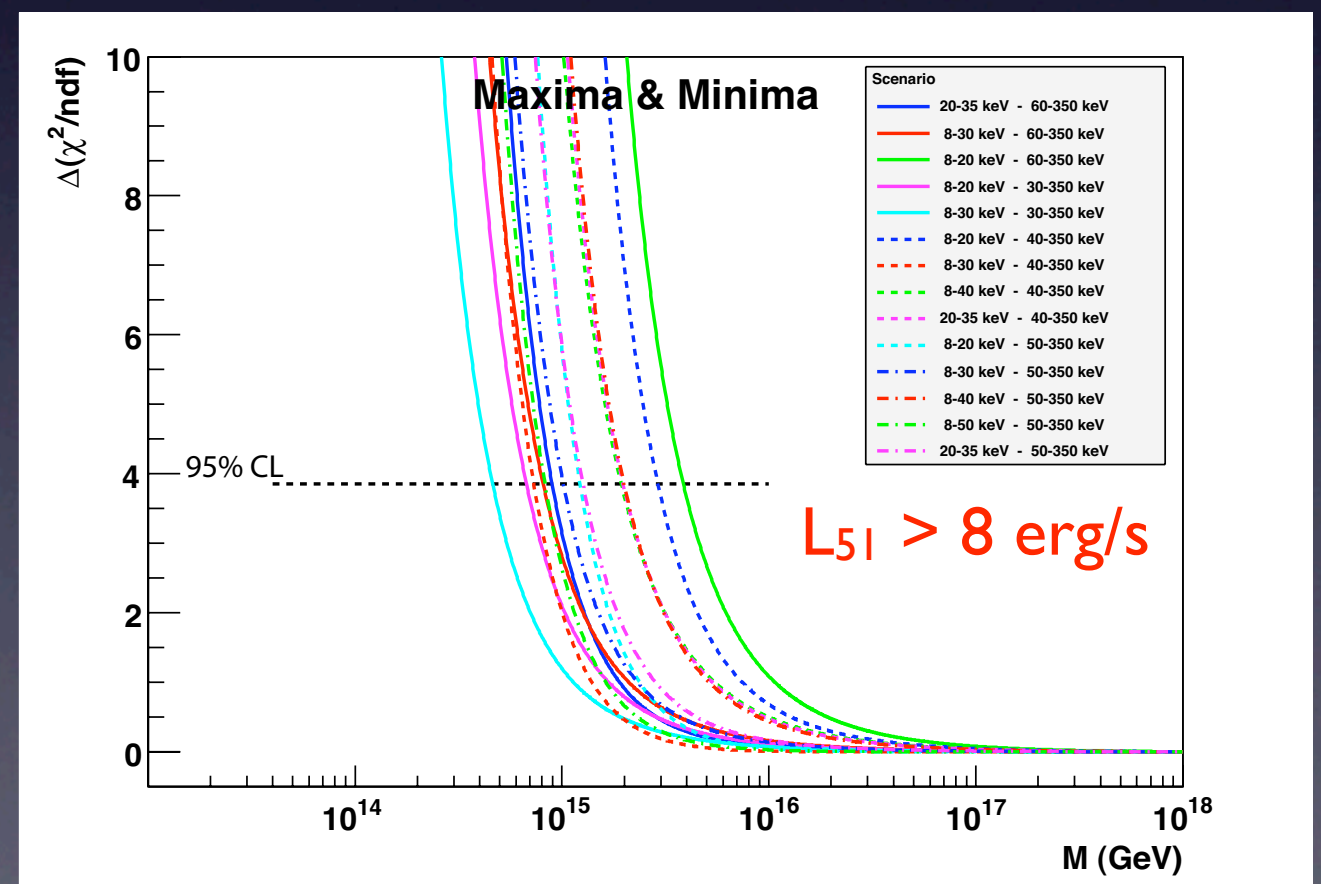
# Un exemple d'effet source

- Les écarts temporels semblent corrélés avec la luminosité des sursauts
- Grand  $z \rightarrow$  seulement des GRB lumineux  $\rightarrow \langle \Delta t \rangle$  petits
- Petit  $z \rightarrow$  GRB lumineux ou non  $\rightarrow \langle \Delta t \rangle$  plus grands
- Coupure sur la luminosité  $L_{51} > 8 \text{ erg/s}$  (10 sursauts)

$$E_{\text{QG}} > 4 \times 10^{15} \text{ GeV}$$



Norris et al., ApJ 534 (2000) 248





# Résultats

- Limites à 95% CL
- Toutes les limites sont entre  $10^{14}$  et  $10^{16}$  GeV
- Meilleures limites pour le scénario #3 ( $\langle \Delta E \rangle \sim 130$  keV)
- Pas de corrélation claire entre la limite et  $\langle \Delta E \rangle$

Scenario	Coupure luminosité	
	Sans	Avec
#1	$5.7 \times 10^{14}$	$9.0 \times 10^{14}$
#2	$9.0 \times 10^{14}$	$8.1 \times 10^{14}$
#3	$2.0 \times 10^{15}$	$3.9 \times 10^{15}$
#4	$6.3 \times 10^{14}$	$6.7 \times 10^{14}$
#5	$4.6 \times 10^{14}$	$4.6 \times 10^{14}$
#6	$1.3 \times 10^{15}$	$2.9 \times 10^{15}$
#7	$4.5 \times 10^{14}$	$7.3 \times 10^{14}$
#8	$1.8 \times 10^{15}$	$1.9 \times 10^{15}$
#9	$1.0 \times 10^{15}$	$2.0 \times 10^{15}$
#10	$7.3 \times 10^{14}$	$1.2 \times 10^{15}$
#11	$7.9 \times 10^{14}$	$1.0 \times 10^{15}$
#12	$1.2 \times 10^{15}$	$2.0 \times 10^{15}$
#13	$5.2 \times 10^{14}$	$8.3 \times 10^{14}$
#14	$6.8 \times 10^{14}$	$1.3 \times 10^{15}$

Toutes les limites sont données en GeV

# Résultats

- Limites à 95% CL
- Toutes les limites sont entre  $10^{14}$  et  $10^{16}$  GeV
- Meilleures limites pour le scénario #3 ( $\langle \Delta E \rangle \sim 130$  keV)
- Pas de corrélation claire entre la limite et  $\langle \Delta E \rangle$

Scenario	Coupure luminosité	
	Sans	Avec
#1	$5.7 \times 10^{14}$	$9.0 \times 10^{14}$
#2	$9.0 \times 10^{14}$	$8.1 \times 10^{14}$
#3	$2.0 \times 10^{15}$	$3.9 \times 10^{15}$
#4	$6.3 \times 10^{14}$	$6.7 \times 10^{14}$
#5	$4.6 \times 10^{14}$	$4.6 \times 10^{14}$
#6	$1.3 \times 10^{15}$	$2.9 \times 10^{15}$
#7	$4.5 \times 10^{14}$	$7.3 \times 10^{14}$
#8	$1.8 \times 10^{15}$	$1.9 \times 10^{15}$
#9	$1.0 \times 10^{15}$	$2.0 \times 10^{15}$
#10	$7.3 \times 10^{14}$	$1.2 \times 10^{15}$
#11	$7.9 \times 10^{14}$	$1.0 \times 10^{15}$
#12	$1.2 \times 10^{15}$	$2.0 \times 10^{15}$
#13	$5.2 \times 10^{14}$	$8.3 \times 10^{14}$
#14	$6.8 \times 10^{14}$	$1.3 \times 10^{15}$

Toutes les limites sont données en GeV



# Conclusion

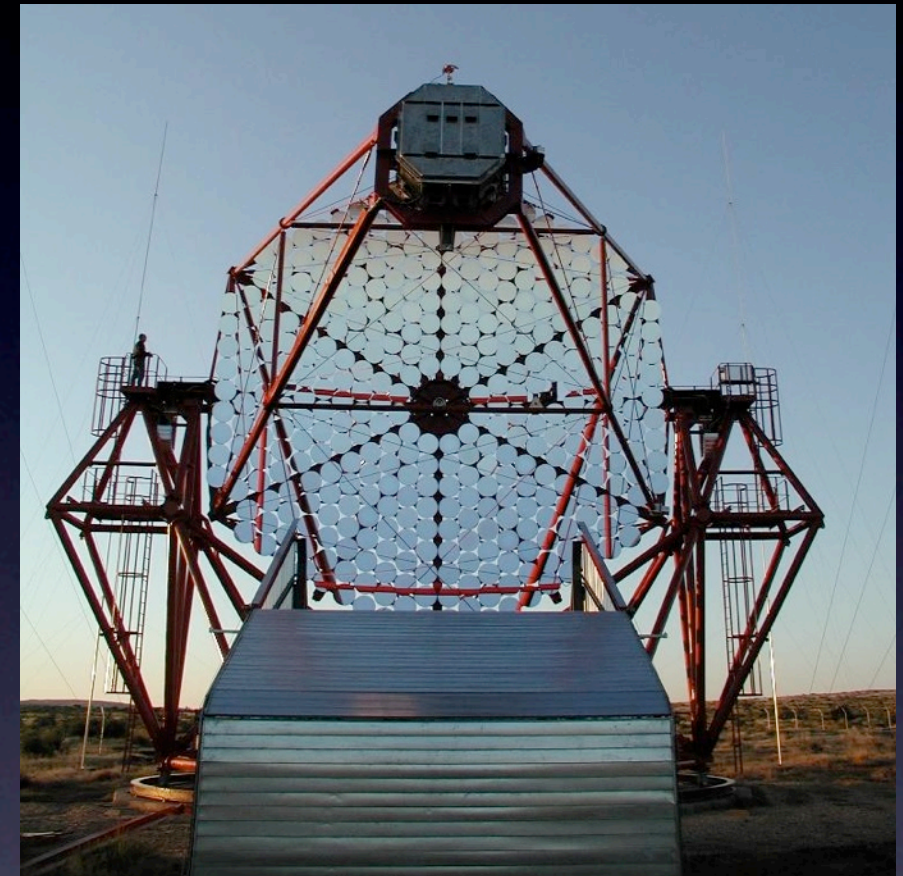
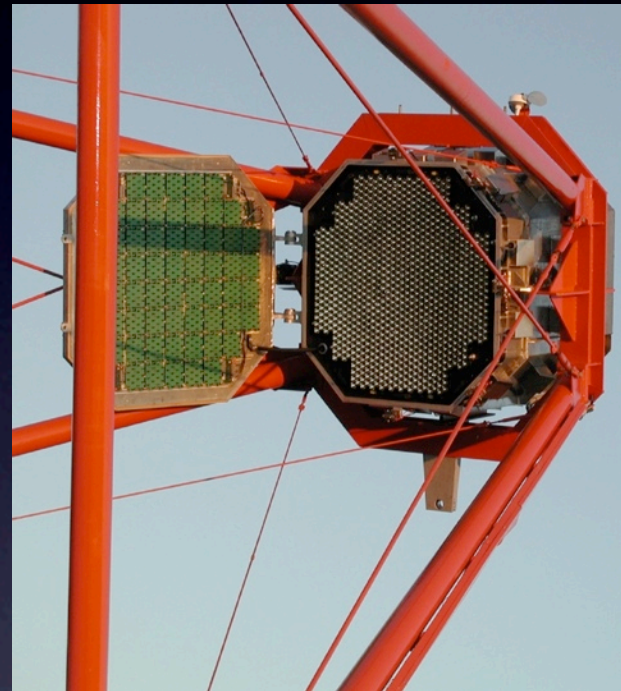
- Etude d'un ensemble de 15 GRBs de redshifts connus ( $0.16 < z < 3.37$ )
- Utilisation de données photon/photon permettant le test de différents  $\langle \Delta E \rangle$  et le choix d'un binning adapté
- Test d'un échantillon réduit avec  $L_{51} > 8$  erg/s (10 sursauts)
- Pas d'effet
- Meilleure limite obtenue avec l'échantillon de grande luminosité, avec un  $\langle \Delta E \rangle \sim 130$  keV :

$$E_{QG} > 3.9 \times 10^{15} \text{ GeV} \\ \text{à 95 \% CL}$$



# High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.)

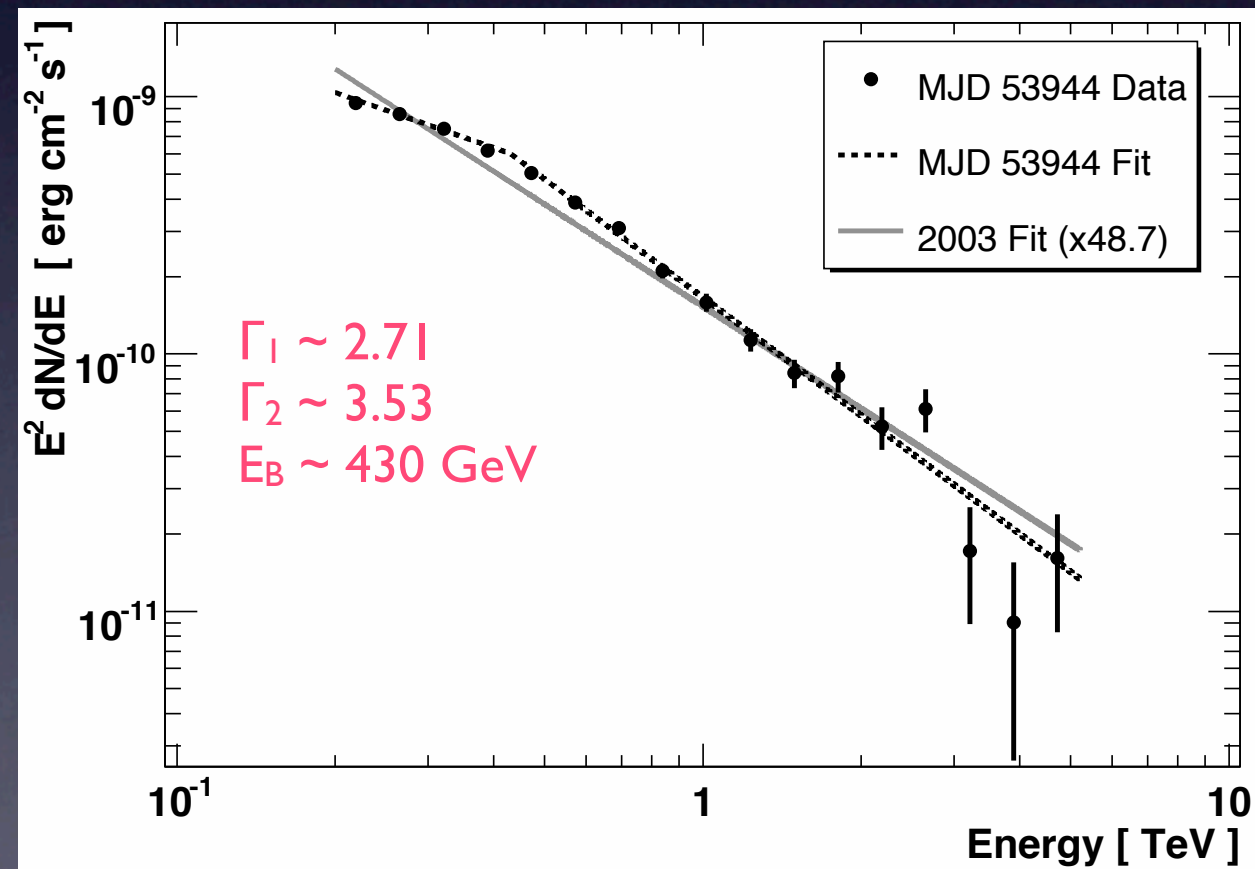
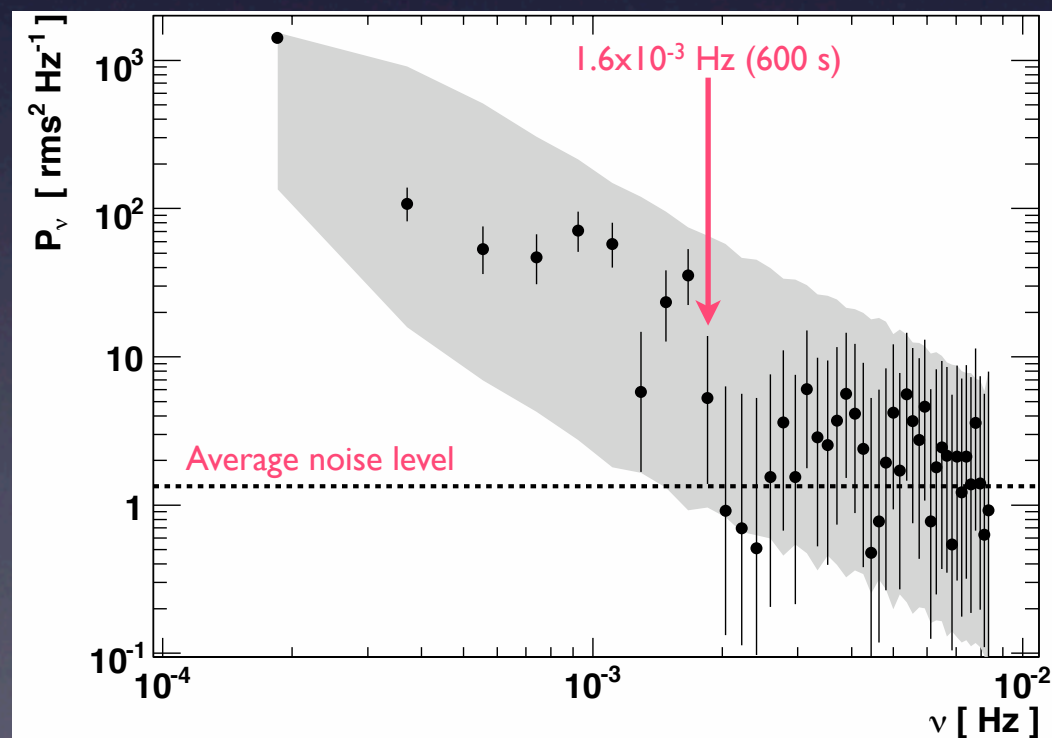
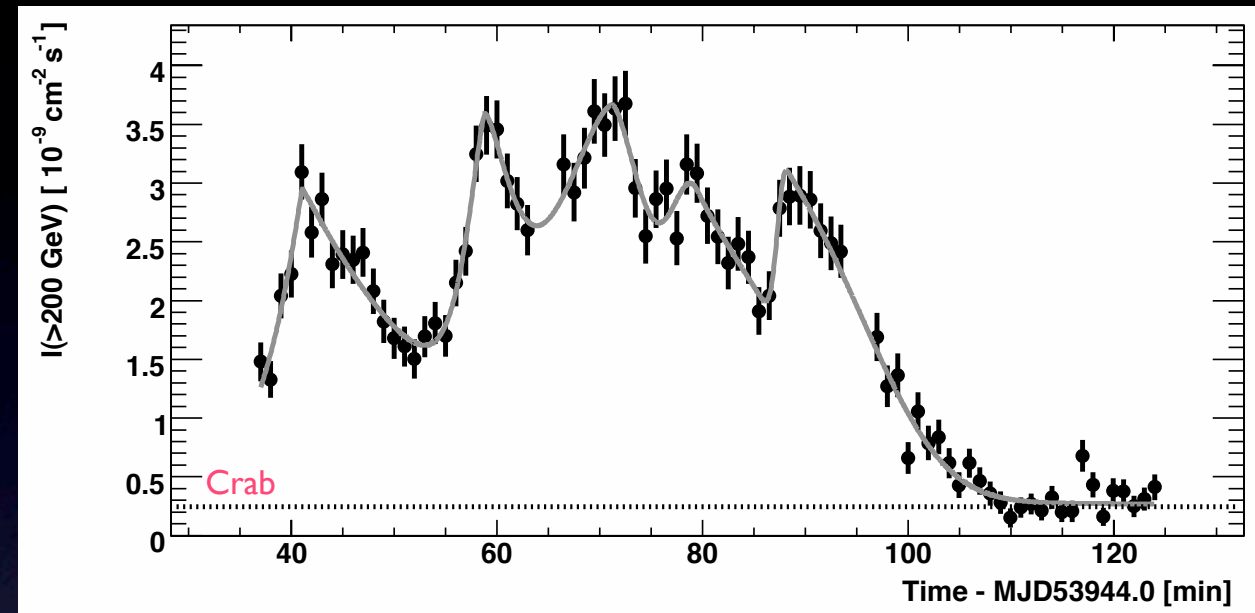
- Situé en Namibie
- ~1800 m d'altitude
- Gamme d'énergie: 0.1-100 TeV
- Point Spread Function  $\sim 0.1^\circ$
- Résolution en énergie  $\sim 15\%$





# Une éruption exceptionnelle de PKS 2155-304

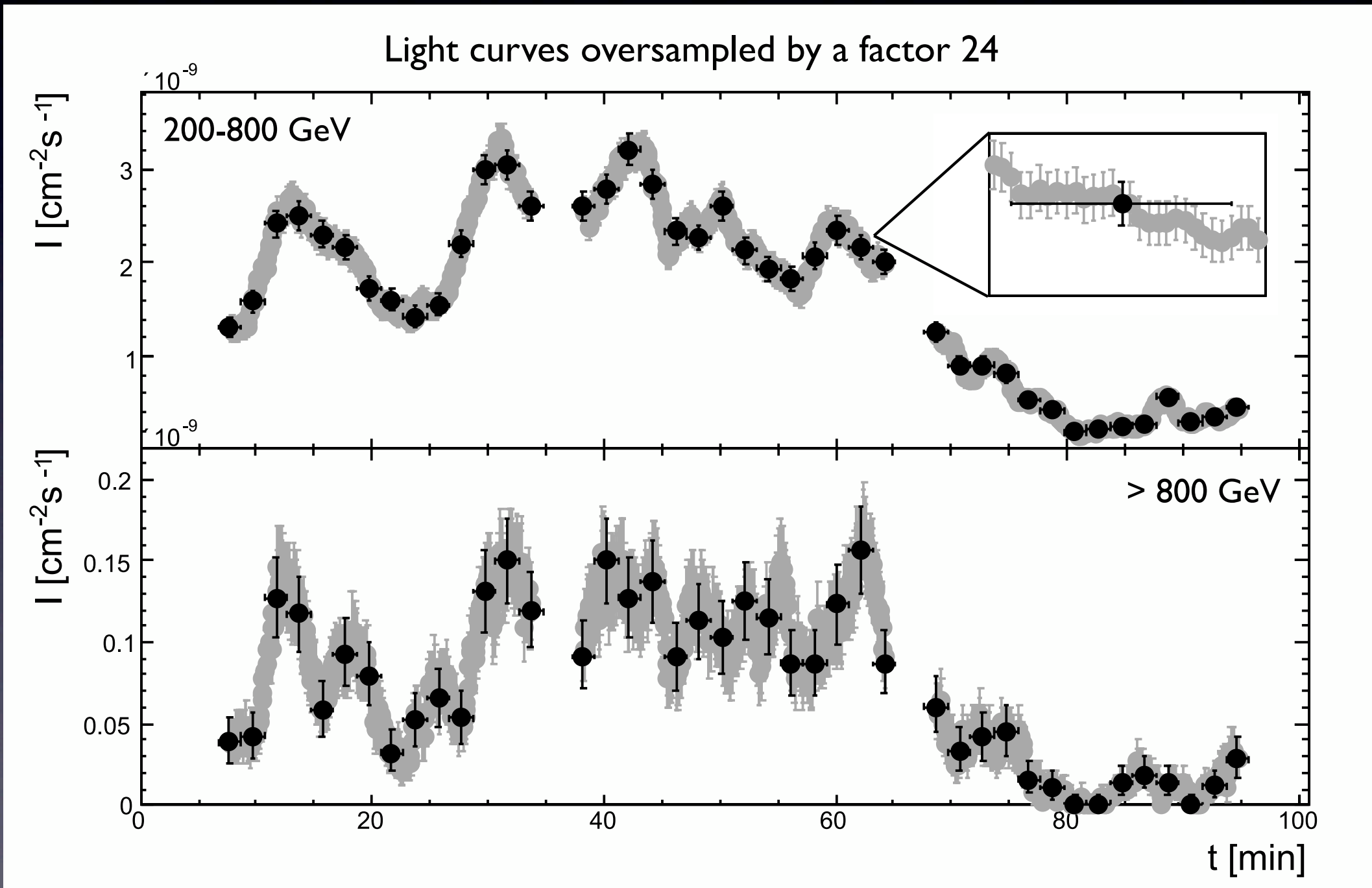
- Flux important  $\rightarrow \sim 14$  Crab
- Statistique élevée  $\rightarrow \sim 10000$  photons
- $z = 0.116$  ( $\sim 490$  Mpc)
- Spectre en «broken power-law»
- Grande variabilité
  - Fourier Power  $\sim 600$  s
  - Rise/fall times  $\sim 200$  s



Aharonian et al. (HESS Collaboration), *ApJ* 664, L71 (2007)

# Le but

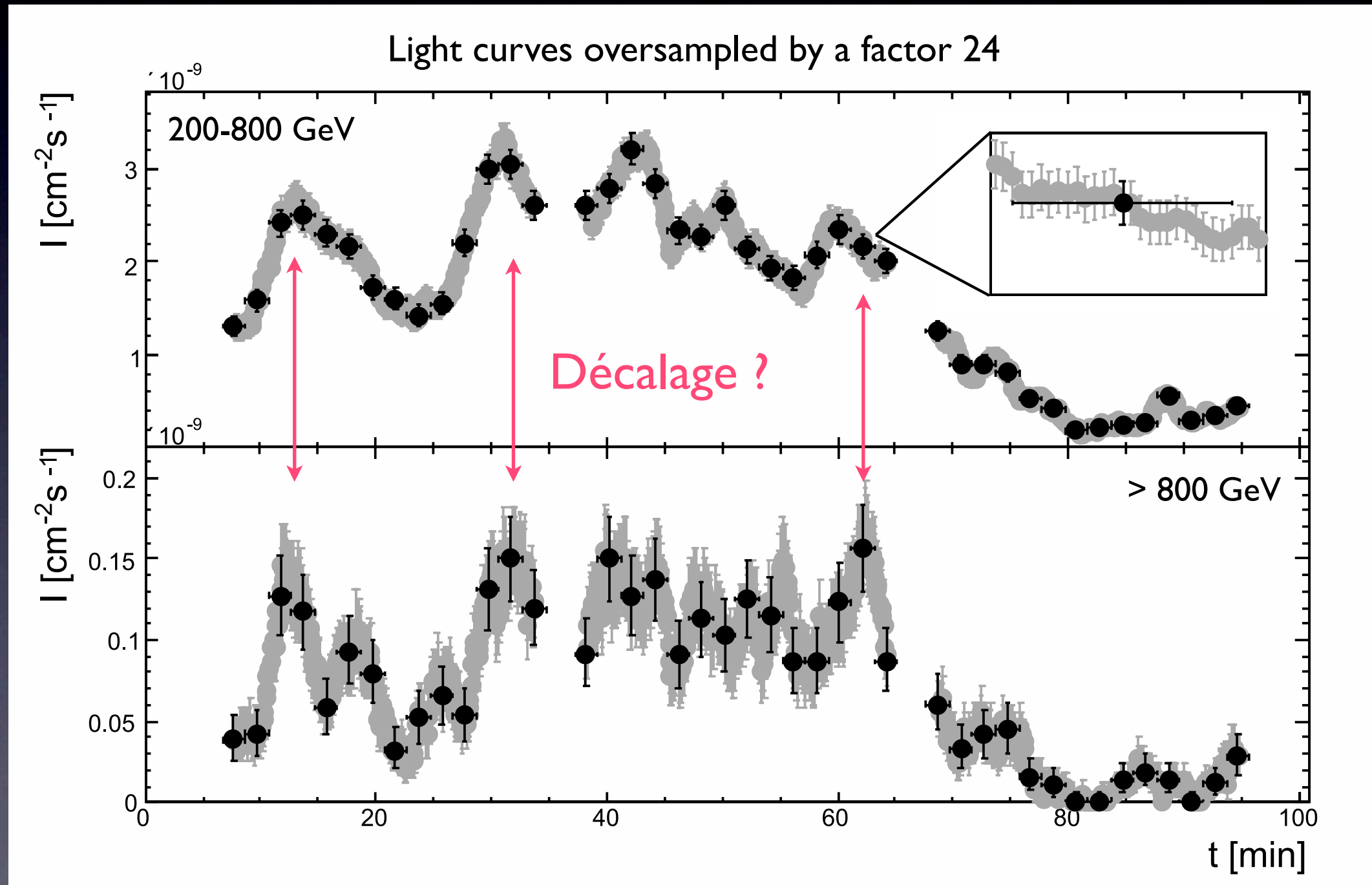
- Chercher un décalage temporel dans deux bandes d'énergies





# Le but

- Chercher un décalage temporel dans deux bandes d'énergies



# Mesure des lags

T.-P. Li et al., Chinese J. of Astronomy and Astrophys. 4, 583 (2004) - S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, 1999



# Mesure des lags

- Utilisation de deux méthodes différentes:
  - Modified Cross Correlation Function (MCCF)
  - Wavelet Transform

# Mesure des lags

- Utilisation de deux méthodes différentes:
  - Modified Cross Correlation Function (MCCF)
  - Wavelet Transform
- MCCF :
  - $200 < E < 800 \text{ GeV} \text{ \& } E > 800 \text{ GeV}$
  - $\Delta E = 1 \text{ TeV}$
  - Fit avec une gaussienne + polynôme
  - $\tau_{\text{peak}} = 20 \text{ s}$



# Mesure des lags

- Utilisation de deux méthodes différentes:

- Modified Cross Correlation Function (MCCF)

- Wavelet Transform

- MCCF :

- $200 < E < 800 \text{ GeV} \text{ \& } E > 800 \text{ GeV}$

- $\Delta E = 1 \text{ TeV}$

- Fit avec une gaussienne + polynôme

- $\tau_{\text{peak}} = 20 \text{ s}$

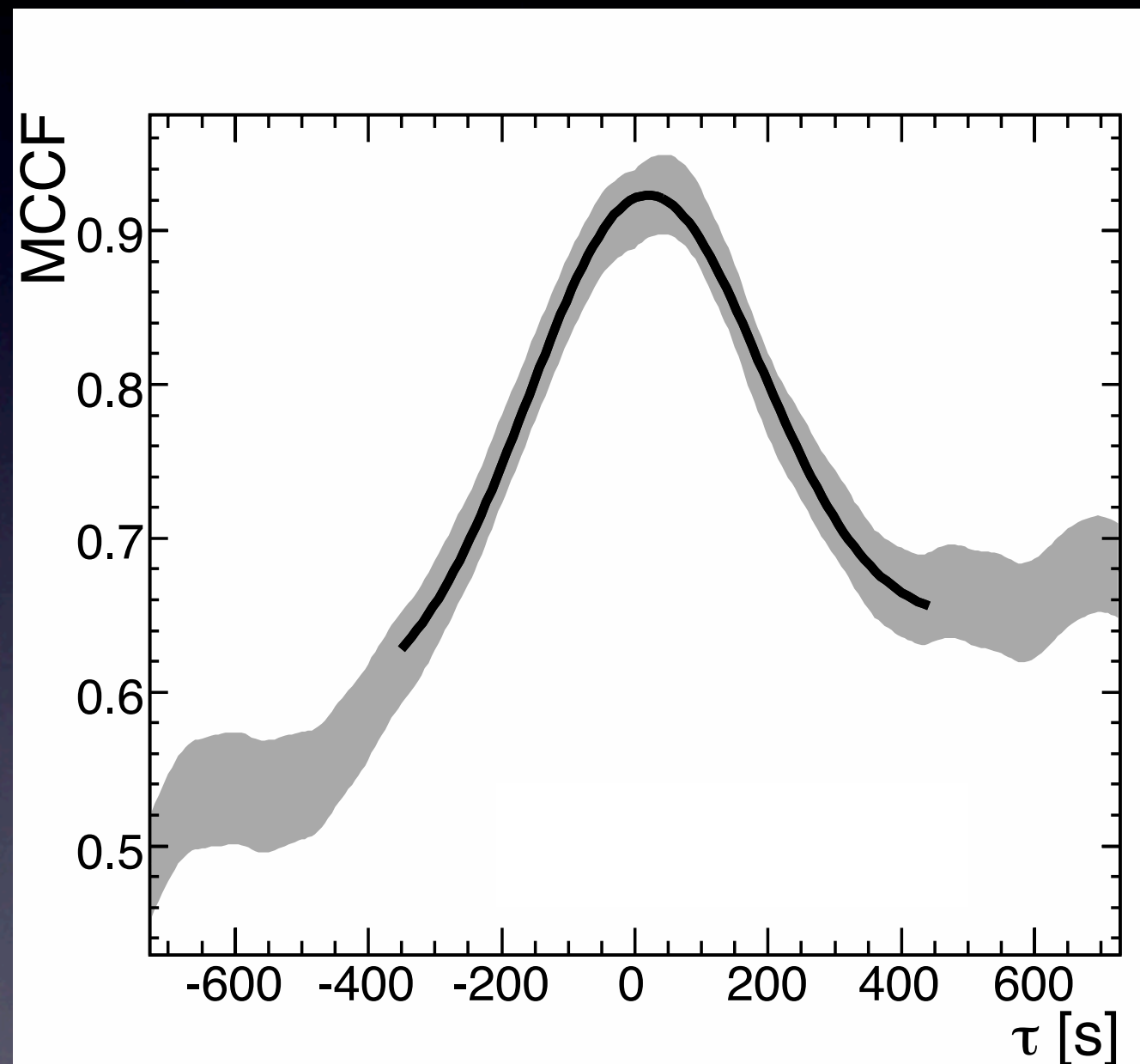
- CWT :

- $210 < E < 250 \text{ GeV} \text{ \& } E > 600 \text{ GeV}$

- $\Delta E = 0.92 \text{ TeV}$

- Deux paires d'extrema identifiées

- $\langle \tau \rangle = 27 \text{ s}$



# Calibration des erreurs (MCCF)

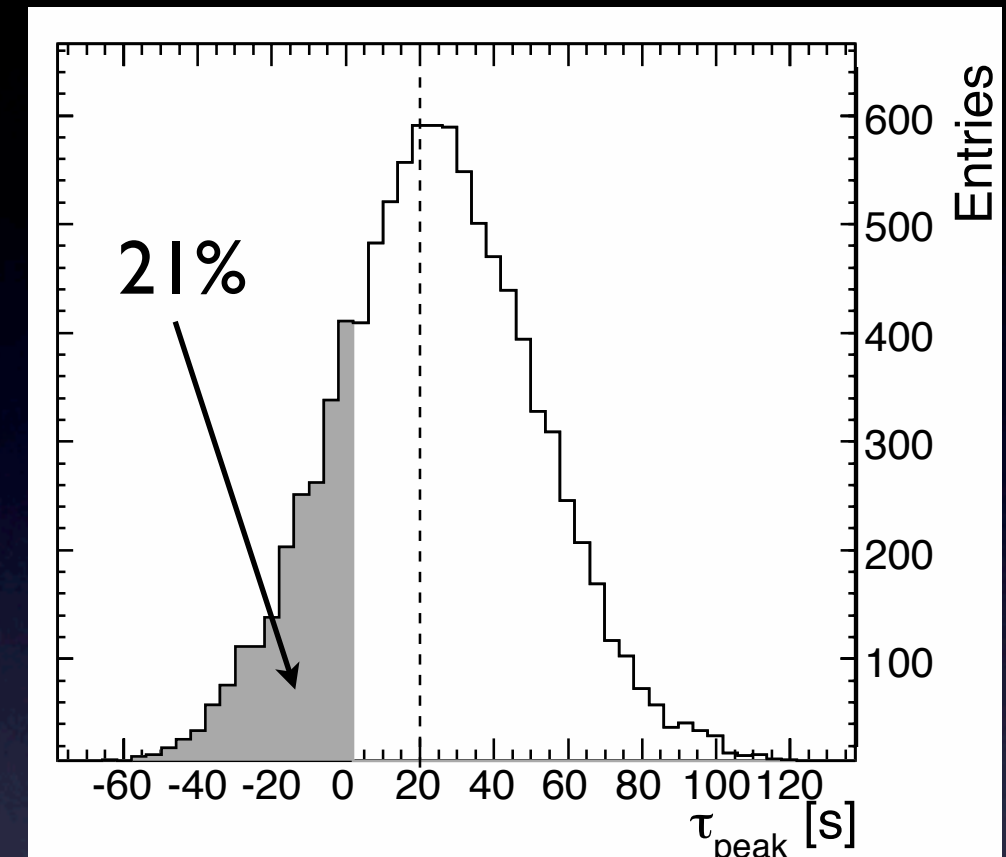


# Calibration des erreurs (MCCF)

- «toy Monte Carlo»
  - 10000 courbes de lumière simulées pour chaque bande d'énergie
  - Variation du flux dans les barres d'erreurs
  - MCCF et mesure de  $\tau_{\text{peak}}$

# Calibration des erreurs (MCCF)

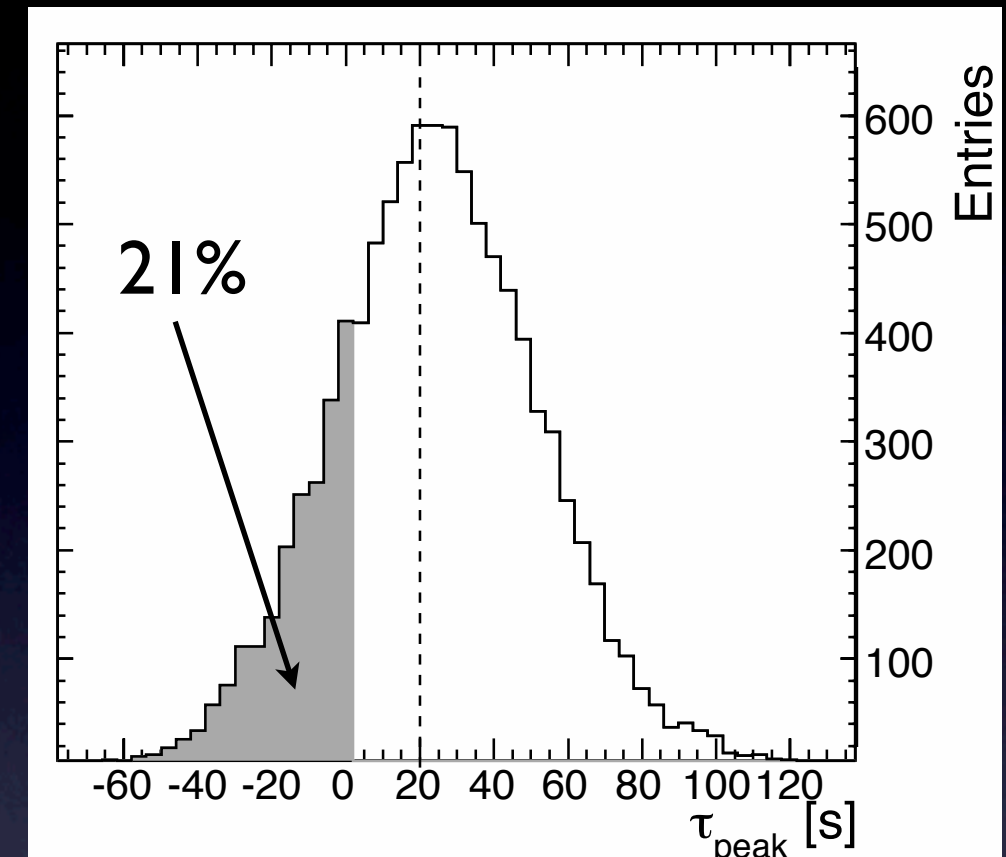
- «toy Monte Carlo»
  - 10000 courbes de lumière simulées pour chaque bande d'énergie
  - Variation du flux dans les barres d'erreurs
  - MCCF et mesure de  $\tau_{\text{peak}}$
- Cross Correlation Peak Distribution
  - Moyenne = 25 s
  - RMS = 28 s
  - $\tau_{\text{peak}} < 0$  pour 21% des essais
  - $\tau_{\text{peak}} = 0$  ne peut pas être exclu





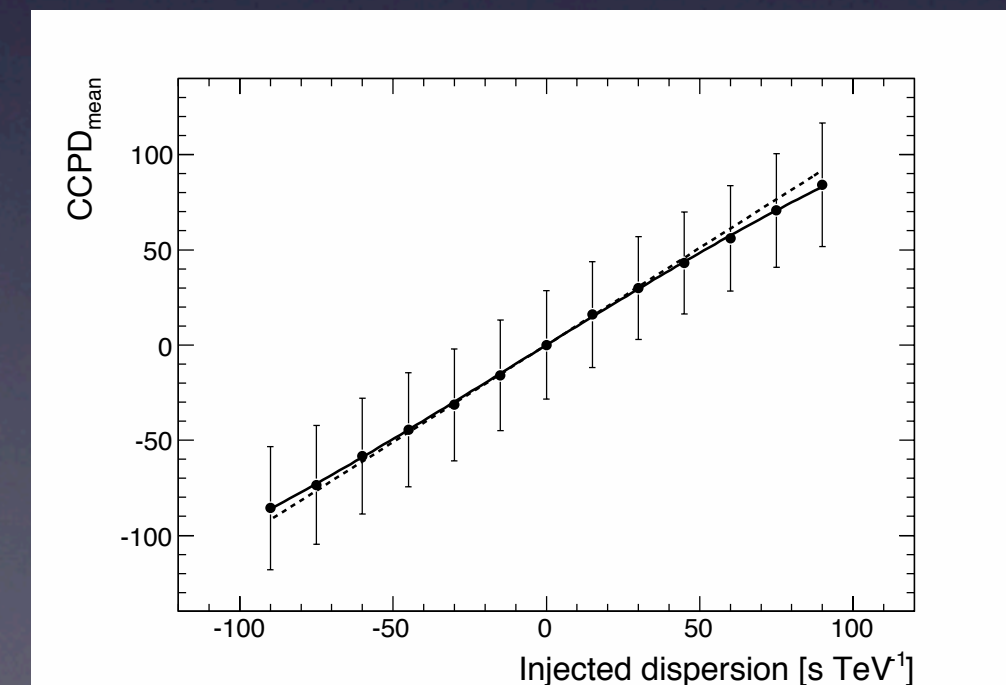
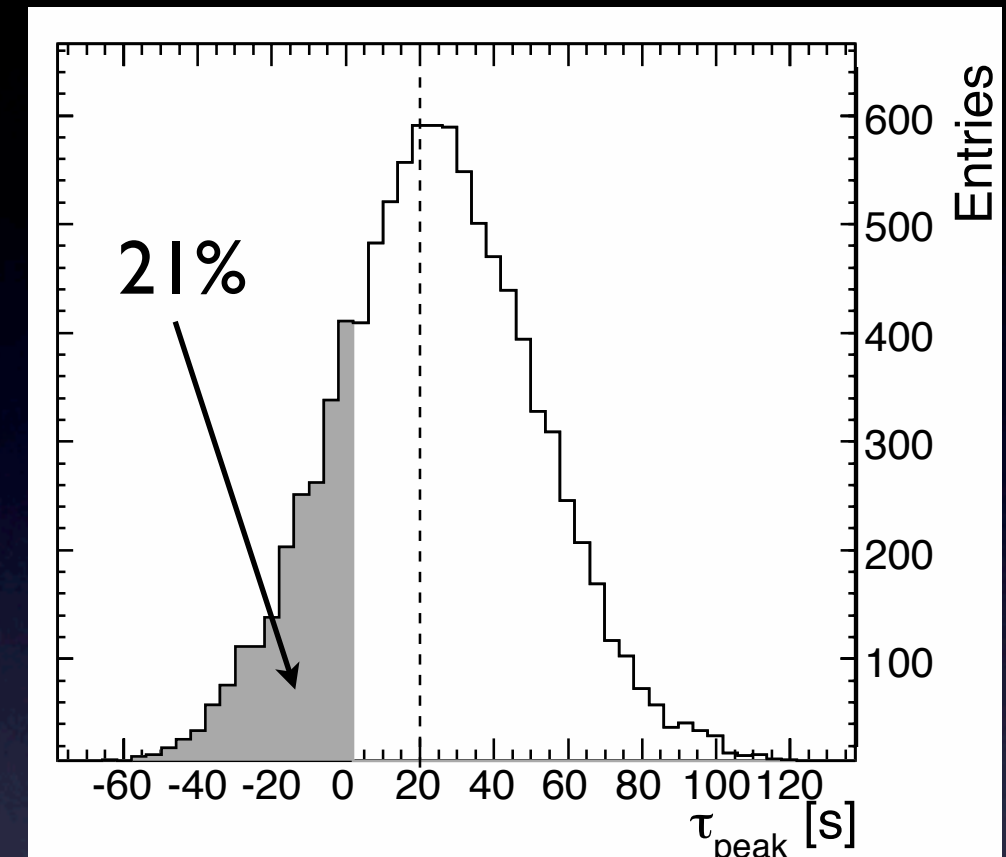
# Calibration des erreurs (MCCF)

- «toy Monte Carlo»
  - 10000 courbes de lumière simulées pour chaque bande d'énergie
  - Variation du flux dans les barres d'erreurs
  - MCCF et mesure de  $\tau_{\text{peak}}$
- Cross Correlation Peak Distribution
  - Moyenne = 25 s
  - RMS = 28 s
  - $\tau_{\text{peak}} < 0$  pour 21% des essais
  - $\tau_{\text{peak}} = 0$  ne peut pas être exclu
- Réponse à une dispersion
  - On injecte une dispersion dans les données
  - $|\Delta t / \Delta E| < 90 \text{ s/TeV}$  par pas de 15 s/TeV



# Calibration des erreurs (MCCF)

- «toy Monte Carlo»
  - 10000 courbes de lumière simulées pour chaque bande d'énergie
  - Variation du flux dans les barres d'erreurs
  - MCCF et mesure de  $\tau_{\text{peak}}$
- Cross Correlation Peak Distribution
  - Moyenne = 25 s
  - RMS = 28 s
  - $\tau_{\text{peak}} < 0$  pour 21% des essais
  - $\tau_{\text{peak}} = 0$  ne peut pas être exclu
- Réponse à une dispersion
  - On injecte une dispersion dans les données
  - $|\Delta t / \Delta E| < 90 \text{ s/TeV}$  par pas de 15 s/TeV
- Même procédure appliquée pour la méthode en ondelettes





# Résultats

Méthode	$\langle \Delta E \rangle$ (TeV)	$\Delta t / \Delta E$ 95% CL (s/TeV)	$E_{QG}$ 95% CL (GeV)	$\Delta t / \Delta E^2$ (s/TeV <sup>2</sup> )	$E_{QG}$ 95% CL (GeV)
MCCF	1.02	$< 73$	$> 7.2 \times 10^{17}$	$< 41$	$> 1.4$
CWT	0.92	$< 100$	$> 5.2 \times 10^{17}$	-	-

- Différences entre les deux méthodes
  - Ecart en énergie moyens  $\langle \Delta E \rangle$
  - La CWT donne un  $\Delta t$  plus grand
- La meilleure limite obtenue avec un blazar
- Sensibilité médiocre pour le terme quadratique...

# Résultats

Méthode	$\langle \Delta E \rangle$ (TeV)	$\Delta t / \Delta E$ 95% CL (s/TeV)	$E_{QG}$ 95% CL (GeV)	$\Delta t / \Delta E^2$ (s/TeV <sup>2</sup> )	$E_{QG}$ 95% CL (GeV)
MCCF	1.02	$< 73$	$> 7.2 \times 10^{17}$	$< 41$	$> 1.4$
CWT	0.92	$< 100$	$> 5.2 \times 10^{17}$	-	-

- Différences entre les deux méthodes
  - Ecart en énergie moyens  $\langle \Delta E \rangle$
  - La CWT donne un  $\Delta t$  plus grand
- La meilleure limite obtenue avec un blazar
- Sensibilité médiocre pour le terme quadratique...



# Conclusion

- Analyse d'une éruption exceptionnelle de PKS 2155-304 ( $z = 0.116$ ) avec H.E.S.S.
- Etude de physique fondamentale avec une source astrophysique avec une grande précision
- Aharonian et al. (HESS Collaboration) PRL, 101, 170402 (2008)
- Pas de décalage temporel ( $> 3\sigma$ ) avec deux méthodes différentes
- Limite sur l'échelle de Gravitation Quantique la plus contraignante obtenue pour un Blazar, en supposant l'absence d'effets sources :

$$E_{QG} > 0.7 \times 10^{18} \text{ GeV}$$
$$\text{à } 95\% \text{ CL}$$

# Etude en cours

- Etude de la corrélation entre l'énergie et le temps d'arrivée des photons avec une fonction de densité de probabilité définie par:

$$P_i(t, E) = N \int_0^\infty A(E_S) \Gamma(E_S) G(E - E_S, \sigma(E_S)) F_S(t - \tau E_S) dE_S$$

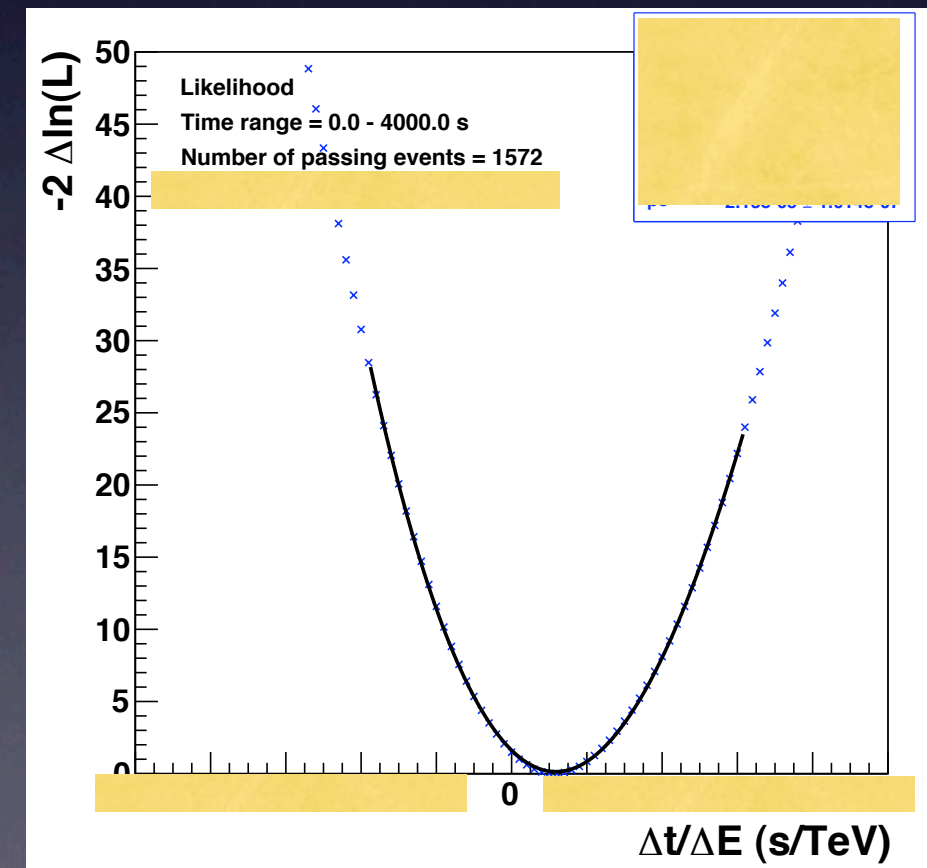
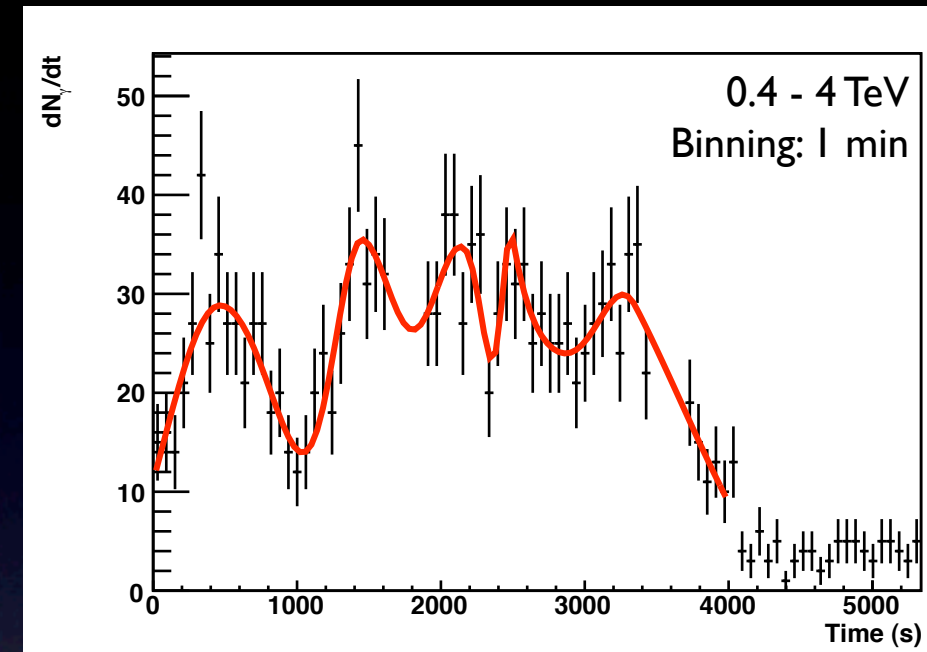
où  $\Gamma(E_S)$  est le spectre émis,  $G(E - E_S, \sigma(E_S))$  rend compte de la résolution en énergie,  $A(E_S)$  est l'acceptance de H.E.S.S. et  $F_S$  est un ajustement de la courbe de lumière

- On suppose un effet linéaire
- La fonction de vraisemblance est donnée par:

$$L = \prod_i P_i(t, E)$$

pour tous les photons dans l'intervalle étudié

- Le minimum de la fonction de vraisemblance nous donne le décalage en s/TeV
- Analyse non binnée, plus sensible, permettant d'étudier la courbe de lumière localement





# Résultats actuels

GRBs

AGNs

Source(s)	Expérience	Méthode	Résultat	Référence
GRB 021206	RHESSI	Fit + temps d'arrivée moyen dans un pic	$E_{QG} > 1.8 \times 10^{17}$ GeV	S. Boggs et al., ApJ 611 (2004) L77
GRB 080916C	Fermi (LAT + GBM)	$t_{Max(E)} - t_0$	$E_{QG} > 1.5 \times 10^{18}$ GeV	A.A. Abdo et al., Science Express, 02/19/2009
9 GRBs	BATSE/OSSE	Wavelets	$E_{QG} > 6 \times 10^{15}$ GeV	J. Ellis et al., A&A 402 (2003) 409
15 GRBs	HETE-2	Wavelets	$E_{QG} > 4 \times 10^{15}$ GeV	J. Bolmont et al., ApJ 676 (2008) 532 + ICRC 07 + COSPAR 08
17 GRBs	INTEGRAL	Likelihood	$E_{QG} > 1.5 \times 10^{14}$ GeV	Lamon et al., Gen. Rel. Grav. 40 (2008) 1731
35 GRBs	BATSE/HETE-2/ SWIFT	Wavelets	$E_{QG} > 1.4 \times 10^{16}$ GeV	J. Ellis et al., Astropart. Phys. 25 (2006) 402 + Erratum arXiv:0712.2781
Mkn 421	Whipple	$t_{Max(E < 1 \text{ TeV})} - t_{Max(E > 2 \text{ TeV})}$	$E_{QG} > 0.6 \times 10^{17}$ GeV	S.D. Biller et al., Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 2108
Mkn 501	MAGIC	ECF, Likelihood	$E_{QG} > 3 \times 10^{17}$ GeV	J. Albert et al., Phys. Lett. B 668 (2008) 253 + arXiv:0803.2120
PKS 2155 -304	HESS	CCF, Wavelets	$E_{QG} > 7 \times 10^{17}$ GeV	Aharonian et al., Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 170402

# Résultats actuels

GRBs

Source(s)	Expérience	Méthode	Résultat	Référence
GRB 021206	RHESSI	Fit + temps d'arrivée moyen dans un pic	$E_{QG} > 1.8 \times 10^{17} \text{ GeV}$	S. Boggs et al., ApJ 611 (2004) L77
GRB 080916C	Fermi (LAT + GBM)	$t_{\text{Max}(E)} - t_0$	$E_{QG} > 1.5 \times 10^{18} \text{ GeV}$	A.A. Abdo et al., Science Express, 02/19/2009
9 GRBs	BATSE/OSSE	Wavelets	$E_{QG} > 6 \times 10^{15} \text{ GeV}$	J. Ellis et al., A&A 402 (2003) 409
15 GRBs	HETE-2	Wavelets	$E_{QG} > 4 \times 10^{15} \text{ GeV}$	J. Bolmont et al., ApJ 676 (2008) 532 + ICRC 07 + COSPAR 08
17 GRBs	INTEGRAL	Likelihood	$E_{QG} > 1.5 \times 10^{14} \text{ GeV}$	Lamon et al., Gen. Rel. Grav. 40 (2008) 1731
35 GRBs	BATSE/HETE-2/ SWIFT	Wavelets	$E_{QG} > 1.4 \times 10^{16} \text{ GeV}$	J. Ellis et al., Astropart. Phys. 25 (2006) 402 + Erratum arXiv:0712.2781
Mkn 421	Whipple	$t_{\text{Max}(E < 1 \text{ TeV})} - t_{\text{Max}(E > 2 \text{ TeV})}$	$E_{QG} > 0.6 \times 10^{17} \text{ GeV}$	S.D. Biller et al., Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 2108
Mkn 501	MAGIC	ECF, Likelihood	$E_{QG} > 3 \times 10^{17} \text{ GeV}$	J. Albert et al., Phys. Lett. B 668 (2008) 253 + arXiv:0803.2120
PKS 2155 -304	HESS	CCF, Wavelets	$E_{QG} > 7 \times 10^{17} \text{ GeV}$	Aharonian et al., Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 170402

AGNs



# Résultats actuels

GRBs

AGNs

Source(s)	Expérience	Méthode	Résultat	Référence
GRB 021206	RHESSI	Fit + temps d'arrivée moyen dans un pic	$E_{QG} > 1.8 \times 10^{17}$ GeV	S. Boggs et al., ApJ 611 (2004) L77
GRB 080916C	Fermi (LAT + GBM)	$t_{Max(E)} - t_0$	$E_{QG} > 1.5 \times 10^{18}$ GeV	A.A. Abdo et al., Science Express, 02/19/2009
9 GRBs	BATSE/OSSE	Wavelets	$E_{QG} > 6 \times 10^{15}$ GeV	J. Ellis et al., A&A 402 (2003) 409
15 GRBs	HETE-2	Wavelets	$E_{QG} > 4 \times 10^{15}$ GeV	J. Bolmont et al., ApJ 676 (2008) 532 + ICRC 07 + COSPAR 08
17 GRBs	INTEGRAL	Likelihood	$E_{QG} > 1.5 \times 10^{14}$ GeV	Lamon et al., Gen. Rel. Grav. 40 (2008) 1731
35 GRBs	BATSE/HETE-2/ SWIFT	Wavelets	$E_{QG} > 1.4 \times 10^{16}$ GeV	J. Ellis et al., Astropart. Phys. 25 (2006) 402 + Erratum arXiv:0712.2781
Mkn 421	Whipple	$t_{Max(E < 1 \text{ TeV})} - t_{Max(E > 2 \text{ TeV})}$	$E_{QG} > 0.6 \times 10^{17}$ GeV	S.D. Biller et al., Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 2108
Mkn 501	MAGIC	ECF, Likelihood	$E_{QG} > 3 \times 10^{17}$ GeV	J. Albert et al., Phys. Lett. B 668 (2008) 253 + arXiv:0803.2120
PKS 2155 -304	HESS	CCF, Wavelets	$E_{QG} > 7 \times 10^{17}$ GeV	Aharonian et al., Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 170402

# Activités actuelles

- **Analyse** : recherche d'un effet de gravitation quantique
  - Analyse de Blazars de redshifts connus
  - Utilisation d'une méthode de vraisemblance permettant une analyse non binnée
  - Comparaison des différentes méthodes (CCF, ondelettes, vraisemblance, ECF, ....)
  - Perspectives pour CTA
- **Instrumentation** (CTA)
  - Participation au choix d'un photodétecteur pour les caméras de CTA
  - Participation au projet d'électronique d'acquisition NECTAr avec test d'un démonstrateur