



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Sursauts Gamma (GRB): Observations



Sursaut gamma

Françoise Combes



Découverte et progrès

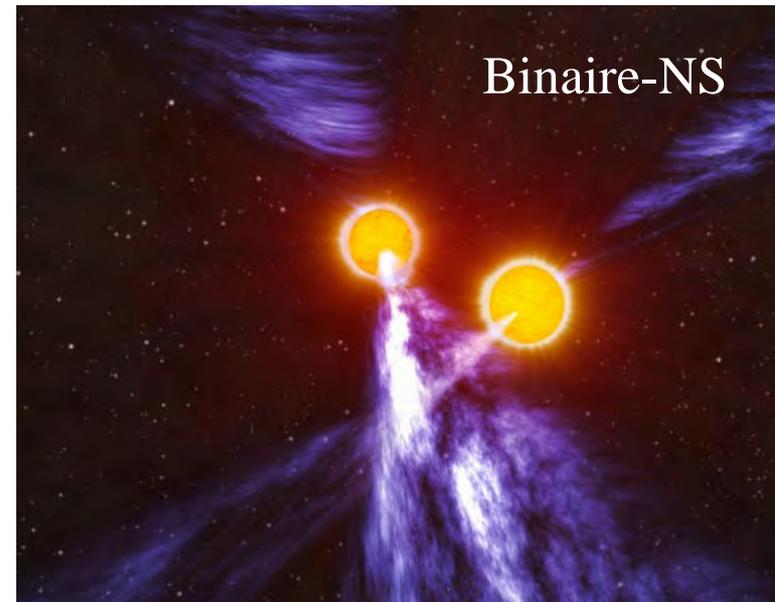
→ Un peu d'histoire

→ Propriétés, distribution

→ Bimodalité (75% > 2s)

→ Afterglow, Galaxies-hôte

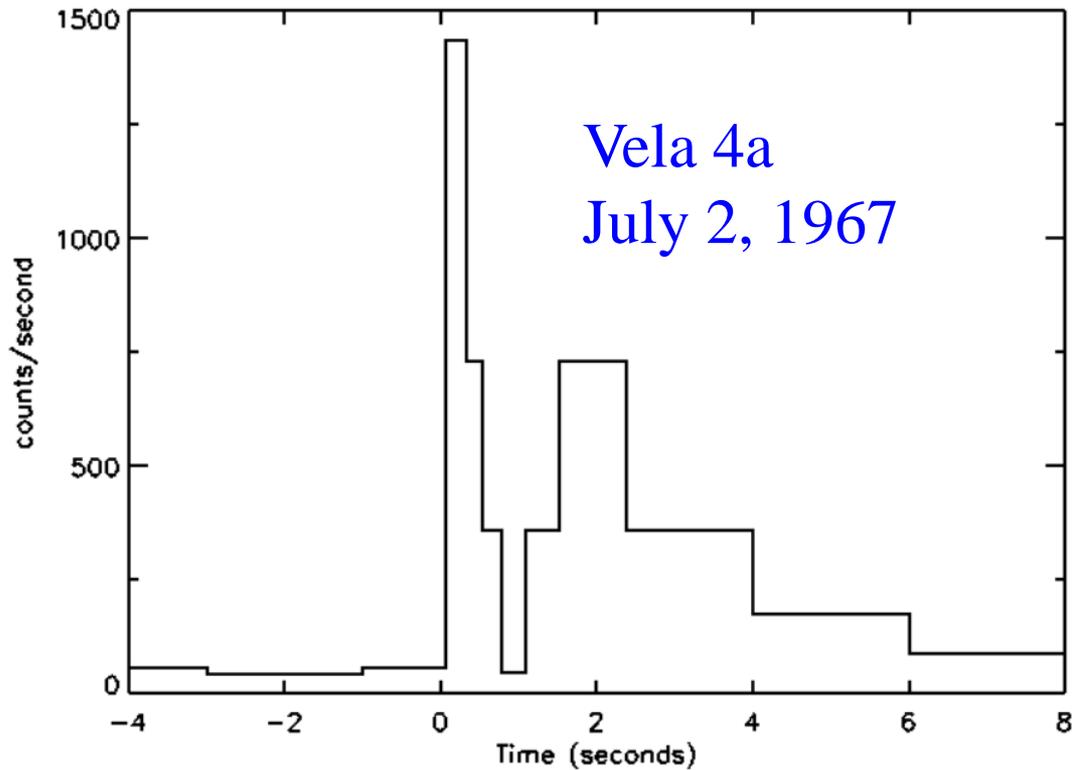
→ Applications: exploration du milieu Intergalactique, Cosmologie



Découverte 1967-1973

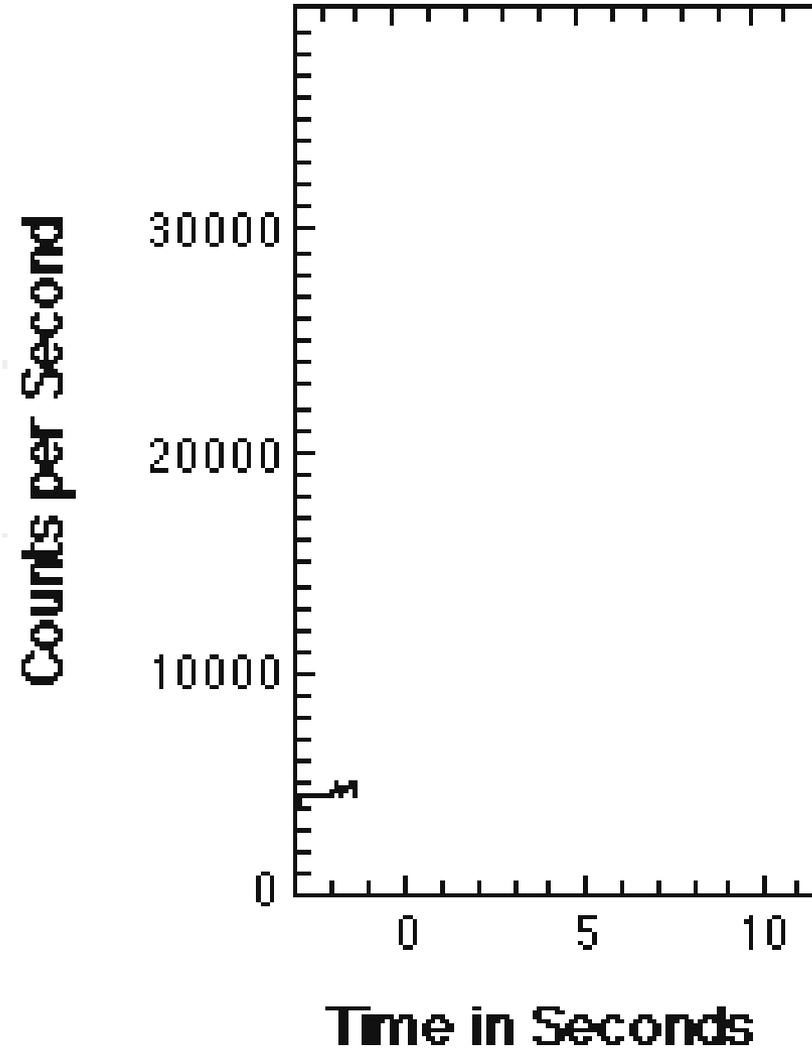
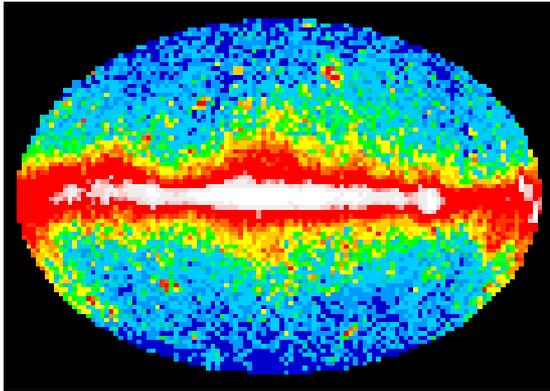
La série de satellites VELA, lancés par les USA: vérifier l'application du traité de non-développement des essais nucléaires (1963)

Détection des rayons gamma, X, des neutrons et CR, à 137 000 km



+ detection des X, UV, CR solaires

GRB: qu'est-ce que c'est?



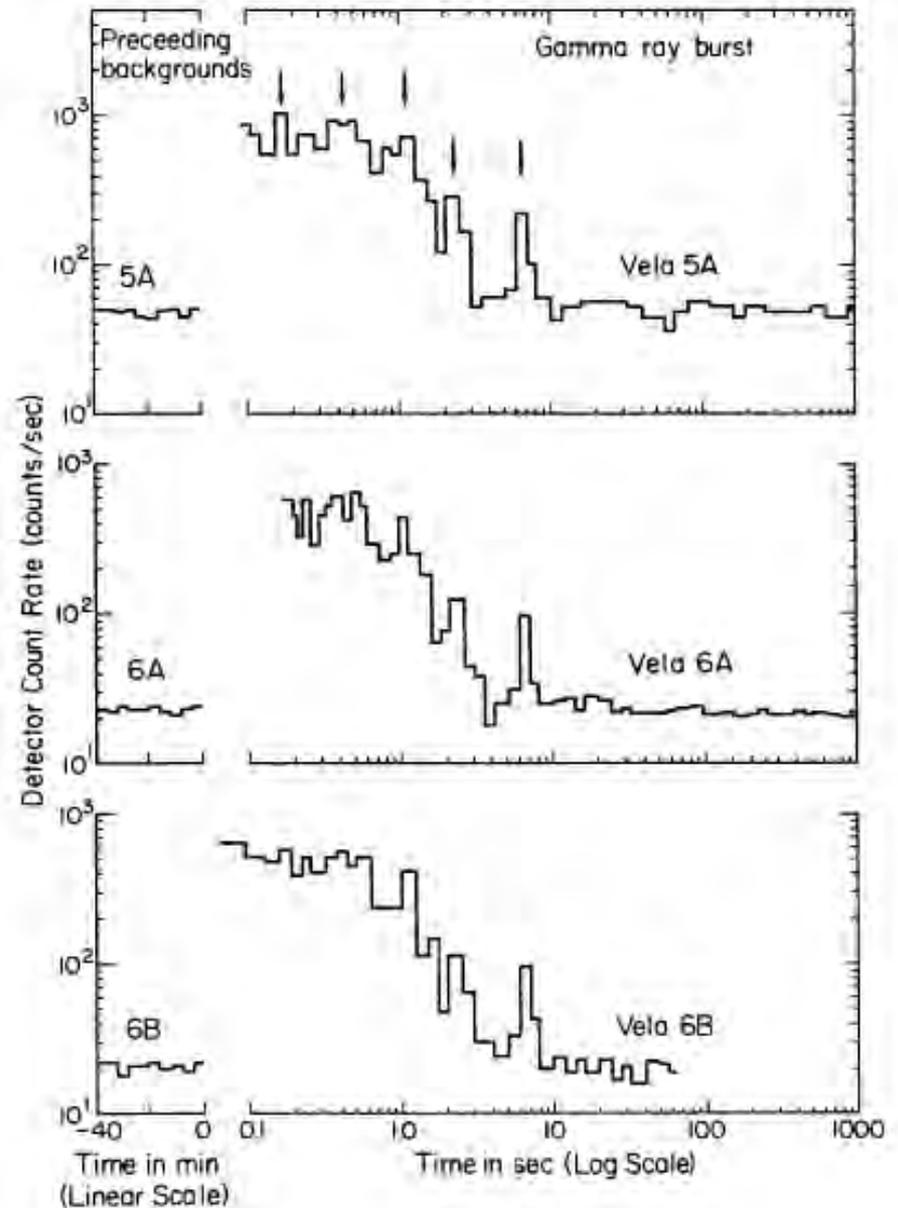
Plusieurs sursauts,
En quelques secondes

GRB: les Vela

Klebesadel et al 1973: 16 GRB détectés par la série des Vela, 0.2 -1.5 MeV, 0.1 à 30sec de durée. Les directions excluent la Terre ou le Soleil. Aucune nova, supernova ne coïncide non plus

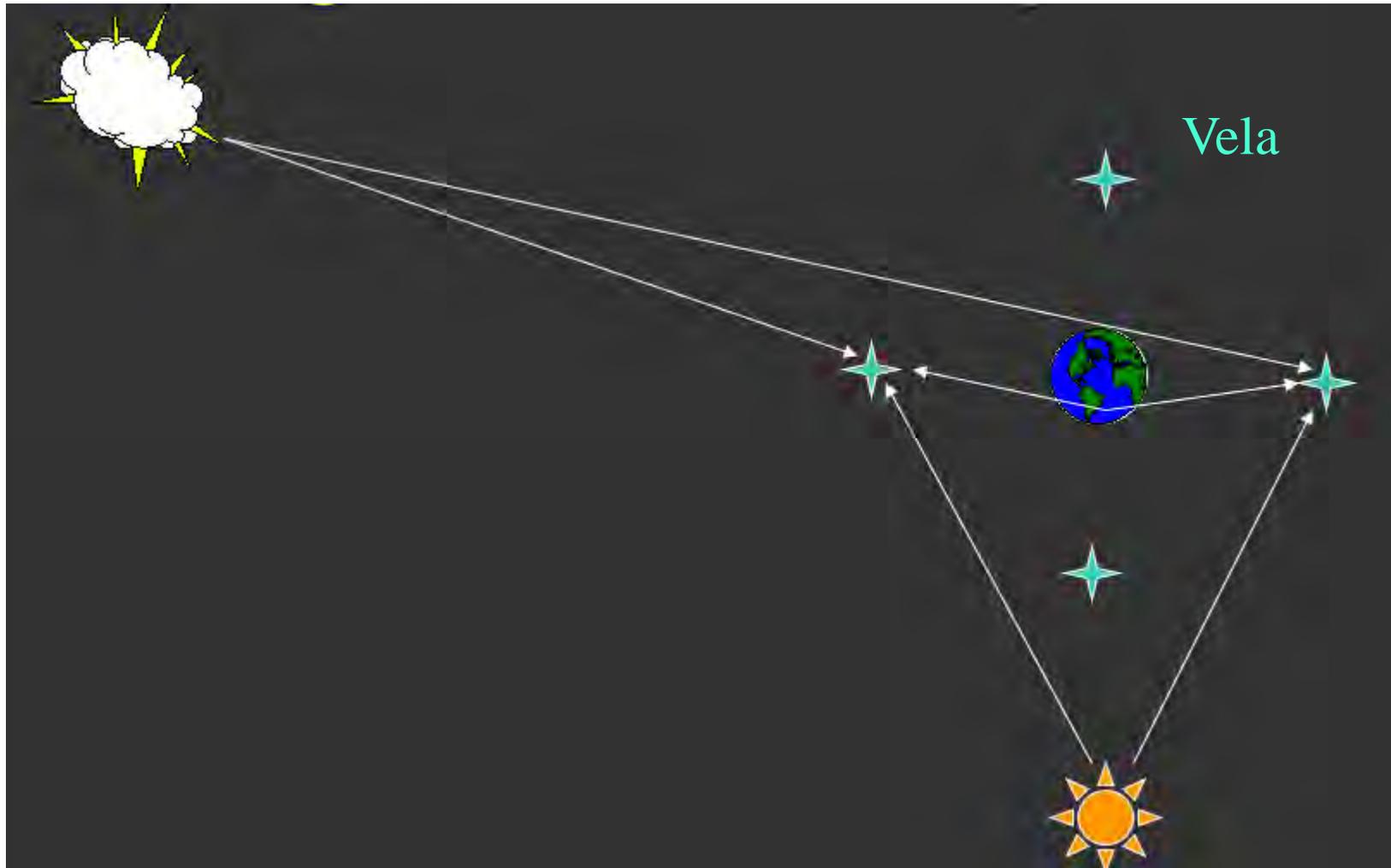
Direction vaguement indiquée par les 3 satellites

A $D=1$ Mpc, 10^{46} ergs



L'émission ne vient pas du Soleil

Une douzaine de satellites Vela



GRB: mystère pendant 30ans

Plus de 150 théories différentes:

Sursauts Magnétiques

Evaporation des trous noirs

Accrétion d'anti-matière

Jet AGN re-dirigé

Magnétars, Soft Gamma-Ray Repeaters (SGRs)

Mini trou noir absorbant une étoile à neutrons

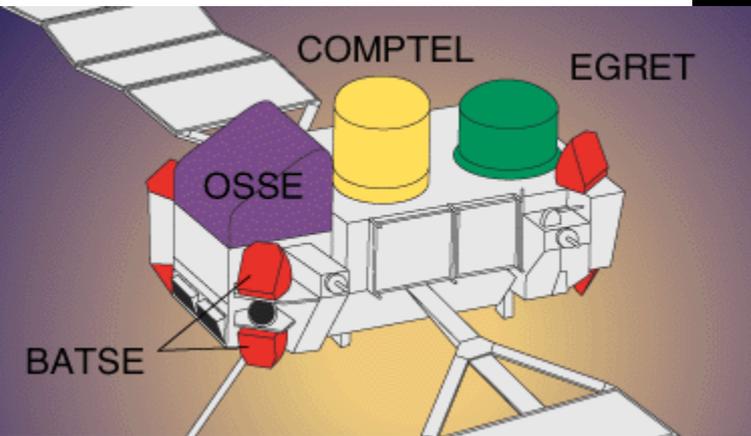
Signaux des extraterrestres ?

1^{ère} découverte 1967

1^{ère} identification 1997



Compton Gamma Ray Observatory GRO



1991-2000

20keV-30GeV

X-rays and γ

BATSE Burst and Transient Sources Experiment 0.02- 8 MeV

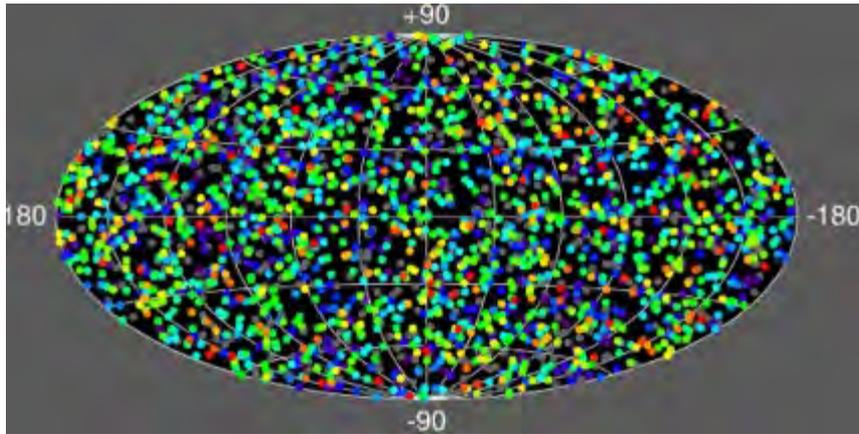
OSSE Oriented Scintillation Spectrometer Experiment 0.05-19 MeV

COMPTEL Compton Telescope (Imager) 0.75 – 30MeV

EGRET Energetic Gamma Ray Experiment Telescope 20-30 000 MeV

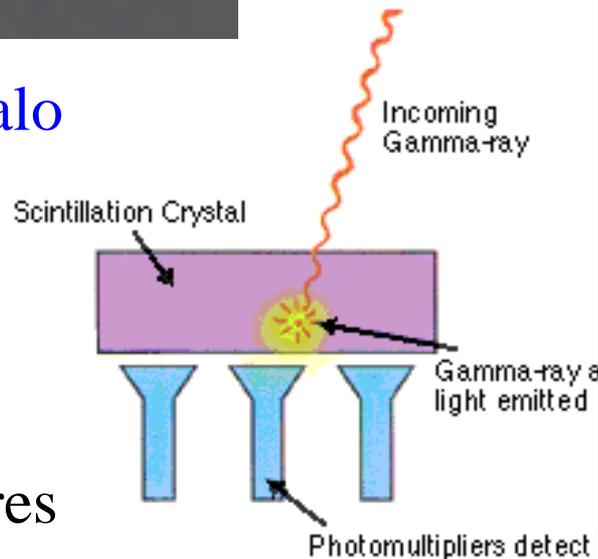
Détection de 1 GRB par jour

Des milliers de GRB détectés durant la mission (~3000)
Mais toujours pas d'identification

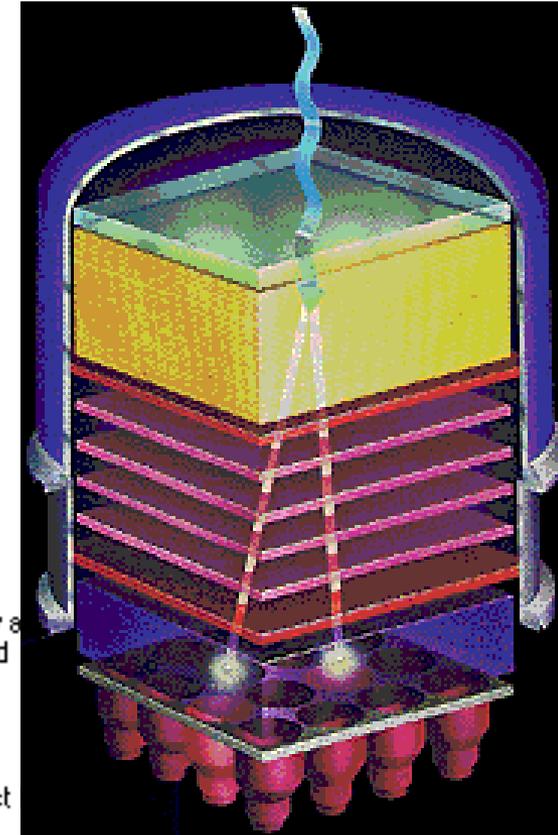


Isotrope: pourrait être un halo
autour de notre Galaxie?

BATSE: scintillateur
EGRET: Production de paires



EGRET: chambre
à étincelles → paires



Satellites & Instruments

BATSE (sur CGRO, 1991-2000) les GRB proviennent de toutes les directions, sont d'origine cosmologique, mais le scintillateur n'avait pas assez de résolution pour identifier les sources

BeppoSAX (1997-2000): X-mous jusqu'au gamma
Permet de détecter des émissions transitoires **afterglows**,
d'identifier les galaxies, les redshifts
émission 21h après: van Paradijs et al 1997

HETE-2 (2001-2004):
origine des long bursts
Observations de GRB030329 /SN2003dh

Swift (2005-): afterglows des short-GRB
afterglows → grand z GRB → cosmologie

Fermi (2008-): GRB haute énergie



HETE-2 satellite

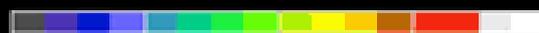
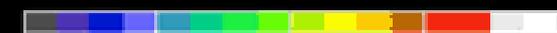
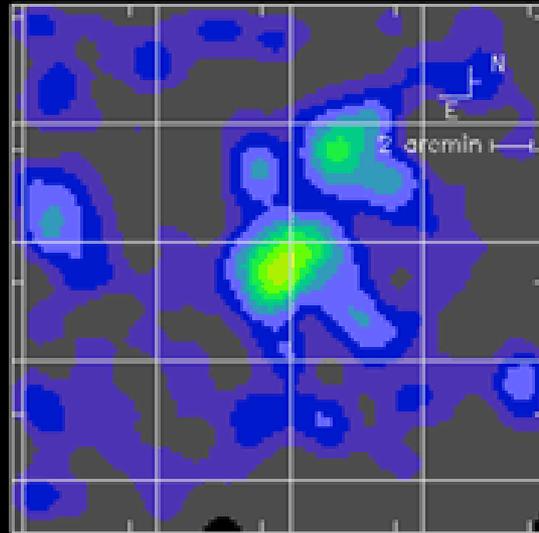
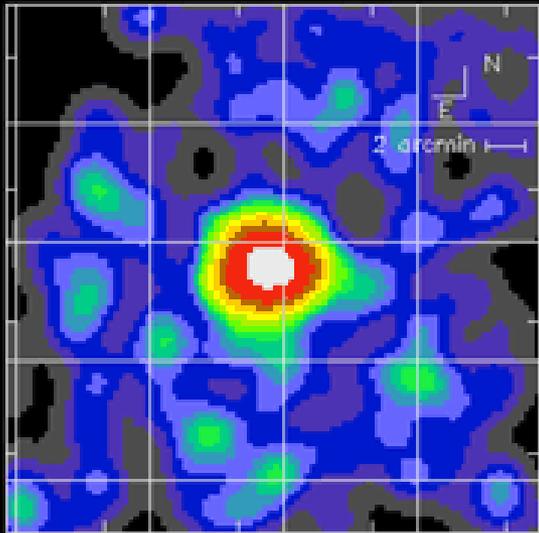
NASA+
France
Japon

Origine extragalactique des GRB

Transitoire, plusieurs jours après le GRB

February 28, 1997

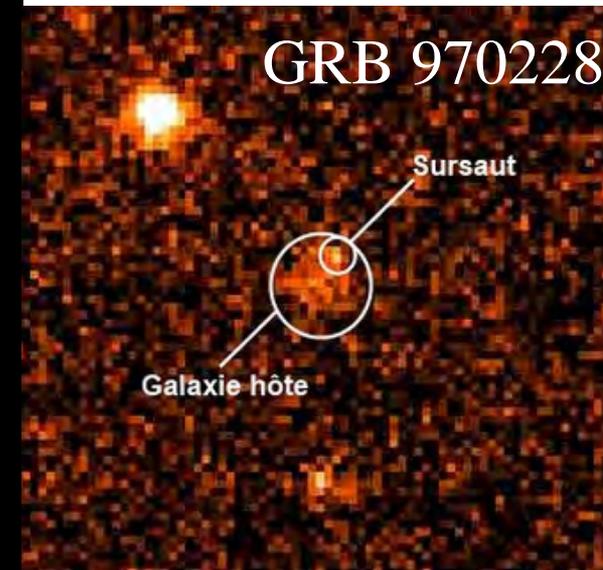
March 3, 1997



GRB 970228 X-ray afterglow
at 8 hours (left) and 3 days (right) after the Gamma-ray burst.

$z=0.695$

GRB 970228

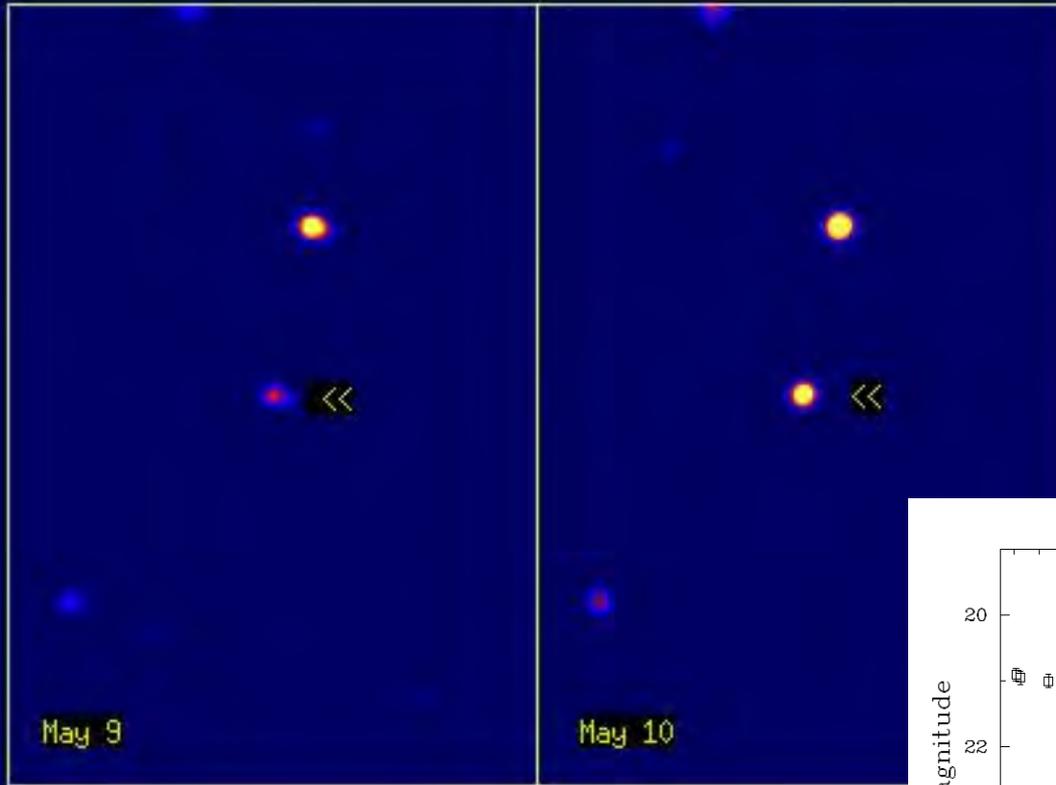


Raies du Fe dans la rémanence

Afterglow: permet d'identifier la galaxie dans laquelle la source optique peut-être identifiée, et son redshift! *van Paradijs et al 1997*

Contrepartie optique du GRB970508

GRB 970508 Optical Counterpart



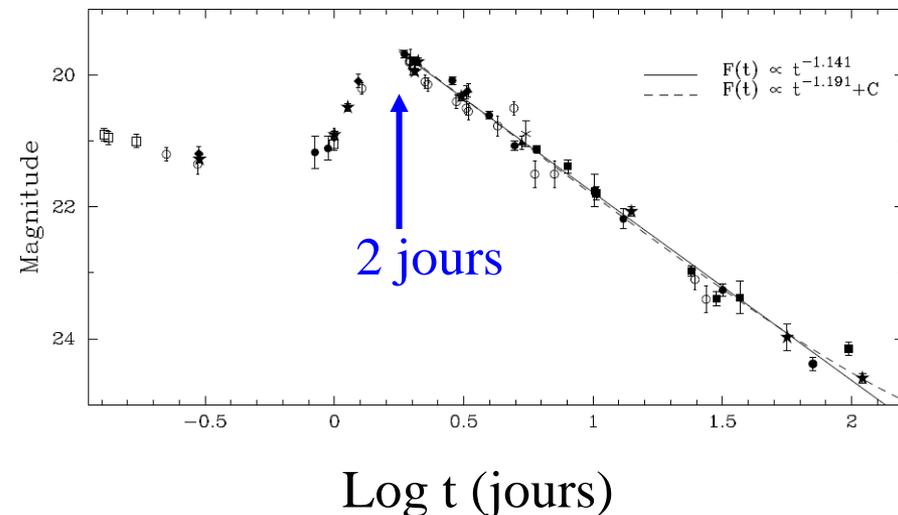
Palomar Observatory

Metzger et al. 1997

BeppoSAX localise
les rayons X
→ Permet de suivre
le burst+afterglow

Mesurer le spectre, et
d'encadrer le redshift

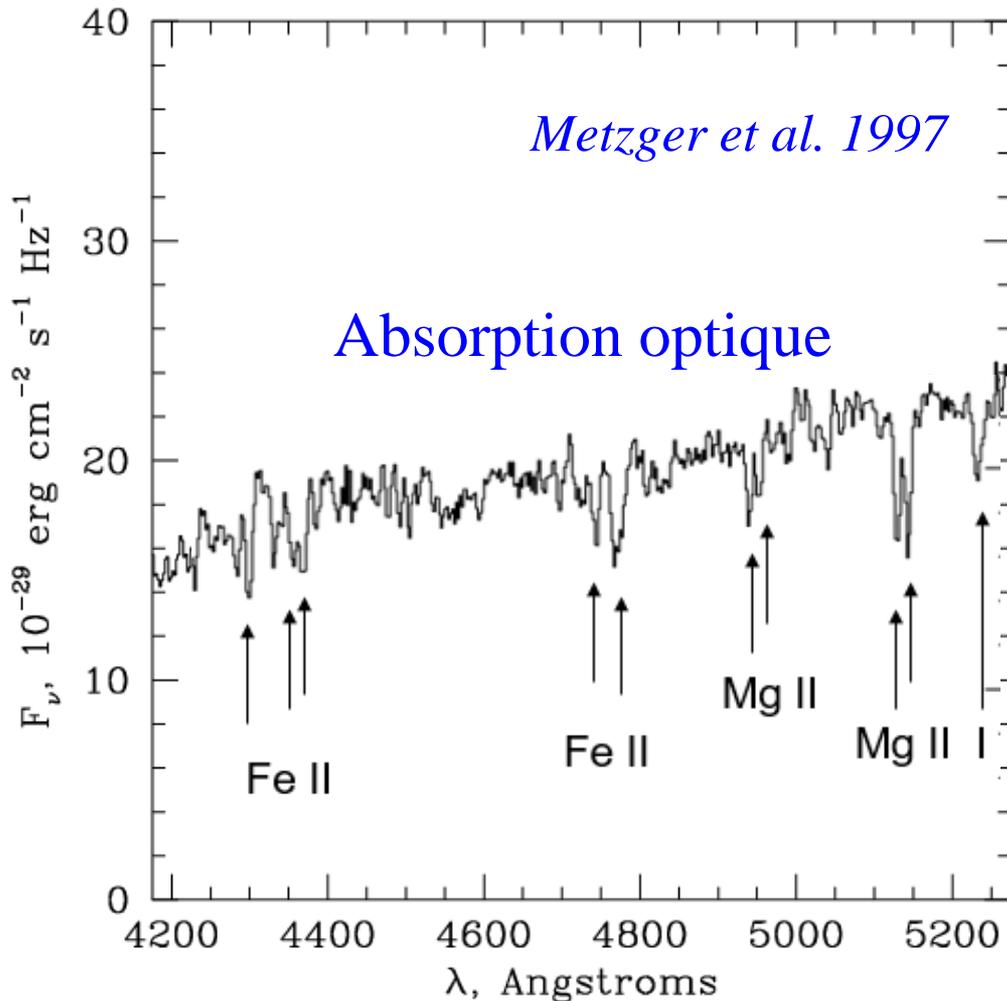
R-band lightcurve of GRB970508



Galama et al. 1998

Spectre de GRB970508

Raies d'absorption à $z=0.835$



Gaz sur la ligne de visée,
pas de forêt Lyman- α
en contrepartie

Le gaz donne alors
une limite inférieure de
la distance (FeII, MgII)

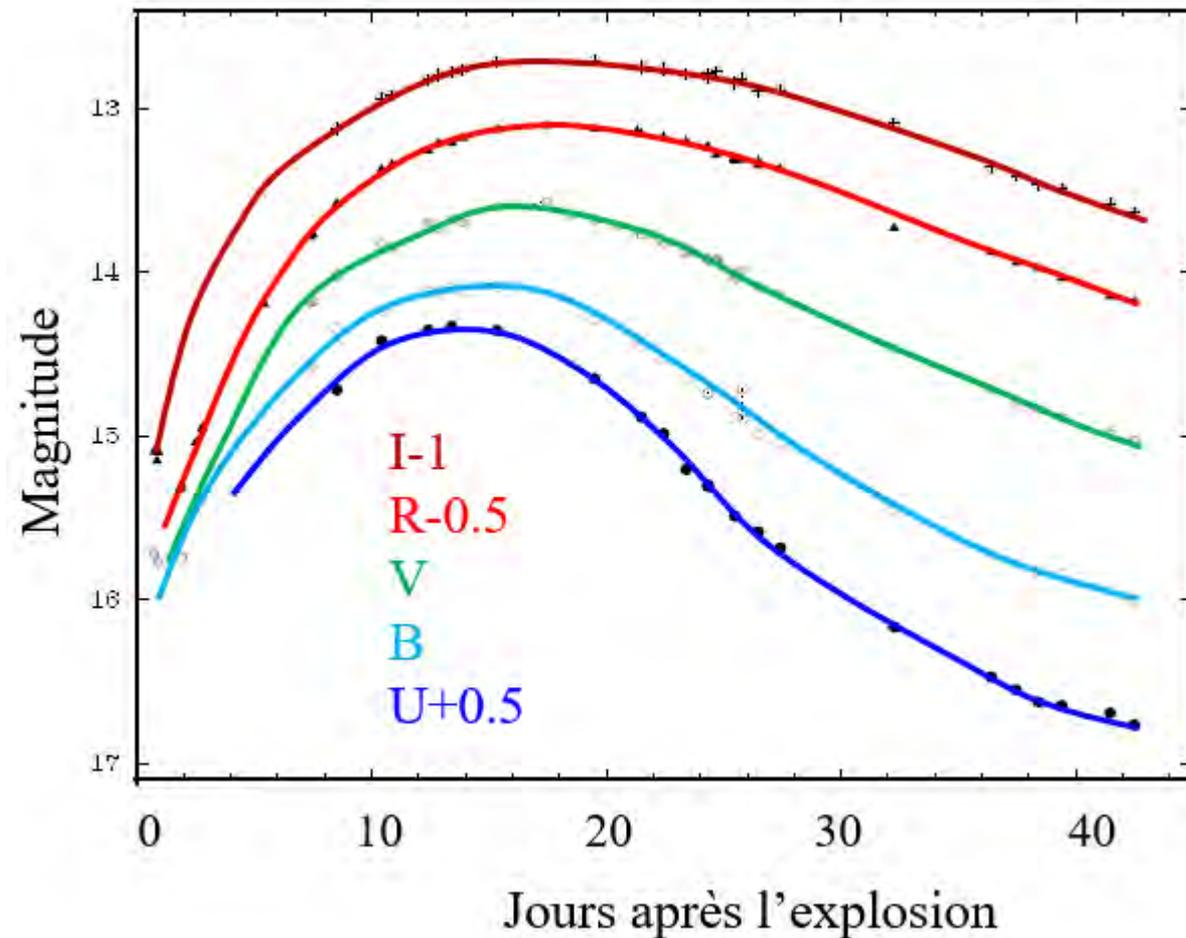
$$0.835 < z < 2.3$$

Pas d'autres traces!

→ Source cosmologique

Identification avec SN1998bw

ESO184-G82, redshift $z = 0.00856$



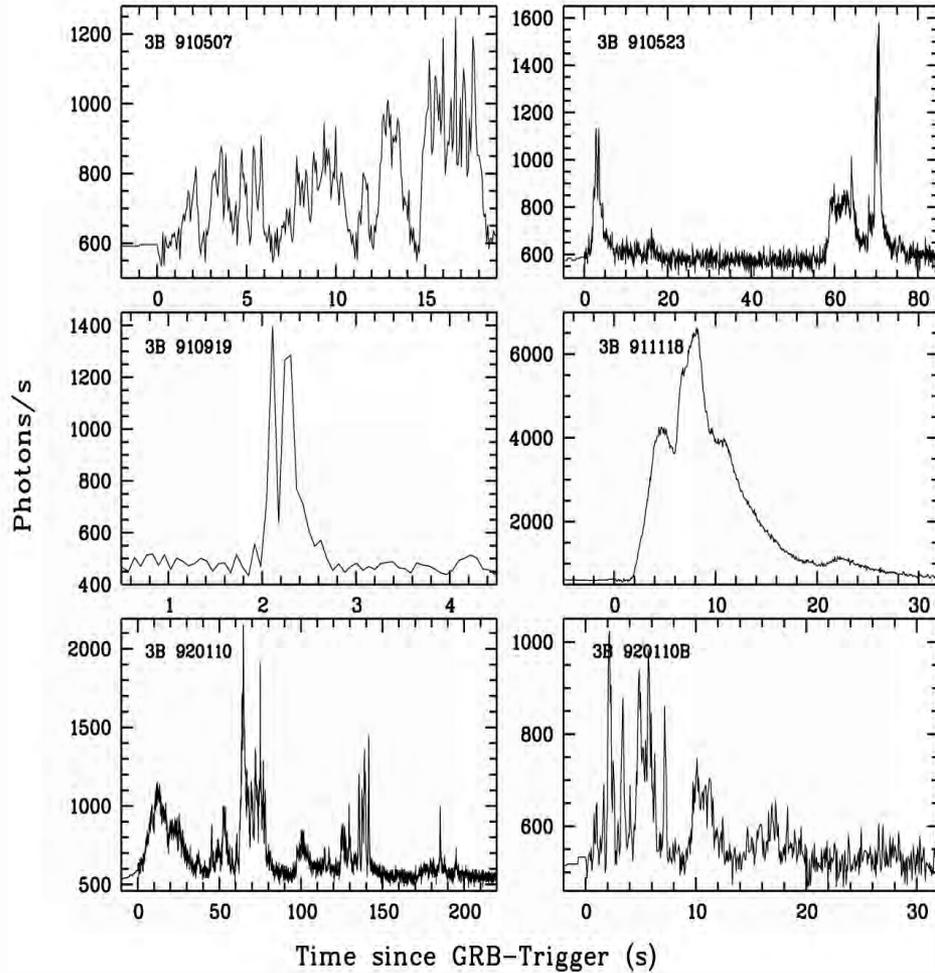
Première coïncidence
Preuve qu'un GRB long
peut-être dû à une SN

BeppoSAX

Galama et al. 1998

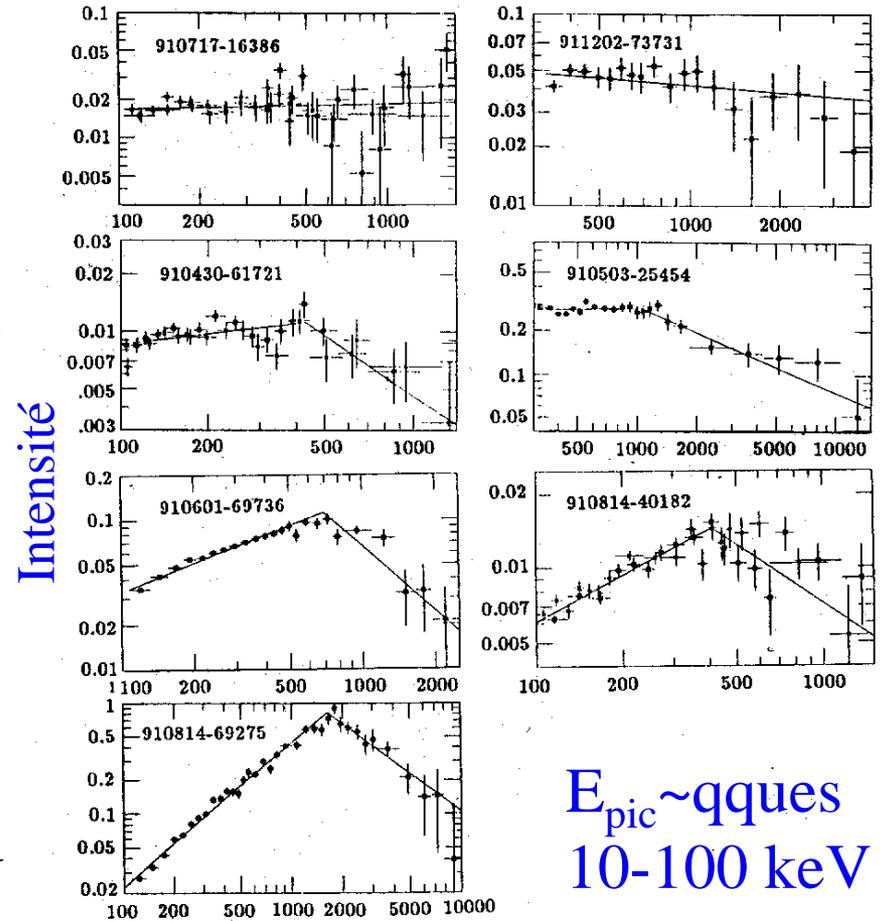
Courbes de lumière et Spectres

Des pics très fins



Temps (sec)

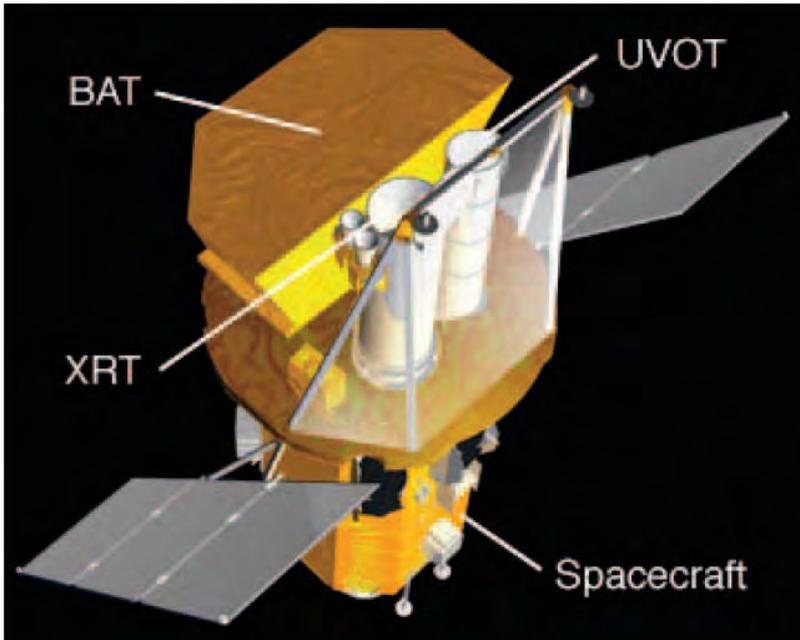
Lois de puissance / cassures



Energie (keV)

$E_{pic} \sim \text{qqes}$
10-100 keV

Swift satellite (Neil Gehrels)



But: utiliser les afterglows pour identifier les sources des GRB

BAT alerte d'un sursaut, et XRT et UVOT pointent immédiatement dans cette direction

Gehrels et al 2004

(N.G. disparu en 2017)

BAT: Burst Alert Telescope: 15-150 keV

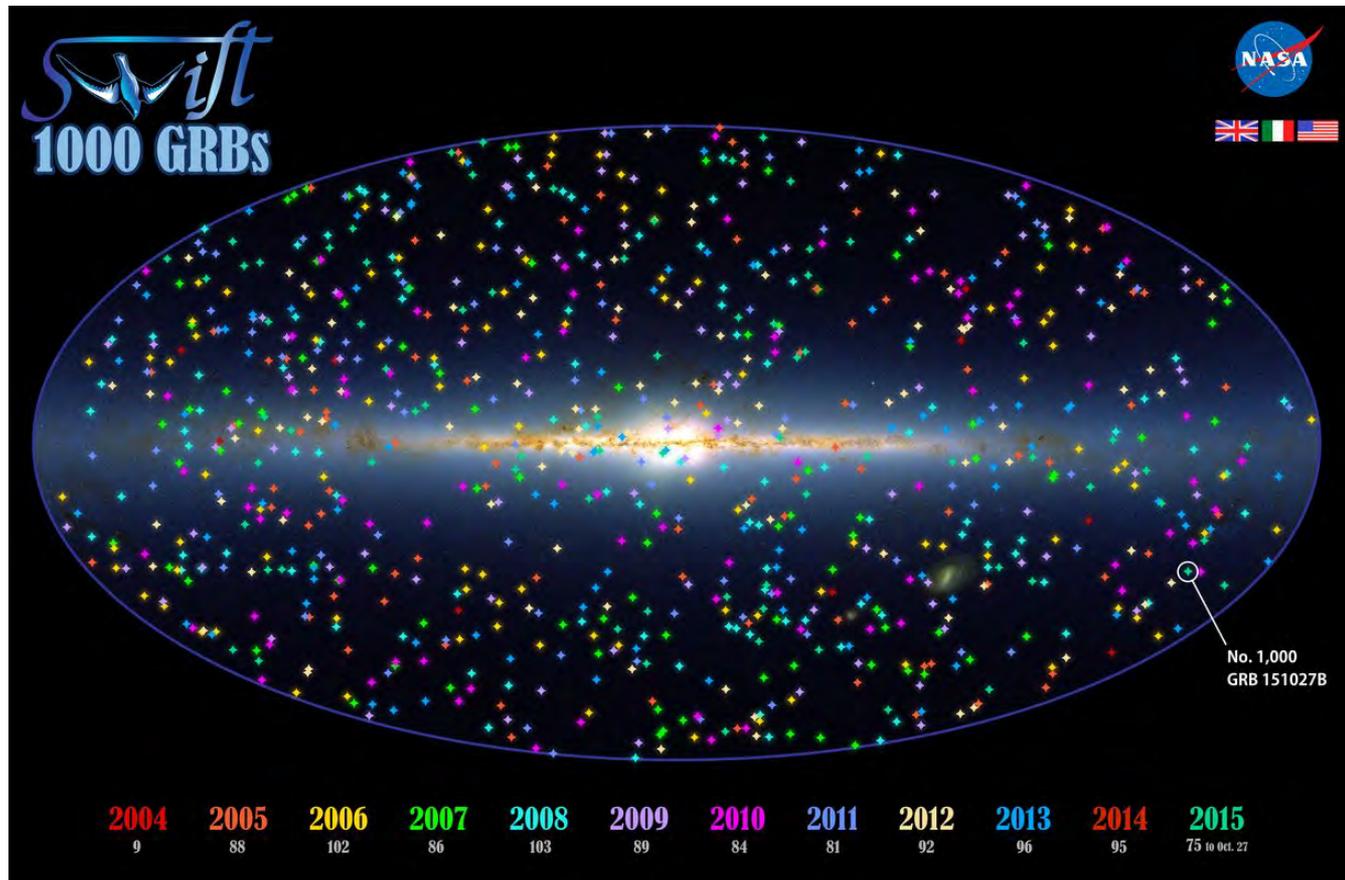
XRT: X-Ray Telescope: 0.2-10 keV

UVOT: Ultraviolet/Optical Telescope: $(5-18) \cdot 10^{14}$ Hz

(0.3'' precision)

Swift: identification des GRB

- l'effondrement d'une étoile géante → formation d'un trou noir ou d'une étoile à neutrons (**sursauts longs**),
 - fusion de deux étoiles à neutrons binaires (**sursauts courts**)
- Les sursauts courts ont des afterglows plus faibles → plus difficile



Fermi: LAT et GBM

Fermi: haute énergie 20 à 300 GeV: Blazars, pulsars, GRB

GBM GRB Monitor

Scintillateurs

LAT balaye tout le ciel
en 3h, 30 fois plus sensible
qu'EGRET

GRB 080916C

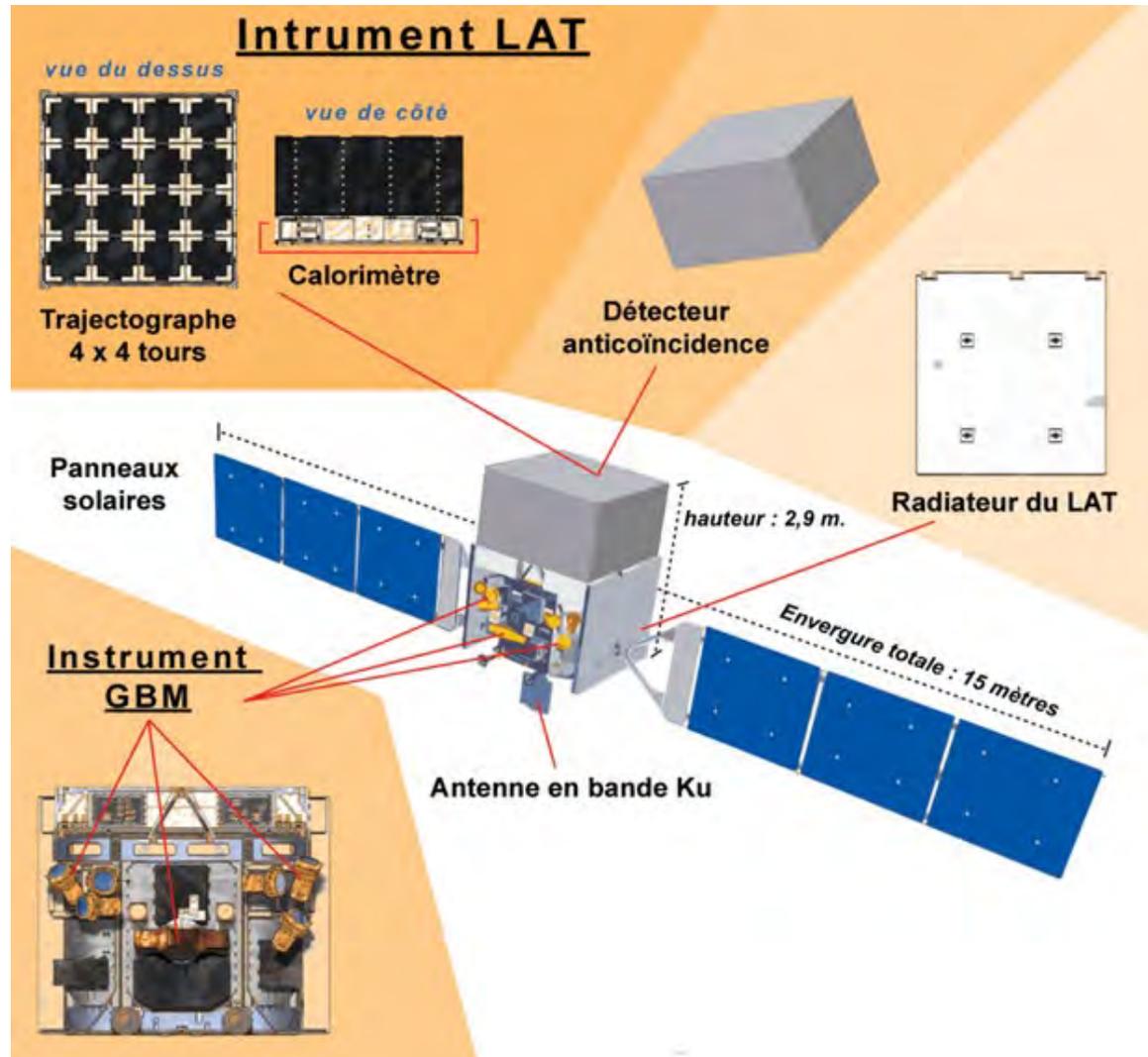
de 10 keV à 10 GeV

$z=4.35$

12 milliards d'al

Le plus puissant

9000 SNIa



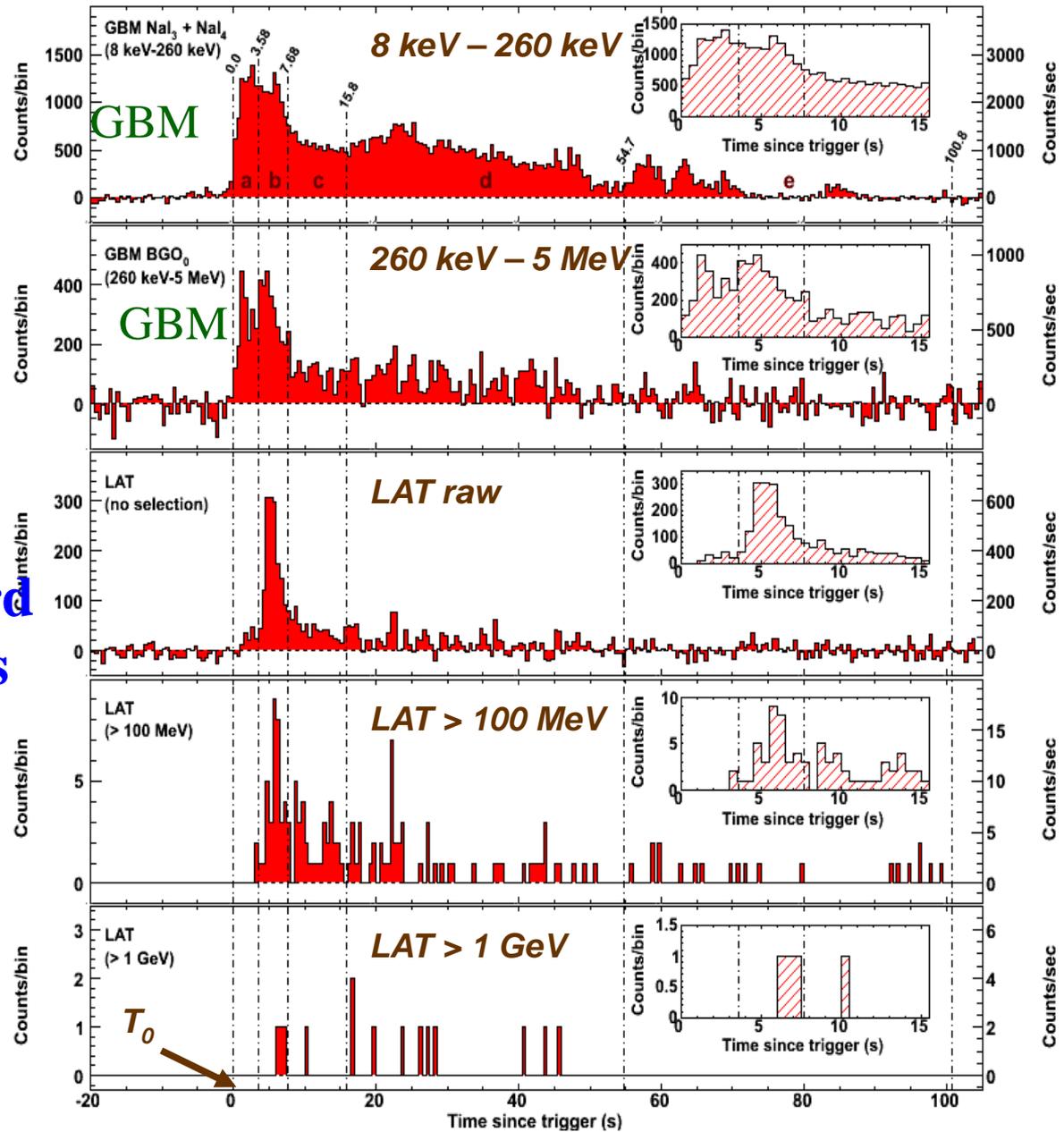
Fermi: LAT et GBM

Courbes de lumière
de GRB 080916C
per bin 0.5sec
a, b, c, d, e

7 décades en énergie

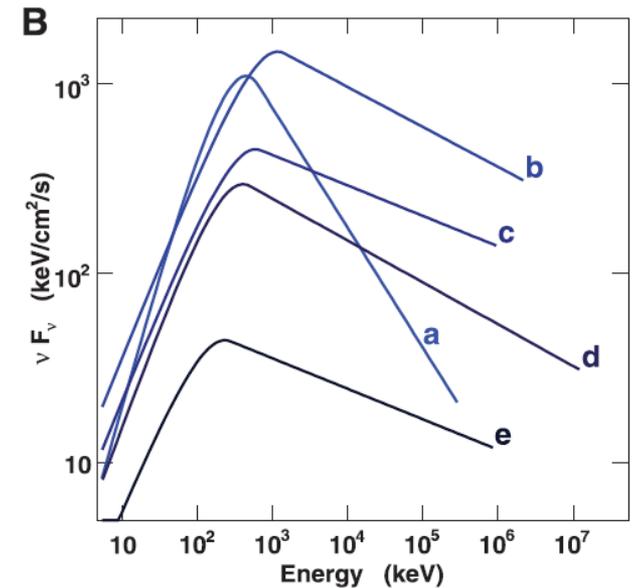
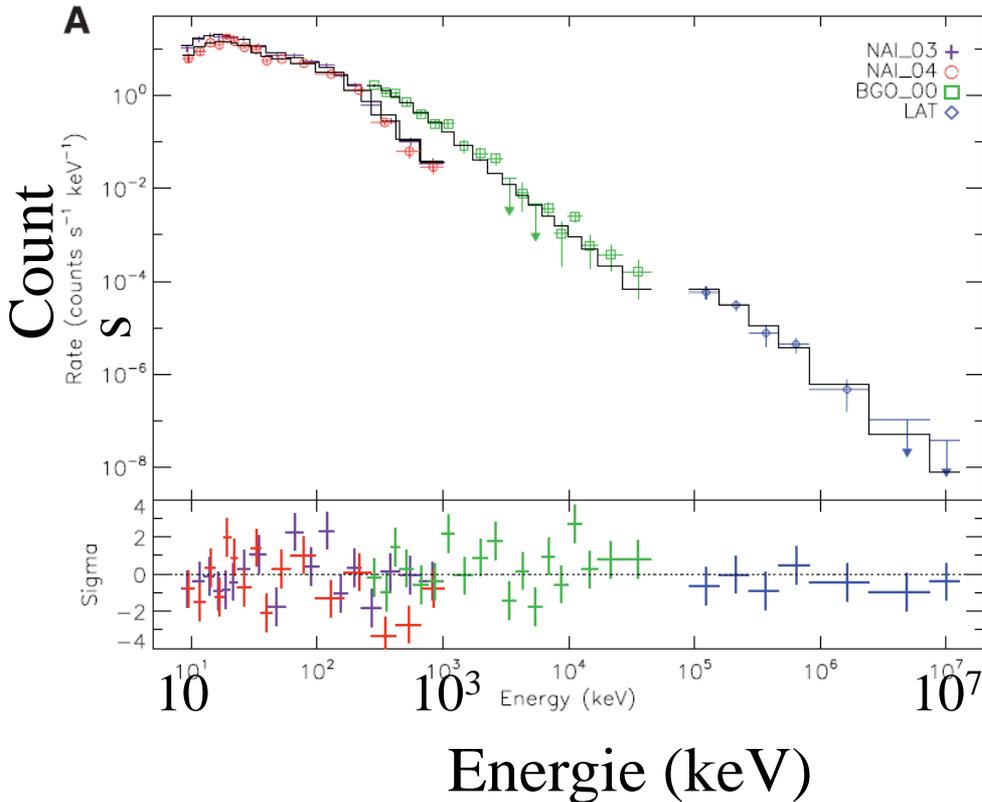
Les HE arrivent plus tard
et restent plus longtemps

Visible jusqu'à 200sec



Fermi: GRB080916C

Compatible avec un seul mécanisme



Evolution temporelle a,b → e

$z=4.35$ $\gamma > 600-900$ selon le temps

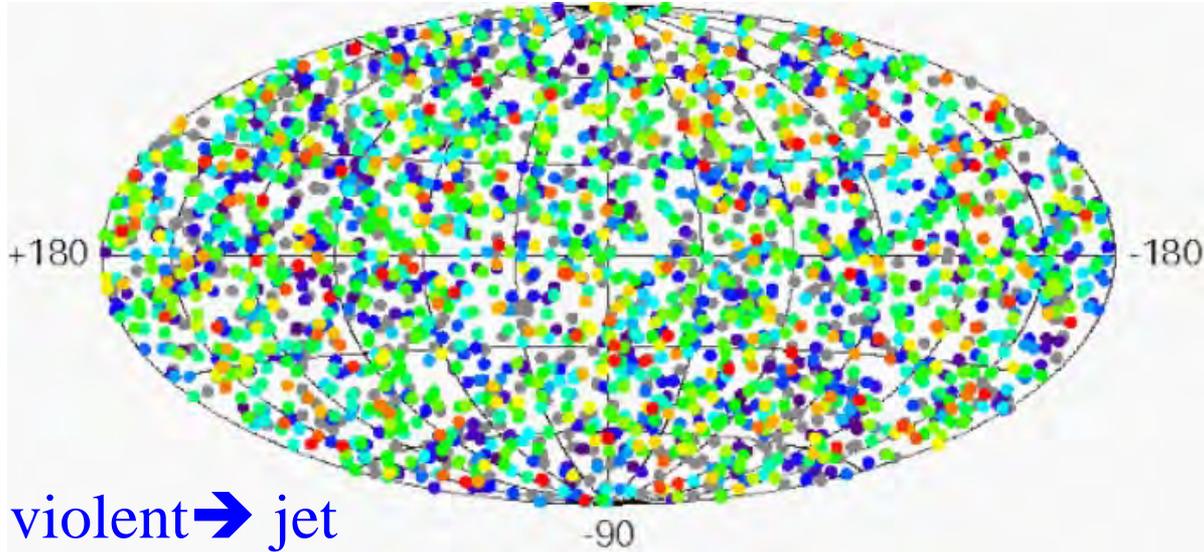
Source $R > 10^{16}$ cm = 600AU

Radiation: synchrotron

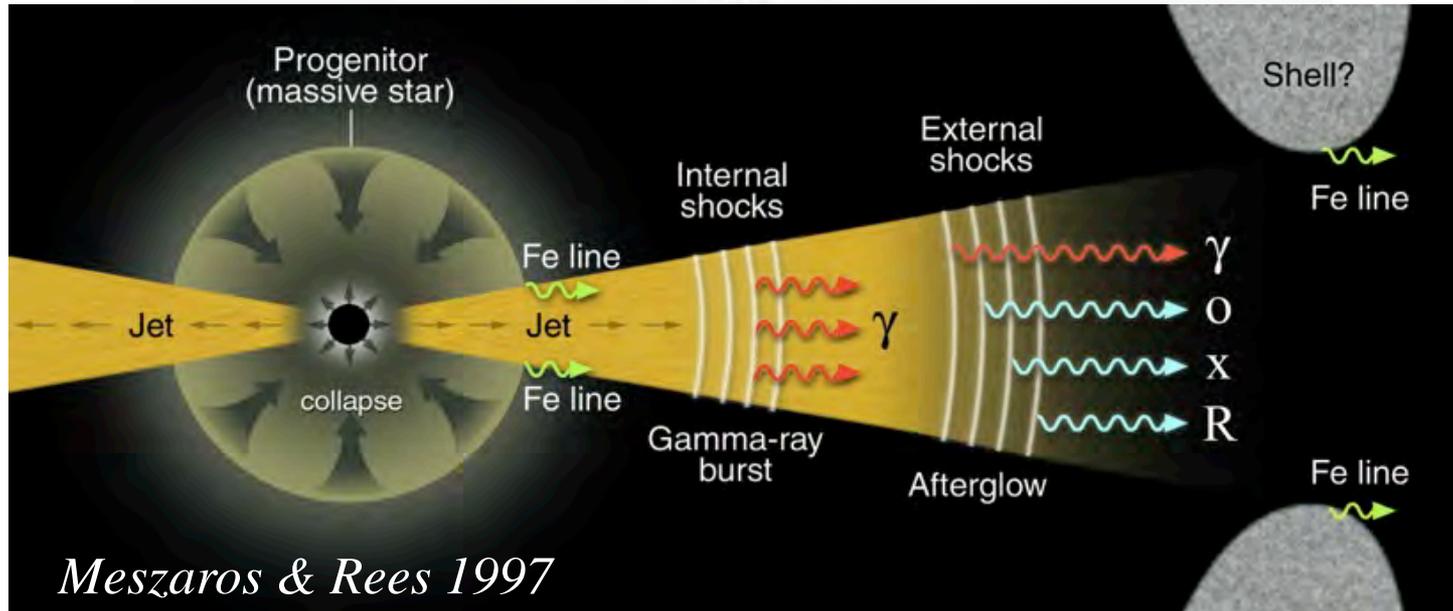
Absence de SSC (Self-Compton) → $E_{\text{mag}} \gg E_{\text{kin}}(e)$

Nature des Sursauts Gamma

BATSE sur CGRO, dévoile la distribution homogène → cosmologique



Evénement violent → jet



Energie des Sursauts Gamma

En quelques secondes 10^{50} - 10^{54} ergs seulement en gamma

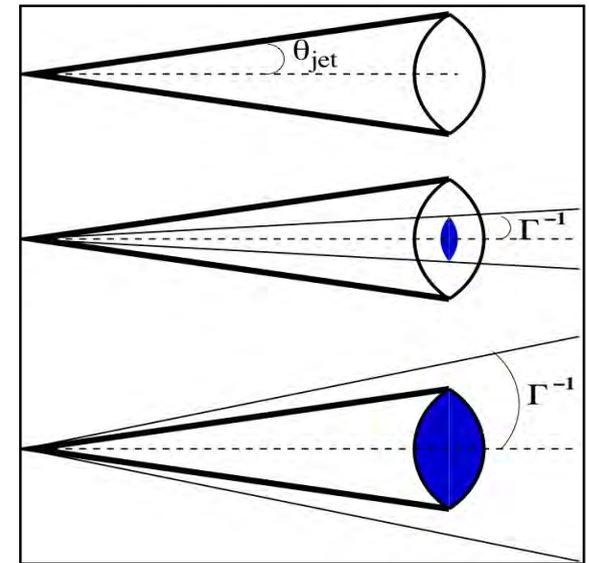
Le Soleil $\sim 4 \cdot 10^{33}$ erg/sec, 10^{51} ergs/ 10^{10} ans SN: 10^{51} ergs sur un mois

GRB sont observés jusqu'à $z \sim 9$

Le puzzle de l'énergie énorme
pourrait être allégé avec le beaming
"To beam or not to beam"

Certains GRB sont associés à des SNe
(GRB980425/SN1998bw,
GRB030329/SN2003dh etc.)

Mais en général l'énergie est $100 \times E_{\text{SN}}$

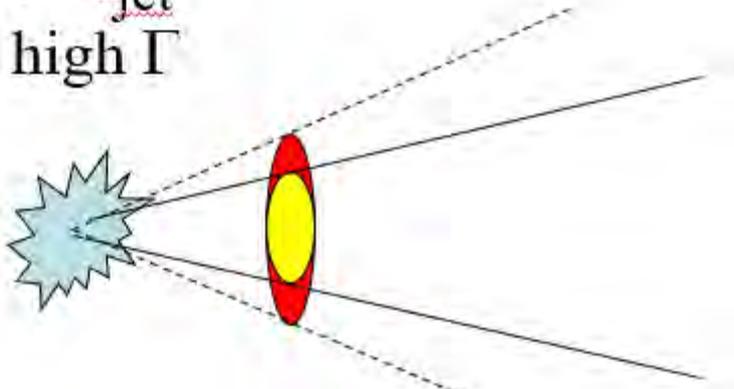


Même si isotrope,
l'angle apparent est
 $1/\Gamma$

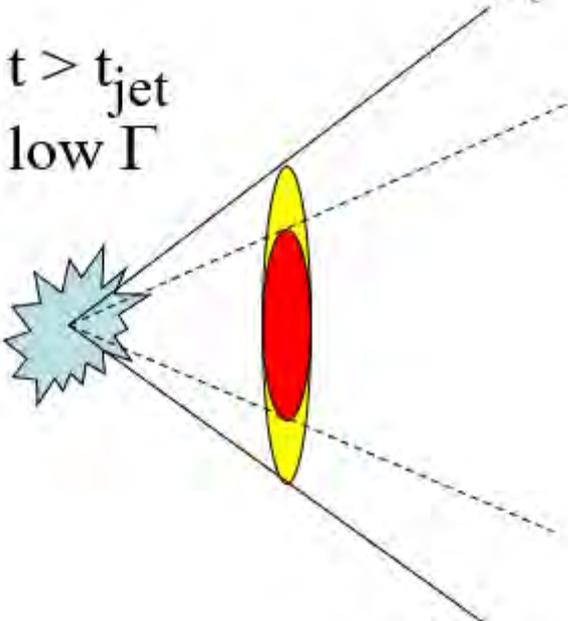
→ Cassure lorsque
 $\theta_{\text{jet}} \sim 1/\Gamma$

Indices pour le beaming

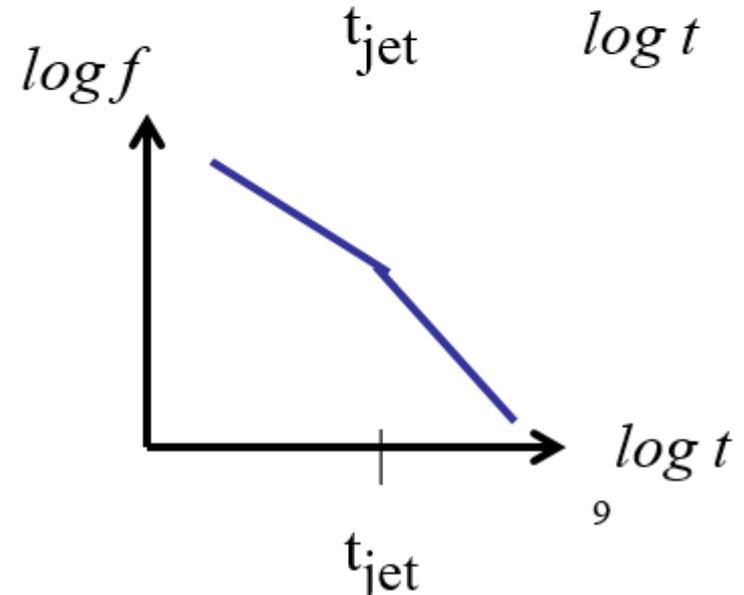
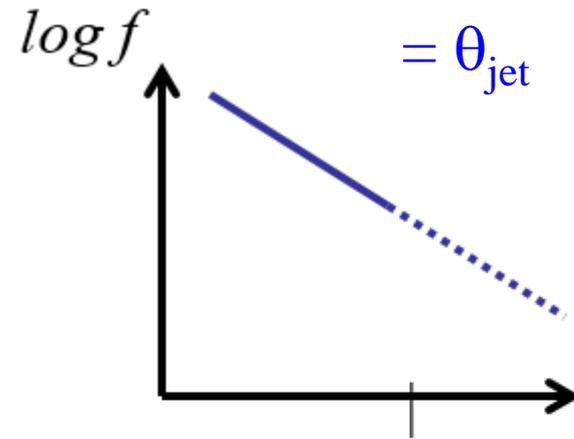
$t < t_{\text{jet}}$
high Γ



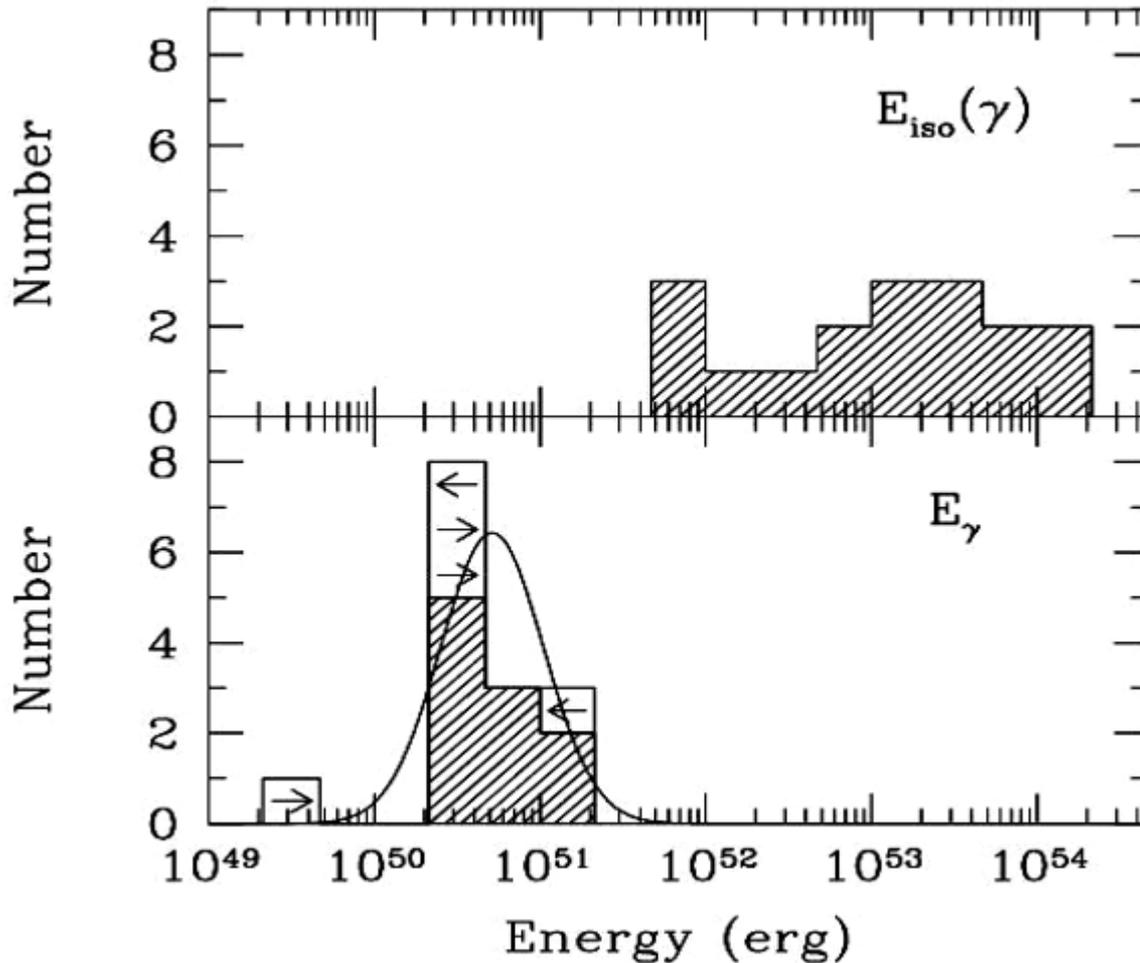
$t > t_{\text{jet}}$
low Γ



Dans l'afterglow
 Γ diminue avec le temps
et $1/\Gamma$ croît et devient



Moins d'énergie avec beaming



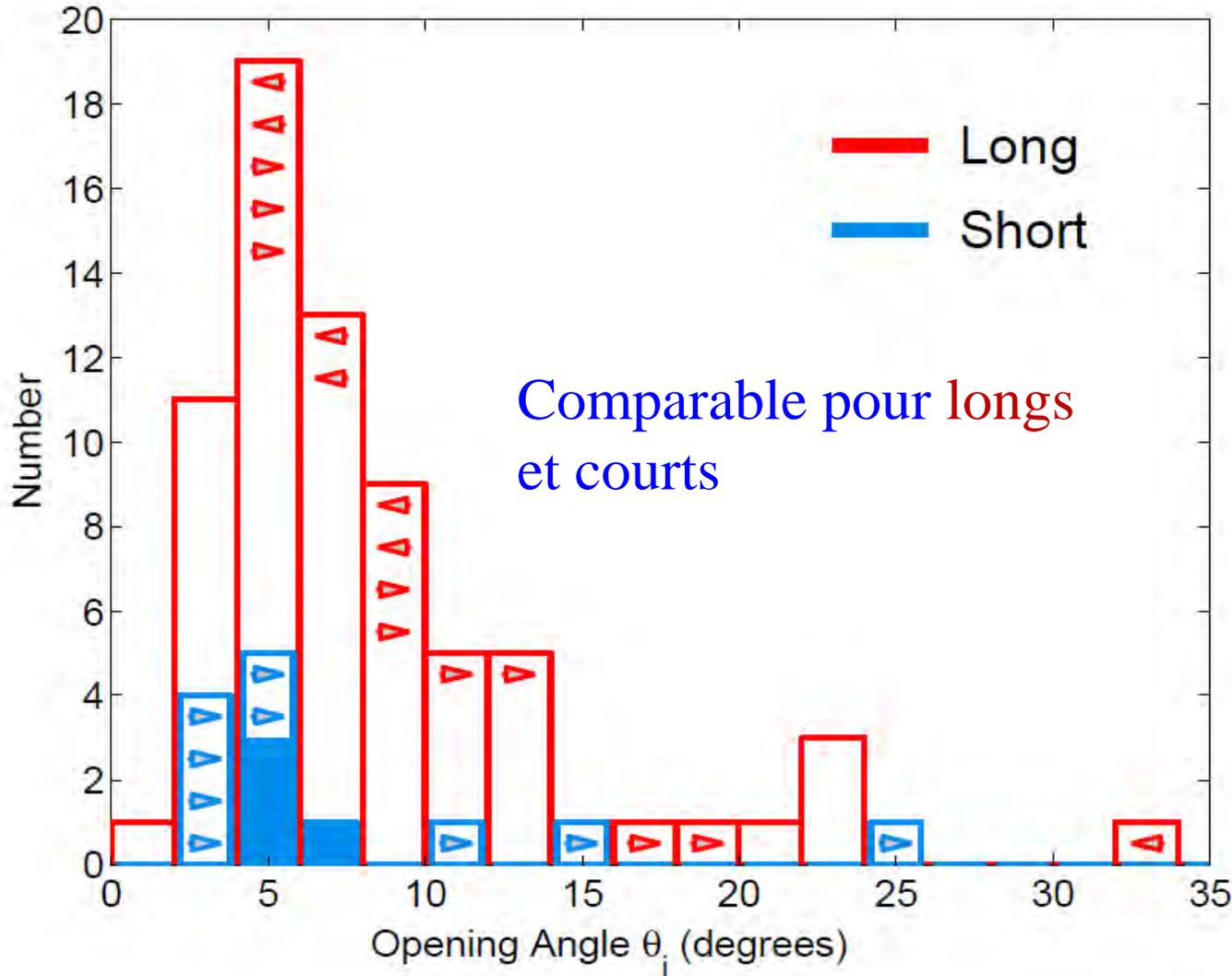
Avant la correction
de beaming
Hypothèse isotrope

Après la correction
de beaming

→ Une énergie plus
raisonnable

Distribution des angles

A partir des cassures de la courbe de lumière des afterglows



$\langle \theta \rangle \sim 10^\circ$

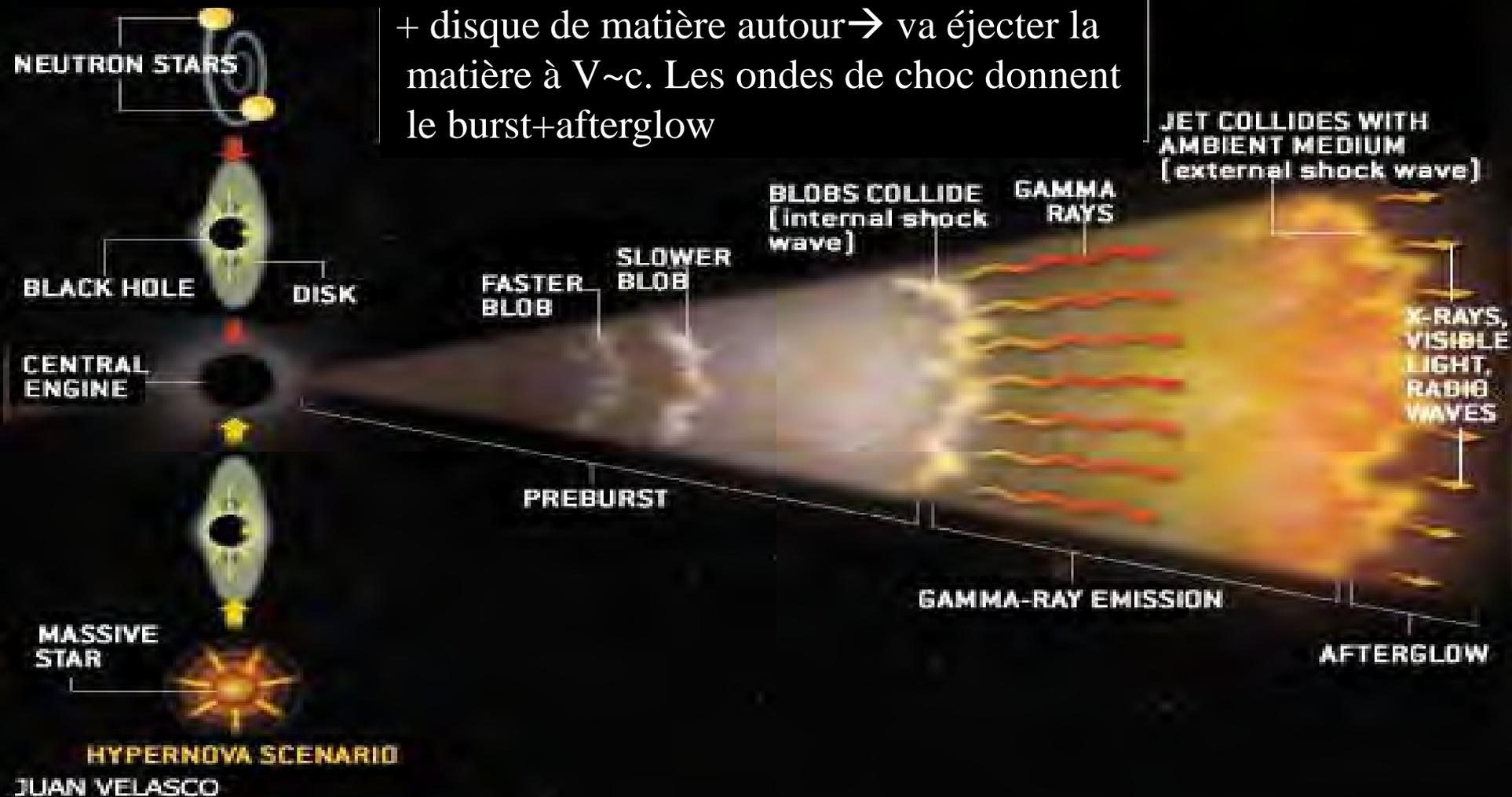
→ beam factor 100

L'énergie des GRB
peut être corrigée
de ~ 100

Beaming: un jet se forme lors de l'événement

Merger scenario

Deux scénarios: fusion de 2 NS, ou Hypernova. Dans les 2 cas, formation BH, + disque de matière autour → va éjecter la matière à $V \sim c$. Les ondes de choc donnent le burst+afterglow

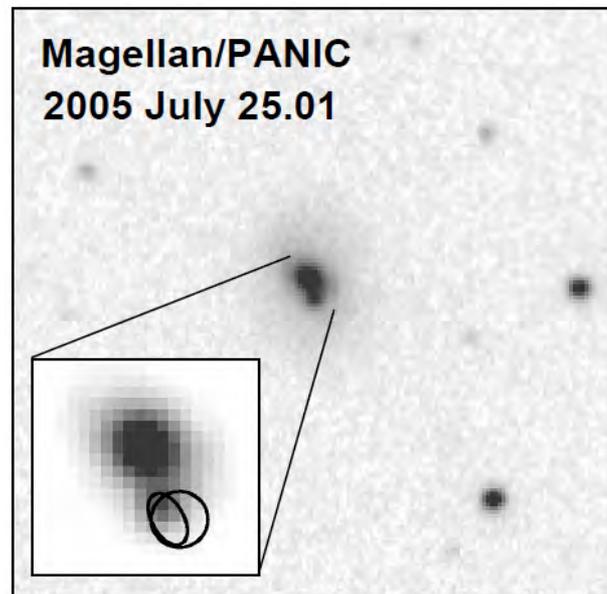


Beaming, cas des Short GRB

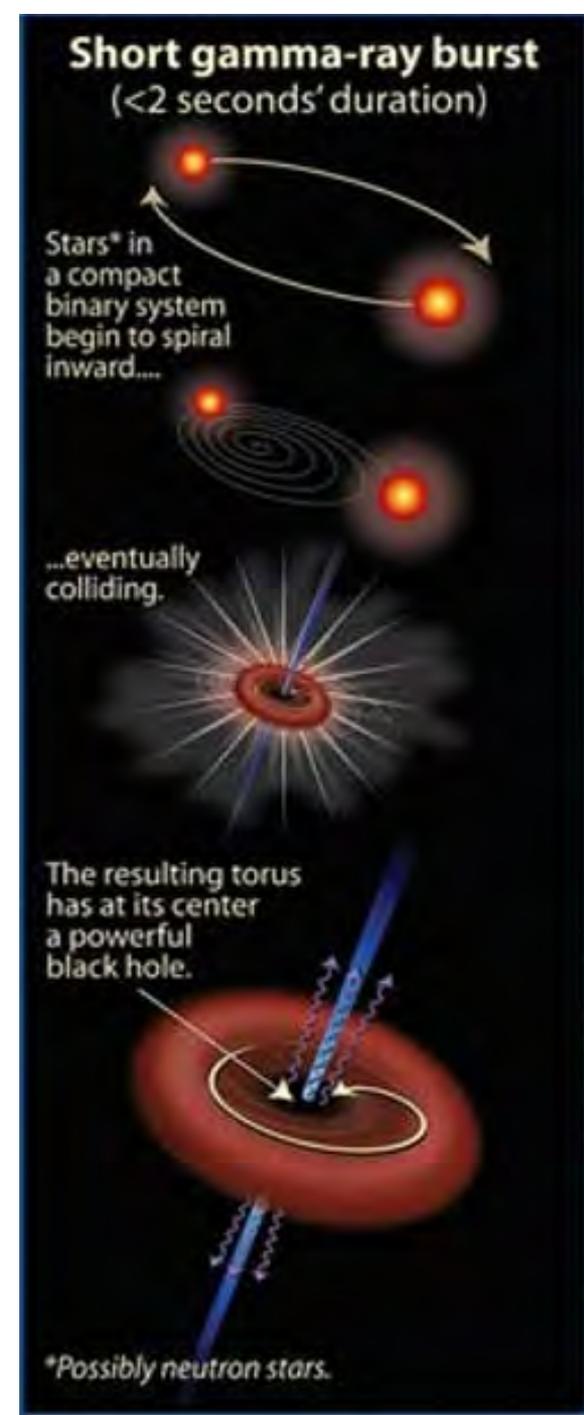
Burst plus court, mais aussi la rémanence
afterglow plus court

Première détection d'un afterglow dans un
S-GRB, GRB 050724, une galaxie Elliptique
 $z=0.257$

Même jet relativiste, mais 10-1000 fois
plus faible, dans une population vieille
d'étoiles

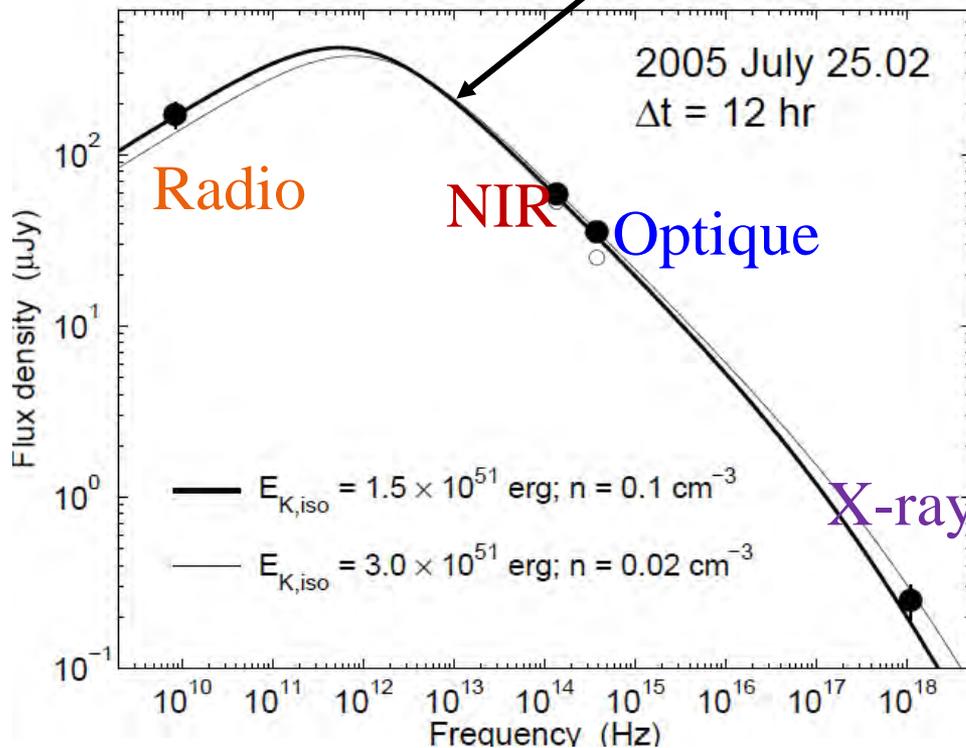


Berger et al 2005



Premier afterglow Short GRB

Modèle synchrotron

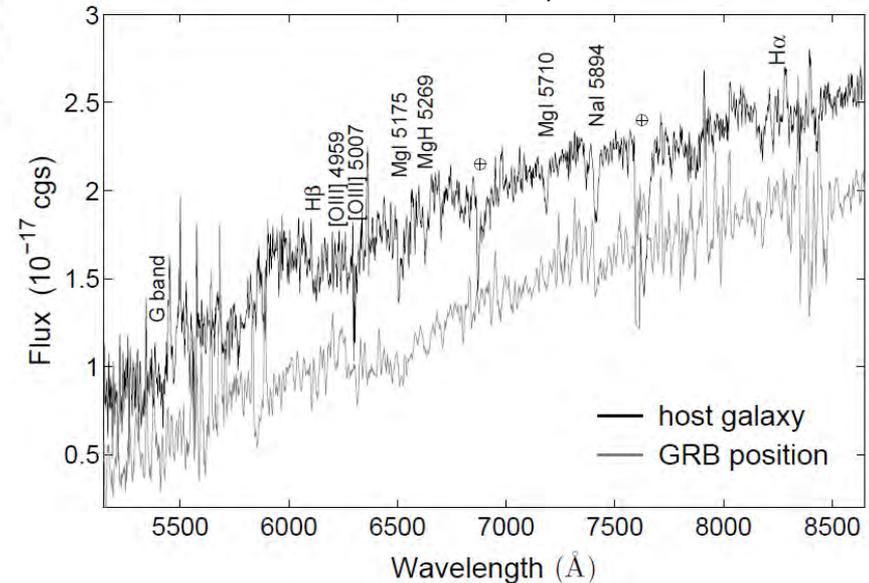


Si le beaming existe,
 <10% des NS-NS, NS-BH
 Terminent par un GRB

→ E(short) 10-1000 fois plus
 faible que E(long)

Energie $E(e^-) \approx 4\%$
 $E(B) \approx 2\%$

Spectre raies absorption
 Étoiles vieilles, $z=0.257$



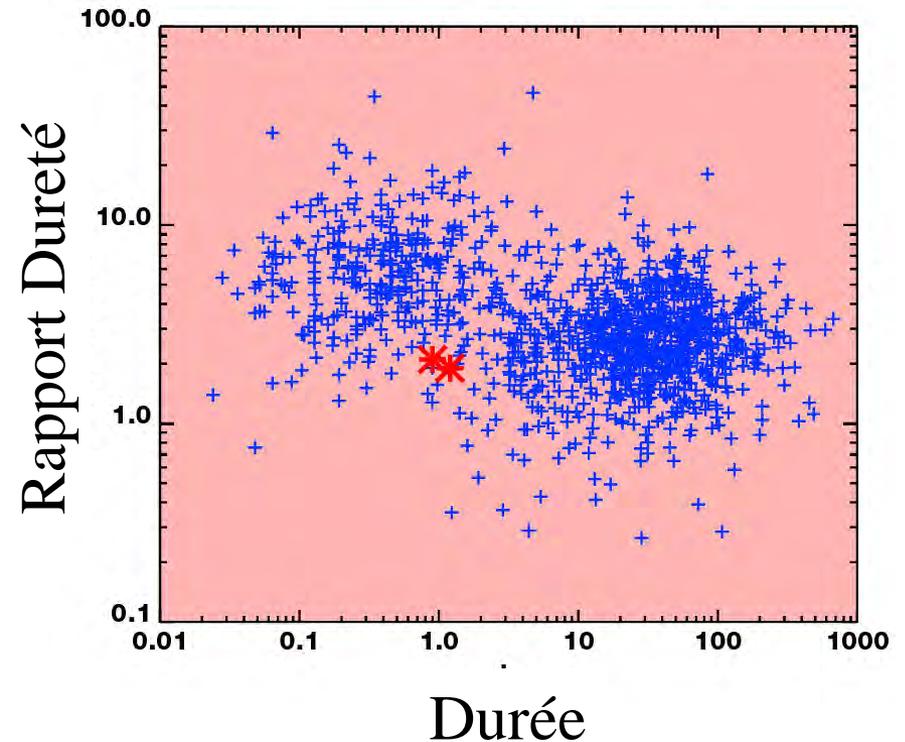
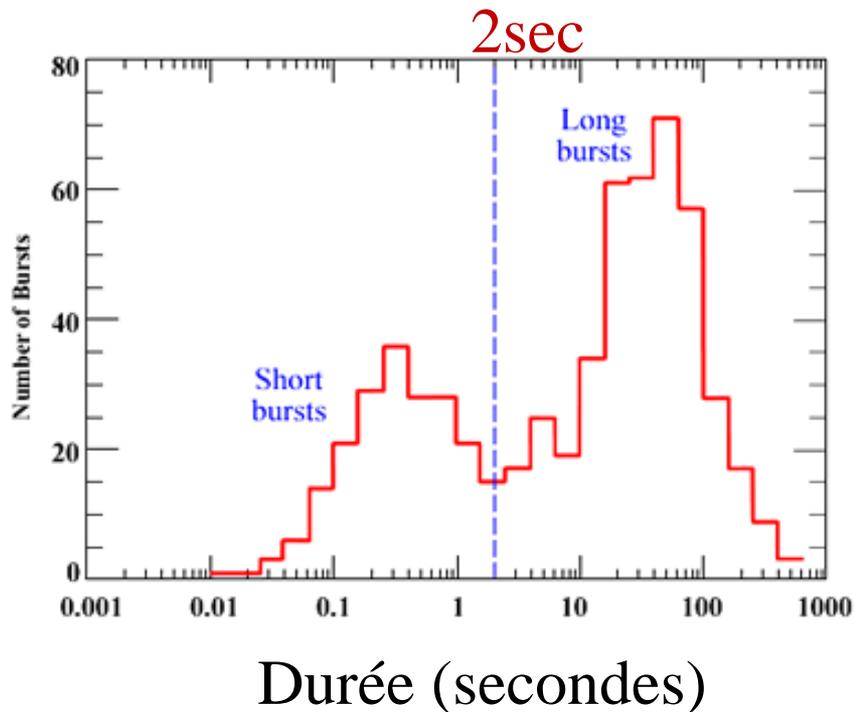
Deux types de sursauts

Les **courts** (durée inférieure à 2sec), **spectre plus dur**

Les **longs** (2s jusqu'à 15min), **spectre plus mou**, plus nombreux

10^{50} - 10^{54} erg en une courte période, 10^{51} erg SN (1 mois)

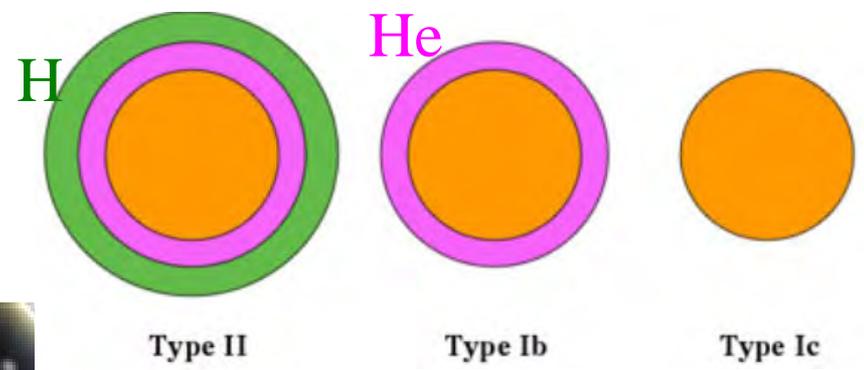
Soleil 4×10^{33} erg/s, 10^{51} erg en 10 milliards d'années



Collapses: SNIi (Crabe),
mais aussi SNIb, SNIc

Selon la masse

$$8M_{\odot} < M < 30 M_{\odot}$$



Supernova



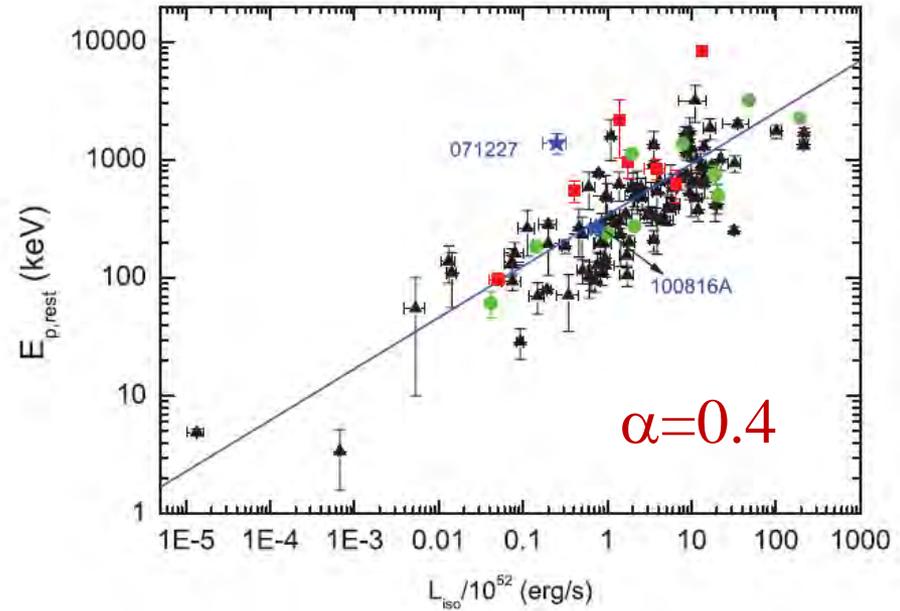
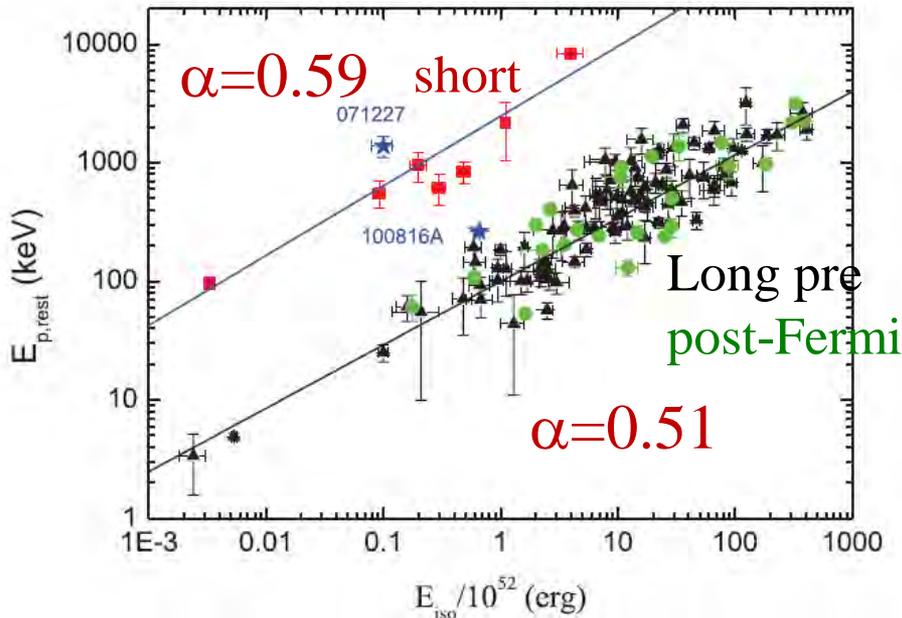
Hypernova

$$M > 30M_{\odot}$$

Energie au pic, et luminosité

E_{\max} dans le référentiel au repos, versus E_{iso} , L_{iso}
En supposant l'émission isotrope (pas de beaming)

L' E_{\max} des GRB courts est plus grande, le spectre est plus dur
Mais une fois pris en compte la durée plus courte \rightarrow universel



Relation d'Amati (2006) $E_p \propto E_{\text{iso}}^{0.5}$

Zhang et al 2012

Propriétés des GRB

Durée de milli sec à minutes (2s sépare les courts des longs)

Plus de 100x énergie de supernovae (sauf si beaming $\rightarrow E_{\text{GRB}}=E_{\text{SN}}$)

Il reste une émission « Afterglow » pendant plusieurs jours
et à d'autres fréquences (optique, radio, mois, ans)

Sursauts longs, liés à la mort d'étoiles massives, supernovae

\rightarrow Etoiles à neutrons, trou noirs

Sursauts courts: binaires dont la fusion donne un trou noir

Moins d'énergie, redshift plus faible, afterglow faible



GRB $z=8.2$ GRB long
plus loin que le QSO
 $z=7.5$

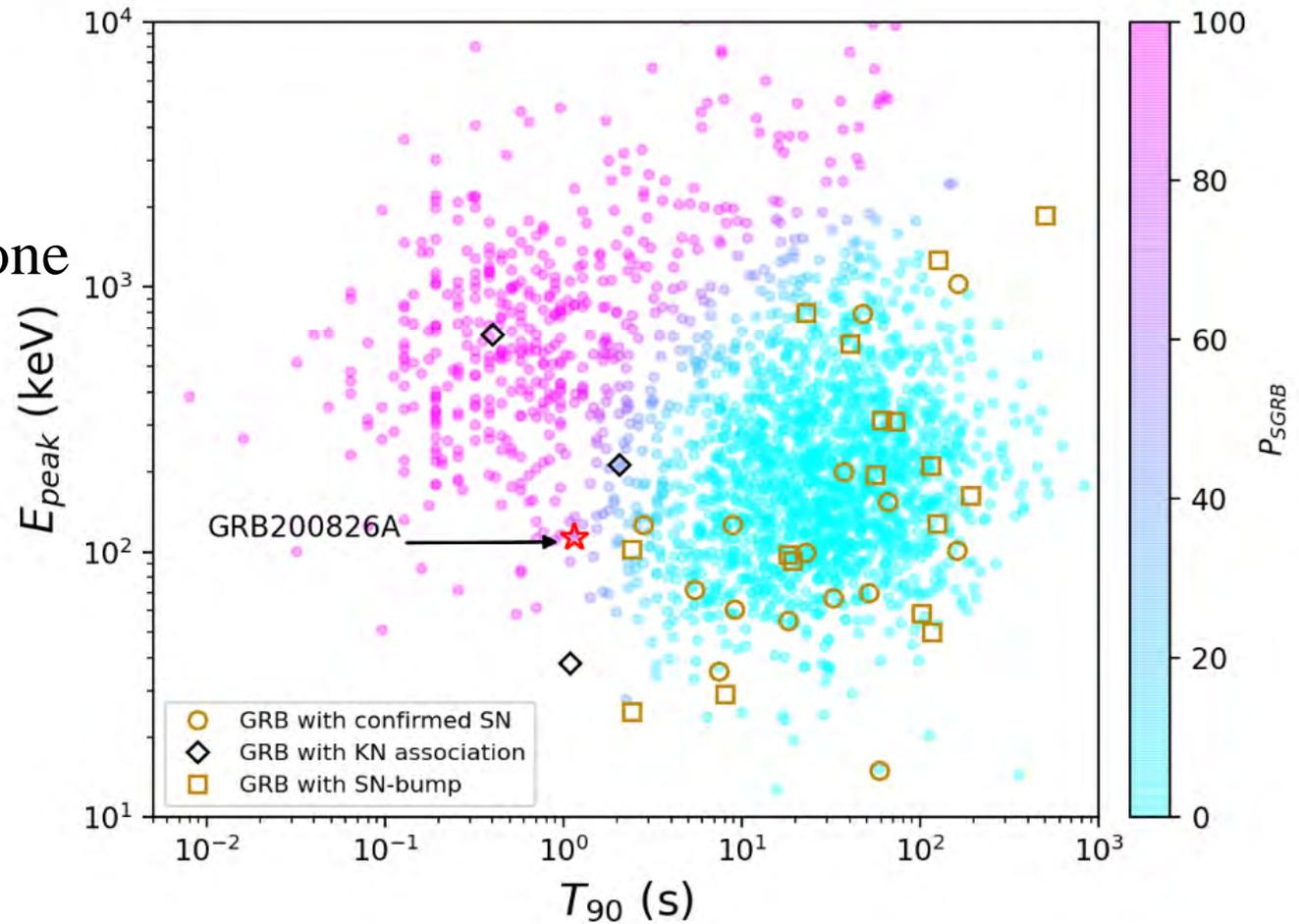
Exception: un GRB court venant d'une SN

GRB200826A

Provient d'une zone
ambigue entre
GRB longs et
Courts

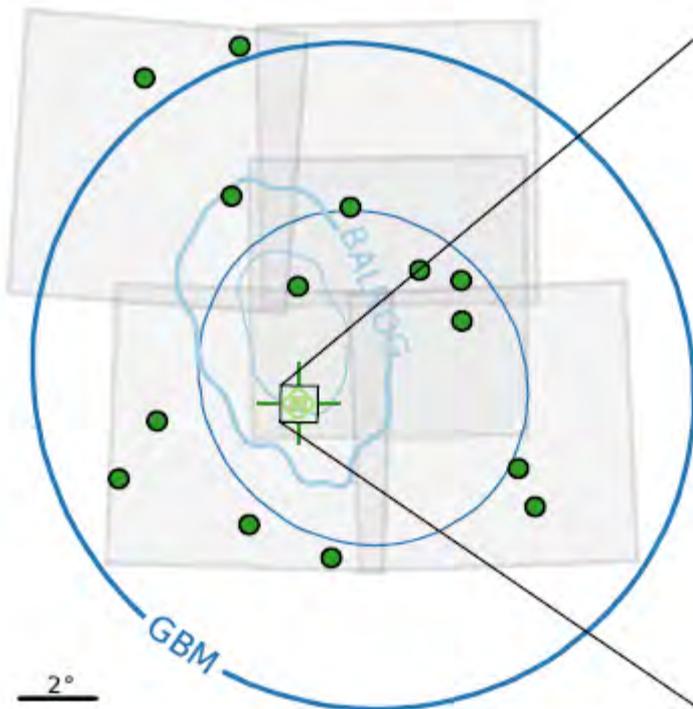
$T_{90} = 1\text{s}$

E_{peak} faible

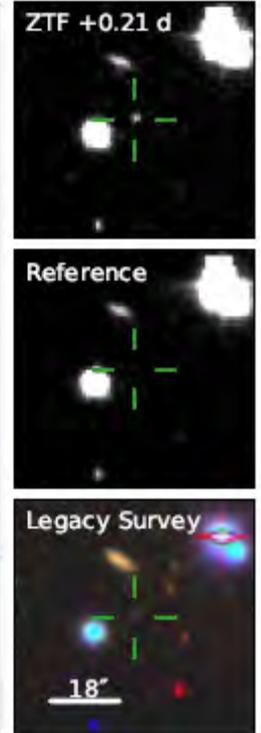
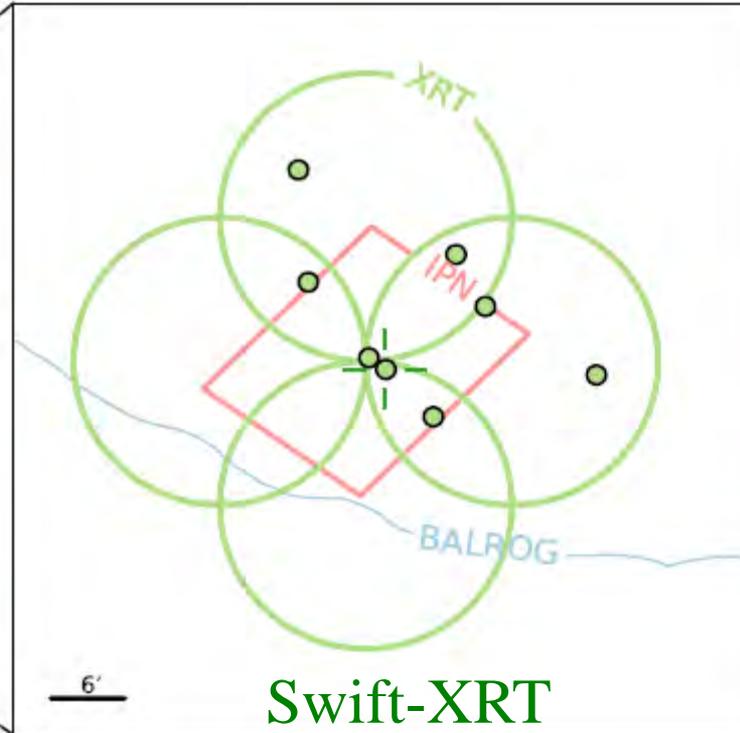


GRB200826A: afterglow

Fermi-GBM



ZTF Zwicky Transient Factory



Identification à 0.08'' près
Afterglow optique montre une supernova!

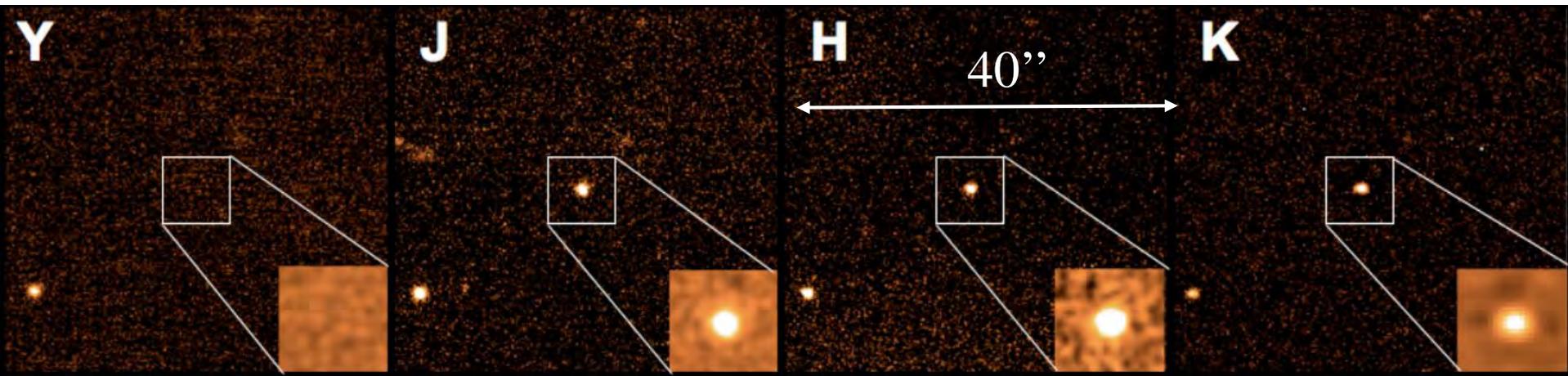
GRB à grand redshift

Au vu de leur énergie, ils pourraient être détectés à $z=15$

Mais il serait difficile de détecter la galaxie hôte!

Un des plus lointains: GRB090423 $z=8.23$, 600Myr après le BigBang

Long-GRB: hypernova



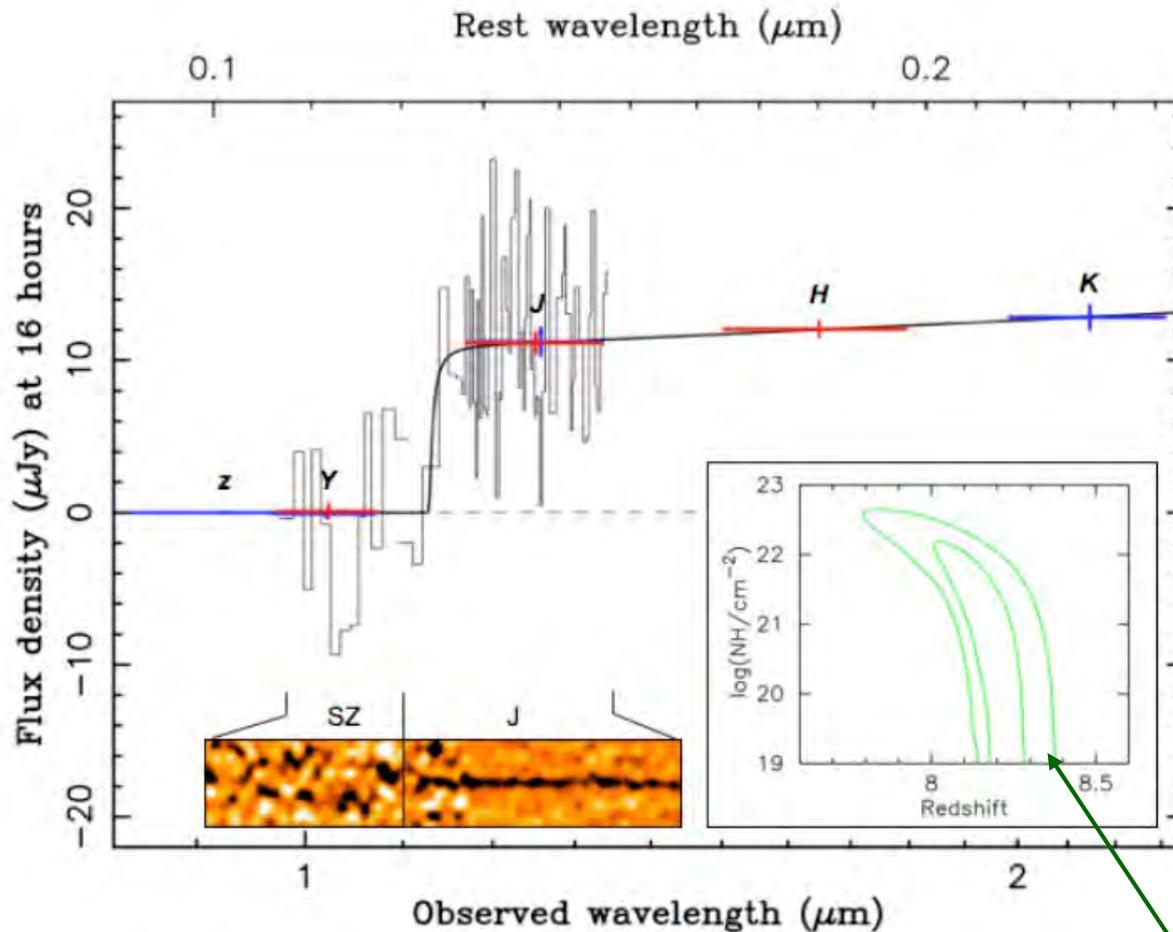
Afterglow 0.5-1.5h après le burst

Tanvir et al 2009

Photo $z \sim 9.4$ pour GRB 090429B
No host galaxy detected

Cucchiara et al 2011

GRB à $z=8.23$



Le saut entre Y et J donne le redshift

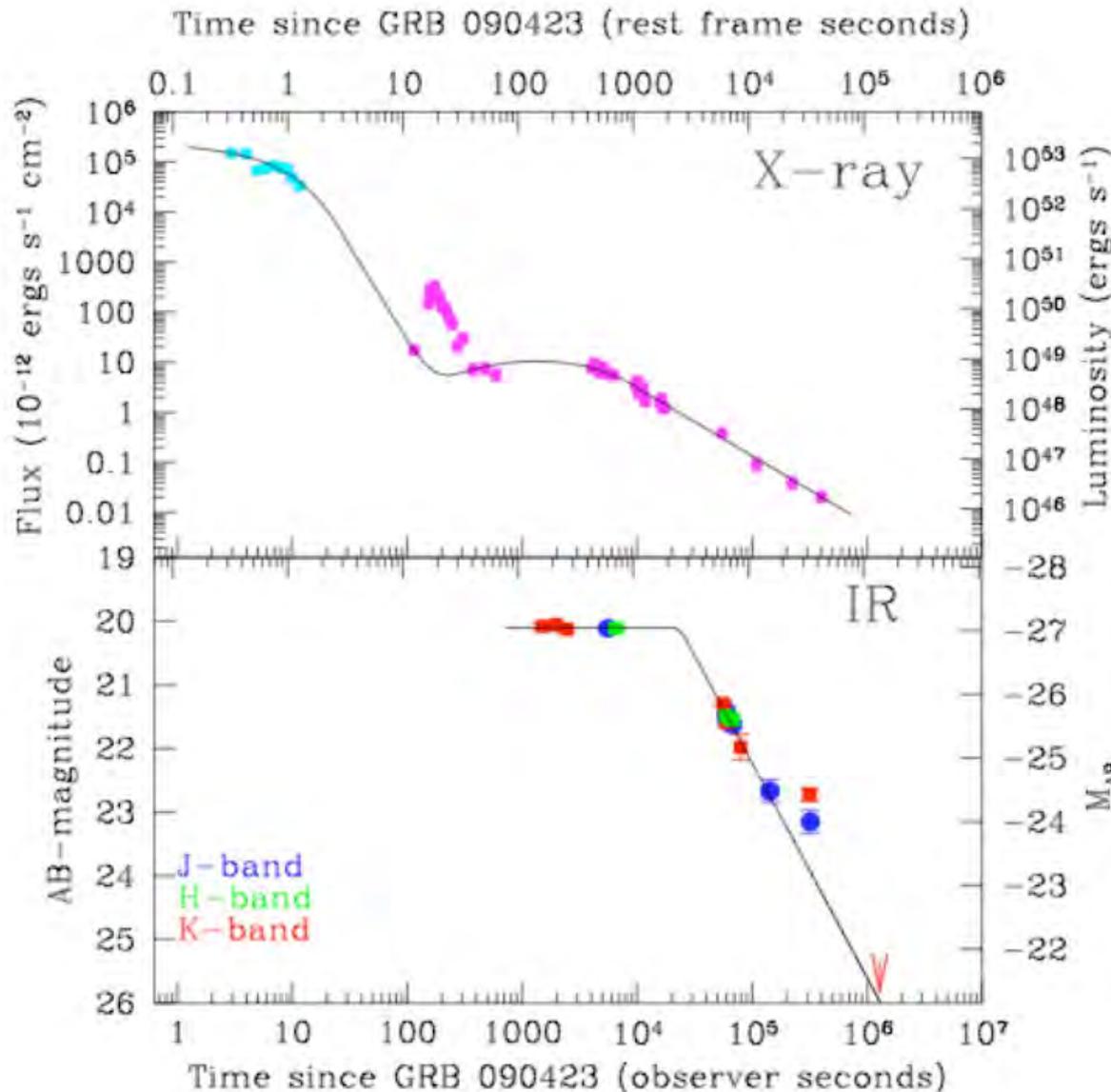
Le spectro VLT donne $z=8.23$

Jusqu'à 40h d'afterglow

Faible abondance en métaux

Modèle $\text{NHI}=10^{21}\text{cm}^{-2}$

GRB à $z=8.23$



Durée observée 10.3s
Correspond dans le
ref au repos à 1.1s
[en $(1+z)$]

Cassure de
Refroidissement

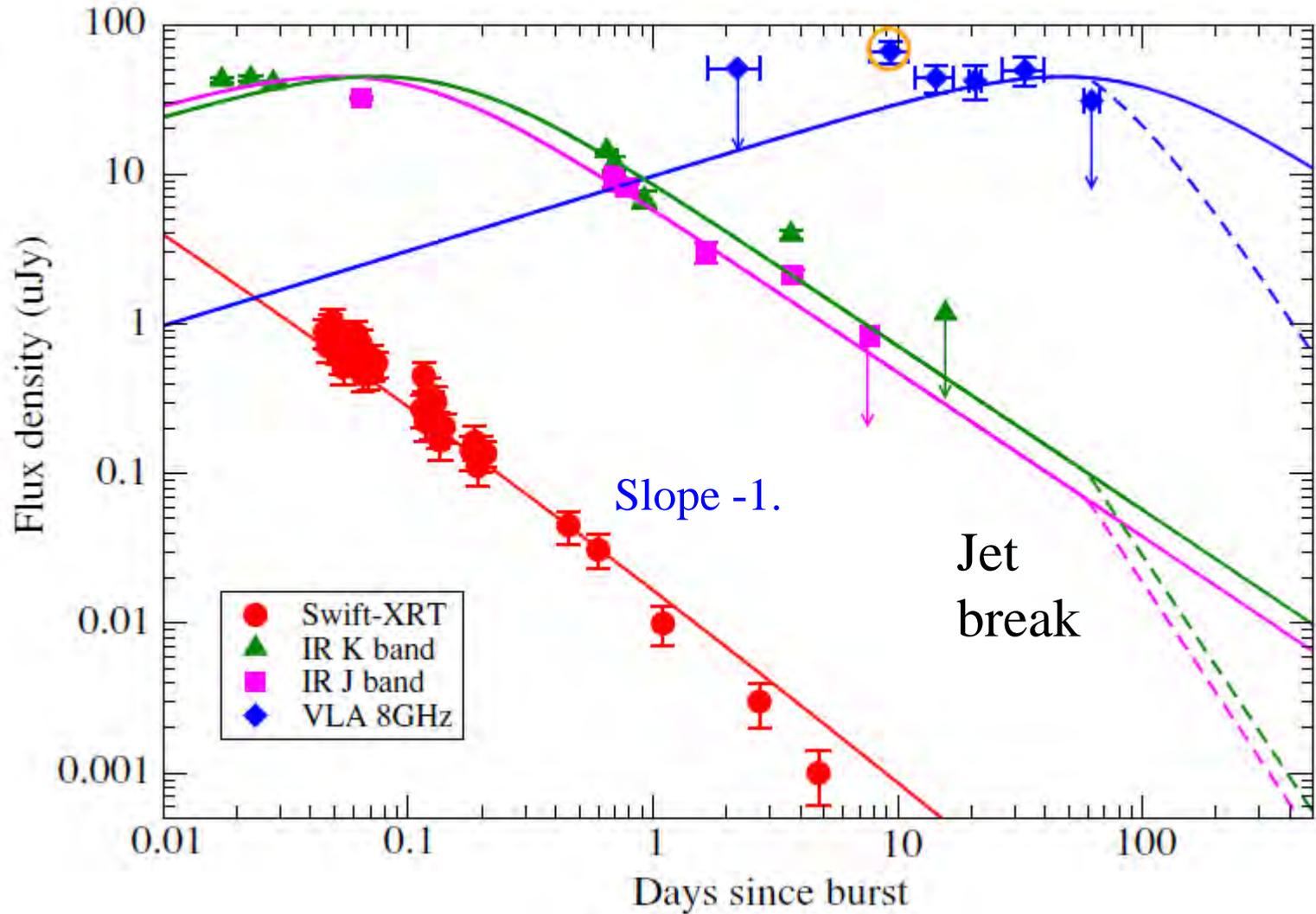
1.5h \rightarrow 10min (ref repos)

La durée est semblable
à $z=0$, pas de PopIII

La galaxie a déjà formé
bcp d'étoiles, mais
CO/H₂ non-detecté

Stanway et al 2009

Afterglow en radio: GRB090423, $z=8.23$



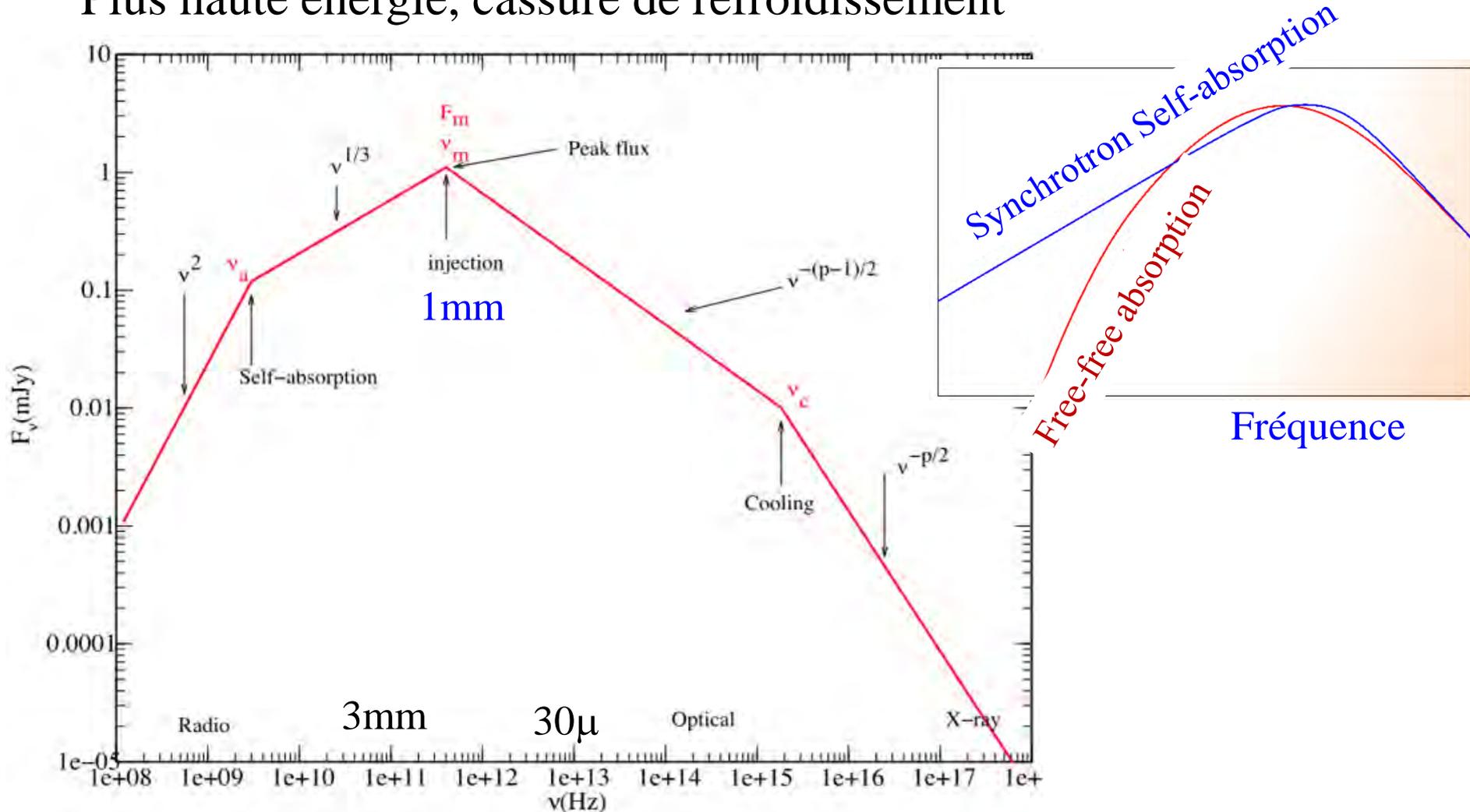
Modèle isotrope, à densité constante

Interprétation du spectre

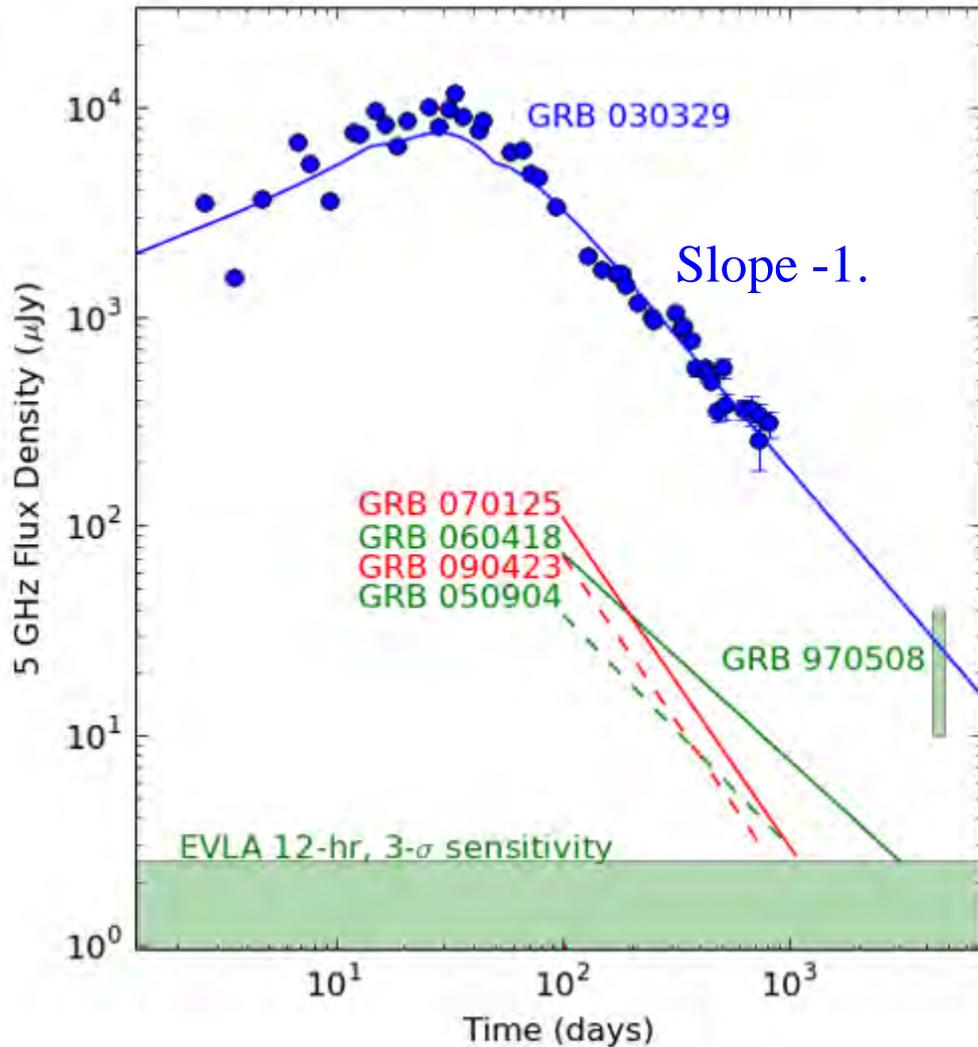
Basse fréquence, le synchrotron est absorbé

Soit free-free (milieu externe), soit Self-absorption

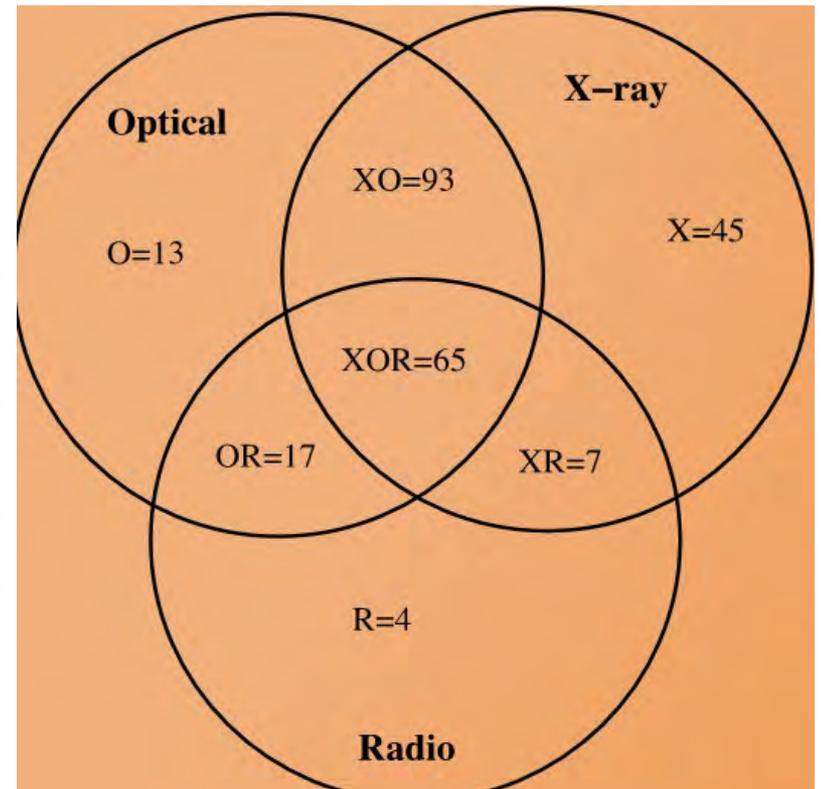
Plus haute énergie, cassure de refroidissement



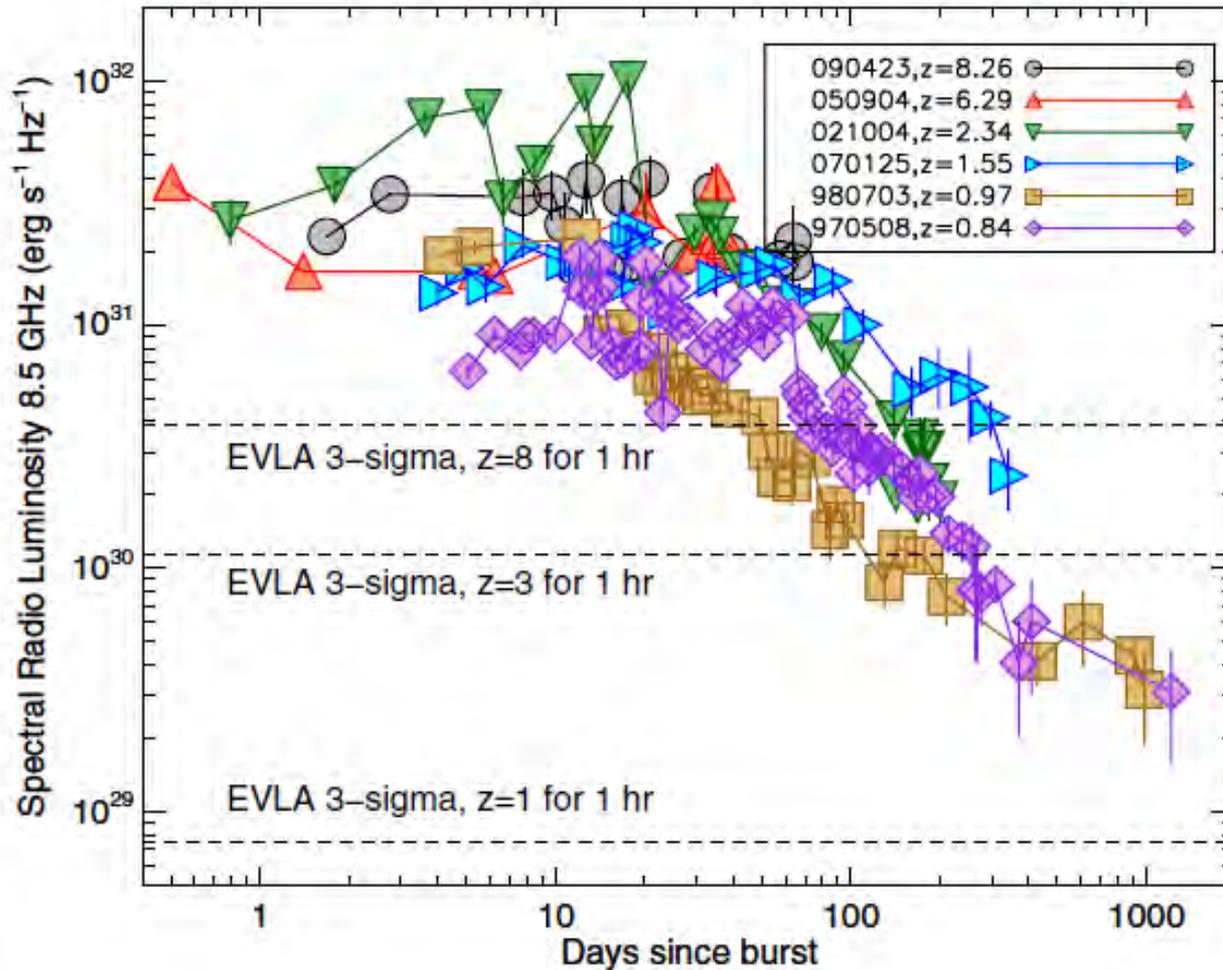
Afterglow en radio



Les afterglows se ressemblent tous, aucune évidence de différents mécanismes ou différents environnements



6 GRB à différents redshifts



Dans le ref au repos
Le flux radio est max
3 jours après le burst

8.5 GHz
Déteçtabilité
proportionnelle à
la force du GRB

300 afterglows
30% déteçtés en radio

Sursauts et absorption sur la ligne de visée

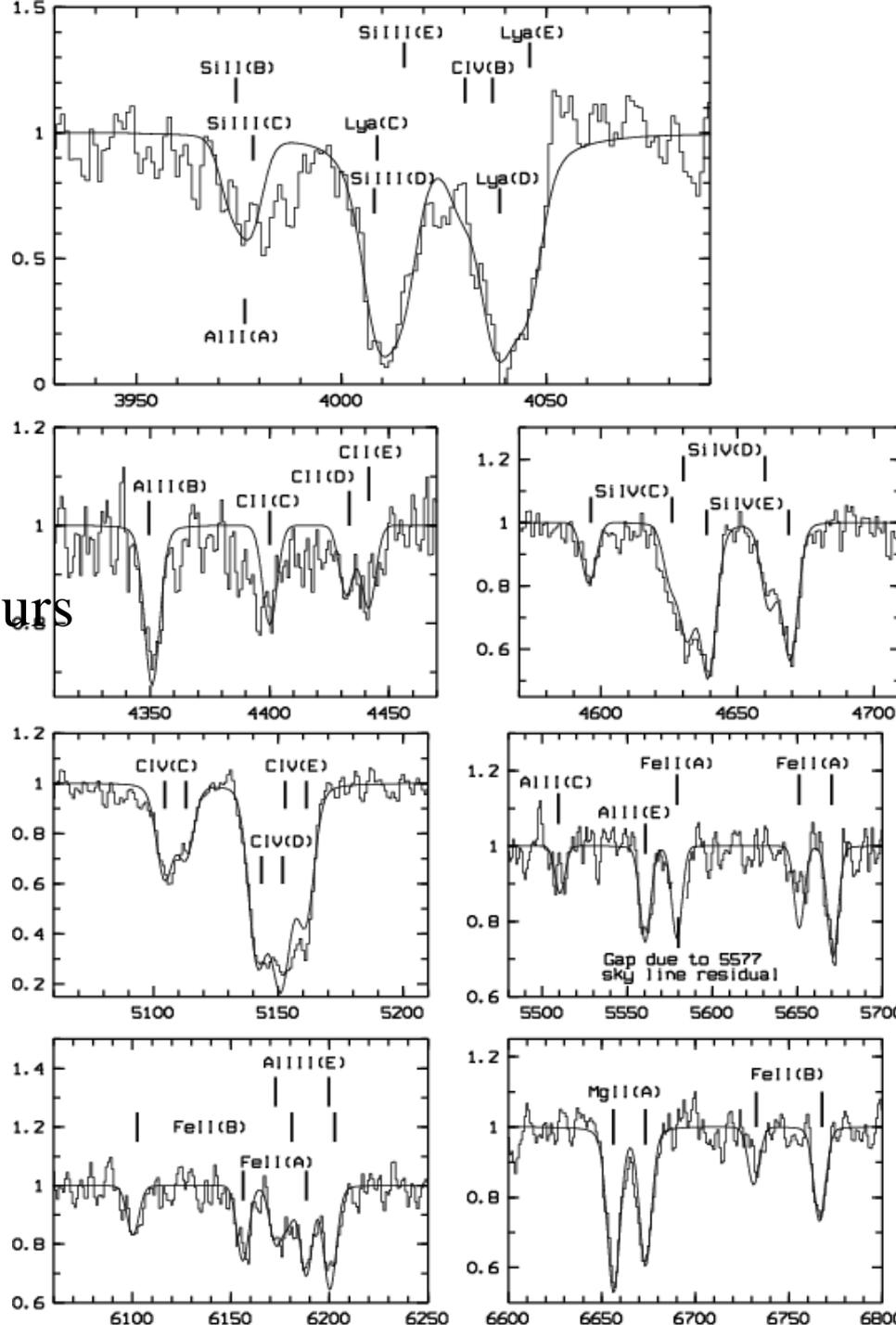
Les GRB sont des émissions brèves mais très intenses

Il reste une émission pendant qq jours

Ici 5 systèmes abs détectés à $z=$
1.3806, 1.6039, 2.2983, 2.3230,
 $z(\text{GRB})= 2.3292$

Un est un DLA (galaxie LBG)

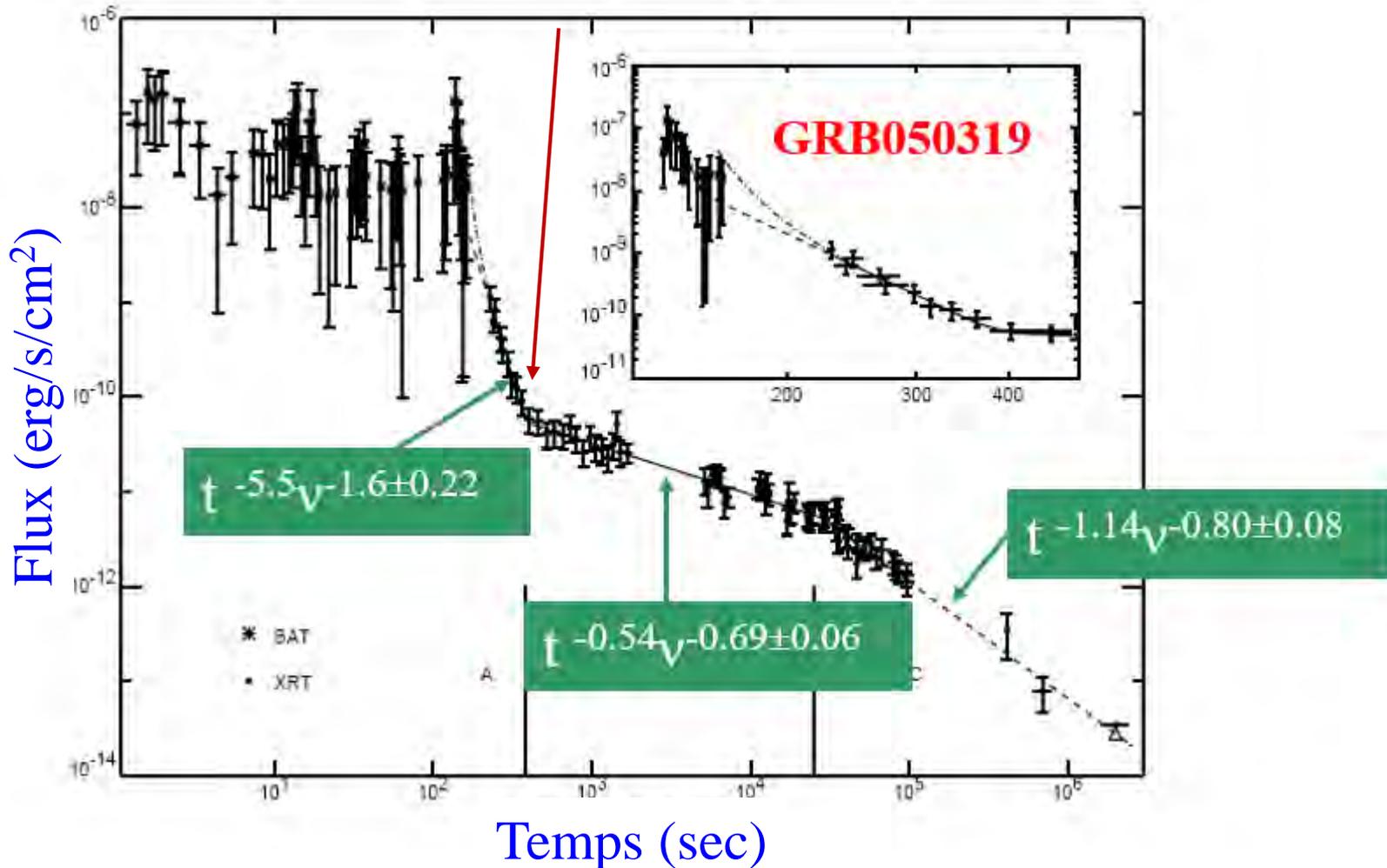
Intégration d'1h, 10h après le sursaut, *Moller et al 2002*



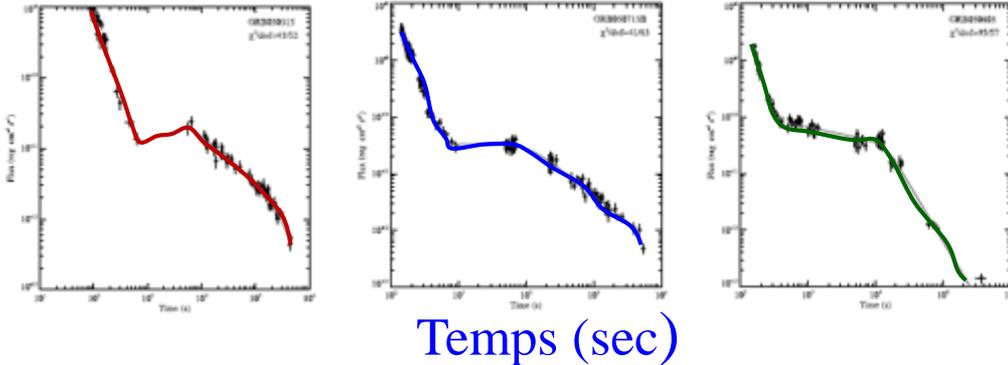
Plateau dans l'afterglow X

1^{ère} phase: soft
Continuation du burst
Puis plus hard → jet

Ré-injection d'énergie?



Plateau dans les X



La moitié des sources
présentent ce plateau

Ré-injection continue d'énergie (*Fan & Xu 2006*)

Si l'évènement de fusion donne lieu à une magnétar,

Il peut y avoir ré-injection continue

Par contre si la fusion donne lieu à un trou noir, c'est moins sûr

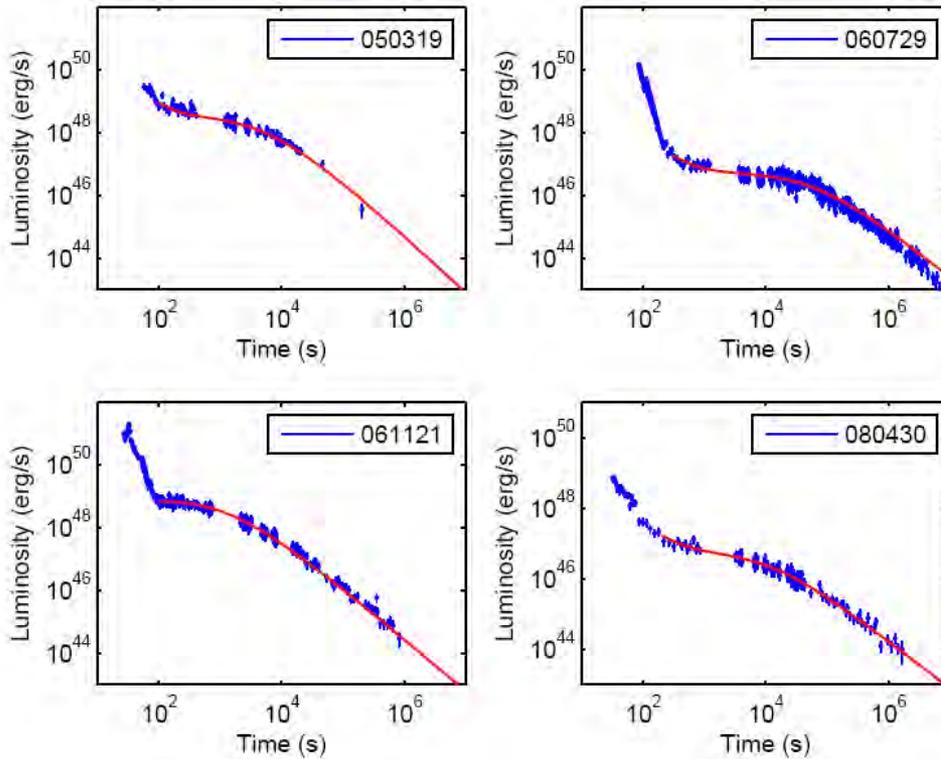
→ Pourrait indiquer la source du GRB

ou bien dû à la structure initiale des éjecta, facteur de Lorentz Γ

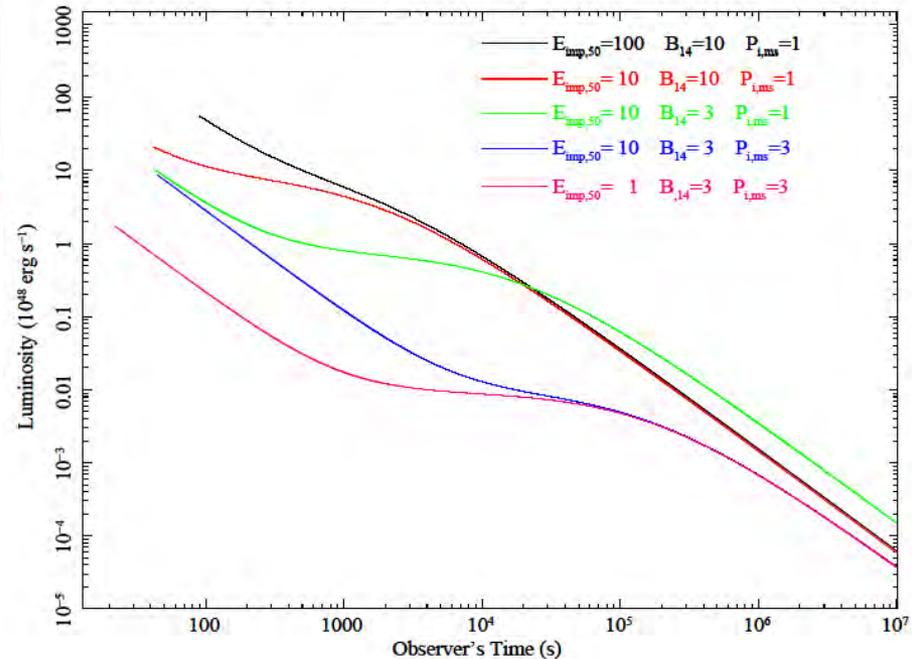
variables avec R et t, avec $E(>\Gamma) \propto \Gamma^{-\beta}$

Rees & Meszaros 1998, Nousek et al. 2006

Plateau des courbes de lumière



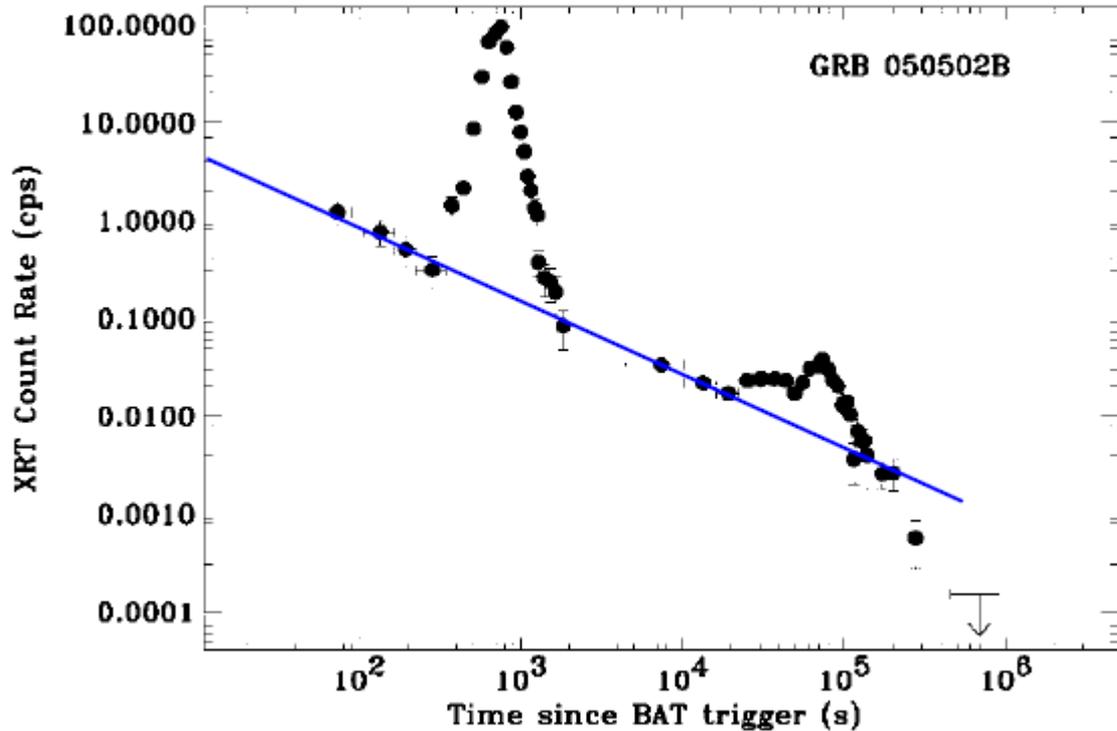
Energie réinjectée par le pulsar
Magnétar $B > 10^{14}G$
simulations numériques par
Dall'Osso et al. 2011
selon E_{GRB} , B , $P_{spin} \sim 1-3ms$



représentent bien les plateaux
des afterglows
avec plusieurs pentes

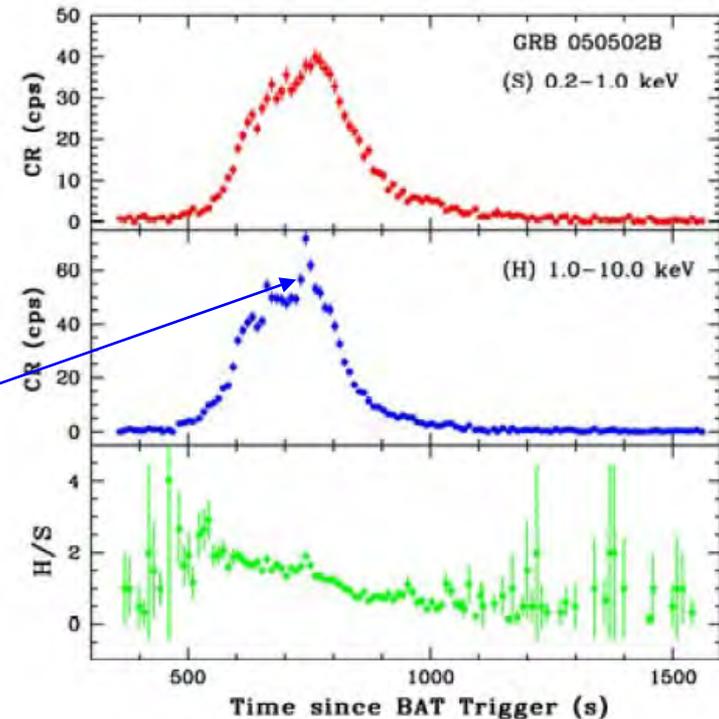
→ L'énergie réinjectée provient
du spin-down du magnétar

Flares X dans les courbes de lumière (XRF)



Un ou plusieurs sursauts, parfois supérieurs en énergie au GRB

Le rapport de dureté H/S monte au début du sursaut
Pic de X-durs indique des chocs internes



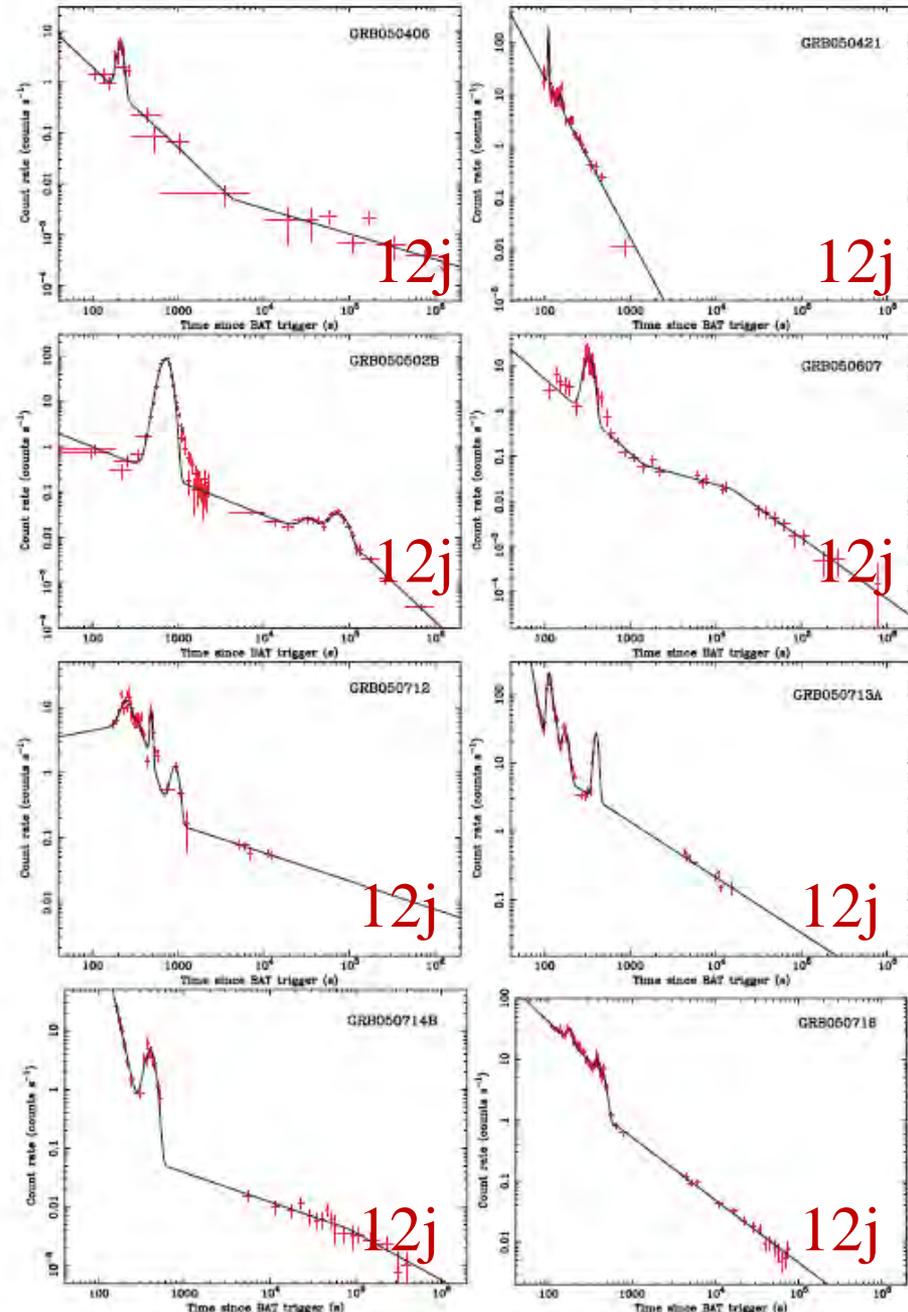
Flares en rayons-X et γ

69 sursauts, S ou L GRB, tout z
Flux anti-corrélé avec t
X et γ : même mécanisme

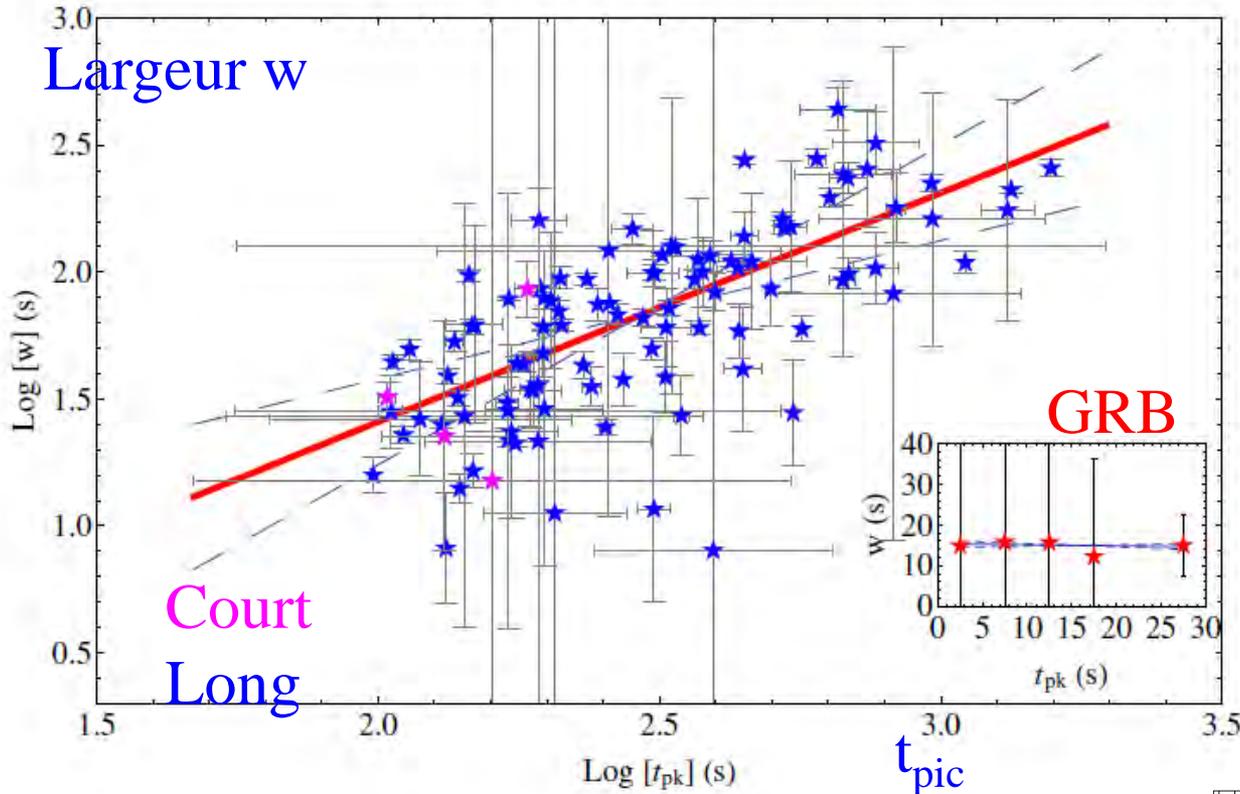
Tous les sursauts peuvent être
expliqués par une activité de
l'objet central

Moins de la moitié par des
chocs internes, dans la boule
de feu, ou jet de l'afterglow

15% ne peuvent être
expliqués que par l'objet central



Statistiques de 113 Flares



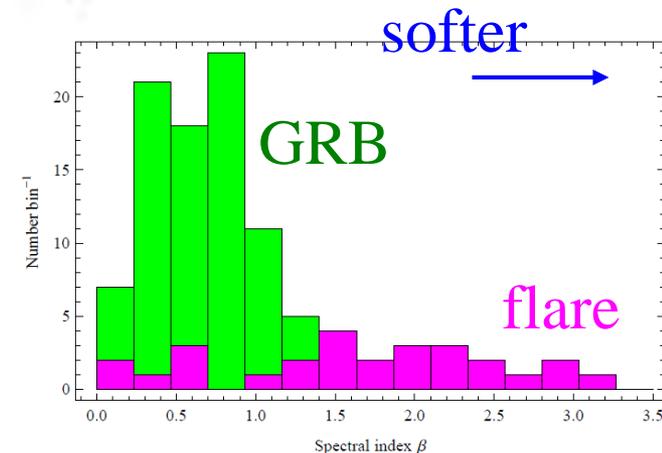
Mécanismes GRB
différent de
l'afterglow

$$w \propto E^{-0.5}$$

Plus étroit à HE

tdécroissance = 2 x t montée

Spectre X devient mou avec le temps



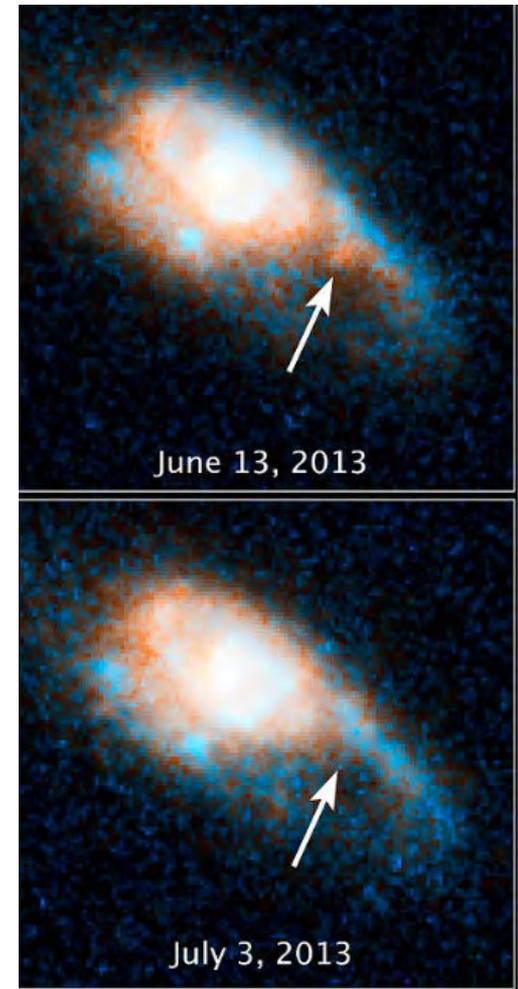
Galaxies hôte



Très différentes selon les courts et les longs

Les longs GRB (hypernova?) sont observés **exclusivement** dans des galaxies à formation d'étoiles, spirales ou mergers

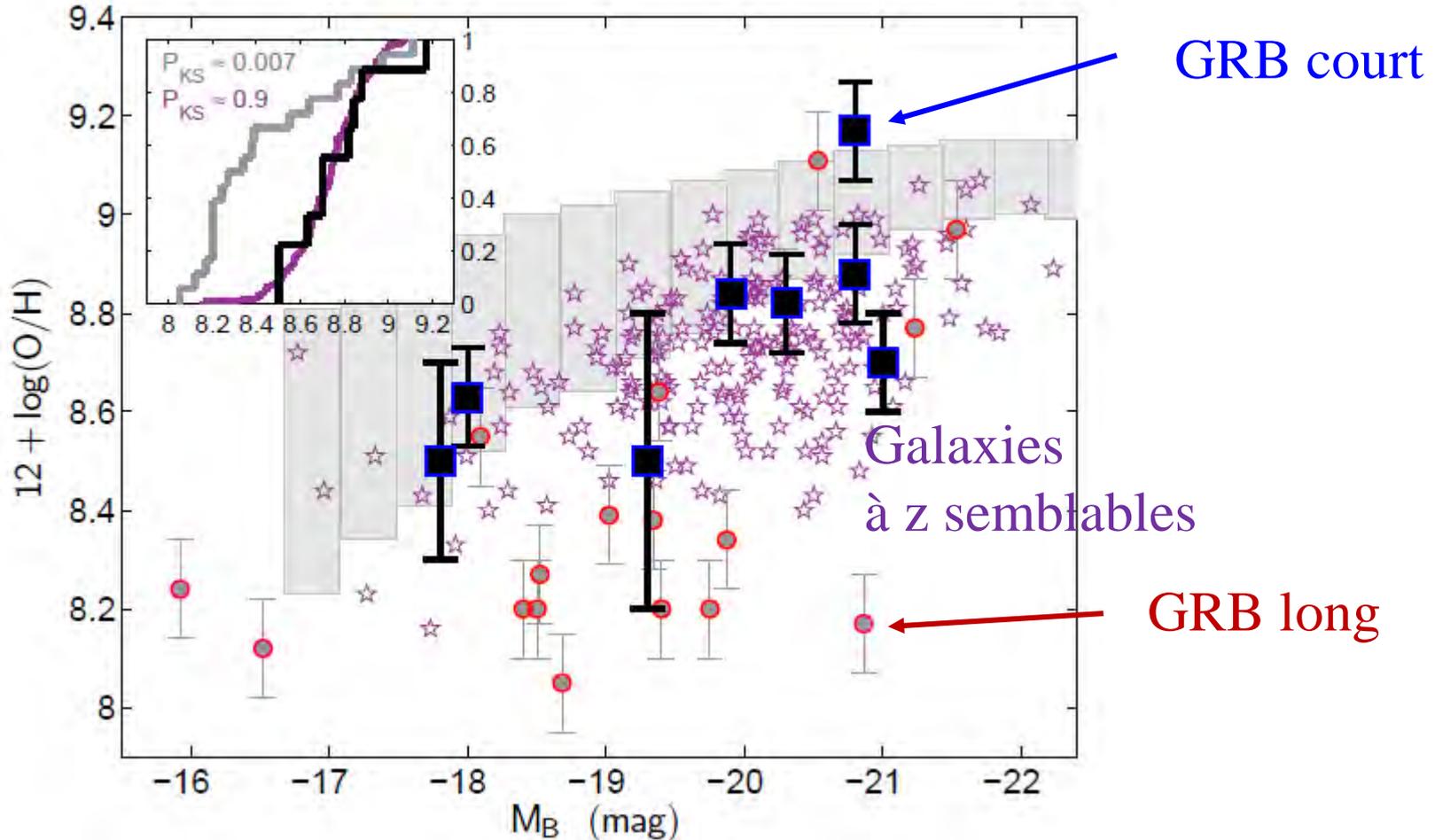
Les courts GRB (NS-NS mergers) dans des galaxies à vieilles populations stellaires, galaxies elliptiques, et souvent dans les parties externes (en plus de galaxies spirales)



SGRB 130603B
kilonova

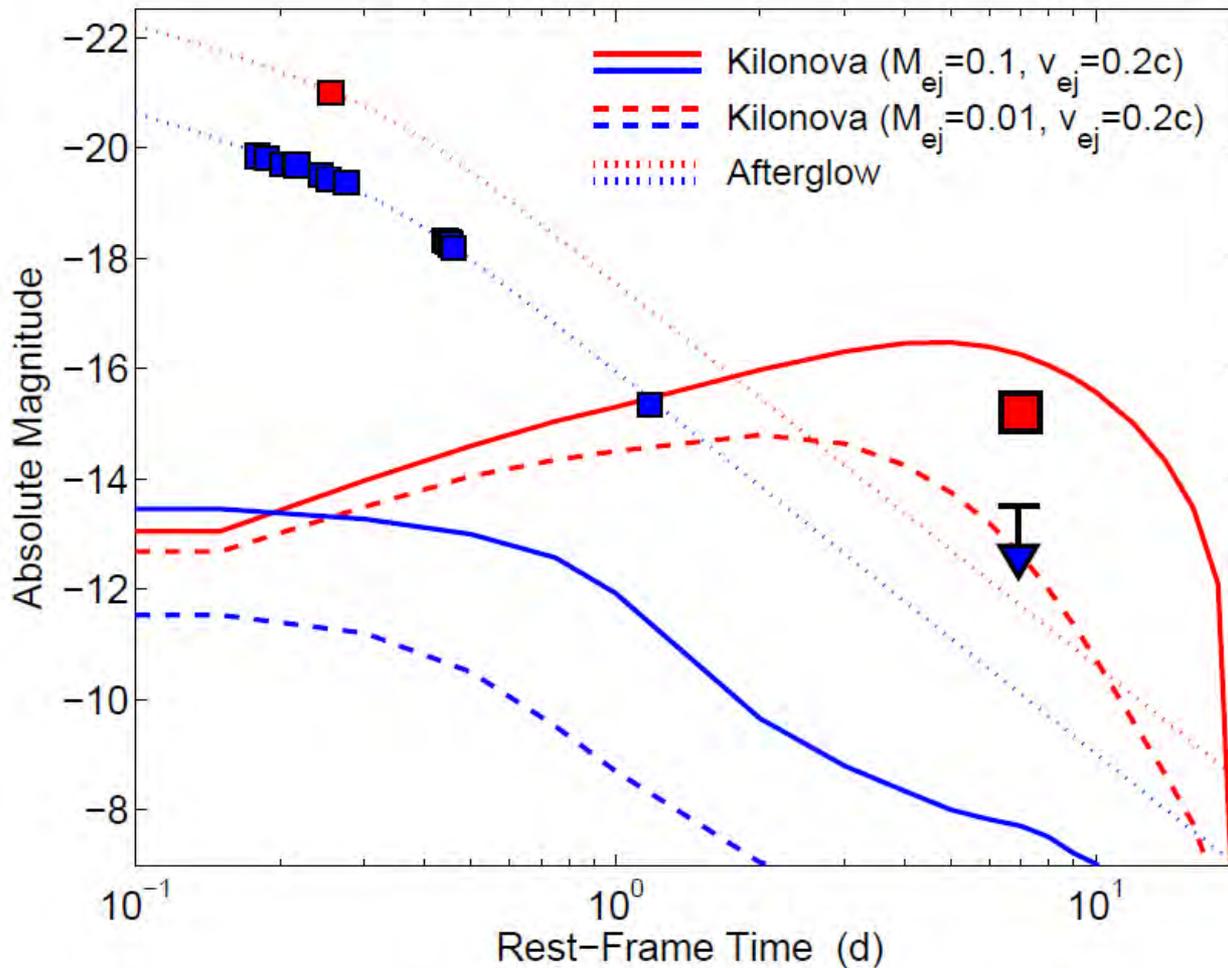
Métallicité

Les galaxies-hôte des GRB longs → faible métallicité



→ Les galaxies-hôte des GRB courts ont la même métallicité que les galaxies de champ normales

Kilonova dans GRB130603B (court)



Kilonova aussi
dans NS-NS
GW170817 Ondes
Gravitationnelles

L'excès de lumière
provient de la
formation par le
r-process des
éléments lourds
Lanthanides

Abondance de neutrons
dans les éjecta

Qu'est-ce qu'une kilonova

Li & Paczynski 1998 (LP98)

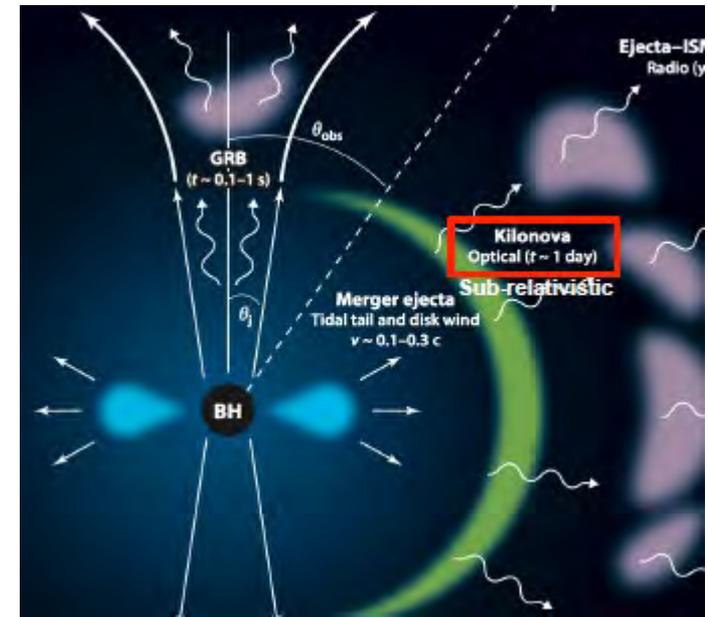
Metzger et al 2010, invente le terme de « kilonova »

Après le sursaut gamma court (accrétion de matière dans
tore en rotation autour du remnant) → jet

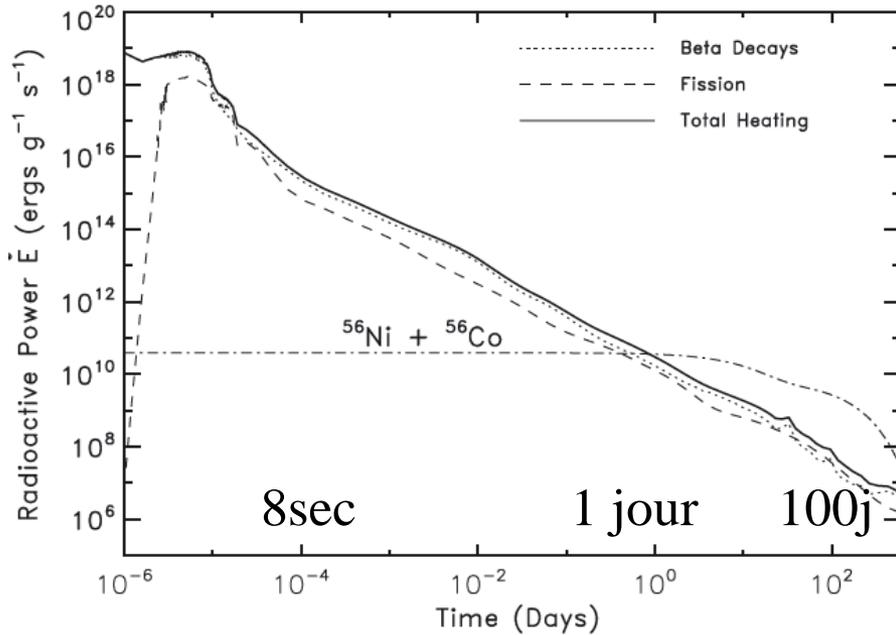
Emission plus isotrope, due à la radioactivité des éjecta
comme une SNIa (^{56}Ni). Ici capture rapide de neutrons
qui ne dure que qqes secondes, mais la
Radioactivité est bcp plus longue

→ 10^{41} erg/s, ou 10^3 L(Eddington) pour $1M_{\odot}$

→ Kilonova, car une nova \sim L(Eddington)

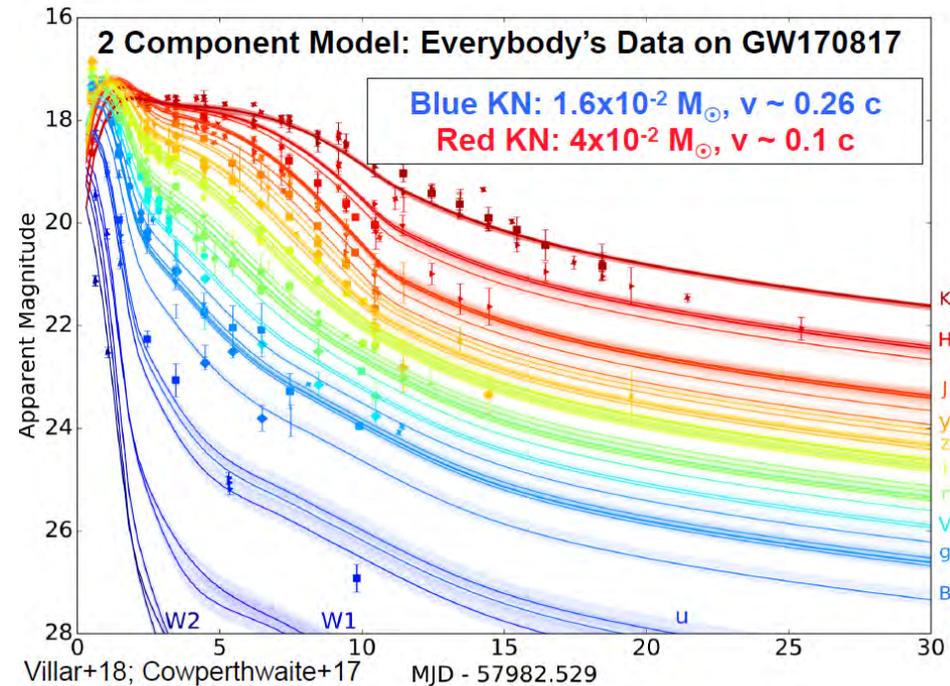


Prédictions de courbes de lumière

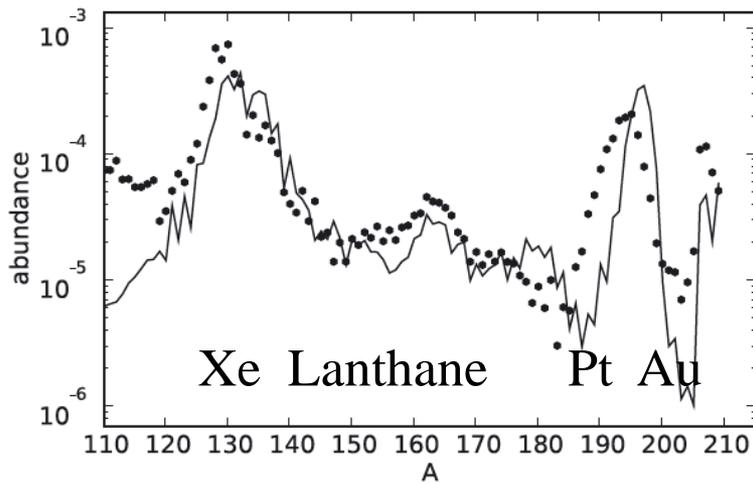


r-process (rapide accrétion de neutrons)

$10^{-2} M_{\odot}$ d'ejecta



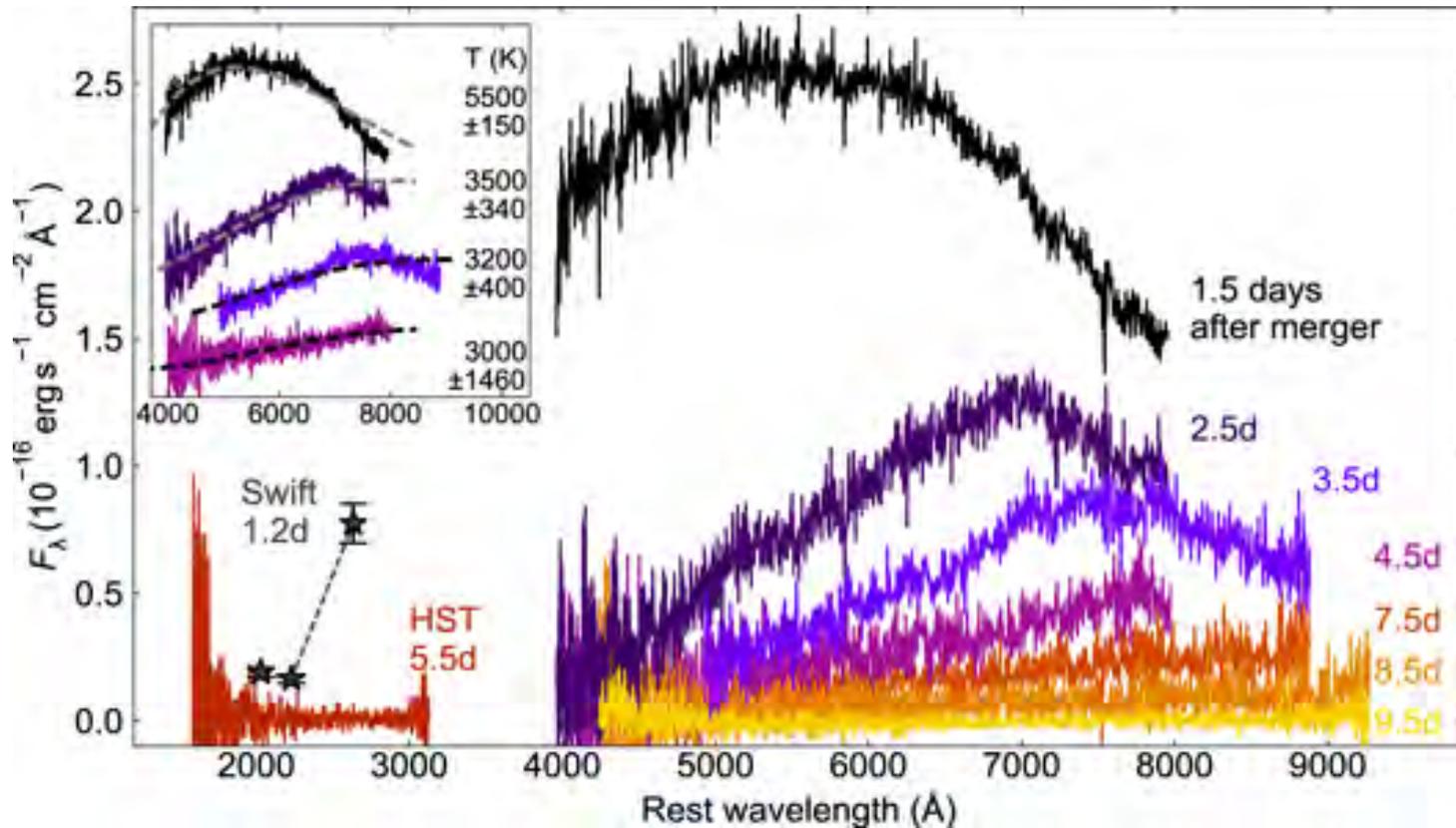
Prédictions des abondances



Points=
r-process dans
le système solaire

Metzger et al 2010

Comparaison avec les observations

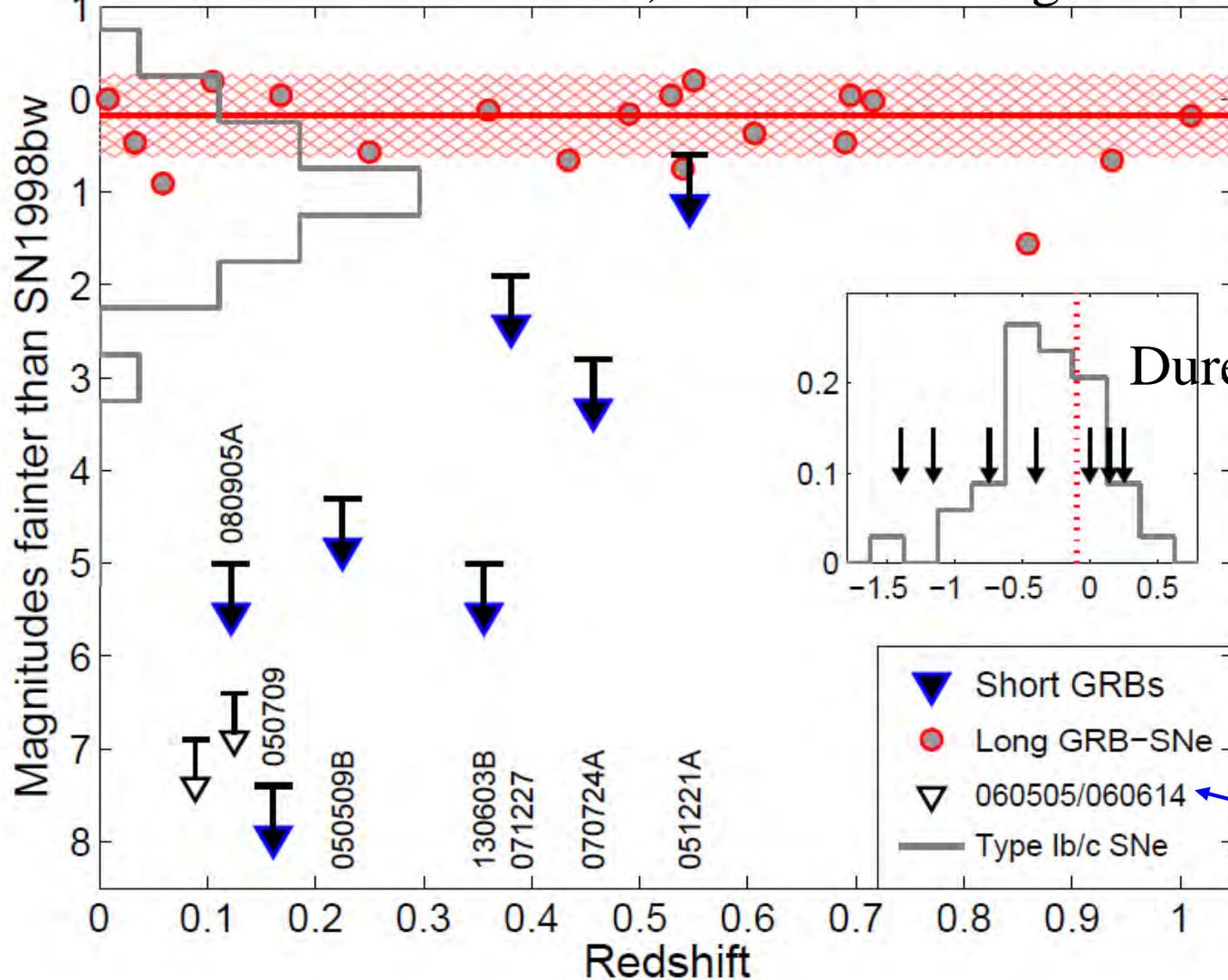


Rougisement du spectre Temp $T=11000$ à 9000 K
Peu de lanthanides à la base, Plus dans les parties externes
 $v \sim 0.3c$ Nicholl et al 2017

Galaxies hôte: supernovae?

Les courts sont moins lumineux, et se trouvent à $0.1 < z < 1.3$

Pas d'association à des SN, même dans les galaxies spirales

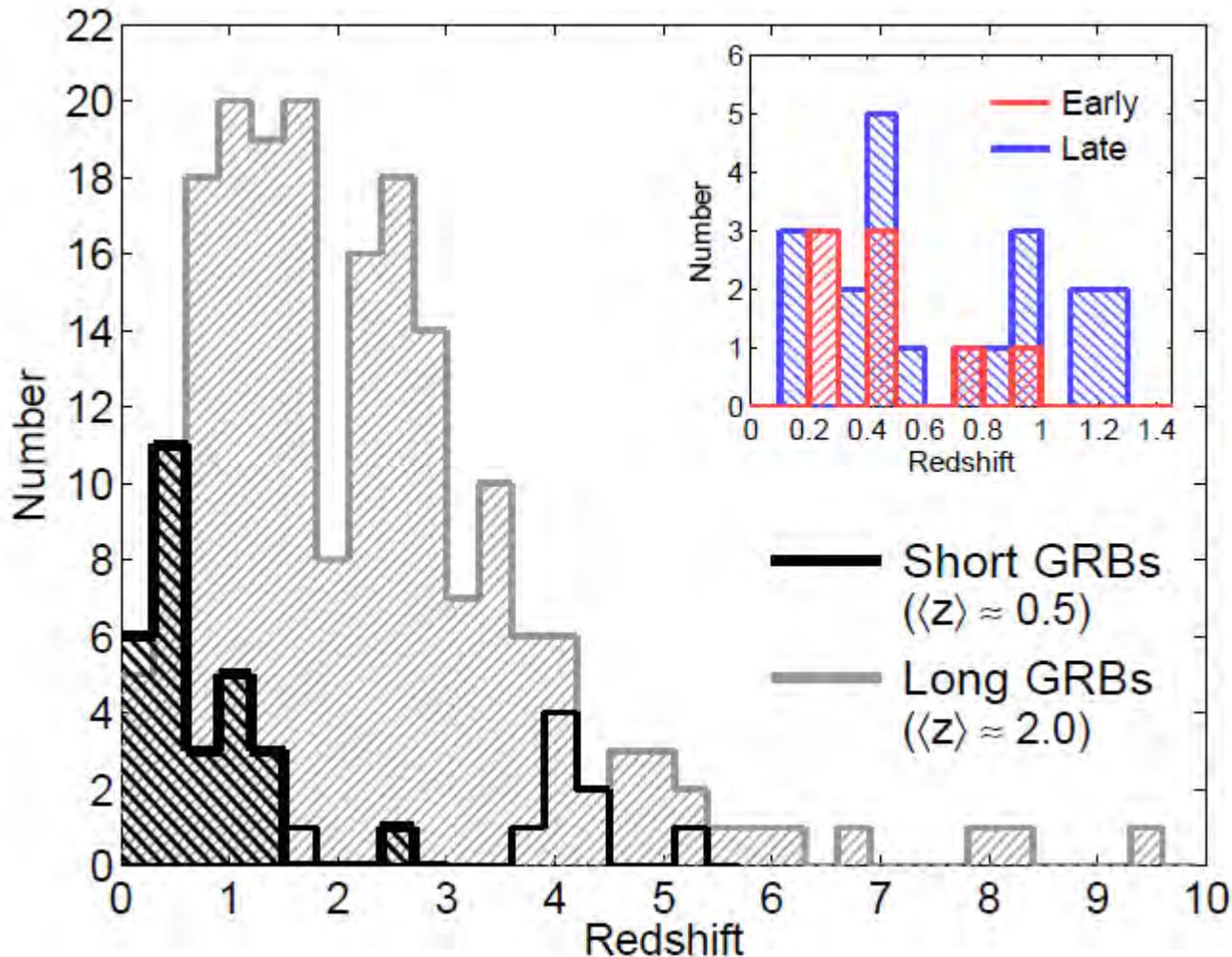


SN1998bw
associé au
long GRB

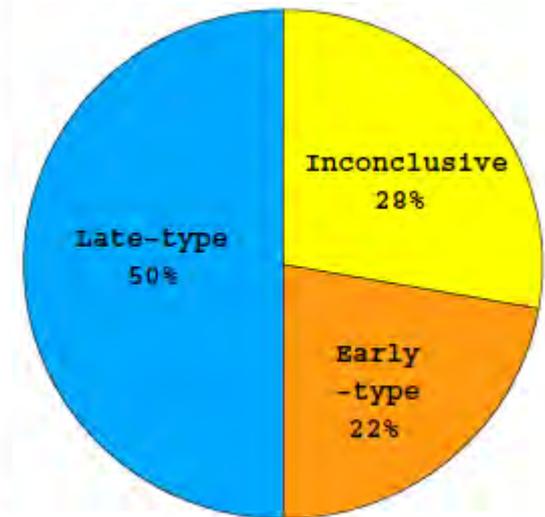
Durée des sGRB

2 GRB longs
sans SN

Galaxies hôte: distribution en redshift

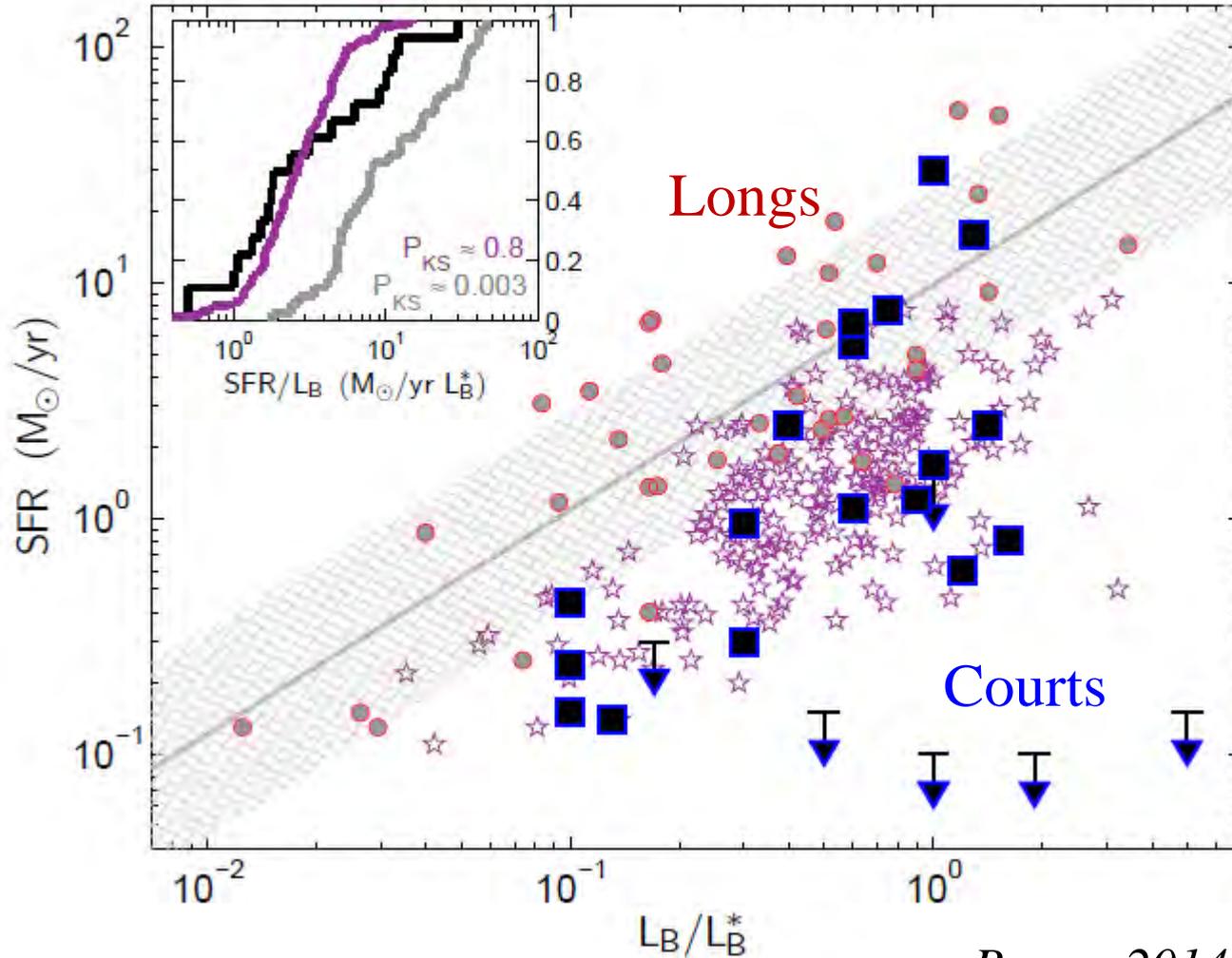


Les GRB courts habitent un mélange de types morphologiques

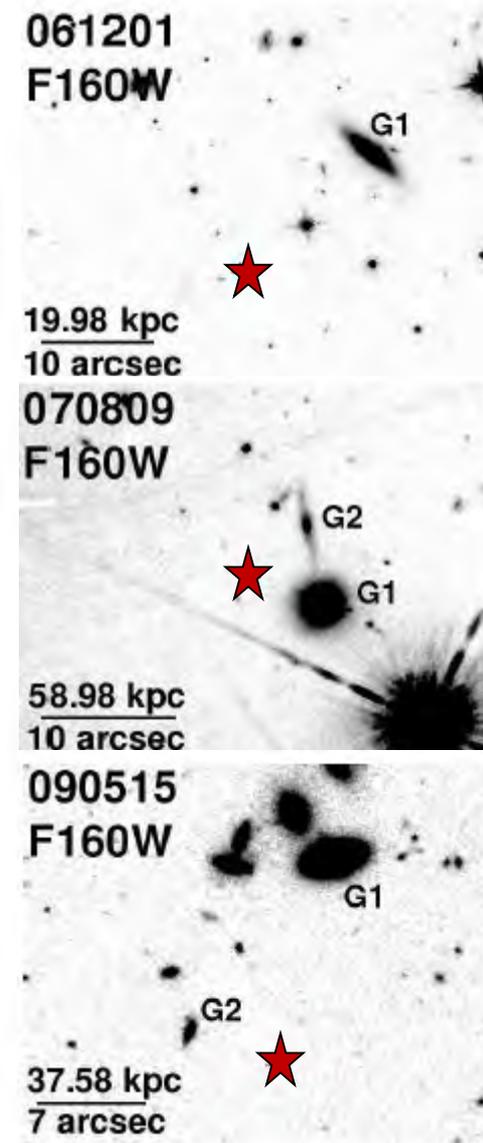


Galaxies hôte: distribution en SFR

Les hôtes des SGRB ont des taux spécifiques de formation d'étoiles bien inférieurs

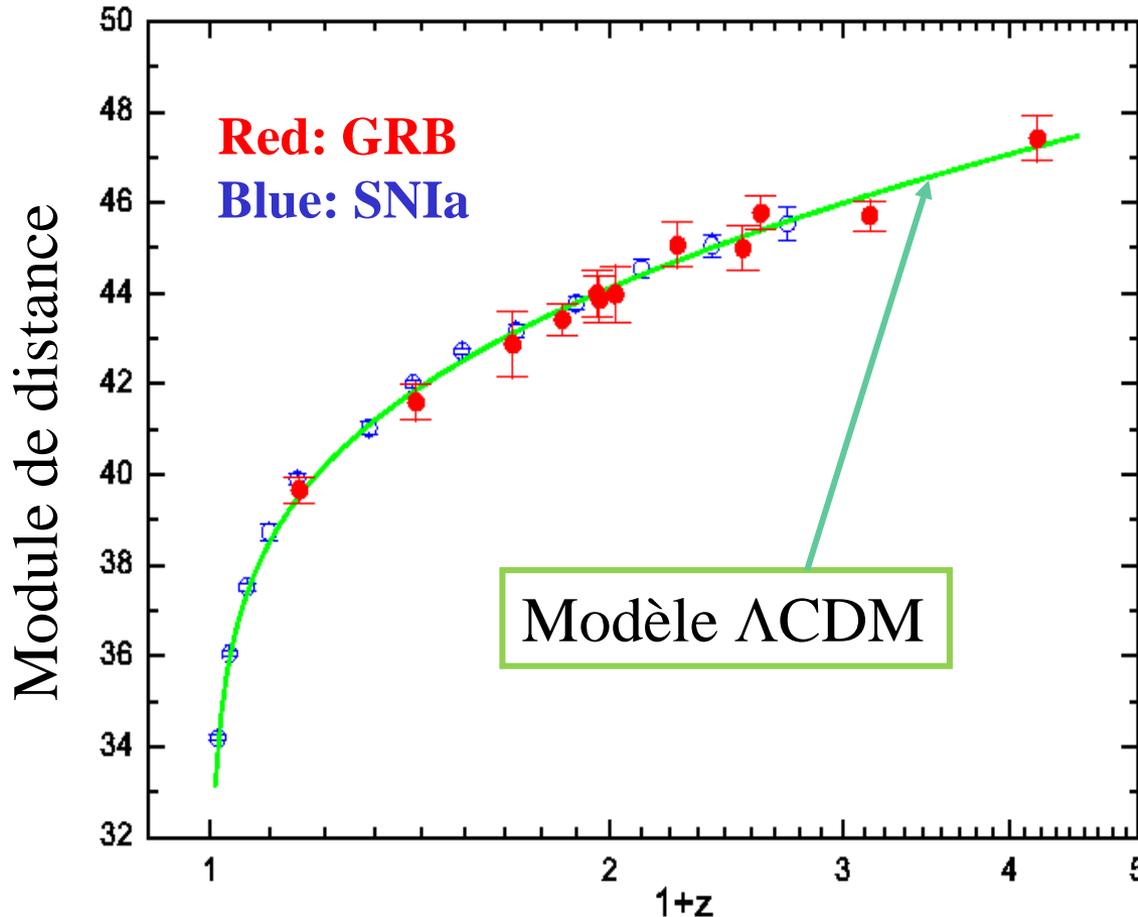


Offset!



Berger 2014

Application à la cosmologie



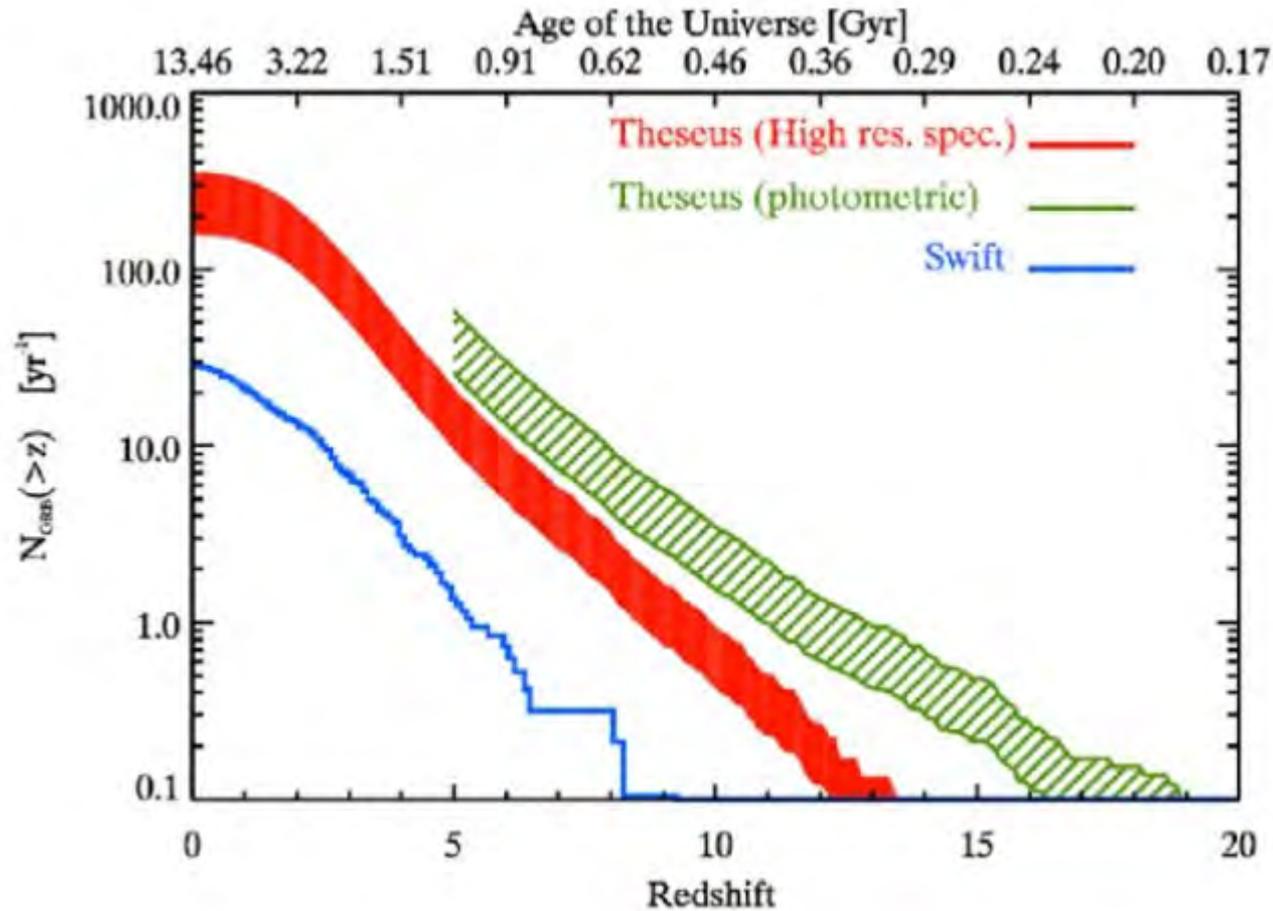
Avantages

- GRB sont détectés à grand z
- Gamma insensibles à l'extinction de la poussière

Le diagramme de Hubble des GRBs est compatible avec les SNe Ia

Perspectives

Projet de satellite IR, X et γ , de l'ESA



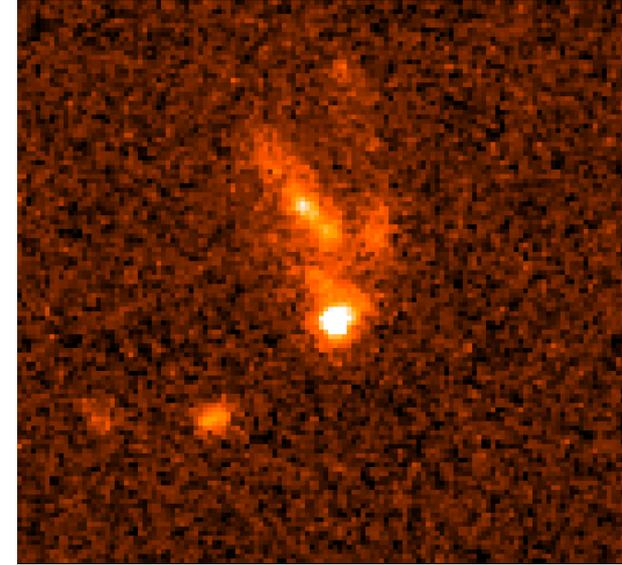
Résumé

Les GRB: bimodalité ($> 2\text{sec}$ ou $< 2\text{sec}$)
Longs : spectre mou, Courts : spectre dur

**→ Afterglow, permet d'identifier
la galaxie, le redshift, la nature de l'objet
central, le Beaming**

→ Galaxies-hôte: Longs uniquement spirales, mergers
Formation d'étoiles, faible métallicité
Courts: mixtes, vieille population

**→ Applications: exploration du milieu
Intergalactique, Cosmologie**



Sursaut gamma