

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 γ - BE

AMS-02, HETE-2
Analyse - Simulation



Parcours

ENSICAEN, 1999 - 2002

Formation d'ingénieur



Thèse, LPTA, 2002 - 2005

Astronomie γ - BE



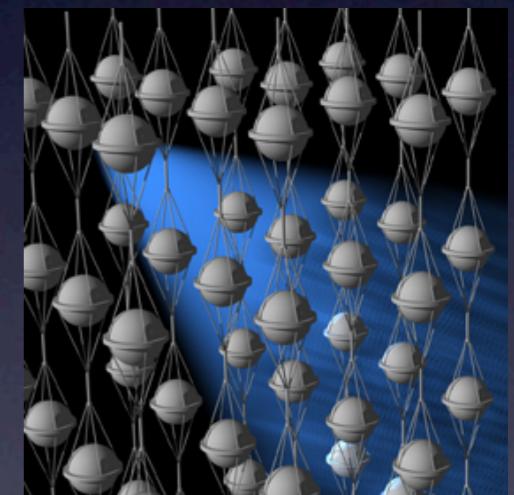
Postdoc, DESY, 2005 - 2008

Astronomie V

Instrumentation,...

AMS-02, HETE-2
Analyse - Simulation

AMANDA/IceCube
Instrumentation - Simulation



Parcours

ENSICAEN, 1999 - 2002

Formation d'ingénieur



Thèse, LPTA, 2002 - 2005

Astronomie γ - BE

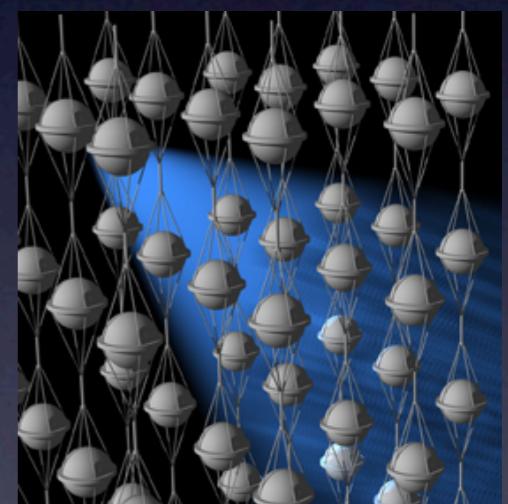
Instrumentation,...



Postdoc, DESY, 2005 - 2008

Astronomie ν

AMS-02, HETE-2
Analyse - Simulation



Postdoc, LPNHE, depuis 09/2008...

Astronomie γ - HE

AMANDA/IceCube
Instrumentation - Simulation

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



Parcours

ENSICAEN, 1999 - 2002

Formation d'ingénieur



Thèse, LPTA, 2002 - 2005

Astronomie γ - BE

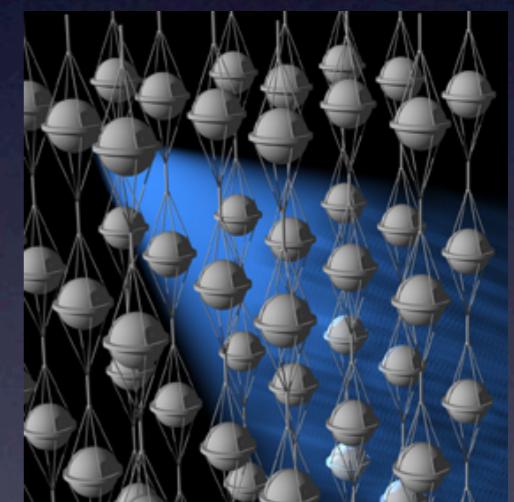
Instrumentation,...



Postdoc, DESY, 2005 - 2008

Astronomie ν

AMS-02, HETE-2
Analyse - Simulation



Postdoc, LPNHE, depuis 09/2008...

Astronomie γ - HE

AMANDA/IceCube
Instrumentation - Simulation

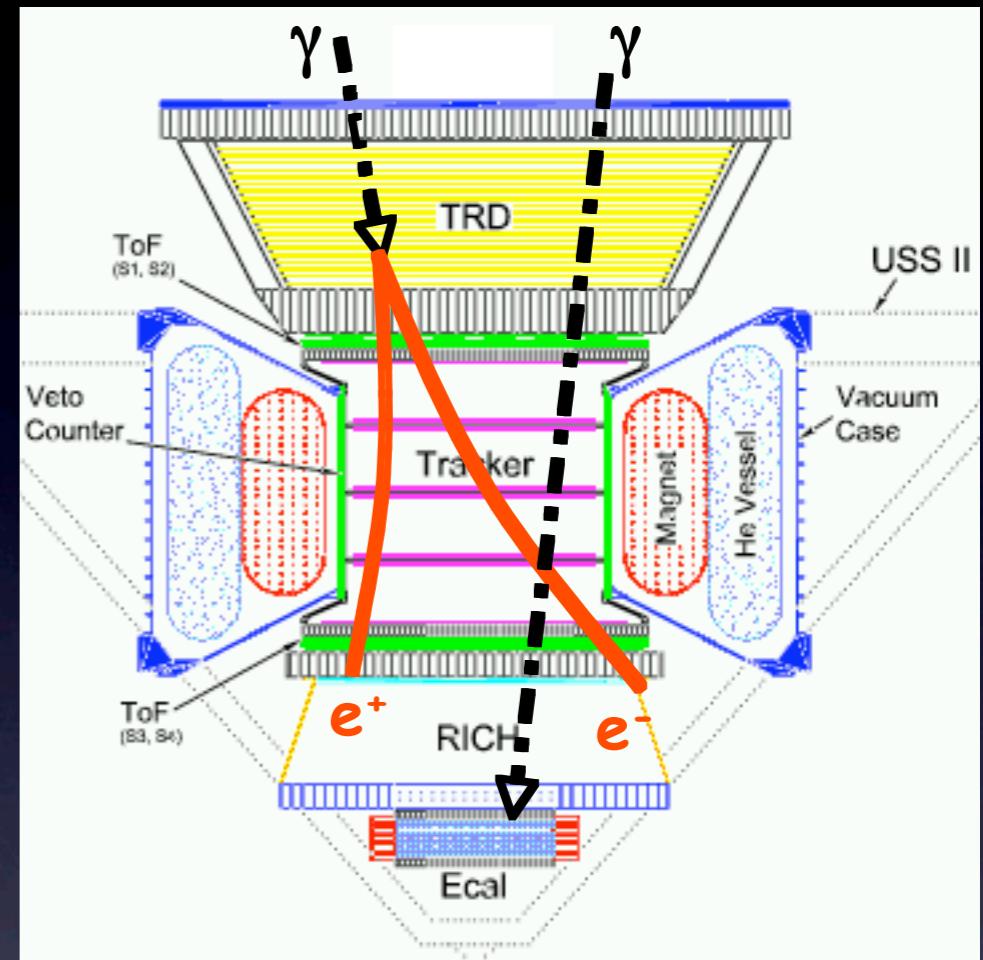
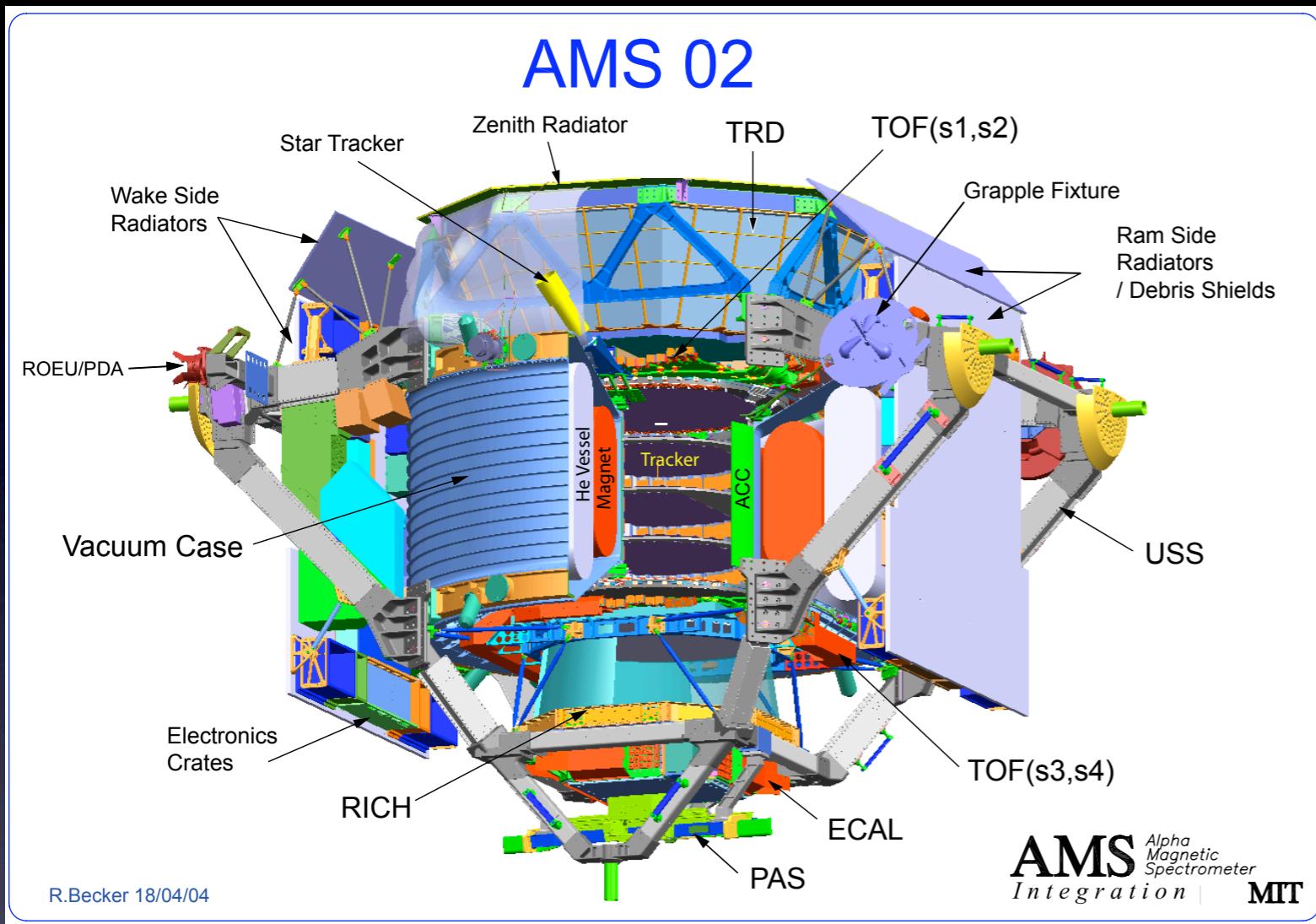
H.E.S.S. , CTA
Analyse - Instrumentation



Thème

Les sources astrophysiques
comme laboratoires de
physique fondamentale...

AMS-02

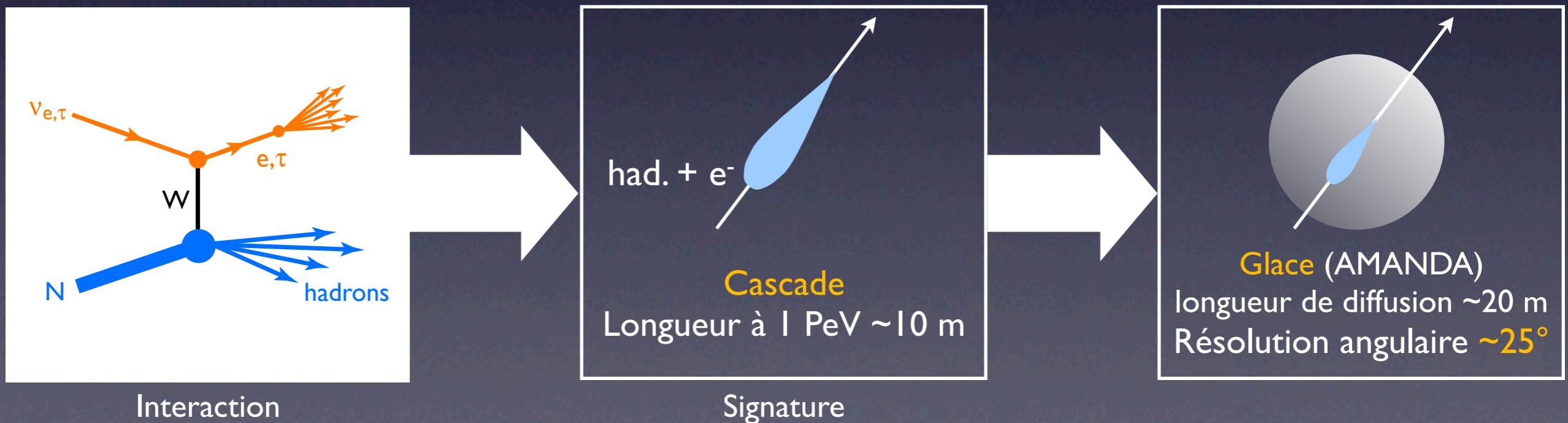
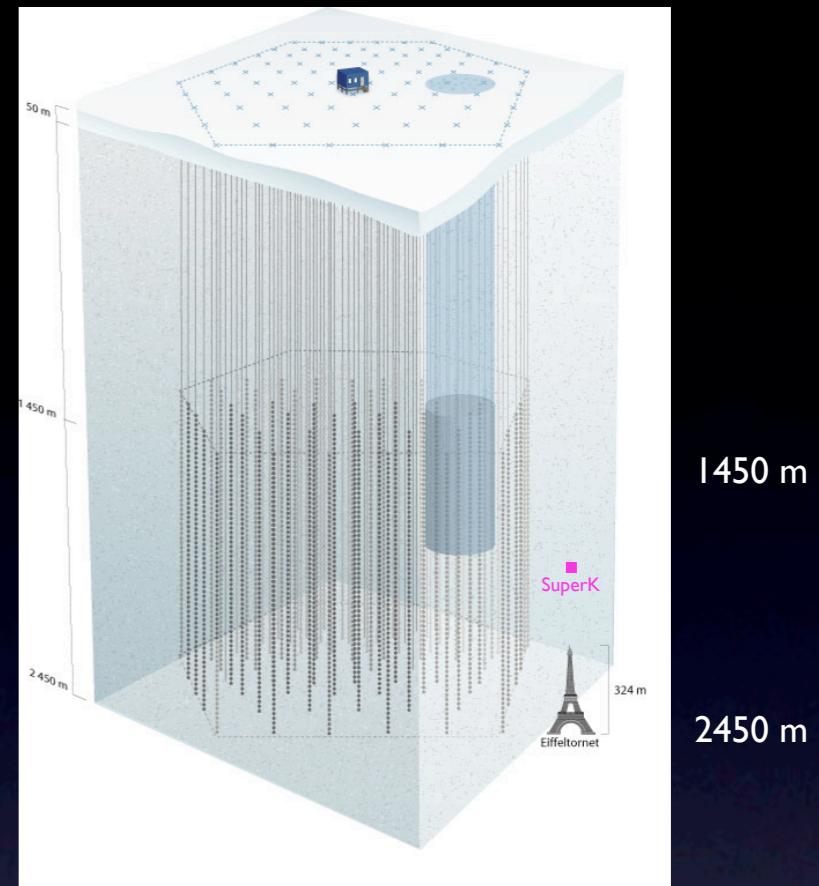


Détection des gamma

- 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

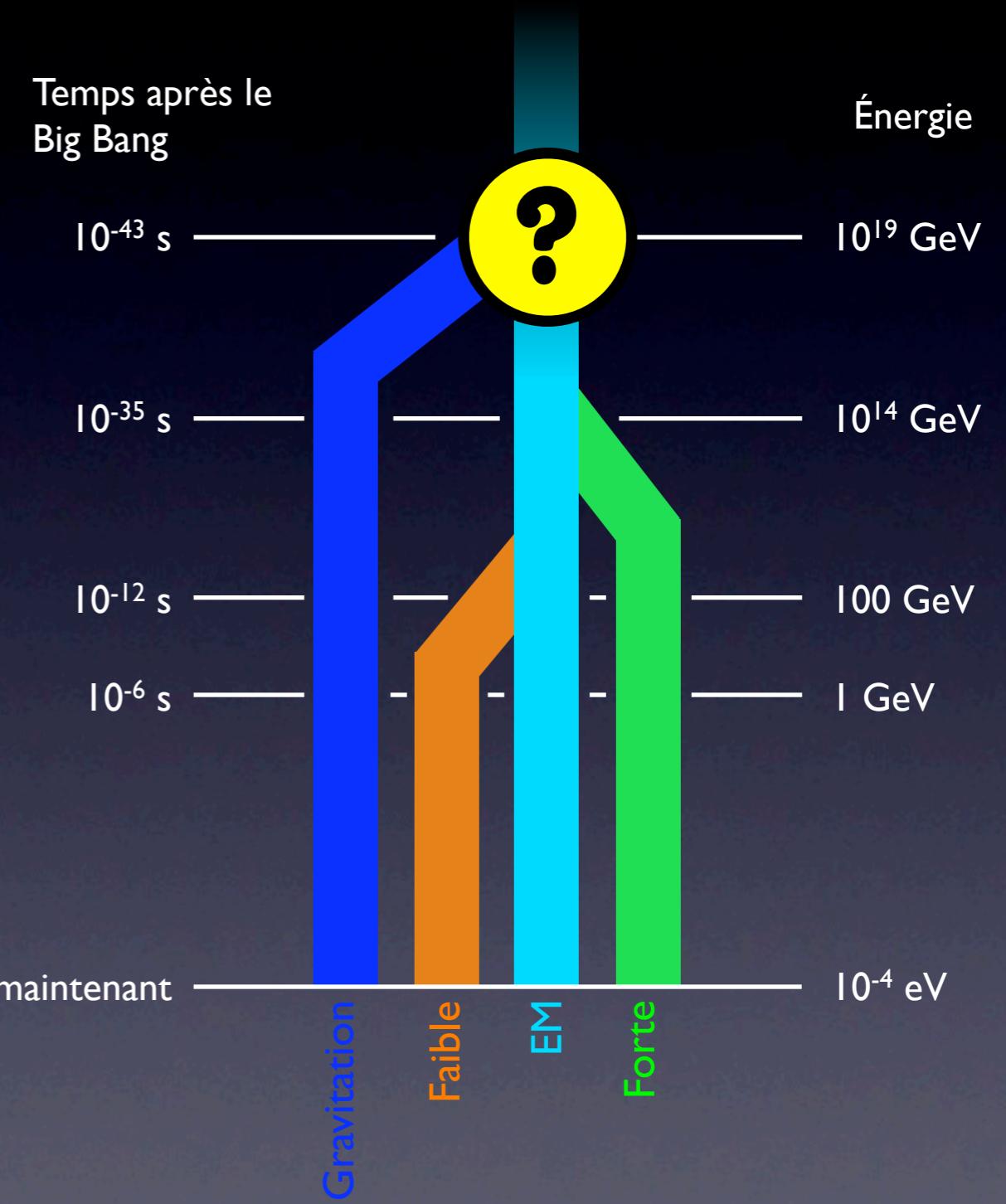
IceCube

- 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 $E_{QG} \sim \mathcal{O}(E_P = 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV})$
- $v(E) = c / n(E)$
- 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 :

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

$$\Delta t = t_1 - t_2 \quad \Delta E = E_1 - E_2 \quad \Omega_\Lambda = 0.7 \quad \Omega_m = 0.3$$

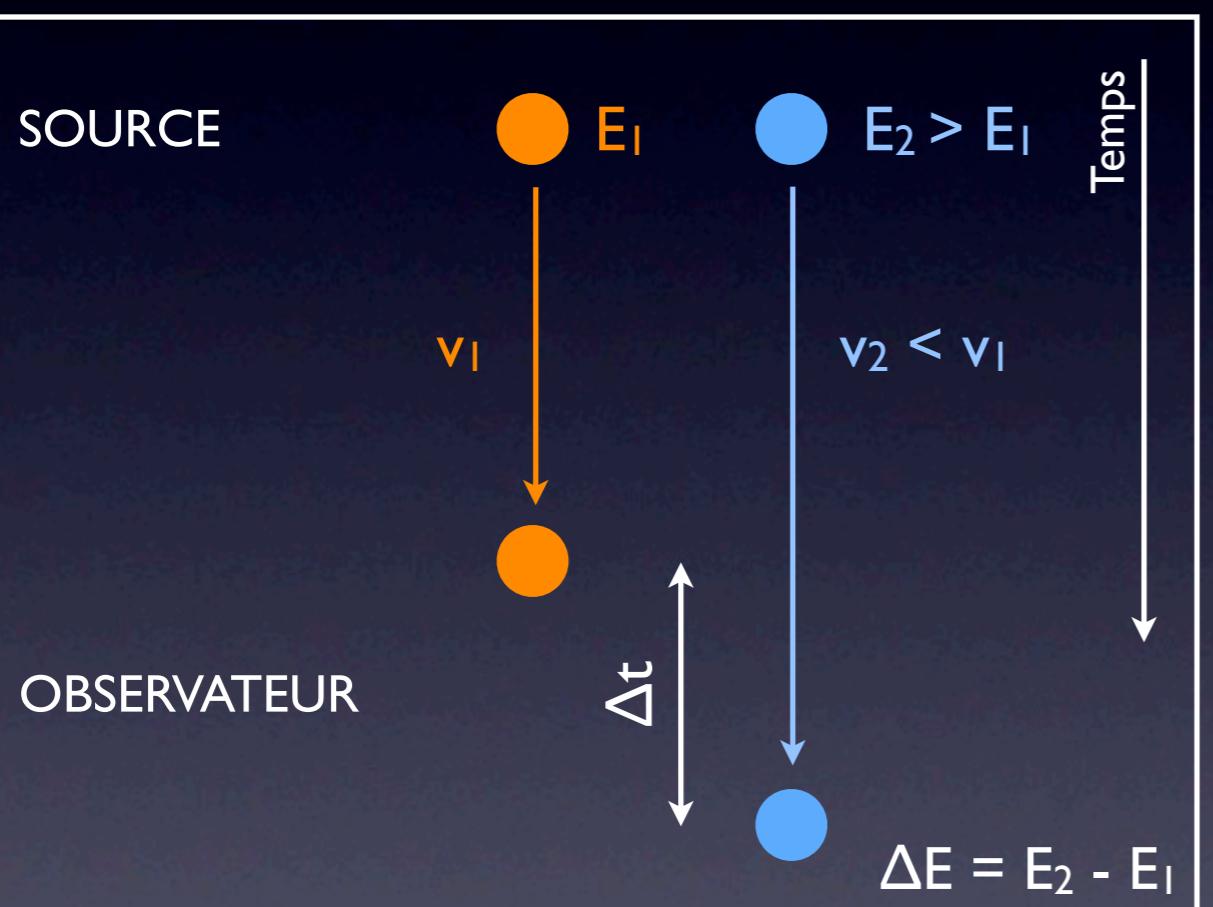
Décalage temporel

- Les effets de QG pourraient apparaître à $E_{QG} \sim \mathcal{O}(E_P = 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV})$
- $v(E) = c / n(E)$
- 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 :

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

$$\Delta t = t_1 - t_2 \quad \Delta E = E_1 - E_2 \quad \Omega_\Lambda = 0.7 \quad \Omega_m = 0.3$$

Effets de GQ et effets sources

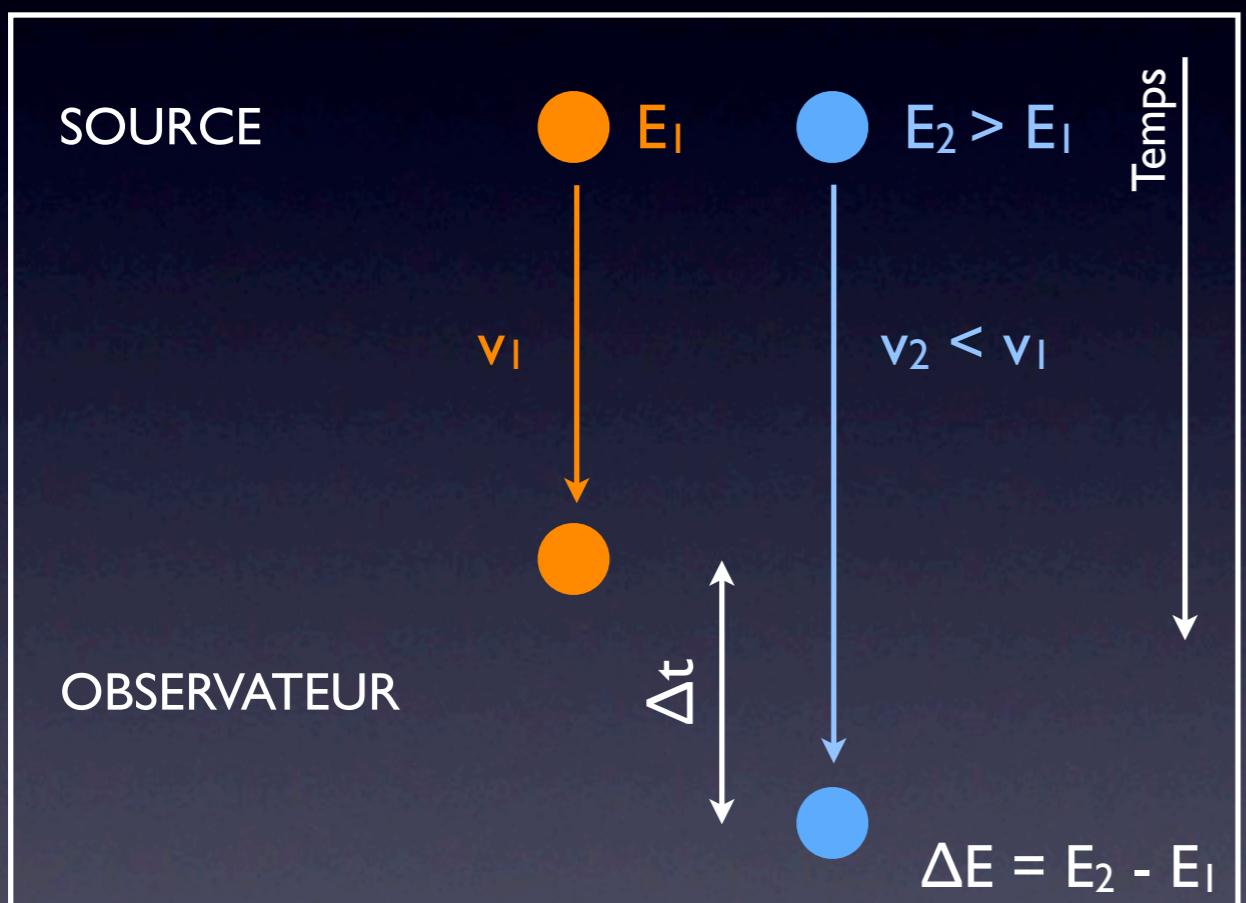


Effet de QG

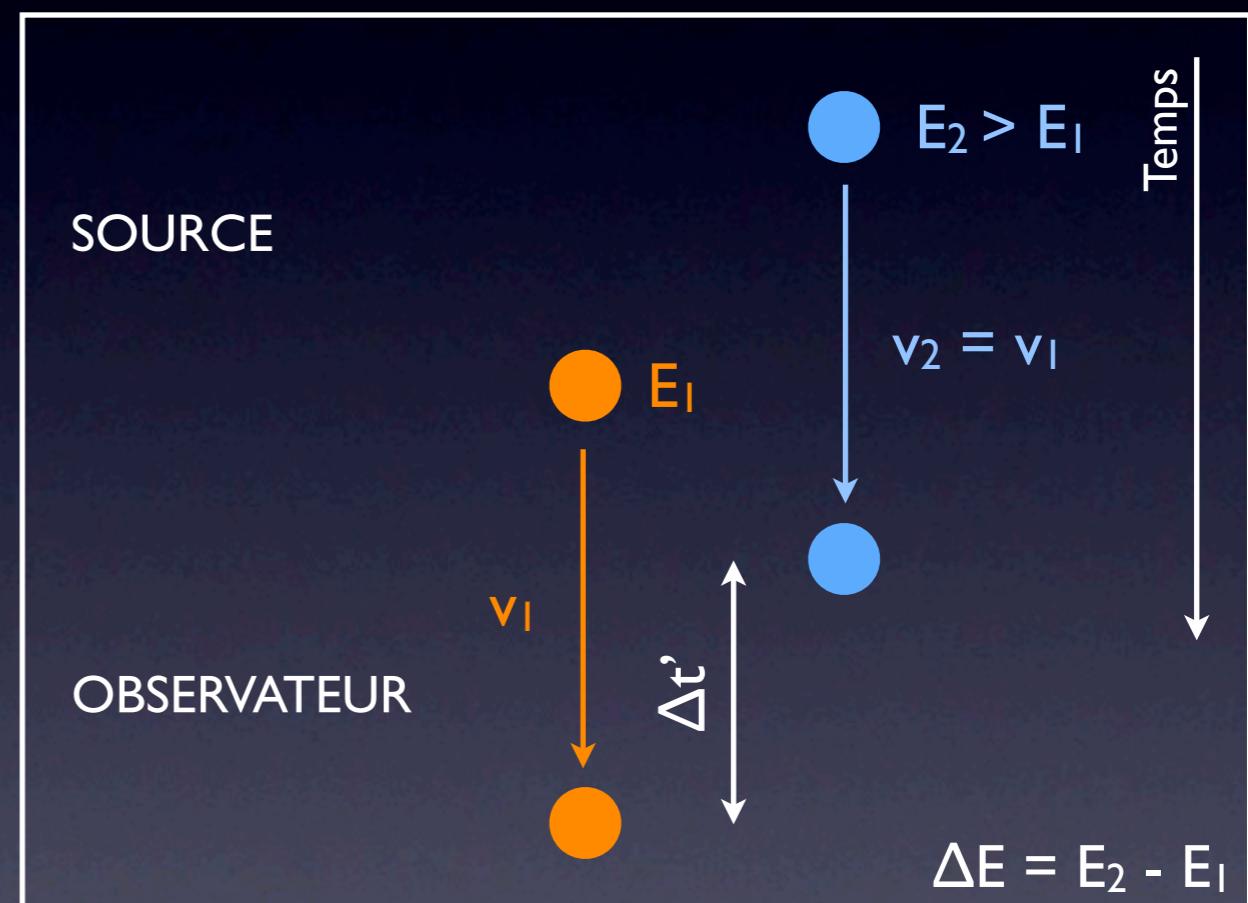
Propagation → Effet VIL

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 (~ 250 vus, ~ 80 localisés, ~ 20 avec z)
- Gamme d'énergie étendue : 0.5-600 keV (soft & medium X-rays + γ -rays)
- WXM, SXC, FREGATE
- FREGATE:
 - Gamme d'énergie : 6-400 keV
 - Surface effective : 160 cm^2
 - Champ de vue : 70°
 - Résolution temporelle : $6.4 \mu\text{s}$
 - 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

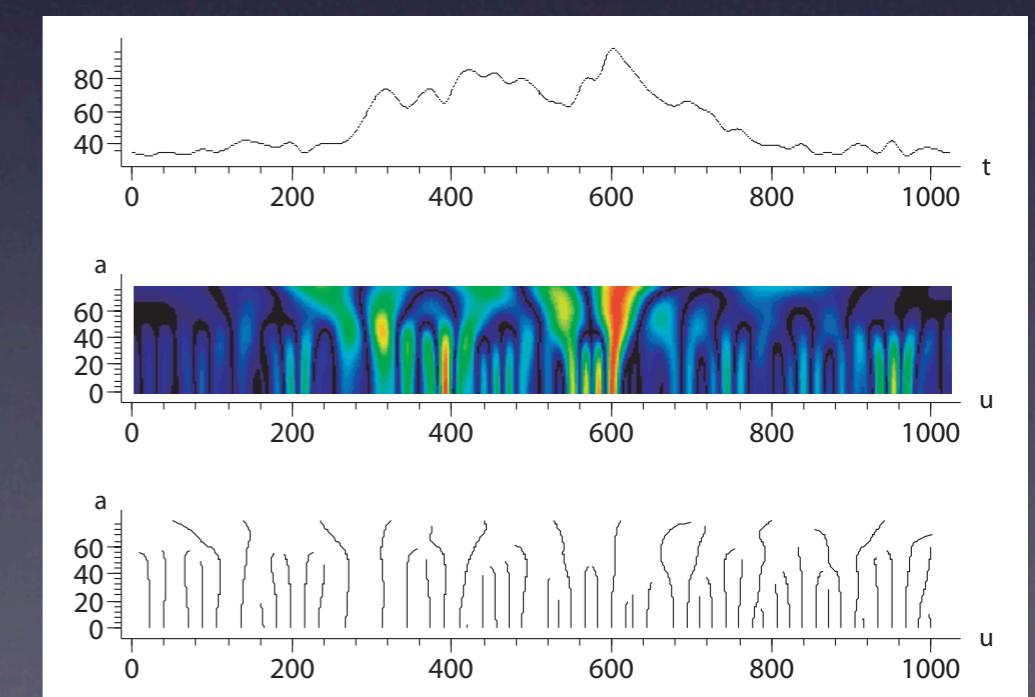
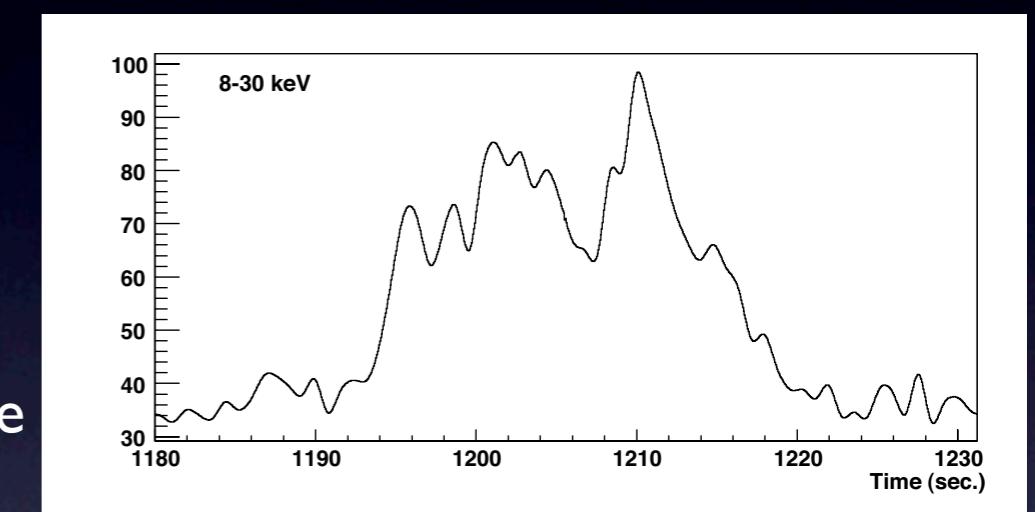
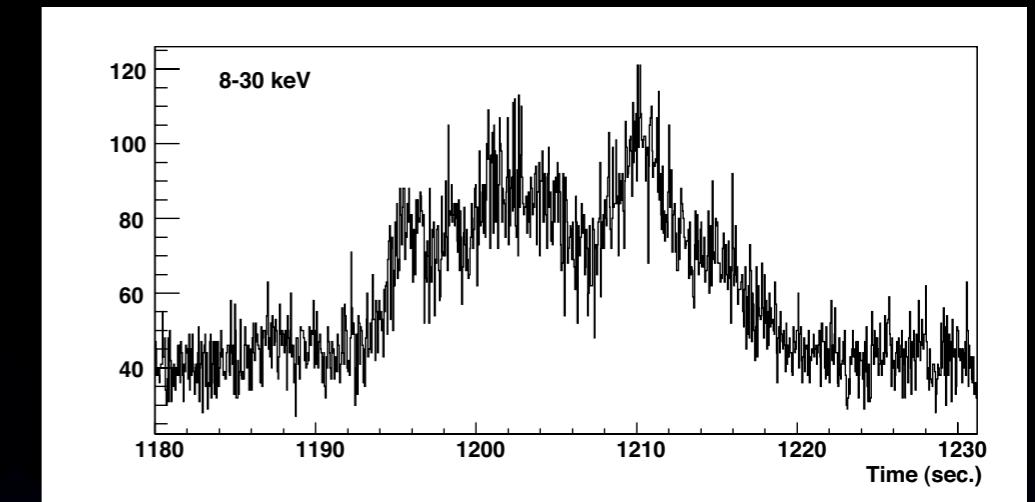
2000-2006

- But : localisation rapide des GRBs (~ 250 vus, ~ 80 localisés, ~ 20 avec z)
- Gamme d'énergie étendue : 0.5-600 keV (soft & medium X-rays + γ -rays)
- WXM, SXC, FREGATE
- FREGATE:
 - Gamme d'énergie : 6-400 keV
 - Surface effective : 160 cm^2
 - Champ de vue : 70°
 - Résolution temporelle : $6.4 \mu\text{s}$
 - 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 χ^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

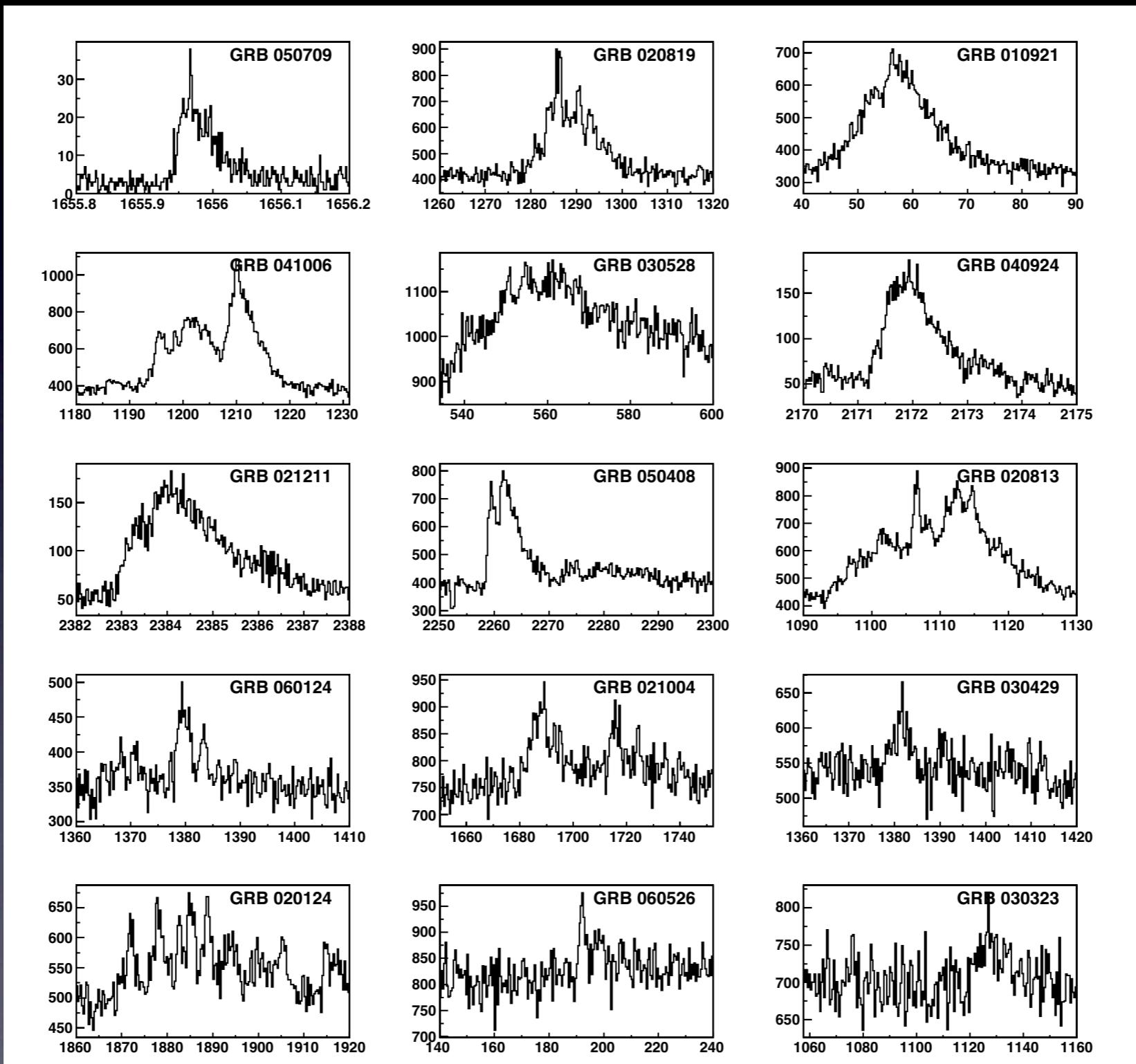
Choix des bandes d'énergie

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

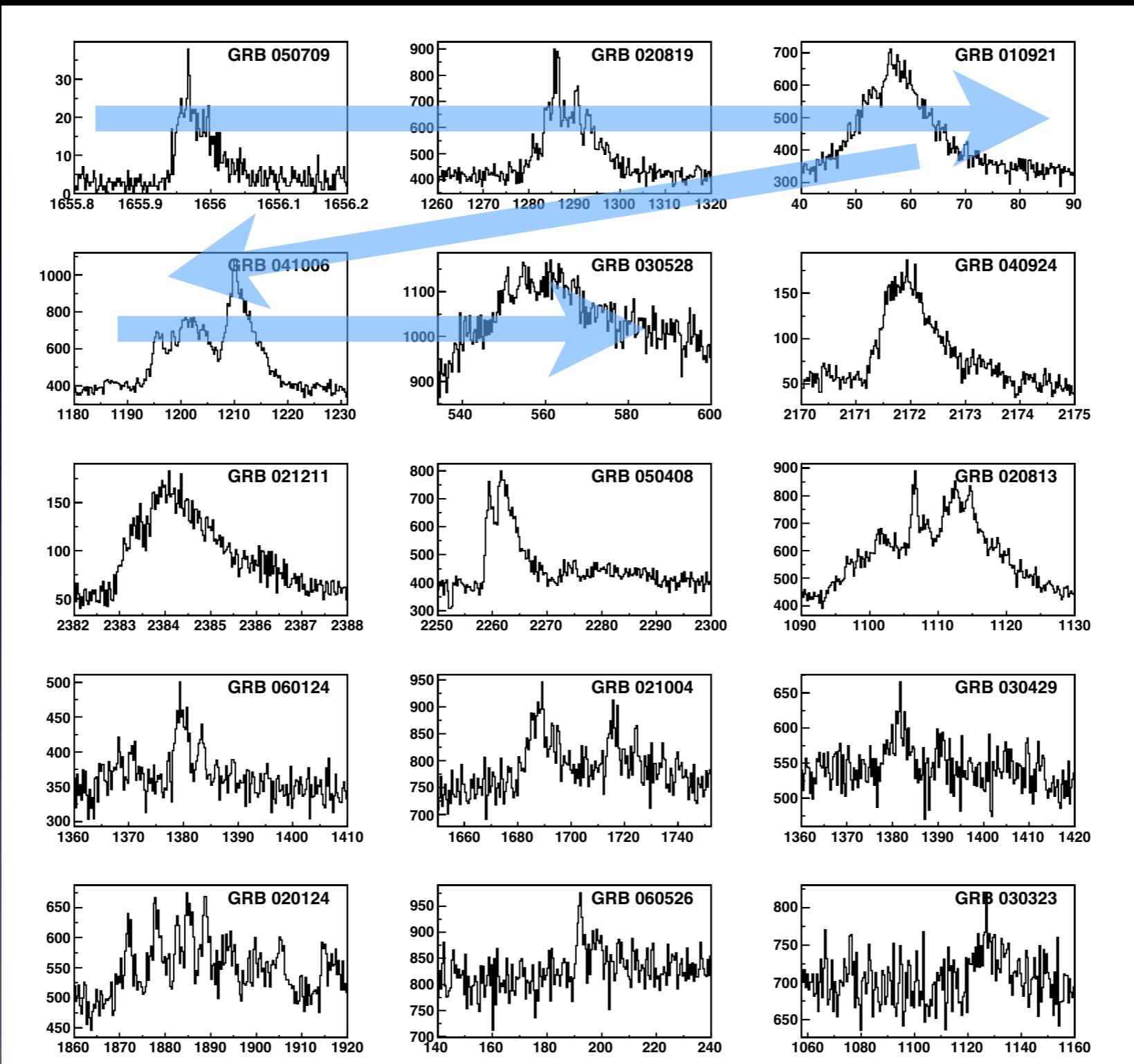
Scénario	Bande 1	Bande 2	$\langle \Delta E \rangle$ moyen *
#1	20-35	60-350	117.6
#2	8-30	60-350	127.2
#3	8-20	60-350	130.2
#4	8-20	30-350	85.0
#5	8-30	30-350	82.0
#6	8-20	40-350	102.8
#7	8-30	40-350	99.8
#8	8-40	40-350	97.9
#9	20-35	40-350	90.1
#10	8-20	50-350	116.9
#11	8-30	50-350	113.9
#12	8-40	50-350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

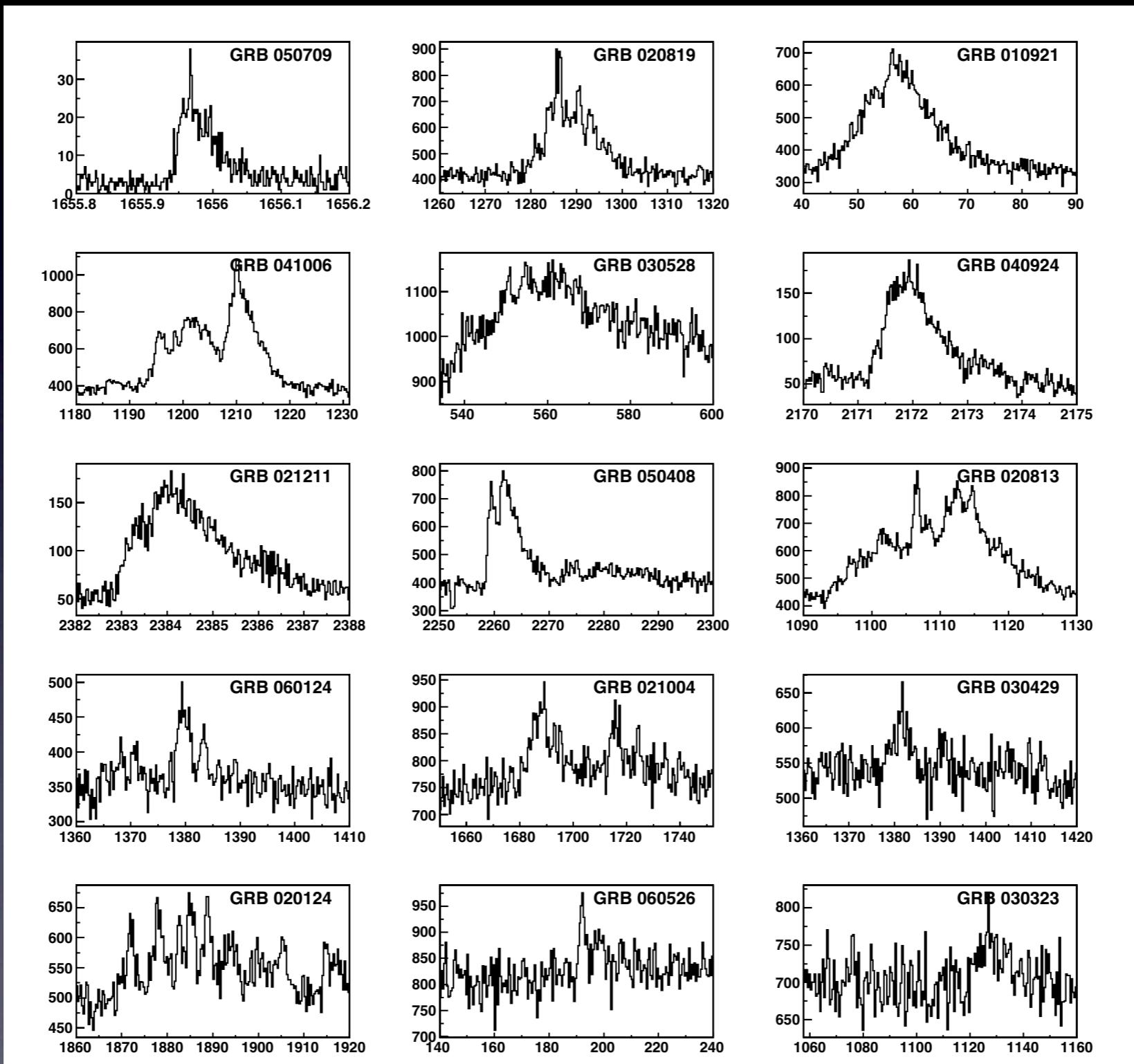
Les données



Les données

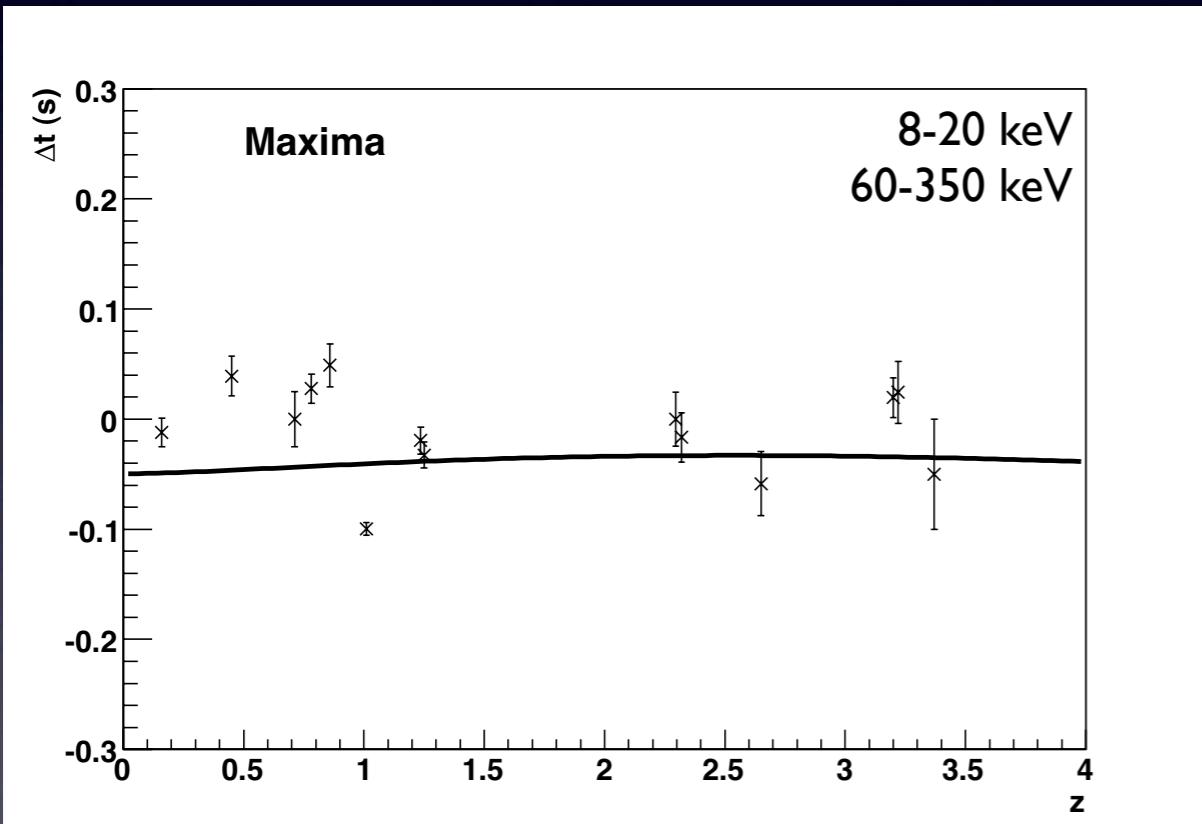


Les données

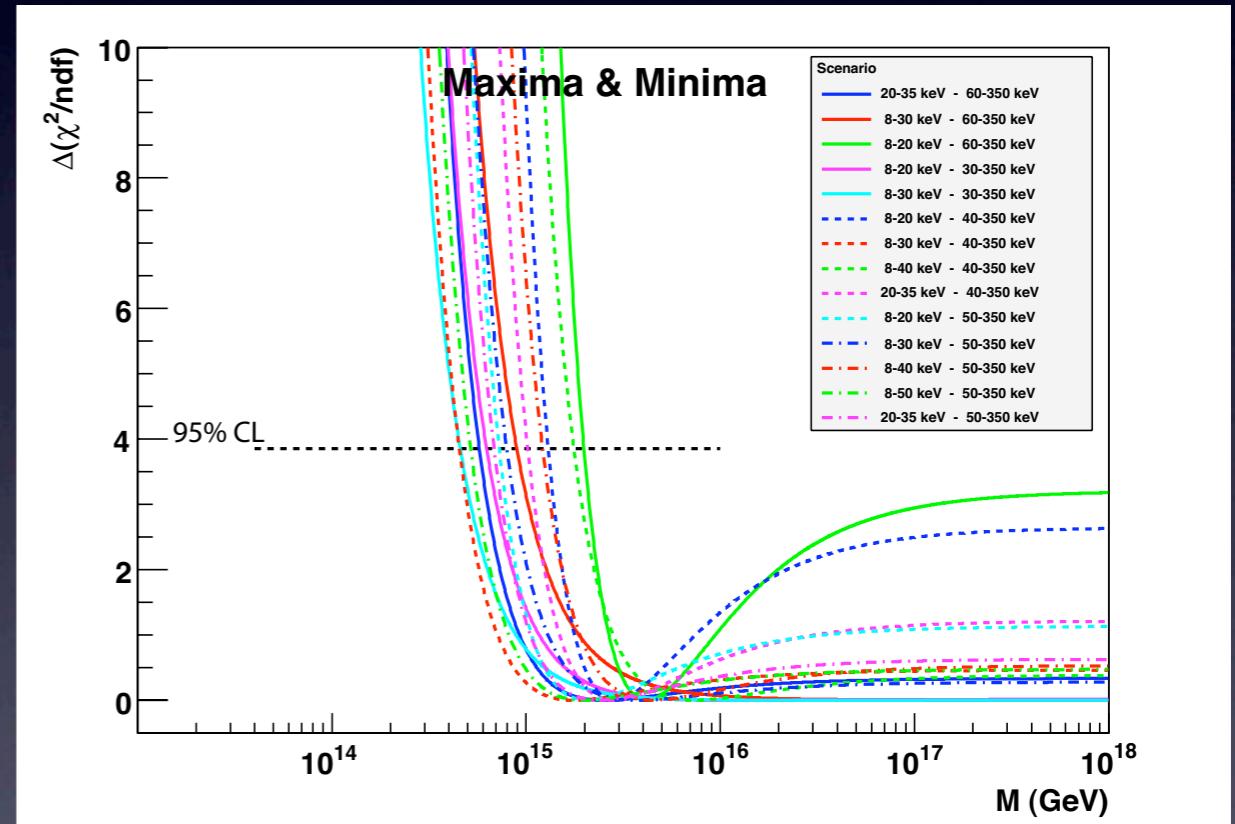


Résultats avec HETE-2

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



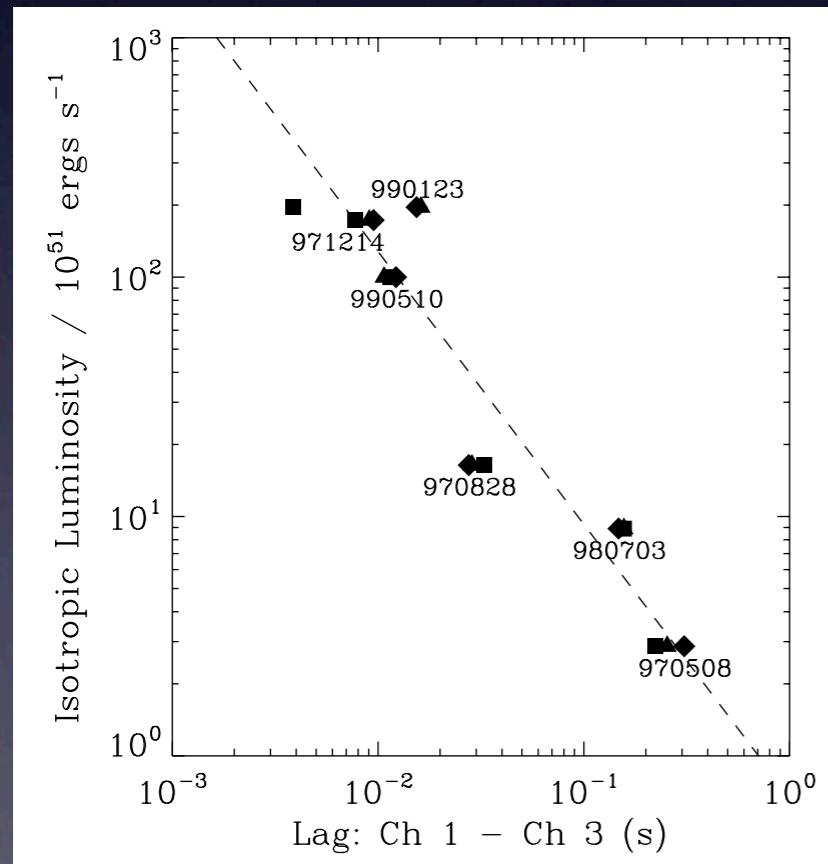
$E_{QG} > 2 \times 10^{15}$ GeV



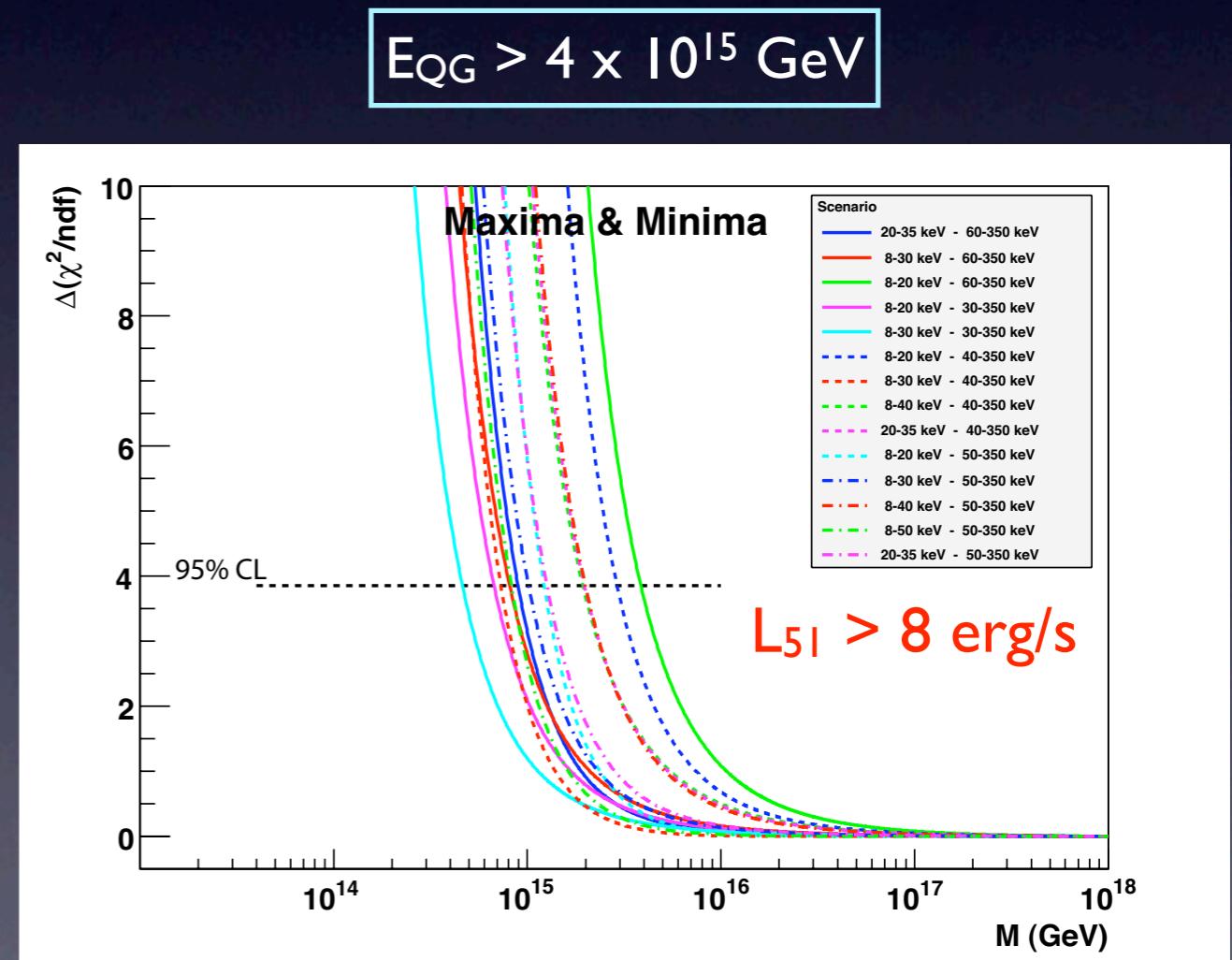
Résultats publiés dans ApJ 676, 532 (2008)

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 $L_{51} > 8$ erg/s (10 sursauts)



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	5.7×10^{14}	9.0×10^{14}
#2	9.0×10^{14}	8.1×10^{14}
#3	2.0×10^{15}	3.9×10^{15}
#4	6.3×10^{14}	6.7×10^{14}
#5	4.6×10^{14}	4.6×10^{14}
#6	1.3×10^{15}	2.9×10^{15}
#7	4.5×10^{14}	7.3×10^{14}
#8	1.8×10^{15}	1.9×10^{15}
#9	1.0×10^{15}	2.0×10^{15}
#10	7.3×10^{14}	1.2×10^{15}
#11	7.9×10^{14}	1.0×10^{15}
#12	1.2×10^{15}	2.0×10^{15}
#13	5.2×10^{14}	8.3×10^{14}
#14	6.8×10^{14}	1.3×10^{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	5.7×10^{14}	9.0×10^{14}
#2	9.0×10^{14}	8.1×10^{14}
#3	2.0×10^{15}	3.9×10^{15}
#4	6.3×10^{14}	6.7×10^{14}
#5	4.6×10^{14}	4.6×10^{14}
#6	1.3×10^{15}	2.9×10^{15}
#7	4.5×10^{14}	7.3×10^{14}
#8	1.8×10^{15}	1.9×10^{15}
#9	1.0×10^{15}	2.0×10^{15}
#10	7.3×10^{14}	1.2×10^{15}
#11	7.9×10^{14}	1.0×10^{15}
#12	1.2×10^{15}	2.0×10^{15}
#13	5.2×10^{14}	8.3×10^{14}
#14	6.8×10^{14}	1.3×10^{15}

Toutes les limites sont données en GeV

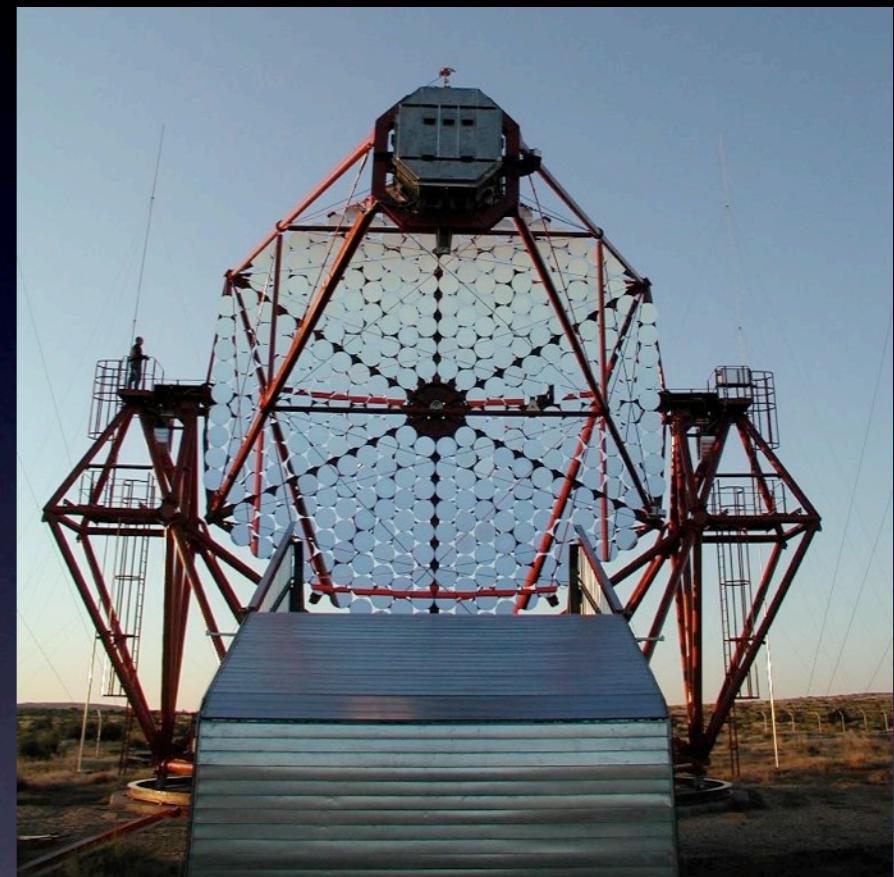
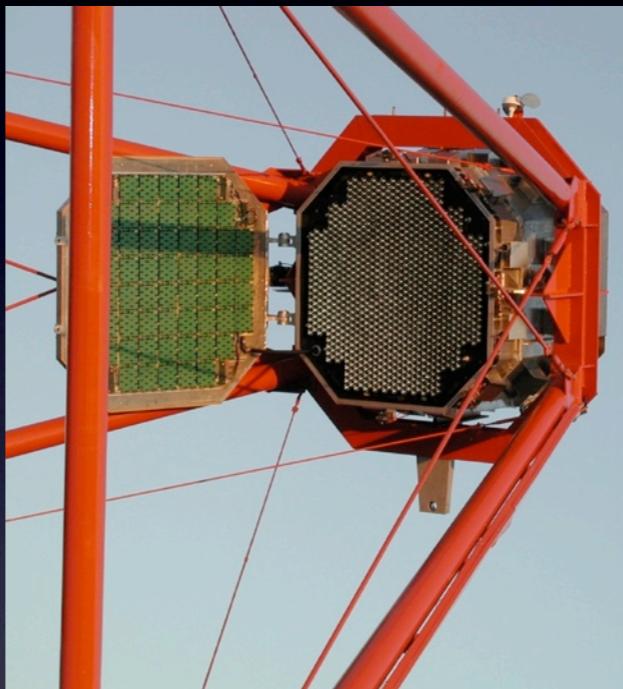
Conclusion

- 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 $L_{51} > 8 \text{ erg/s}$ (10 sursauts)
- Pas d'effet
- Meilleure limite obtenue avec l'échantillon de grande luminosité, avec un $\langle \Delta E \rangle \sim 130 \text{ keV}$:

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

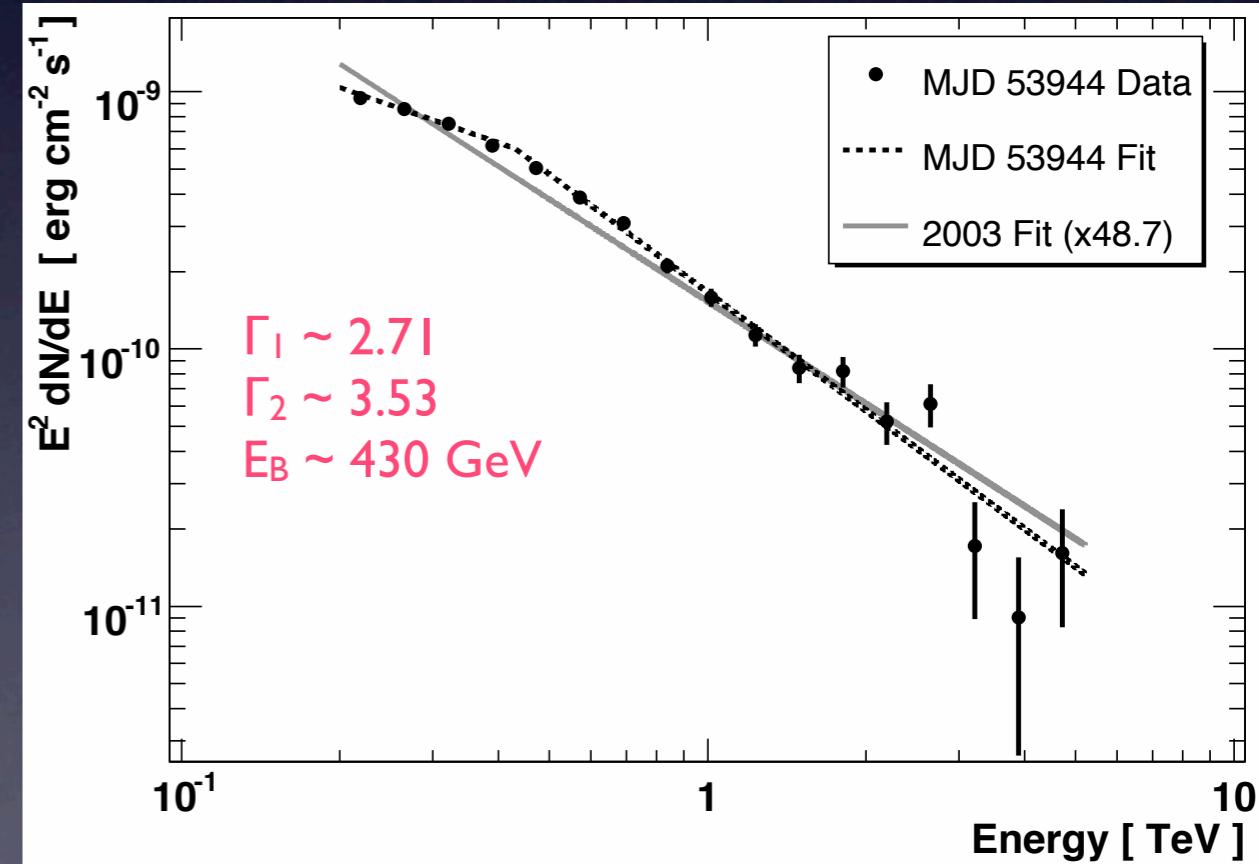
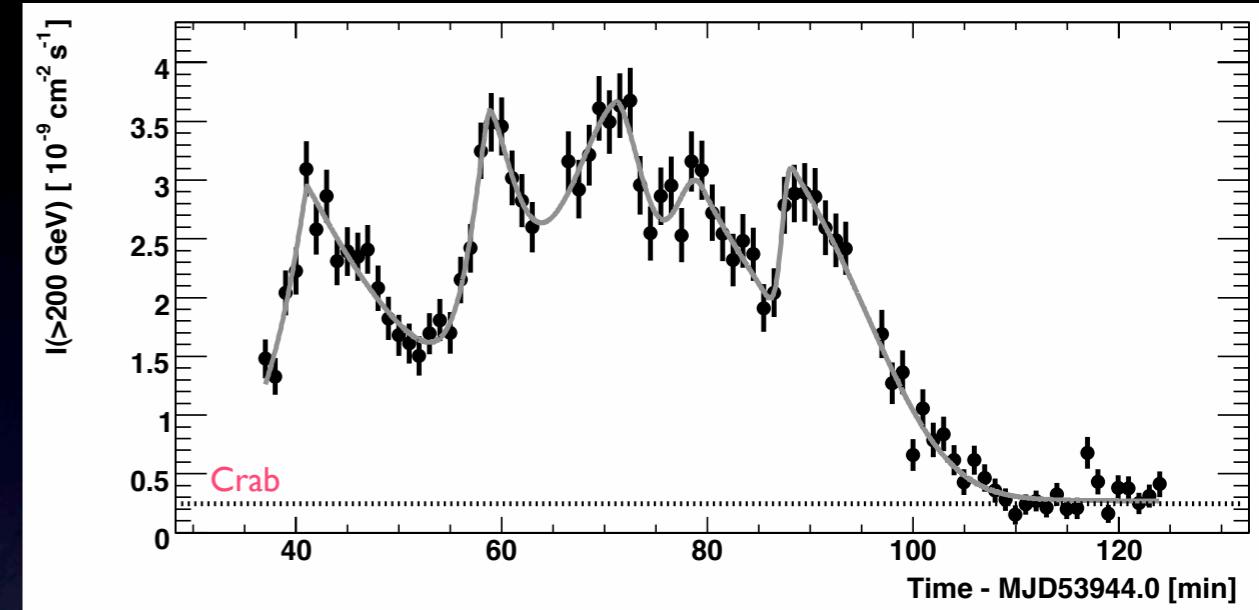
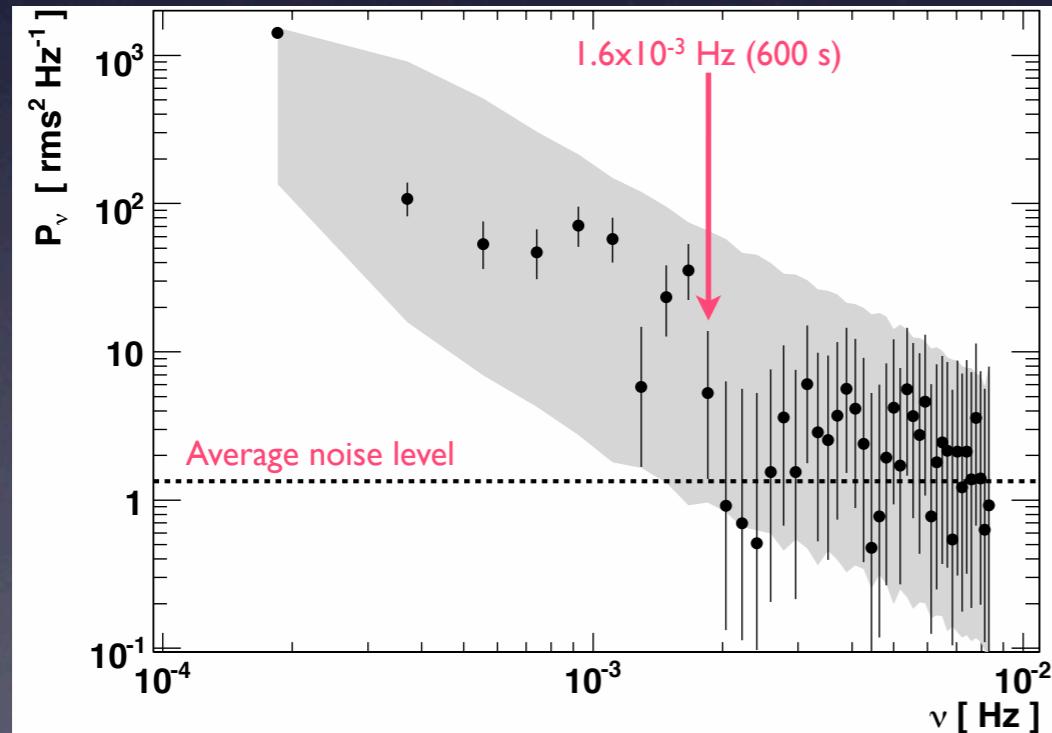
High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.)

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



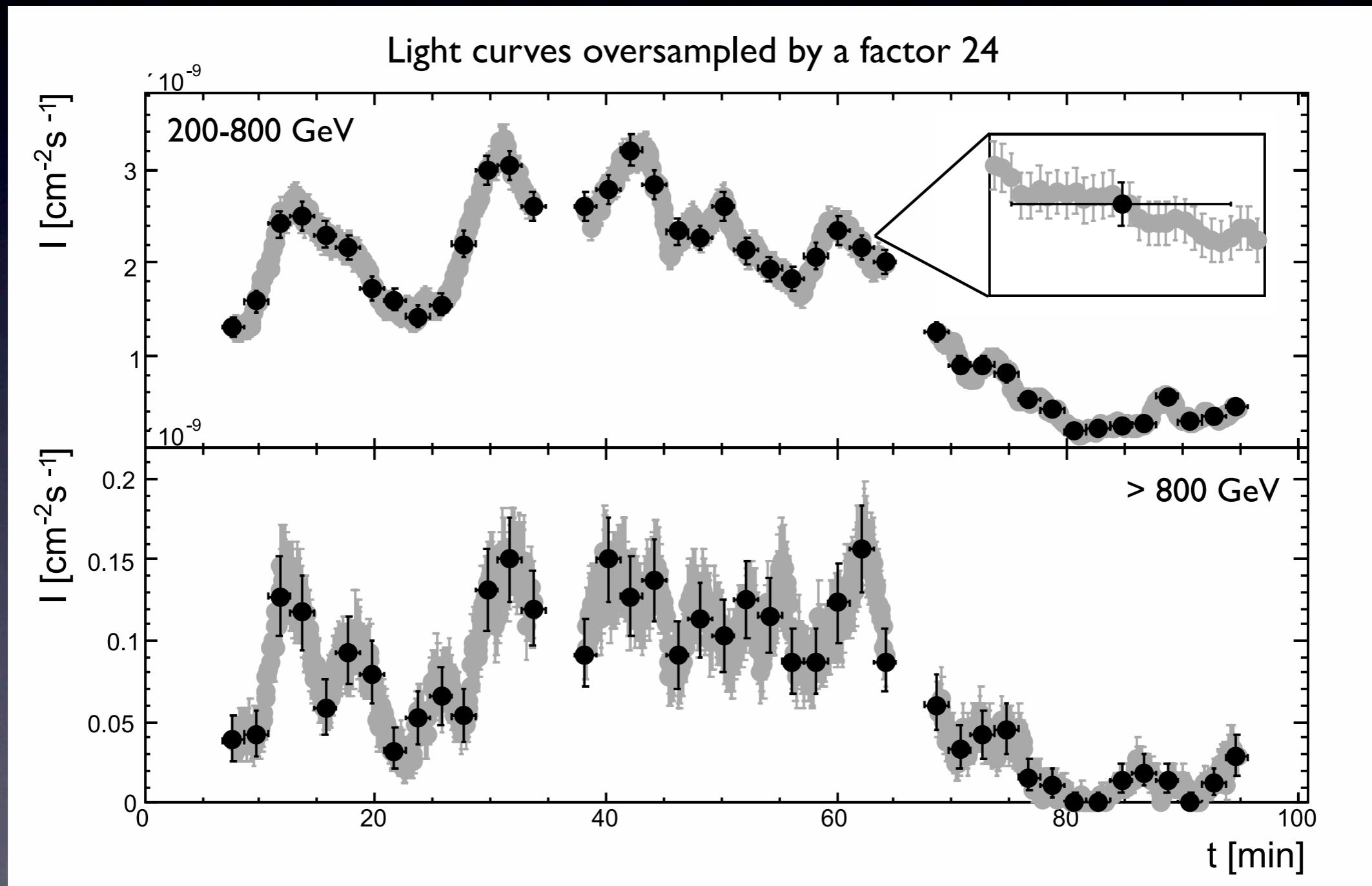
Une éruption exceptionnelle de PKS 2155-304

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



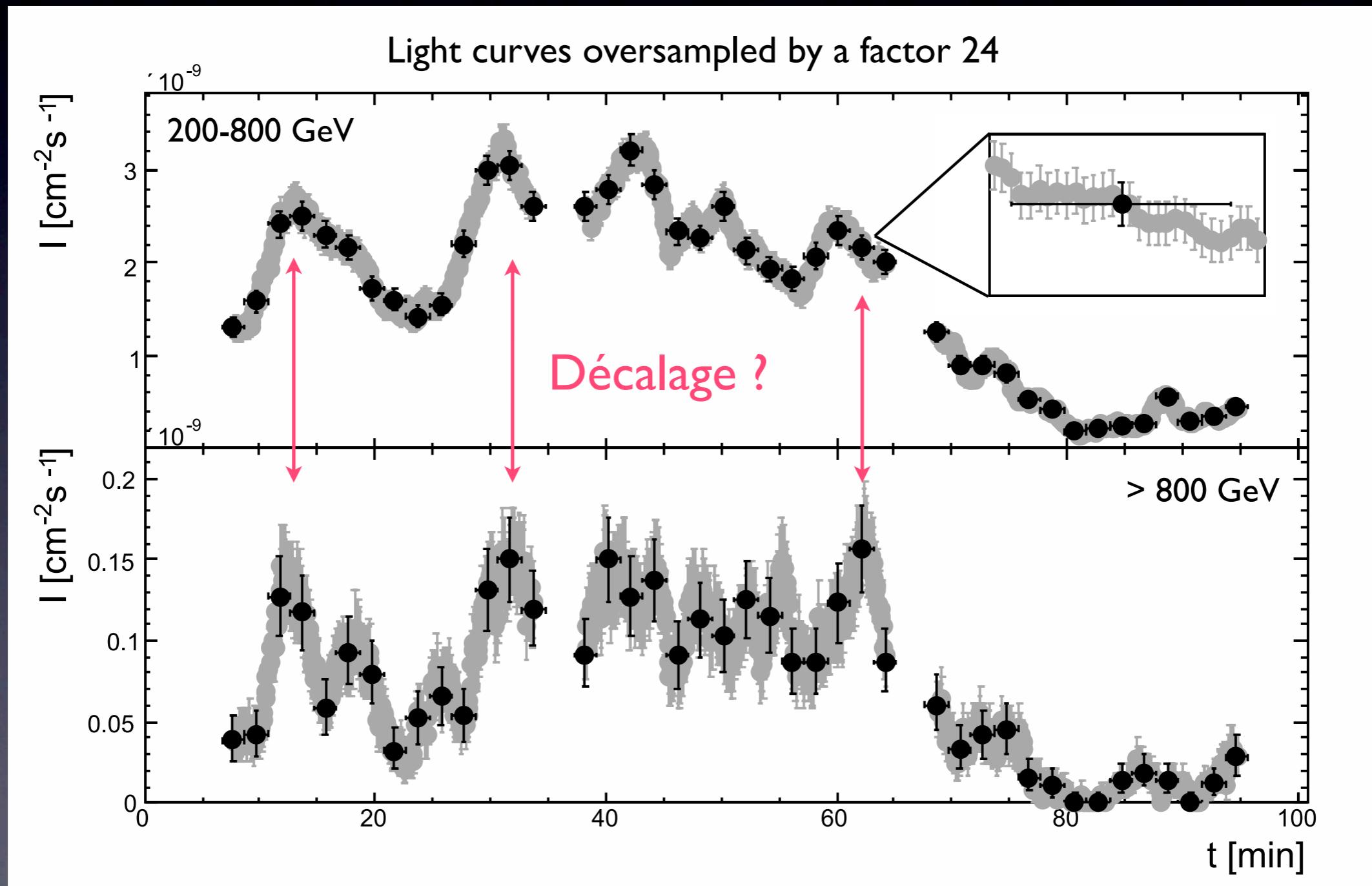
Le but

- Chercher un décalage temporel dans deux bandes d'énergies



Le but

- Chercher un décalage temporel dans deux bandes d'énergies



Mesure des lags

Mesure des lags

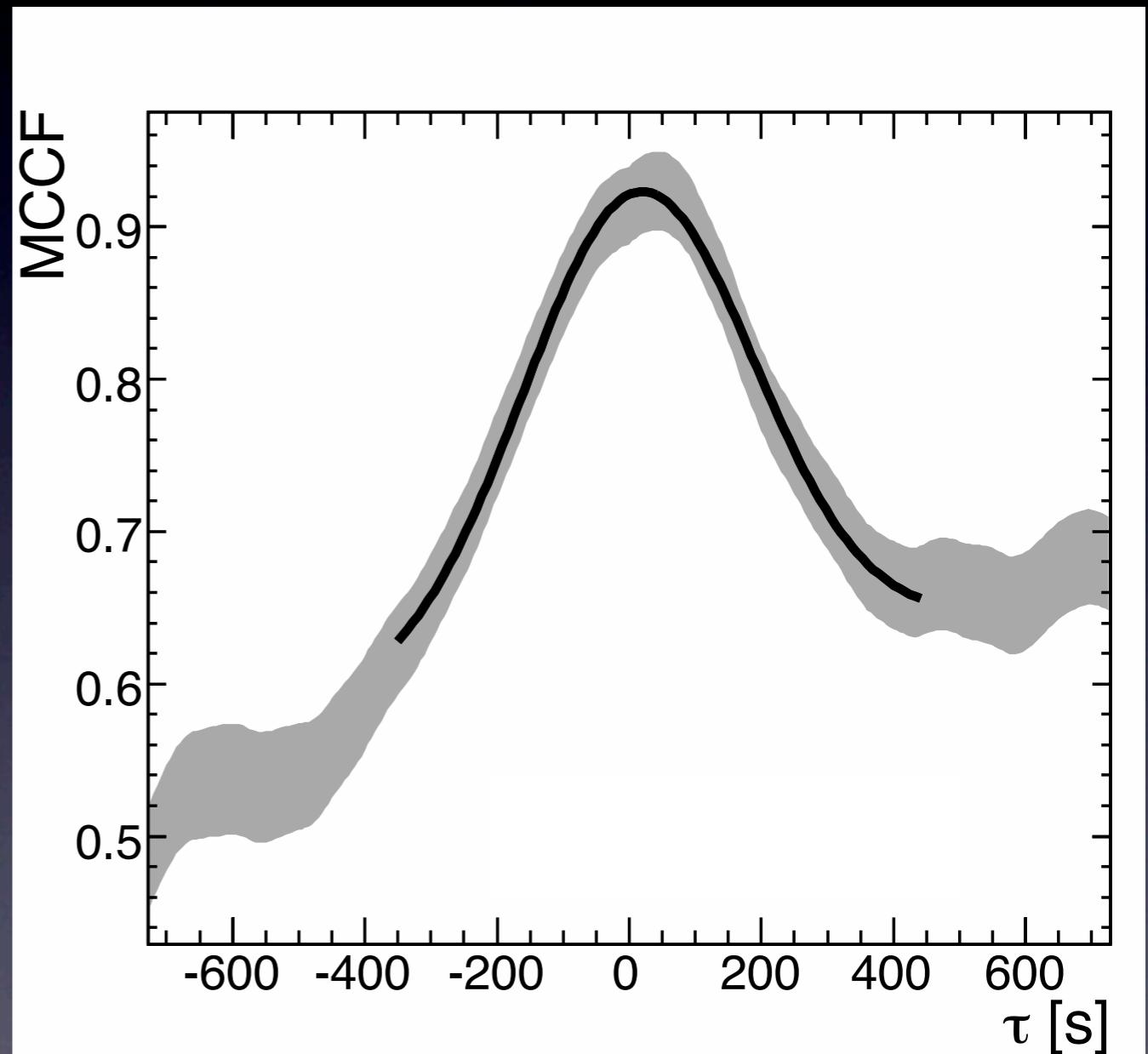
- Utilisation de deux méthodes différentes:
 - Modified Cross Correlation Function (MCCF)
 - Wavelet Transform

Mesure des lags

- Utilisation de deux méthodes différentes:
 - Modified Cross Correlation Function (MCCF)
 - Wavelet Transform
- MCCF :
 - $200 < E < 800 \text{ GeV} \& E > 800 \text{ GeV}$
 - $\Delta E = 1 \text{ TeV}$
 - 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 :
 - $200 < E < 800 \text{ GeV} \& E > 800 \text{ GeV}$
 - $\Delta E = 1 \text{ TeV}$
 - Fit avec une gaussienne + polynôme
 - $\tau_{\text{peak}} = 20 \text{ s}$
- CWT :
 - $210 < E < 250 \text{ GeV} \& E > 600 \text{ GeV}$
 - $\Delta E = 0.92 \text{ TeV}$
 - Deux paires d'extrema identifiées
 - $\langle \tau \rangle = 27 \text{ s}$



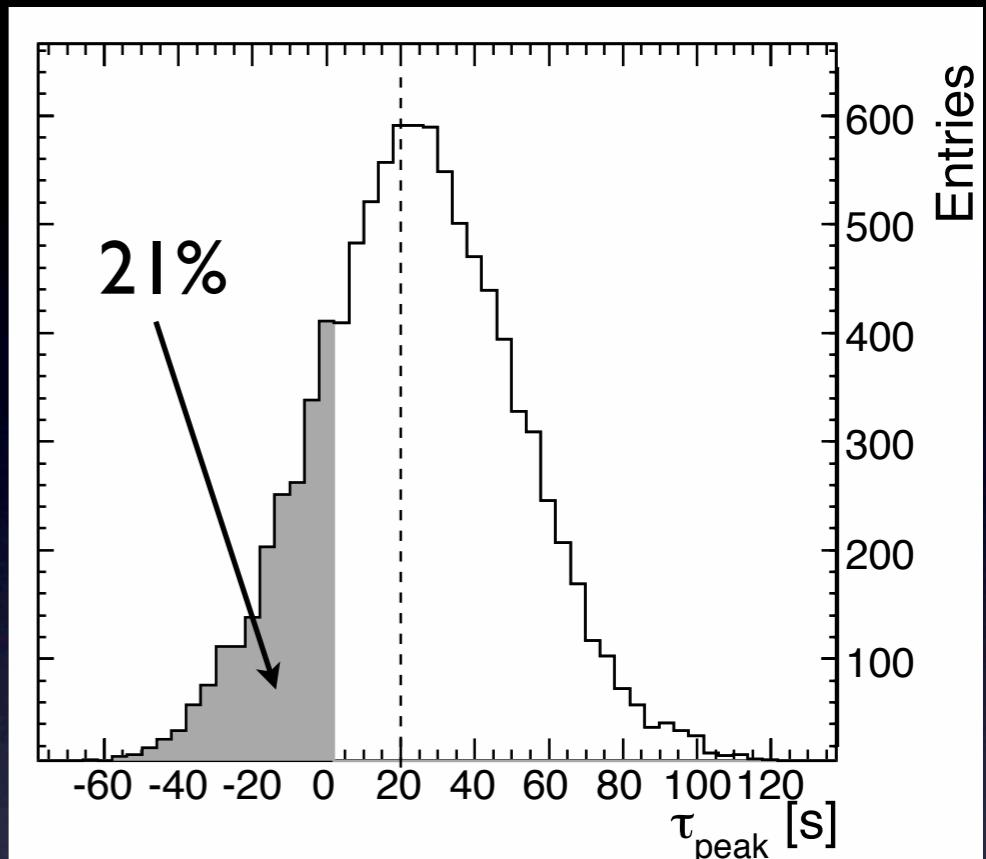
Calibration des erreurs (MCCF)

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 τ_{peak}

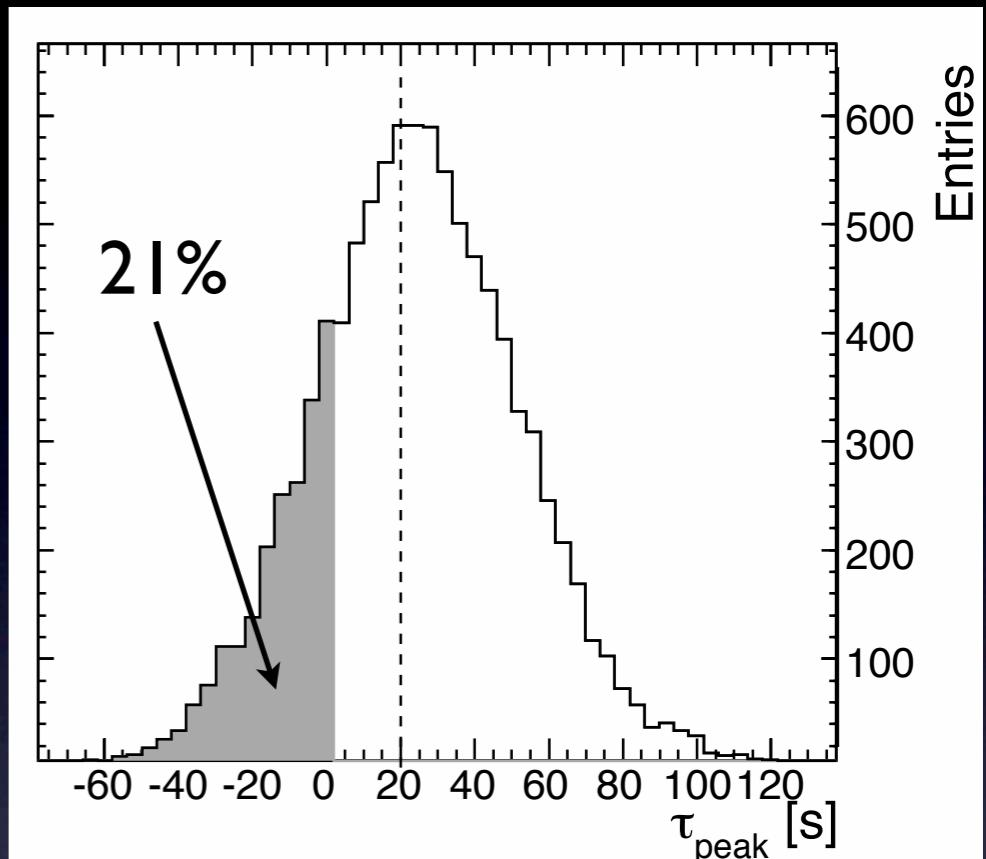
Calibration des erreurs (MCCF)

- «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 τ_{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



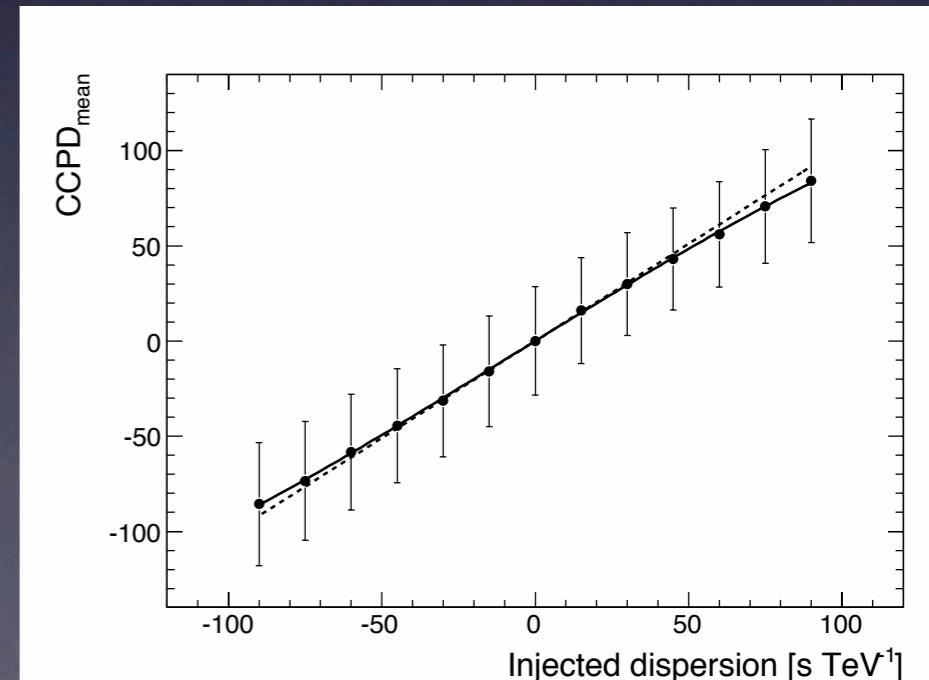
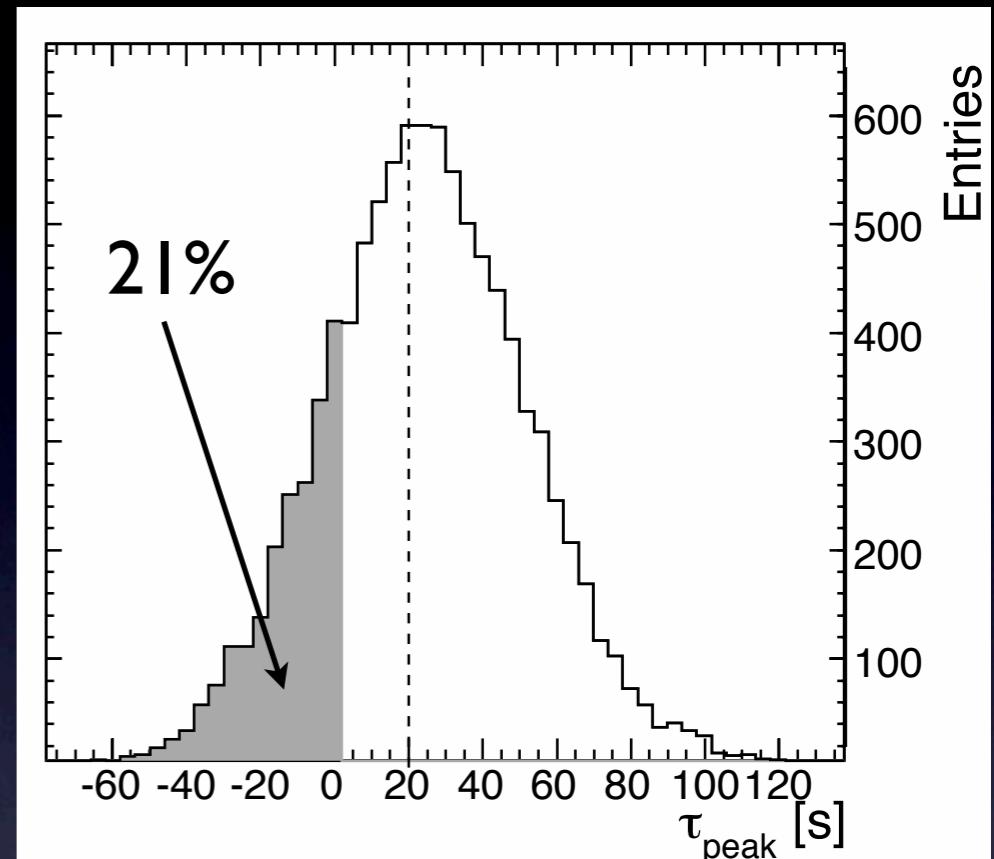
Calibration des erreurs (MCCF)

- «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 τ_{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 τ_{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 ²)	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
 - Ecarts en énergie moyens $\langle \Delta E \rangle$
 - La CWT donne un Δt 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 ²)	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
 - Ecarts en énergie moyens $\langle \Delta E \rangle$
 - La CWT donne un Δt 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** :

$$E_{QG} > 0.7 \times 10^{18} \text{ GeV}$$

à 95% 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:

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

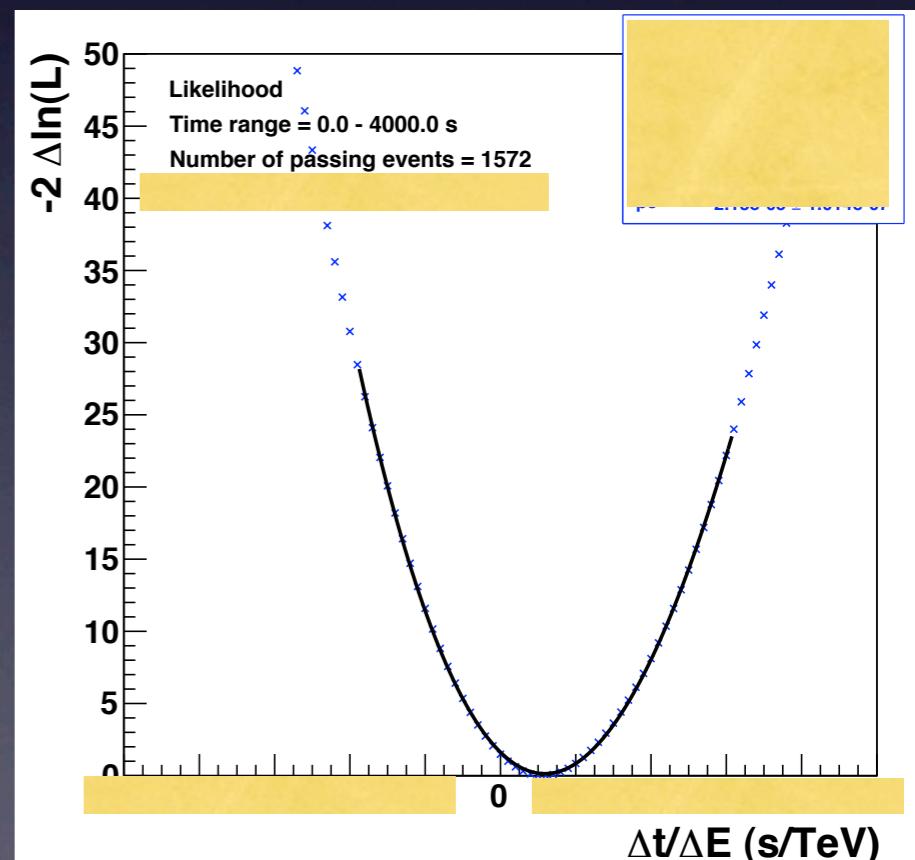
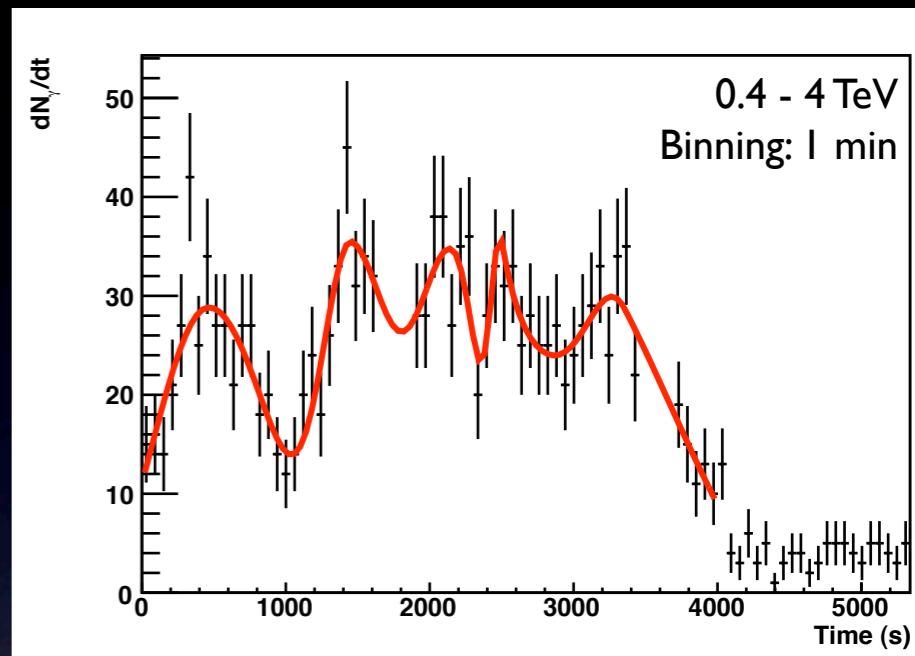
où $\Gamma(E_S)$ est le spectre émis, $G(E-E_S, \sigma(E_S))$ rend compte de la résolution en énergie, $A(E_S)$ est l'acceptance de H.E.S.S. et F_S est un ajustement de la courbe de lumière

- 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

AGNs

Source(s)	Expérience	Méthode	Résultat	Référence	
GRBs	GRB 021206	RHESSI	$E_{QG} > 1.8 \times 10^{17} \text{ GeV}$	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	$E_{QG} > 1.5 \times 10^{14} \text{ GeV}$	Lamou 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

Résultats actuels

AGNs

Source(s)	Expérience	Méthode	Résultat	Référence	
GRBs	GRB 021206	RHESSI	$E_{QG} > 1.8 \times 10^{17} \text{ GeV}$	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	$E_{QG} > 1.5 \times 10^{14} \text{ GeV}$	Lamou 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
AGNs	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

Résultats actuels

AGNs

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	$E_{QG} > 1.5 \times 10^{14} \text{ GeV}$	Lamou 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

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