

# Les sursauts $\gamma$

J.L. Atteia, CESR

Robert Mochkovitch, IAP

ARTICLE DE FOND

Les auteurs nous offrent un exposé très complet des connaissances actuelles sur les sursauts  $\gamma$ , sujet aussi difficile que passionnant. Après un bref historique ils nous explicitent les propriétés que l'on peut dégager de l'observation.

Les modèles théoriques de sursauts  $\gamma$  seront développés dans le CC n° 100.

## Introduction et historique

Les sursauts gamma sont des éclairs de rayonnement gamma, à la fois brefs et très puissants, qui atteignent chaque jour la Terre. L'origine de ce phénomène astrophysique remarquable est restée longtemps mystérieuse puisque c'est seulement à partir de 1997 que les astrophysiciens ont véritablement espéré résoudre l'énigme posée par ces sources qui les intriguaient depuis le début des années 1970. Ces longues années d'études et d'observations ont donné lieu à de multiples tâtonnements, fausses pistes et rebondissements et représentent sans doute l'un des feuilletons scientifiques les plus passionnants de la fin du 20<sup>e</sup> siècle, illustrant parfaitement les incertitudes de la recherche scientifique.

La découverte proprement dite des sursauts a été le fruit du hasard. Ce sont les satellites militaires américains de la série Vela lancés dans les années 1960 qui, les premiers, observèrent des bouffés intenses de rayons gamma en provenance de l'espace. Après quelques années d'observation, et ayant constaté que ces événements provenaient bien de sources célestes et non d'explosions nucléaires provoquées par

l'homme dans l'espace, les militaires confièrent le problème aux astrophysiciens...

Dès la parution en 1973 de l'article mentionnant la découverte des sursauts plusieurs groupes, aux Etats Unis, en France et en Union Soviétique, se lancèrent dans la réalisation de détecteurs pour les observer. Dans la lignée des détecteurs militaires, les instruments scientifiques des années 1980 et 1990 étaient relativement simples. Ils ne fournissaient pas d'emblée la direction des sursauts, mais deux techniques permettaient de la reconstruire a posteriori. La première donnait une idée grossière de la direction des sources par la comparaison des flux de photons tombant sur des détecteurs ayant des orientations différentes. Elle a été longtemps utilisée par les russes, puis plus récemment par les américains avec l'expérience BATSE. La seconde était basée sur la mesure exacte du temps d'arrivée du sursaut sur plusieurs satellites répartis dans le Système Solaire. Cette seconde méthode offrait une précision bien supérieure (de l'ordre de la minute d'arc), mais elle avait l'inconvénient de faire appel aux données de plusieurs satellites (d'équipes souvent concurrentes), ce

qui explique qu'un délai de plusieurs semaines était en général requis pour obtenir les positions finales. En France, le CESR (Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements) s'est particulièrement impliqué dans cette seconde voie avec pour objectif l'obtention de positions fiables. Ces travaux ont abouti, à la fin des années 1980 à la publication d'un important catalogue de positions précises de sources.

Malgré ces efforts, les sursauts gamma ne semblaient pouvoir être associées à aucun objet bien identifié (pulsars, quasars, sources X, étoiles variables). Les boîtes d'erreur restaient désespérément vides, comme si une fois le sursaut passé, ne subsistait aucune trace de la source qui l'avait produit... En plus de cette absence têtue de lien avec des objets connus, deux observations troublaient les astrophysiciens. Il s'agissait de l'isotropie de la distribution des sursauts sur le ciel et de l'absence d'émission X permanente en provenance des sources. L'isotropie posait problème car elle ne reflétait pas la célèbre structure aplatie de notre Galaxie. Il fallait donc supposer que les sursauts se produisaient tout près du Soleil (à quelques centaines de parsecs tout au plus). Mais alors pourquoi ne voyait-on pas les sources en rayons X alors que ces radiations avaient déjà permis la découverte de plusieurs populations nouvelles d'étoiles à neutrons dans toute la Galaxie.

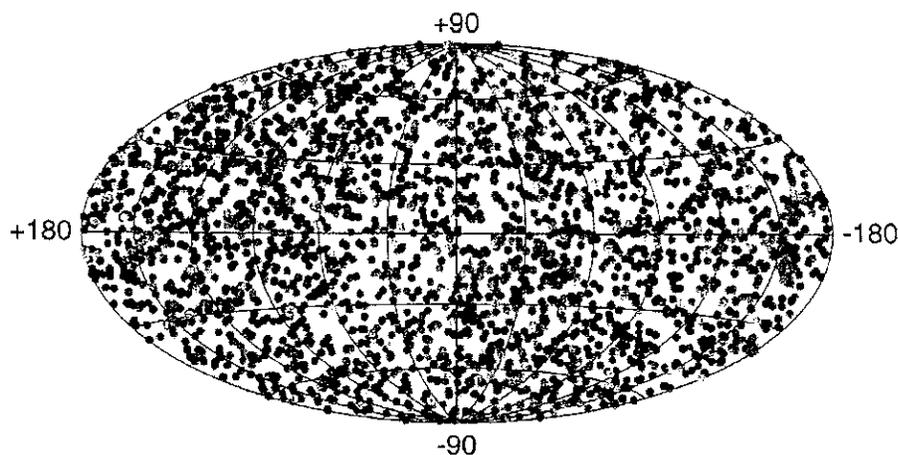
En dépit de ces questions la majorité des astrophysiciens demeurait convaincue que le lien finirait par être établi entre les sursauts et une sous-population particulièrement discrète d'étoiles à neutrons ou de trous noirs de notre Galaxie<sup>1</sup>. C'est pourquoi les premières observations de BATSE étaient attendues avec impatience. Cet instrument, placé sur le gros satellite américain d'astronomie gamma Compton GRO, emportait des détecteurs 10 à 20 fois plus sensibles que tous ceux qui avaient volé auparavant. Il ne faisait aucun doute que si les sursauts étaient situés dans notre Galaxie, BATSE les détecterait dans un grand volume et produirait enfin une carte les montrant concentrés dans le plan du disque galactique...

## Les observations

### Propriété globales.

Les premiers résultats de BATSE tombèrent six mois environ après le lancement. La carte de la distribution sur le ciel des 153 premiers sursauts (BATSE "voit" environ un événement par jour) fut publiée dans le journal "Nature" en Janvier 1992. Elle ne laissait pas plus entrevoir la structure galactique que toutes celles qui l'avait précédée. Après la publications de ces observations il fallut donc abandonner définitivement l'idée d'une genèse des sursauts au sein de notre Galaxie. A la fin de la mission, après neuf ans de fonctionnement, le nombre de sursauts vus par BATSE dépasse 2700 et la carte obtenue (fig. 1) continue à ne montrer aucun écart significatif à l'isotropie.

## 2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



**fig. 1 : distribution de tous les sursauts vus par l'expérience BATSE. Il n'y a aucun écart mesurable à l'isotropie.**

Les données de BATSE contenaient par ailleurs une autre information capitale, relative cette fois à l'homogénéité de la distribution des sursauts.

La relation  $\text{Log } N - \text{Log } P$  qui donne le nombre d'événements plus brillants qu'un flux donné  $P$  de photons est simplement une droite de pente  $-3/2$  dans le cas de sources réparties de manière homogène dans un espace euclidien. Les données de BATSE suivaient effectivement une droite de pente  $-3/2$  pour les sursauts brillants mais présentaient un "manque" significatif de sursauts faibles. Cette observation pouvait s'interpréter de deux façons différentes: la première consistait à supposer que les sursauts restaient des objets relativement proches appartenant à un grand halo sphérique centré sur notre Galaxie. L'absence de composante dipolaire détectable dans la répartition des sources sur le ciel (alors que le Soleil se trouve à 8 kpc du centre de la Galaxie) imposait par ailleurs à ce halo d'avoir un rayon dépassant 100 kpc. Dans cette hypothèse, l'écart à la droite de pente  $-3/2$  traduisait simplement la diminution du nombre de sources à la périphérie du halo. L'autre possibilité était bien sûr de placer les sursauts à distance cosmologique. L'isotropie était alors naturellement expliquée : à des décalages vers le rouge  $z$  voisins de l'unité, la forme de la courbe  $\text{Log } N - \text{Log } P$  s'interprétait par des effets cosmologiques.

Le débat entre tenants de ces deux explications est resté vif pendant 5 ans avant qu'en 1997 les observations du satellite "Beppo" SAX conduisent à la première mesure de distance pour un sursaut et confirment l'hypothèse cosmologique.

## Propriétés temporelles.

Les sursauts gamma sont des événements intrinsèquement courts mais dont la durée couvre malgré tout six ordres de grandeur depuis quelques millisecondes jusqu'à mille secondes environ. L'historgramme des durées présente deux pics bien définis, le premier autour de quelques dixièmes et le second autour de quelques dizaines de secondes.

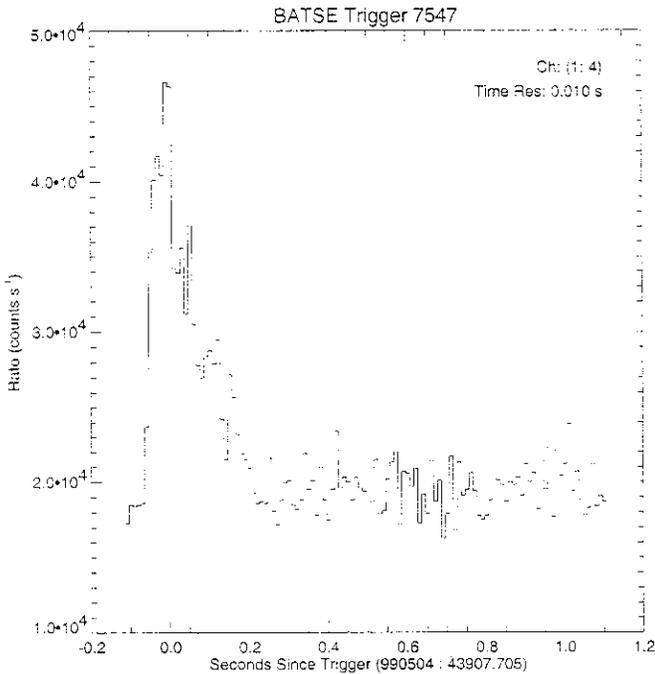


Figure 2a : Exemple de sursaut court

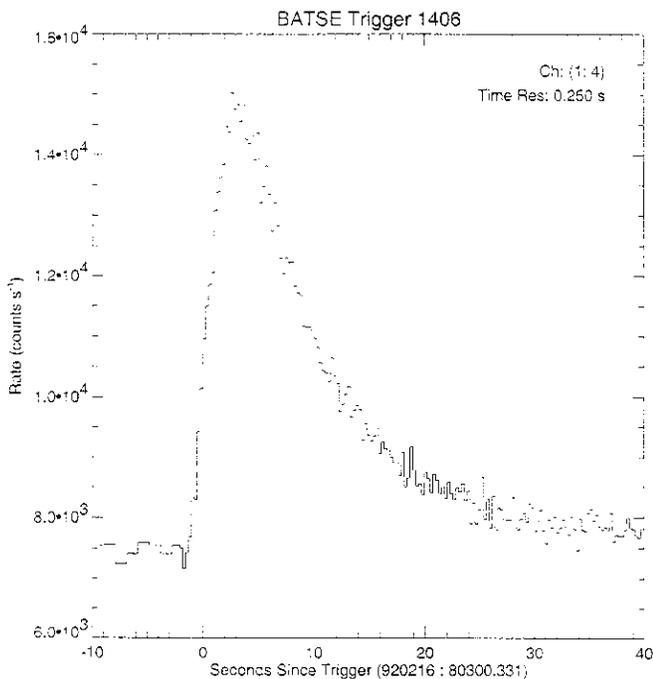


Figure 2b : Exemple de sursaut long simple

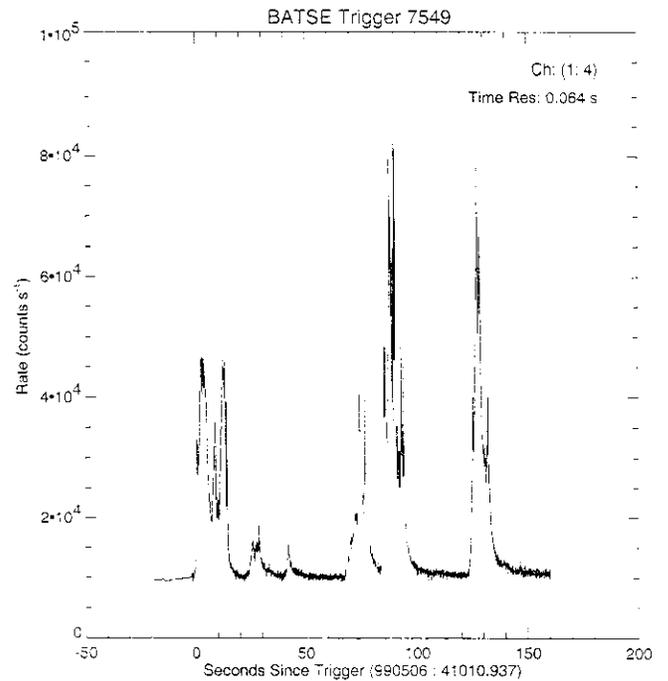


Figure 2c : Exemple de sursaut long complexe

Cette séparation nette pourrait indiquer des origines différentes pour les sursauts courts et les sursauts longs mais cette question reste encore largement débattue.

Les profils temporels des sursauts montrent par ailleurs une très grande diversité (fig. 2a - 2b - 2c). Certains présentent une évolution simple avec un pulse unique d'intensité. La montée est en général rapide et le déclin quasi-exponentiel ce qui a conduit à qualifier de "FRED" pour "Fast Rise Exponential Decay" ce type de profil. D'autres sont beaucoup plus complexes avec une succession de pics bien séparés ou au contraire se chevauchant partiellement. Ils peuvent le plus souvent être analysés en terme d'une superposition de pulses élémentaires chacun étant de type "FRED". La variabilité temporelle est rapide, et peut être présente à de nombreuses échelles à l'intérieur d'un même sursaut. Dans certains cas, elle atteint le niveau de la milliseconde.

## Propriétés spectrales.

Le spectre des sursauts gamma est non thermique c'est à dire différent d'un corps noir. Entre 10 keV et quelques MeV, il peut, dans la majorité des cas, être caractérisé par un collage de deux lois de puissance

$$N(E) \propto E^{-\alpha} \text{ pour } E < E_0 \text{ et } N(E) \propto E^{-\beta} \text{ pour } E > E_0$$

où  $N(E)$  est la densité de flux des photons reçus (en photons.cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> keV<sup>-1</sup>). Les valeurs caractéristiques des indices spectraux  $\alpha$  et  $\beta$  sont  $0,6 < \alpha < 1,5$  et  $2 < \beta < 3$  et l'énergie de transition  $E_0$  est de l'ordre de quelques centaines de keV. Au-dessus de 500 keV seule une fraction des sursauts émet

de manière notable et dans quelques cas le spectre en loi de puissance se poursuit au-delà de 10 MeV. A beaucoup plus haute énergie quelques sursauts ont été détectés par l'expérience EGRET également à bord de Compton GRO. Des photons de plusieurs GeV ont été observés parfois longtemps après la fin de l'émission gamma classique. Le record<sup>2</sup> en ce domaine appartient à GRB 9402172 où un photon de 18 GeV a été détecté 5000 s après la fin du sursaut. A basse énergie, l'émission X entre 2 et 10 keV prolonge l'émission gamma tout en continuant à suivre un spectre proche d'une loi de puissance. Par contre aucune information n'est aujourd'hui disponible sur les domaines UV et X très mou et ce n'est que dans le visible que des observations sont à nouveau disponibles.

La présence ou l'absence de raies dans le spectre des sursauts a fait l'objet de nombreuses controverses. Certaines expériences russes et le satellite japonais GINGA indiquaient l'existence "d'accidents spectraux" qui furent interprétés comme des raies cyclotron (à quelques dizaines de keV) ou d'annihilation électron-positron vers 500 keV. Aucune de ces raies ne fut confirmée par l'expérience BATSE pourtant plus sensible, de sorte que leur réalité est aujourd'hui fortement contestée. Cette question est tout à fait critique car la plupart des modèles actuels cherchant à expliquer l'émission gamma des sursauts sont incompatibles avec la présence de raies cyclotron ou d'annihilation électron-positron.

### Liens entre les propriétés temporelles et les propriétés spectrales.

La recherche de liens entre les propriétés temporelles et les propriétés spectrales des sursauts revêt une grande importance car celles-ci fournissent souvent des tests contraignants pour les modèles. La relation la mieux établie analyse la dureté des sursauts en fonction de leur durée. La dureté est définie comme le rapport du nombre de photons reçus dans deux bandes d'énergie différentes. La fig.3 montre ainsi les résultats de l'expérience PHEBUS qui utilise les bandes 120 - 320 keV et 320 - 7000 keV. Une nette distinction apparaît, séparant les sursauts courts (de durée  $t < 2$  s) qui sont globalement plus durs que les sursauts longs ( $t > 2$  s). Le même type de relation est retrouvée en utilisant d'autres bandes spectrales, en particulier celles de l'expérience BATSE.

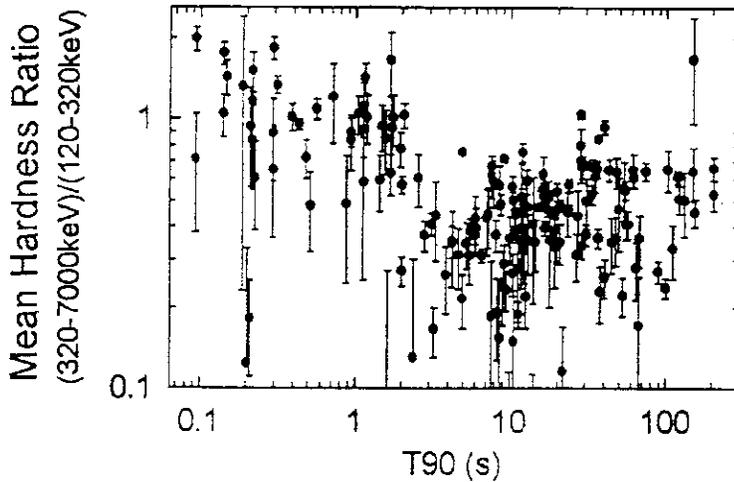


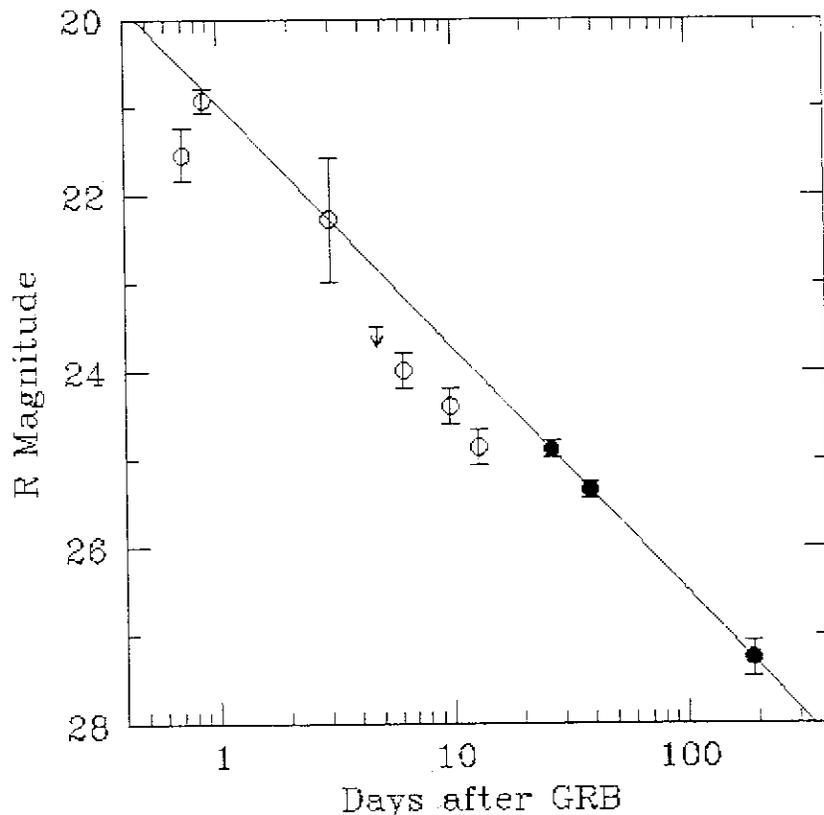
fig. 3 : Relation durée - dureté pour un échantillon de sursauts observés par l'expérience PHEBUS.

La relation durée-dureté concerne la dureté globale du sursaut prenant en compte l'ensemble des photons reçus. Il est également possible d'obtenir la dureté "instantanée" en découpant le sursaut en un certain nombre d'intervalles de temps sur lesquels la dureté est mesurée individuellement. La dureté instantanée apparaît fortement corrélée à l'intensité tout au long du sursaut mais à l'intérieur des pulses le maximum de dureté précède légèrement le maximum d'intensité. La forme des pulses évolue également en fonction de l'énergie d'observation. Leur largeur suit une loi de la forme  $W(E) \propto E^{-0.4}$  de sorte qu'ils sont environ deux fois plus minces à 300 keV qu'à 50 keV.

### Les contreparties à plus basse énergie.

Pendant la période qui suivit l'annonce des résultats de BATSE il devint clair que la controverse qui persistait sur l'échelle de distance des sursauts ne pourrait être levée que par l'observation de contreparties à basse énergie, en particulier dans le domaine visible. La recherche de contreparties à partir des observations gamma était virtuellement impossible en raison de la dimension des boîtes d'erreur (plusieurs degrés pour BATSE). A l'intérieur de plusieurs degrés le nombre d'objets détectables par un grand télescope est en effet si important qu'une éventuelle contrepartie n'avait que très peu de chance d'être retrouvée. Les boîtes d'erreur plus petites obtenues par triangulation entre plusieurs satellites étaient quant à elles disponibles trop tardivement pour détecter une source rapidement déclinante. Le satellite italo-néerlandais "Beppo" SAX (du nom du physicien italien Giuseppe "Beppo" Occhialini) lancé en Avril 1996 a enfin permis de résoudre le problème. Doté à la fois d'un détecteur de sursauts gamma et de télescopes X, il tira parti de la résolution voisine de la minute d'arc accessible dans le domaine X pour donner en moins d'une heure la position précise des sursauts qu'il détectait. Il devenait alors possible de rechercher une contrepartie optique à l'aide de grands télescopes et la première fut effectivement découverte le

28 Février 1997. Il s'agissait d'un objet initialement de magnitude 21 mais faiblissant rapidement. Le flux déclinait en suivant une loi de puissance  $F \propto t^{-1,2}$  en accord avec des prédictions théoriques antérieures à l'observation (fig.4). La contrepartie était entourée d'une nébulosité à peine visible qui, s'il s'agissait de la galaxie hôte du sursaut, indiquait que l'objet se trouvait à très grande distance. L'hypothèse d'une origine cosmologique des sursauts était confortée mais manquait encore une preuve plus directe.



**Figure 4 : Courbe de lumière (dans le rouge) de l'afterglow du sursaut GRB 970228.**

**L'évolution est proche d'une droite en coordonnées Log -- Log (la magnitude étant une échelle logarithmique) ce qui correspond à un déclin en loi de puissance.**

Celle-ci est venue deux mois plus tard avec l'observation du sursaut GRB970508. Le spectre de sa contrepartie optique obtenu avec le télescope Keck II (de 10 m de diamètre) a en effet montré la présence de fines raies d'absorption du fer et du magnésium affecté d'un décalage vers le rouge  $z = 0,835$ . Ces raies sont la trace de la présence sur la ligne de visée de gaz appartenant probablement à la galaxie hôte, située à plusieurs milliards d'années-lumière. Depuis lors, une dizaine d'autres décalages ont été mesurés entre  $z = 0,42$  et  $z = 4,5$  confirmant de manière quasi-définitive<sup>3</sup> l'échelle de distance cosmologique pour les sursauts.

Les contreparties découvertes grâce à "Beppo" SAX correspondent à des émissions postérieures au sursaut gamma proprement dit et ont été baptisées "afterglows" par les anglo-saxons. Selon les cas elles peuvent être étudiées de quelques semaines à quelques mois (le record appartenant à GRB970228 dont la courbe de lumière a été suivie pendant près de six mois) avant de devenir inobservables.

Des contreparties radio ont également été détectées et celle du sursaut GRB970508 a donné lieu à un résultat tout à fait remarquable. La source radio associée au sursaut a d'abord présenté des scintillations qui ont cessé au bout d'une semaine environ. Les scintillations sont dues aux fluctuations de densité électronique dans le milieu interstellaire et se manifestent tant que la dimension angulaire de la source n'excède pas une certaine limite (de la même manière que les étoiles scintillent mais pas les planètes). L'estimation de la taille angulaire de GRB970508 après une semaine a ainsi montré que le gaz émetteur devait être en expansion relativiste sans qu'il soit cependant possible de déterminer de façon précise son facteur de Lorentz.

Un autre type de contrepartie optique fut enfin découvert sur le sursaut GRB990123 situé à  $z = 1,6$ . Moins de 5 secondes après sa découverte par BATSE, et grâce à un réseau d'alerte sophistiqué, il put être pointé par une caméra automatique à grand champ quiregistra une émission de lumière visible atteignant la magnitude 9. Si le sursaut s'était trouvé dans notre Galaxie, à une distance de 1000 années-lumière par exemple, son éclat aurait dépassé pendant quelques secondes celui du Soleil !!! Cette émission très précoce, contemporaine de l'émission gamma, est mal comprise mais a probablement une cause différente de celle de l'afterglow.

#### Notes

1 - Il faut malgré tout souligner que certains astronomes, plus audacieux ou perspicaces que leurs collègues, suggéraient déjà que les sursauts puissent provenir des confins de l'Univers, et correspondre à des explosions plus fantastiques encore que celles des supernovae.

2 - La notation utilisée donne la date du sursaut. Ainsi GRB 940217 est le sursaut (Gamma-Ray Burst) du 17 Février 1994.

3 - Un des sursauts détecté par "Beppo" SAX pourrait malgré tout être associé à une supernova relativement proche à  $z \sim 0,01$ .