

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MENTOURI-CONSTANTINE

FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° Ordre :

Série :

MÉMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de Magister en physique

Spécialité : Astrophysique

Thème

Les Galaxies hôtes des sursauts gamma

Présenté par

Hamid HAMIDANI

Soutenance le 02/12/2010

Devant le jury :

Président :

M. Nourredine Mébarki

Prof. Univ. Mentouri Constantine

Rapporteur :

M. Nidhal Guessoum

Prof. Univ. Américain Sharjah

Examineurs :

M. Achour Benslama

Prof. Univ. Mentouri Constantine

M. Nassim Seghouani

Maître de Recherche CRAAG Alger



Université de Mentouri, Constantine, Algérie

“La science exige de l’homme sa vie entière.
Et même si vous aviez deux vies, elles ne suffiraient pas.”

Ivan Pavlov

Préface

Dénouer l'énigme des GRBs s'avère une tâche ardue pour les chercheurs, pour essayer de comprendre ce phénomène, leurs efforts ressemblant à ceux d'un bonhomme enchaîné au fond d'une caverne les oreilles bouchées dans une nuit sombre le visage face au mur, et arrive à peine à voir à travers le bandage qu'il a sur les yeux, et qui a comme tâche de comprendre ce qui se passe à l'extérieur. Par l'intermédiaire de la lumière de la lune, ou celle des étoiles, reflétée sur le mur du fond, ou par l'intermédiaire de ce qu'il arrive à peine à entendre. L'information existe, ce serait parfait s'il pouvait ressentir le rayonnement infrarouge, mais un homme ordinaire comme lui en est incapable, il faut qu'il soit spécial, qu'il croit toujours et qu'il n'abandonne pas. De toute façon s'il est assez intelligent pour savoir que la clé est dans le rayonnement infrarouge ce n'est déjà pas mal !

Notre incapacité de voyager à travers l'Univers vers les sites des GRBs afin de voir ce qui se passe là-bas et prendre des échantillons de matière est semblable à l'incapacité du bonhomme. L'atmosphère, la matière interstellaire et intergalactique compliquent la tâche d'observation (et de distinction) de la faible lumière d'un objet stellaire (ou au moins de sa galaxie si elle existe) à des millions ou des milliards d'années lumières, tous comme le fait le bandage du bonhomme. Nous pouvons trouver des pistes en étudiant un des effets du phénomène principal (comme l'afterglow pour les GRBs) comme pour la lumière reflétée sur le mur dans le cas du bonhomme... L'information est contenue dans le domaine infrarouge, elle est portée aussi par les neutrinos (et les gravitons), ce qu'ils pourraient nous offrir sur un plat en or, mais ni le bonhomme, ni l'humanité avec ses moyens actuels sont en mesure de l'avoir facilement. C'est pourquoi l'humanité aujourd'hui trouve très difficile de résoudre l'énigme des GRBs (tout comme le bonhomme ordinaire qui ne peut pas comprendre ce qui se passe à l'extérieur tant qu'il est incapable de ressentir le rayonnement infrarouge), et en voyant ses efforts, ce qu'elle a accompli depuis la découverte des GRBs, on peut dire qu'elle s'est déjà bien distinguée.

Depuis leurs découverte il y a plus de quatre décennies et jusqu'à maintenant, plusieurs questions cruciales restent posées, parmi elles il y a le "Comment ?" et le "Où exactement?" des sursauts gamma. Ma recherche s'est concentrée sur le « Où exactement ? » des

sursauts. La réponse attendue n'a pas cessé d'être "Dans des galaxies", mais récemment, et surtout après le lancement du satellite Swift, on s'est rendu compte que pour la majorité des sursauts qu'on détecte, on n'arrive pas toujours à voir de galaxie, même parfois avec un télescope optique de 10 mètres de diamètre. Les questions qui se posent automatiquement sont donc : Pourquoi ? La galaxie hôte existe-t-elle vraiment pour tous les sursauts gamma ? Ou est-ce à cause de certains phénomènes (d'absorption par exemple) qui empêchent de voir la galaxie ? Et si la galaxie présumée du sursaut n'existait pas (du moins dans certains cas), alors d'où proviennent ces sursauts ? C'est cet enchaînement de questions qui constitue la problématique de mon mémoire.

Récemment nous avons compris que l'effondrement gravitationnel d'un noyau d'étoile massive sur lui-même (supernova Ic) peut donner naissance à un sursaut gamma long. Cette connexion entre supernova et GRB implique une relation entre le taux de formation d'étoiles (SFR : star formation rate) et les sursauts gamma (puisque les étoiles massives ont un âge plutôt court). Elle a été confirmée par l'observation à plusieurs reprises, les galaxies hôtes sont des jeunes galaxies de formation d'étoiles. Tout cela pour dire que les sursauts gamma sont (en principe) un outil pratique pour indiquer les régions de formation d'étoiles (régions avec un grand SFR) dans l'Univers. Il y a un autre intérêt dans l'étude des sursauts gamma : ils représentent un outil très pratique pour étudier le passé de l'Univers du fait qu'ils se situent à des distances cosmologiques (au fin fond de l'univers), et voir loin dans l'espace est équivalent à voir loin dans le passé (le temps).

Les GRBs rayonnent sur un domaine très étendu du spectre électromagnétique, ce sont aussi des sources potentielles d'émission des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie, des neutrinos énergétiques, et des ondes gravitationnelles. Etant des événements de taille stellaire situés à des distances cosmologiques, les GRBs permettent de connecter les différentes branches d'astronomie : stellaire, interstellaire, galactique, et intergalactique, jusqu'à la cosmologie.

Un mystère de la taille des GRBs ne peut pas être résolu par un mémoire de magister, aussi élaboré soit-il. L'ambition c'est bien, mais il ne faut pas avoir les yeux plus gros que le ventre. Dans mon cas, l'ambition était d'espérer qu'une telle thèse contribue à la compréhension de ce phénomène aussi peu que ce soit, et même si le chemin suivi n'aboutit à

rien, cela a son intérêt, au moins pédagogique. Car comme disait Thomas Edison “Je n’ai pas échoué. J’ai simplement trouvé 10.000 solutions qui ne fonctionnent pas.”

Je commencerai le Chapitre I par l’historique de l’astronomie jusqu’à la découverte des sursauts gamma, avant de définir ces derniers. Je terminerai ce chapitre par la définition du sujet de mon mémoire (problématique) ainsi que par les objectifs de cette dernière. Dans le Chapitre II j’essaierai de résumer les propriétés des GRBs, je parlerai aussi de certaines corrélations comme la célèbre relation d’Amati. Le Chapitre III sera dédié aux galaxies hôtes, je résumerai les propriétés observationnelles les plus importantes de ces dernières. Dans le Chapitre IV nous verrons si la détection de la galaxie hôte est corrélée à certaines propriétés du sursaut. Et finalement nous verrons dans le chapitre V si le fait que les GRBs suivent la relation d’Amati dépend de l’existence et des propriétés (e.g. redshift) de la galaxie hôte. Enfin, le mémoire sera achevé avec une conclusion.

Remerciements

Dès mon enfance, l'astronomie était d'une séduction inégale, une passion que je ne trouve nulle part ailleurs, et il m'était difficile d'y résister. Cela fait déjà presque une décennie que j'ai décidé de lier mon destin à la physique et de faire de cette science mon activité principale dans la vie. Pour moi, l'astrophysique, la branche de physique qui me fascine le plus, est le projet qui mérite qu'on y consacre sa vie, mais elle me semblait inaccessible, pour un étudiant ordinaire comme moi.

Mon rêve d'enfance s'est enfin réalisé. Mon aventure avec l'astrophysique a commencé après avoir été admis à l'école doctorale d'astrophysique de Constantine (EDA). Et depuis, je n'ai que de bons souvenirs ; tout a changé pour moi au mieux, ma vie a trouvé un sens plein. À l'EDA, j'ai pu faire de nouveaux amis, venus de différentes régions du pays, et j'ai appris d'autres manières de voir les choses. Surtout, j'ai eu la chance d'avoir d'excellents enseignants de haut niveau. J'ai passé une première année, théorique, les cours étaient passionnants, et pour la première fois de ma vie j'étais triste que les cours prennent fin. Nous ne nous sommes jamais lassés des études : nous assistions aux cours le matin, discussions de l'astronomie et de ses mystères pendant les repas, organisions nos propres colloques d'astrophysique chaque soir dans notre résidence universitaire et observions les étoiles la nuit tout en nous rappelant nos cours du matin qui s'y rapportaient. Je dois tout cela au professeur Mimouni, l'instigateur de l'EDA, c'est lui qui nous a ouvert cette voie et qui est derrière toutes ces bonnes choses, et ce changement dans ma vie. Il a sacrifié autant pour nous, toujours avec un cœur ouvert et un joyeux sourire. Avec lui j'ai appris que la recherche ne se fait pas seulement avec le cerveau, mais aussi et surtout avec le cœur et l'esprit. Je n'arrive pas à trouver les mots pour lui exprimer ma reconnaissance.

Grace à lui j'ai eu la chance de rencontrer un astrophysicien que j'admirais déjà tant. C'est mon encadreur, le professeur Nidhal Guessoum de l'université américaine du Sharjah. Cela fait deux ans que j'ai commencé à travailler avec lui, et c'est un grand merci que je lui adresse, d'être venu de loin nous enseigner et de m'avoir supporté durant ces deux dernières années. Avec lui aussi, tout devient simple, j'ai appris qu'il ne fallait pas tout savoir pour progresser, "avec des formules simples on peut faire de grandes choses", c'est ce qu'il nous disait, et grâce à lui j'ai connu la beauté de l'astronomie X et Gamma ainsi que ses mystères.

Dans son cours le temps passait très vite, nous le bombardions de questions et il nous répondait gentiment. Ensuite, j'ai eu l'occasion de travailler sur les données des grands observatoires gamma, notamment le célèbre Swift. Je m'estime très chanceux d'avoir eu l'occasion de travailler avec lui, et son collaborateur, Walid Azzam, à une période importante, peut être même l'âge d'or de l'astronomie gamma. C'était vraiment un plaisir et un honneur pour moi d'être son étudiant et de développer ses idées, et cette période marquera ma vie à jamais. En sa compagnie j'ai appris ce qu'est "la recherche de haut niveau", dans le vrai sens du mot.

Monsieur Seghouani, toujours de bonne humeur, lui aussi ne passe pas inaperçu. Il a fait tellement pour moi que je le remercie du fond du cœur. Je suis très heureux de l'avoir connu de près. L'EDA a aussi été l'occasion de rencontrer un des grands physiciens théoriciens de l'Algérie, le professeur Mébarki. Je n'oublierais jamais l'assistance qu'il m'a accordée. Une reconnaissance spéciale aussi au professeur Benslama, dont les cours de math me seront utiles à jamais. Je ne dois pas non plus oublier un enseignant avec qui l'astrophysique est très passionnante, le professeur Bouldjedri, qui était toujours prêt à répondre à mes questions, aussi abondantes qu'elles soient. Un grand merci enfin aux autres enseignants admirables de l'EDA : Messieurs Attalah, Abdelatif et Sid, ainsi que d'autres, qui sont venus enseigner de loin.

À côté de ces géants, toujours prêts à me soutenir, je me sens tout petit, et c'est pour cela que je n'ai d'autre choix que de faire de mon mieux pour suivre leur voie. Notre EDA est formidable, une organisation qui a permis de rassembler tous ces chercheurs et de créer une ambiance extraordinaire.

En dehors de l'EDA, je remercie monsieur Doumaz et monsieur Cherchali, deux enseignants de physique à l'université de Blida, ainsi que monsieur Fouka du CRAAG. Je tiens aussi à remercier Mourad Rahmani de l'USTHB, tout comme Abderrahmane Zoghbi de l'université de Cambridge, toujours serviables. Un remerciement enfin à : Lorenzo Amati, Sandra Savaglio, Jochen Greiner pour leurs réponses très utiles.

Enfin je termine avec mes proches, mes amis Mustapha, Khiredine et El Hadj et ma famille : ma mère, mon père, mes frères et mes sœurs, Ismad en particulier, ainsi que mon beau-frère Mehdi et mon oncle Tawfiq.

Je crois en un Dieu unique, créateur de l'univers, qui a guidé mes pas et a fait de moi ce que je suis à présent, je le remercie.

Résumé

Les sursauts gamma (GRB) sont des explosions d'énergie d'une magnitude hors pair dans l'Univers ($\sim 10^{51}$ erg) ; ils produisent des flux de photons gamma sur des durées allant des millisecondes aux milliers de secondes. Leurs origines extragalactiques et cosmologiques furent établies durant les années 90 par les données de CGRO-BATSE, qui montrèrent qu'ils sont distribués uniformément dans le ciel (ne suivant pas, en particulier, la forme de notre galaxie) ; puis en 1997 les détecteurs du satellite BeppoSAX permirent de mesurer le redshift des GRBs, confirmant leurs distances cosmologiques. Et depuis, les télescopes les plus sophistiqués de l'être humain pointent leurs miroirs géants vers les positions des GRBs pour sonder les lieux d'origine des ces explosions couvertes de mystères. D'une année à l'autre des records de redshift sont battus par des GRBs, poussant plus loin les limites de l'Univers connues à l'être humain. Des galaxies lointaines de formation d'étoiles, bleues, naines et irrégulières furent associées avec certaines GRBs. Mais dans beaucoup de cas, les observations des télescopes les plus performants de la planète ne parviennent pas à détecter le moindre objet extragalactique comme si ces GRBs proviennent du néant.

Le satellite Swift dédié aux GRBs, lancé en Novembre 2004, a fourni sans cesse des données précieuses sur les GRBs en masse, ce qui est nécessaire pour les études statistiques. Ainsi ses données publiques ont permis d'effectuer plusieurs percées dans le domaine. Plus spectaculaire encore, il a permis de détecter ce que nul autre n'avait pu le faire avant, avec $z = 8.26$ (c'est-à-dire situé à 13 milliard d'années lumière de la terre) ; GRB090423 est l'événement cosmique le plus éloigné jamais observé par l'homme (si nous excluons le rayonnement CMB).

La population de GRBs avec redshift du satellite Swift dépasse désormais 177 événements (jusqu'au 15 juin 2010). Mais le nombre de GRBs pour lesquels une galaxie a été observé reste toujours limité (62 cas environ, c'est-à-dire un taux de 35%). Par conséquence, une question se pose: "Y a-t-il des explications physiques sous-jacentes au faible taux de galaxies hôtes détectées ? Ou cela est-il simplement dû à des effets de sélections ?" L'objectif de ce mémoire est de répondre à cette question et de comprendre au mieux pourquoi nous ne pouvons pas détecter la galaxie hôte, au moins dans les cas où des tentatives ont été faites.

Afin de répondre, une première comparaison entre les GRBs avec et sans galaxie hôte est faite. La population comprend tous les GRBs de Swift avec mesure du redshift (détecté jusqu'au 15 juin 2010), c'est-à-dire 177 événements, partagés en deux classes (62 avec galaxie et 115 sans).

Une des découvertes les plus importantes effectuées récemment dans le domaine des Gamma Ray Bursts c'est la corrélation trouvée dans la classe des longs GRBs (de durée supérieure à environ 2 seconds dans un repère cosmologique au repos) entre l'énergie du photon à laquelle le spectre νF_ν atteint un maximum de l'émission prompte, $E_{p,i}$, et l'énergie totale rayonnée en supposant une émission isotropique, E_{iso} (la relation d'Amati, Amati et al., 2002). Afin de déterminer une quelconque corrélation entre le fait d'avoir une galaxie hôte et la validité de la relation $E_{iso} - E_{p,i}$, ainsi que de voir si les GRBs avec galaxie hôtes sont différents de ceux sans galaxie hôte visible, nous avons effectué une deuxième comparaison statistique entre l'adéquation de la relation d'Amati avec les GRBs avec ou sans galaxie hôte. Nous avons construit un échantillon (suivant la disponibilité des données de E_{iso} ainsi que de $E_{p,i}$) de 88 GRBs divisé en deux sous classes de GRBs suivant la détection de la galaxie hôte (45 cas) ou non (43 événements). Puis nous avons traité chaque classe à part faisant une comparaison statistique entre les deux classes. Nous avons tracé, ajusté, et comparé la régression linéaire de la relation d'Amati pour chaque classe après avoir calculé les paramètres de la corrélation.

Les résultats des deux comparaisons montrent une différence insignifiante entre les deux classes de GRBs. Nous n'avons pas pu trouver de phénomène physique sous-jacent responsable du manque de galaxies hôtes, comme si ces deux classes (GRBs avec et sans galaxie) ne forment qu'une ! En d'autre terme nous pouvons prévoir l'existence de galaxie hôte, au moins pour notre population de GRBs sans galaxie hôte. Il semble que d'autres effets, telle que la luminosité de la galaxie, sont responsables de notre incapacité à observer la galaxie.

Mots clés : Sursauts Gamma, galaxies hôtes

Abstract

Gamma Ray Bursts (GRBs) are the most powerful explosions in the Universe ($\sim 10^{51}$ erg); they produce a flux of gamma photons during for few seconds, on average. Their extragalactic origins were established in the nineties thanks to the mission CGRO with its instrument BATSE, which showed that the GRBs are distributed uniformly in the sky (without following the shape of our galaxy). In 1997 the BeppoSAX satellite was able to give redshift measurement for the first time, confirming the cosmological distances of the GRBs. And since that time, many big telescopes have tried to probe the environments of these mysterious explosions. Year after year, the records of redshift are beaten by the GRBs, pushing further away the limits of our known Universe. Blue, dwarf and irregular star forming galaxies have been associated with many GRBs. But in many cases, even the observations of the biggest telescopes didn't detect any extragalactic object.

For the past six years that the Swift satellite has been operating, it has been providing rich and more precise data about GRBs. Swift has made a number of breakthroughs and helped improve our understanding of the phenomena associated with GRBs. Most spectacularly, it was able to detect the most distant event, GRB090423, with the greatest redshift ever measured $z = 8.26$ (i.e. located at 13 billions light years away from the earth).

The population of Swift GRBs with redshift measurement is now about 177 events (until June 15 2010). Still, the number of GRBs for which host galaxies have been found or confirmed has remained rather low (62 cases, i.e. a rate of 35%). The question then begs to be asked: are there any underlying physical explanations to this effect (low number of observed host galaxies) or is that simply due to some selection effects? Our objective in this thesis is to find an answer to this crucial question in order to understand why we cannot detect the host galaxy, at least in the cases where such attempts have been made.

In order to answer, a first comparison between GRBs with host galaxy and GRBs without is made. The population includes all Swift GRBs with redshift measurement, detected until June 15 2010 (i.e. 177 events), and divided into two subsamples (62 with galaxy and 115 without).

The Amati relation is one of the most important discoveries made recently in the GRBs field. It has been proposed for long Gamma Ray Bursts (with a duration of more than 2 seconds) and it consists in making a correlation between the photon energy $E_{p,i}$, at which the νF_ν spectrum (in the cosmological rest-frame) of the prompt emission peaks, and E_{iso} , the total radiated energy computed by assuming isotropic emission (Amati et al., 2002). In attempting to characterize GRBs and their host galaxies, we have thought it relevant to investigate the extent to which the Amati relation holds for GRBs regardless of their having a (detected) host galaxy and thus independently of the galactic physical medium in which the burst occurs.

For this purpose we undertake a second comparison between the Amati relation's parameters for GRBs with host galaxies and for those without known host galaxies. We consider two other sample populations of GRBs for which values of $E_{p,i}$ and E_{iso} could be obtained (from the literature and/or calculations), data could be plotted, and relation parameters could be inferred.

The results of both comparisons show that differences between the two subsamples are statistically insignificant; allowing us to conclude that the Amati relation is independent of the GRBs' host galaxies and their physical conditions.

We couldn't find any underlying physical explanations to the lack of host galaxies. It seems like the two subsamples come from the same sample. In other words we can envisage the existence of host galaxies, at least for our population of GRBs without a galaxy host. It seems that our incapacity to observe the galaxy is due to other effects, such as faint luminosity of the host galaxy.

Keywords: gamma-ray bursts, host galaxies

ملخص

تعتبر انفجارات أشعة غاما (GRBs) أقوى الانفجارات في الكون ($\sim 10^{51}$ erg) ، وينتج عنها تدفق فوتونات جاما خلال بضع ثوان ، في المتوسط. تحدث هذه الانفجارات خارج مجرة درب التبانة بملايين السنوات الضوئية و هو ما تبين في التسعينات من القرن الماضي بفضل القمرين الصناعيين CGRO و BeppoSAX. واستطاع هذا الأخير في عام 1997 قياس الانزياح نحو احمر لأول مرة ، مؤكدا المسافات الكونية لهذه الانفجارات. ومنذ ذلك الوقت ، فقد حاول العديد من التلسكوبات الكبيرة التحقيق في مصادر هذه الانفجارات الغامضة، وقد تم ربطها في العديد من الحالات بمجرات زرقاء، غير المنتظمة و غنية بالنجوم الشابة. ولكن في كثير من الحالات ، حتى أكبر التلسكوبات لم تتمكن من رصد أي المجرة، كما لو أن هذه الانفجارات تنبعث من العدم.

على مدى السنوات الست الماضية قام القمر الصناعي Swift بتقديم بيانات مهمة وأكثر دقة حول هذه الانفجارات. مما ساعد في تحسين فهمنا للظواهر المرتبطة بها. كما كان قادرا على رصد الحدث الأكثر بعدا ، GRB090423 ، و الذي يقع على بعد 13 مليار سنة ضوئية من الأرض. لحد الآن قام Swift بقياس حوالي 177 إنزياح نحو الأحمر (حتى 15 يونيو 2010). ومع ذلك ، فإن عدد الانفجارات التي تم فيها العثور على المجرات المضيفة مازال منخفض (62 حالة ، أي بنسبة 35 %). السؤال الذي يتعين طرحه هو : هل هناك أي تفسيرات فيزيائية لهذا النقص (انخفاض عدد المجرات المضيفة الملاحظة) ، هل توجد مجرات في كل الحالات ؟ وهدفنا في هذه الرسالة هو إيجاد إجابة على هذا السؤال البالغ الأهمية من أجل فهم لماذا لا يمكننا الكشف عن المجرة المضيفة ، على الأقل في الحالات التي بذلت فيها محاولات رصد.

من أجل الإجابة ، نقوم بمقارنة بين الانفجارات التي تم فيها رصد المجرة المضيفة والانفجارات التي لم يتم رصد مجراتها. المجموعة تشمل جميع انفجارات Swift مع قياس الانزياح نحو الأحمر (أي 177 الأحداث) ، وتنقسم إلى مجموعتين فرعيتين حسب رصد المجرة او عدمه (62 و 115 علي الترتيب).

علاقة Amati هي واحدة من أهم الاكتشافات التي تمت حديثا في مجال الانفجارات الغاموية و في محاولة لمعرفة الفرق بين الانفجارات التي تم فيها رصد المجرة و تلك التي لم يتم فيها رصدها، نقوم بدراسة علاقة Amati للمجموعتين و مقارنة النتائج.

نتائج كلا من المقارنتين تبين أن الاختلافات بين العينتين طفيفة إحصائيا ، مما يوحي بأن العينتين الفرعيتين مصدرها واحد. وبعبارة أخرى يمكننا أن نتصور وجود المجرات المضيفة ، على الأقل بالنسبة للمجموعات المأخوذة بعين الاعتبار في مقارنتنا. و يبدو أن عجزنا في رصد المجرة يعود لتأثيرات أخرى، مثل المعان الخافت من المجرة المضيفة.

A mes parents

A mes enseignants, de la maternelle à la PG

A mes frères et sœurs et tous mes amis

Table des matières

Préface	iv
Remerciement	vii
Résumé	x
Chapitre I Introduction historique	1
1.1 Histoire de l’astronomie extragalactique.....	1
1.2 Naissance de l’astronomie gamma et la découverte des GRBs	3
1.3 Définition des sursauts gamma	8
1.4 Problématique et objectif de notre mémoire	9
Chapitre II Propriétés globales des GRBs	14
2.1 Introduction	14
2.1.1 Détection	14
2.2 Missions spatiales.....	16
2.2.1 BeppoSAX (1996-2002)	16
2.2.2 HETE-2	17
2.2.3 SWIFT	18
2.3 Propriétés Observationnelles.....	18
2.3.1 Distribution isotropique des GRBs avec BATSE (CGRO 1991-2000)	18
2.3.2 Classification de GRB suivant la durée T_{90} (CGRO 1991-2000).....	21
2.3.3 L’Afterglow.....	22
2.3.3.1 L’Afterglow X.....	23
2.3.3.2 L’Afterglow optique.....	23
2.3.3.3 L’Afterglow radio	23
2.3.3.4 Sursaut obscurs.....	26
2.3.4 Les XRFs.....	27
2.3.5 Relation d’Amati.....	27
2.4 Intérêt des sursauts gamma.....	30

2.4.1 Accélérateurs de particules.....	30
2.4.2 Rayonnement gravitationnel.....	31
2.4.3 Galaxies lointaines	31
2.4.3 Cosmologie.....	31
Chapitre III Progéniteurs et galaxies hôtes des GRBs.....	33
3.1 Les Progéniteurs	33
3.1.1 Association avec supernovae.....	37
3.2 Les galaxies hôtes.....	37
3.2.1 Les galaxies hôtes des LGRBs	41
3.2.1.1 Où se trouvent les LGRBs dans les galaxies hôtes ?.....	41
3.2.1.2 Les galaxies hôtes des LGRBs à grand redshift.....	42
3.2.1.3 Galaxies hôtes des LGRBs vs Galaxies hôtes des SNe.....	43
3.2.1.4 Propriétés des Galaxies hôtes des LGRBs	44
3.2.1.4.1 Morphologie	45
3.2.1.4.2 Métallicité.....	45
3.2.1.4.3 Taux de poussière.....	46
3.2.1.4.4 L'extinction.....	46
3.2.1.4.5 Luminosité de la raie Lyman α	47
3.2.1.4.6 Magnitude UV	48
3.2.1.4.7 Masse stellaire	48
3.2.1.4.8 SFR.....	49
3.2.1.4.9 Âge	51
3.2.1.4.10 Luminosité & couleur.....	51
3.2.1.4.11 Redshift	51
3.2.2 Les galaxies hôtes des SGRBs	51
3.3 Conclusion.....	53
3.4 Intérêts de l'étude des GRBs hôtes.....	54
3.4.1 Progéniteurs des GRBs.....	54
3.4.2 Formation et Evolution des Galaxies	54
3.4.3 ISM des galaxies lointaines	54
3.4.4 Région de formation d'étoile.....	55
3.4.5 Compréhension des sursauts obscurs	55

Chapitre IV Analyse des GRBs de Swift	56
4.1 Introduction	56
4.2 La population.....	57
4.3 Le redshift	58
4.3.1 Test de Kolmogorov-Smirnov pour le redshift	62
4.4 La durée T_{90}	63
4.5 La corrélation entre T_{90} et la fluence	64
4.5.1 Les coefficients de corrélation	64
4.5.1.1 Le coefficient de corrélation r	64
4.5.1.2 Le coefficient de détermination R^2	66
4.5.1.3 Le coefficient de corrélation de Spearman.....	66
4.5.2 Les résultats.....	66
4.6 Le test Kolmogorov-Smirnov.....	69
4.6.1 Column density (NH)	70
4.6.2 1-sec Photon Flux.....	71
4.6.3 Pour la durée T_{90}	71
4.6.4 La fluence	72
4.5 Conclusion.....	73
Chapitre V Y a-t-il un lien entre la relation d'Amati et l'existence (la détection) de la galaxie hôte ?	83
5.1 Introduction	83
5.2 La population.....	84
5.3 L'énergie isotropique E_{iso} et sa distribution dans la population considérée.....	84
5.4 E_{iso} et $E_{p,i}$ en fonction de z	Erreur ! Signet non défini.
5.5 Relation d'Amati	87
5.5.1 Les méthodes utilisées.....	88
5.5.1.1 Méthodes du coefficient de corrélation	88
5.5.1.2 Méthodes classique du Khi deux χ^2	89
5.5.2 Les résultats.....	91
5.5.2.1 Les résultats pour la population totale.....	91
5.5.2.2 Les résultats pour la population des GRBs avec galaxies hôtes.....	92
5.5.2.3 Les résultats sur la population des GRBs sans galaxies hôtes	92
5.6 Conclusion.....	94

Conclusion.....	102
Publication durant le magister.....	105
Références.....	107

Chapitre I

Introduction historique

1.1 Histoire de l'astronomie extragalactique

L'astronomie est l'une des sciences les plus anciennes, avec plus de 7000 ans d'histoire, elle remonte au delà de l'antiquité. À ses débuts, l'astronomie consistait simplement à observer et à prédire les mouvements des objets célestes visibles à l'œil nu. Puis avec l'apparition des premières civilisations en Mésopotamie, Egypte ancienne, Grèce, Inde, Chine ou Amérique de sud (mayas et aztèques). Chaque civilisation avait sa propre vision et compréhension de l'univers, et l'astronomie n'a pas cessé de s'enrichir avec l'enrichissement de la civilisation humaine. En Mésopotamie, l'astronomie voit apparaître ses premiers fondements, c'est une astronomie empirique avec un caractère arithmétique, ce qui a permis de faire les premières prédictions empiriques des dates d'éclipses solaire et lunaire. Durant cette époque l'aspect du ciel a toujours revêtu une signification mythologique et religieuse.

Mais c'est avec la civilisation grecque que l'astronomie se lance vraiment, celle-ci ayant été caractérisée par la recherche d'explication rationnelle des phénomènes célestes. Les Grecs élaborèrent une théorie géocentrique. Environ 4 siècles avant JC quand Eudoxe de Cnide énonça sa théorie des sphères homocentriques, c'était un modèle selon lequel le système solaire était composé de sphères, avec le soleil et les planètes décrivant des trajectoires circulaires autour de la terre immobile au centre de l'Univers, et ce modèle (faux) va être utilisé durant les deux millénaires suivants, il ne se démodera qu'au XVIe siècle !

Au moyen âge c'est la civilisation arabo musulmane qui a repris le flambeau des civilisations anciennes, en particulier les civilisations grecque et indienne ; L'astronomie de la civilisation arabo musulmane avait ses propres caractéristiques. Les musulmans avaient

besoin de connaître la direction de la Kaaba (la Mecque) et les positions du soleil afin de faire leur prière, et la date du commencement du mois de Ramadan (le mois du jeûne), ils utilisaient les étoiles pour naviguer en plein désert donc ils ont eu recours à l'astronomie, ainsi elle est devenue très importante pour la civilisation musulmane. Elle était florissante dans le monde musulman à partir du IXe siècle en contraste avec le déclin occidental. On découvre et on décrit pour la première fois un objet extragalactique, la galaxie Andromède (sans en connaître la nature, bien sur) en l'an 964.

L'occupation de l'Espagne, de la Sicile et du sud de la France par les musulmans depuis le VIIIe siècle a permis la diffusion des connaissances astronomiques de la civilisation musulmane à travers l'Europe qui souffrait d'instabilité politique et de pauvreté. Puis l'astronomie connut des tournants importants dès le XVIe où plusieurs génies apparaissent en Europe dans un laps de temps relativement court. Nicolas Copernic, qui après de nombreuses années d'observation, publie en 1543 son œuvre majeure « *De revolutionibus orbium coelestium libri VI* », réintroduit l'héliocentrisme et met fin au système géocentrique. Ces idées ne sont pas condamnées par l'Eglise jusqu'à ce que Galileo les confirme grâce à ses observations en utilisant la lunette qu'il a construit en 1609 (permettant de grossir six fois), par laquelle il défend et répand l'idée, tout comme Johannes Kepler. Puis un demi-siècle plus tard, vient Isaac Newton qui établit le côté théorique et l'espace de calcul de l'astronomie céleste après avoir énoncé la loi de gravitation universelle en 1687 dans « *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* », ce qui a permis de donner une explication scientifique aux mouvements des planètes. Newton a aussi contribué sur le plan observationnel, en inventant le télescope réflecteur en 1668.

La naissance de l'astronomie extragalactique est redevable à Edwin Hubble qui, en 1923, parvient à établir que la galaxie d'Andromède (M 31) est située largement en dehors de la Voie lactée, et donc qu'il existe d'autres galaxies que la nôtre. telles NGC 6822 puis M32 et M33, et après la découverte du décalage vers le rouge (redshift) en 1929, il parvient à démontrer que ce décalage est proportionnel à la distance, il énonça ainsi une loi (la loi de Hubble) qui établit la relation entre la distance et la vitesse d'éloignement des objets extragalactiques, déduisant que l'Univers n'est pas statique comme on avait toujours cru.

1.2 Naissance de l'astronomie gamma et découverte des GRBs

Mais jusqu'à la première moitié du XXe siècle, l'astronomie reposa seulement sur les informations transportées par la lumière visible que nous recevons, c'est-à-dire les informations transportées par la partie visible des ondes électromagnétiques. Or la lumière visible ne représente qu'une toute petite fraction du spectre électromagnétique, qui s'étend du radio au rayonnement gamma. La découverte du spectre électromagnétique non visible a révolutionné l'astronomie, et la deuxième moitié du XXe voit s'ouvrir d'autres branches d'astronomie observationnelle telle que la radioastronomie, l'astronomie infrarouge, l'astronomie ultraviolet etc., et on se rend compte que toute l'astronomie pratiquée durant des milliers d'années n'était en fait qu'une branche ou une partie de l'astronomie globale.

La première nouvelle « fenêtre » à s'ouvrir après le visible était l'astronomie radio puisque dès les années 1960 l'astronomie a vu un développement massif des radiotélescopes et l'homme a commencé à voir l'Univers d'un autre angle. Très rapidement des découvertes importantes dans l'astronomie, comme celle des pulsars et des quasars fut possible.

L'observation de l'Univers dans les autres domaines du spectre électromagnétique était impossible avec les instruments basés sur terre, puisque l'atmosphère terrestre agit comme un filtre électromagnétique qui ne laisse passer qu'une petite partie de l'ultraviolet avec le visible et le radio et absorbe les autres fréquences des ondes électromagnétiques. Donc afin de détecter les informations précieuses transportées dans les autres domaines du spectre électromagnétique il était nécessaire que le détecteur soit au dessus de l'atmosphère terrestre pour recevoir le photon avant qu'il n'interagisse avec la haute atmosphère. En utilisant des ballons stratosphériques et des fusées on a pu détecter le rayonnement infrarouge et ultraviolet, et on a même découvert le rayonnement X et gamma. Mais ce n'est qu'avec les télescopes embarqués dans des satellites mis en orbite au tour de la terre qu'on a vraiment commencé à faire de l'astronomie gamma.

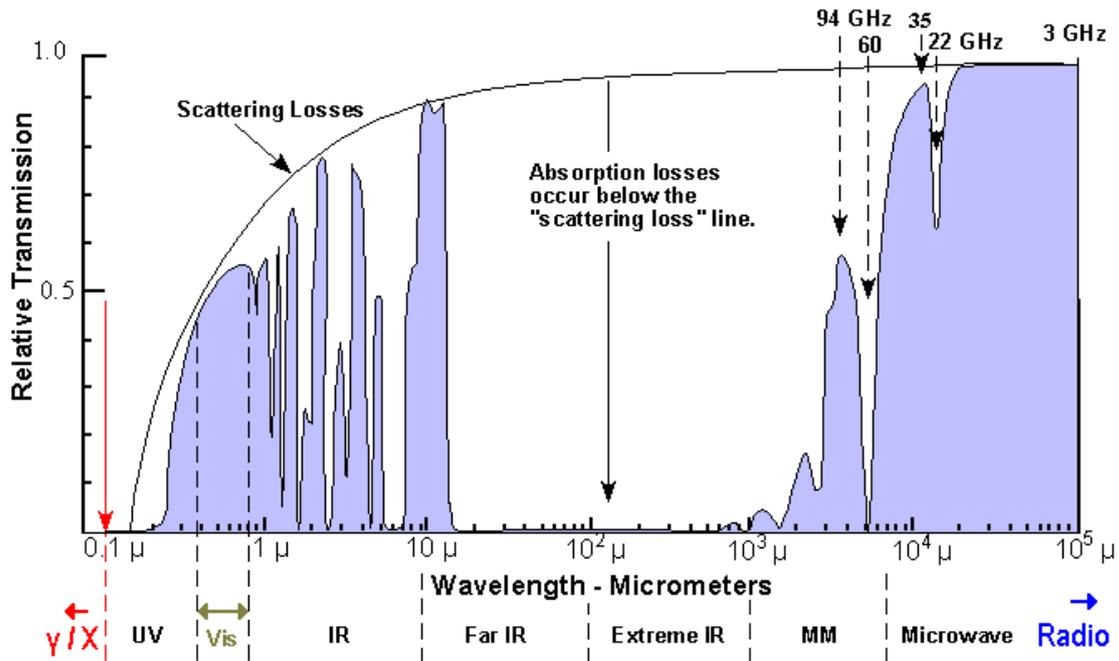


Figure 1.1 Atténuation des ondes électromagnétiques par l'atmosphère mesurée au niveau de la mer. A l'extrême gauche l'atténuation des rayons X et gamma est totale, alors que les ondes radio ne sont pas absorbées par l'atmosphère, tout comme le gros du visible.

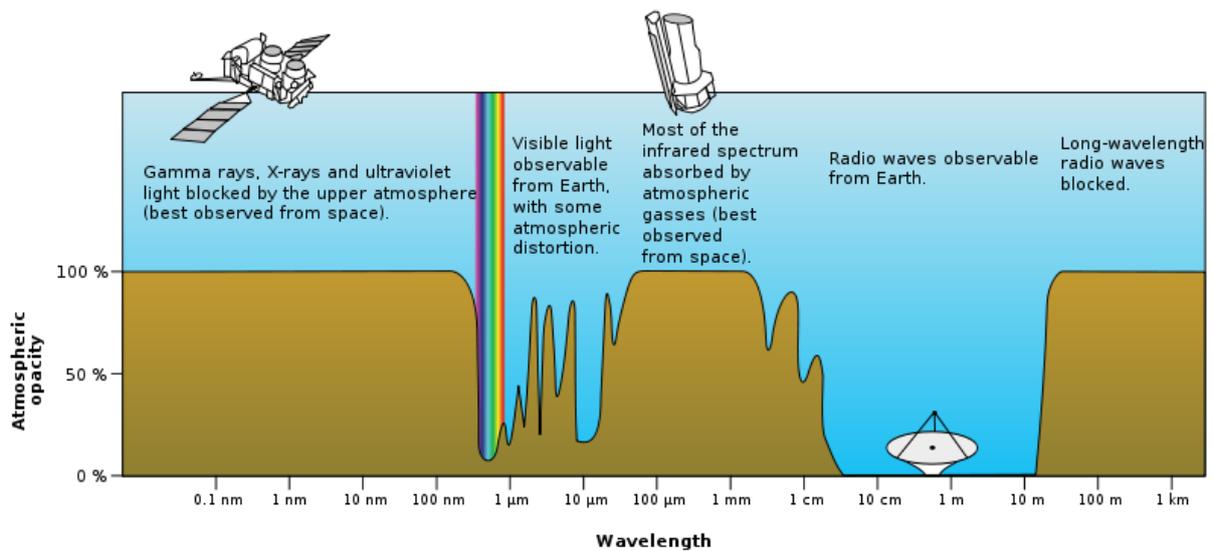


Figure 1.2 Les différentes branches, et instruments d'observation astronomique, en fonction de la longueur d'onde, et de l'atténuation (des ondes électromagnétiques) par l'atmosphère. La possibilité d'observer depuis le sol n'est possible que dans le domaine radio et le visible.

L'astronomie gamma n'a ainsi vraiment commencé qu'à partir de la fin des années soixante du dernier siècle, relativement en retard, et cela s'explique par la difficulté

observationnelle puisque le rayonnement gamma très énergétique interagit fortement avec l'atmosphère, perd son énergie très rapidement et finit par être complètement absorbé par l'atmosphère de la terre, ce qui préserve la vie sur terre. Une autre difficulté provient de la nature du rayonnement gamma, puisque plus l'énergie du photon augmente moins il y a de photons, et comme ce sont les photons que nous détecterons, on aura un signal très faible dans le gamma. De plus il est pratiquement impossible de focaliser les photons gamma comme on fait avec les photons visibles (dans les télescopes réflecteurs à l'aide de grands miroirs) ou avec les photons radio (avec les antennes paraboliques) puisque l'énergie des photons gamma est tellement grande qu'il est impossible de les réfléchir ou de leur faire changer de direction, ils pénètrent la matière directement et l'information est perdue. De ce fait, le rayonnement gamma étant très pénétrants, sa détection requiert des détecteurs volumineux, contenant des plaques de métal d'une certaine épaisseur, ce qui constitue une autre difficulté, puisque ces détecteurs doivent être mis en orbite autour de la terre à l'aide de lanceurs, pour lesquels la charge constitue toujours une contrainte financière et technique.

Mais toutes ces difficultés n'étaient pas en mesure de vaincre la volonté humaine ou ce qui a toujours été derrière ses découvertes, son moteur, « la curiosité ». De nos jours, les instruments gamma mis en orbite autour de la terre se comptent par dizaines, mais tout comme pour la découverte du « Cosmic Microwave Background » (CMB) l'ingrédient de la chance était souvent présent en force dans les grandes découvertes. L'astronomie a toujours été une science de données, et les explications conduiraient souvent à des découvertes. L'astronomie gamma a profité d'un coup de chance extraordinaire, puisque les premiers satellites étaient des satellites militaires, comme les Vela (« veilleur, gardien » en espagnol) envoyés par les USA dans les années 1960 et 70 en pleine guerre froide afin de surveiller d'éventuelles explosions nucléaires soviétiques clandestines ; ils étaient ainsi capables de mesurer les radiations gamma dans l'intervalle d'énergie $\sim 0.2 - 1.5$ MeV. Mais aucune explosion terrestre n'a été signalée, par contre les détecteurs captaient d'autres choses, des bouffées de rayons gamma, des « sursauts » gamma d'une puissance inouïe et en provenance de l'espace, au lieu de provenir de la terre. La découverte du premier sursaut gamma (Gamma Ray Burst en anglais, GRB) a eu lieu en 1969 à la suite d'analyse des données prises le 2 juillet 1967. En fin de compte les paires de satellites Vela 5 et Vela 6 ont pu détecter jusqu'à 73 événements particuliers durant leur service, de juillet 1969 jusqu'à avril 1979. Au début, leurs découvertes furent cachées à la communauté scientifique, et après avoir éliminé les éruptions

solaires et les supernovae, on a compris qu'il s'agissait d'un phénomène mystérieux, et la découverte fut finalement publiée en 1973 (R. Klebesadel, et al., 1973).



Figure 1.3 Un des satellites Vela en orbite autour de la terre, c'était le premier observatoire gamma en orbite (V. Schonfelder, et al., (2001)).

Une des premières explications données était qu'il s'agissait du produit d'une civilisation extraterrestre très développée, mais cette hypothèse a été rapidement abandonnée et on s'est rendu compte qu'il s'agit d'un mystérieux phénomène cosmique. On a compris

qu'il s'agissait d'un phénomène extraordinaire dont la compréhension changera notre conception de l'Univers.

Le grand mystère qui régnait sur les GRBs après la publication des résultats de Vela a fini par attirer la communauté scientifique et a conduit à un grand intérêt envers ce domaine, de ce fait le nombre de publications et de théories proposées se proliféré très rapidement. Ainsi, dès 1975, un travail présenté dans une conférence (Texas Symposium on Relativistic Astrophysics) a dénombré plus de cent modèles théoriques proposés, dont la majorité ont été éliminés pour cause de leur conflits avec certaines observations.

Depuis, le domaine des GRBs n'a pas cessé d'évoluer, de nouvelles découvertes sur les GRBs ayant réussi à plusieurs reprises à arracher une place parmi les 10 meilleurs découvertes de l'année (« top-ten scientific breakthroughs of the year ») auprès du magazine « Science » (exemple : #6 en 2003 et #4 en 2005).

La figure 1.4 illustre les publications dans le domaine des GRBs en fonction du temps. L'évolution est exponentielle, on voit aussi l'effet des missions d'observation, et les grandes découvertes, sur la recherche dans ce domaine.

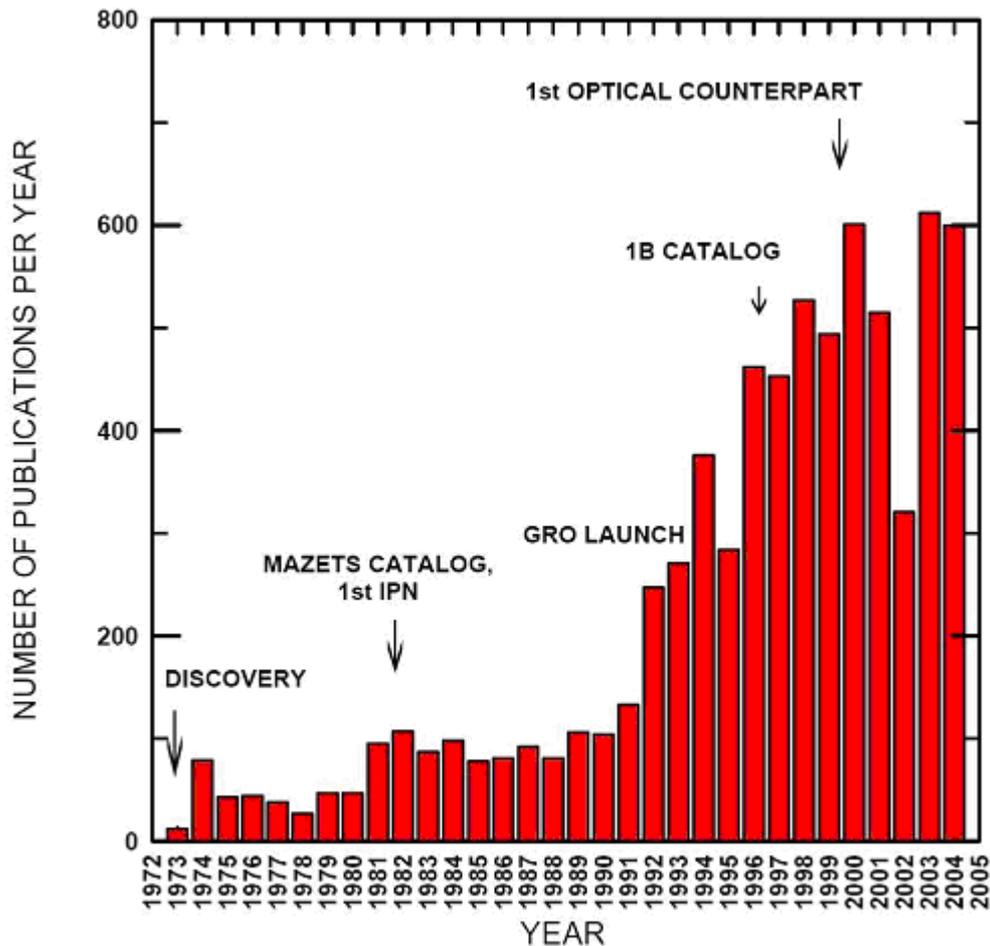


Figure 1.4 Croissance du nombre de publications sur les sursauts gamma depuis leur découverte jusqu'à l'an 2005 (K. Hurley et al., 2001 & M. Stamatikos et al., 2005).

1.3 Définition des sursauts gamma

De nos jours les sursauts gamma (GRB) sont définis comme étant des bouffées de photons gamma très brèves, généralement d'une durée moyenne de quelques secondes ; pendant ce temps l'Univers tout entier se trouve envahi par leur énergie inouïe. Ils sont le produit d'énormes explosions d'énergie survenues à des distances cosmologiques de nous, il y a des milliards d'années, montrant la puissance de l'explosion initiale. Ils nous parviennent de directions aléatoires, avec une fréquence moyenne d'1 à 2 évènements par jour. Leur rayonnement gamma surpasse de loin toutes les autres sources gamma du ciel, y compris notre soleil ; de ce fait ils sont les évènements les plus lumineux de l'Univers, après le Big Bang, produits par les explosions les plus violentes de l'Univers!

Le terme “Gamma-Ray Burst” a été utilisé pour la première fois en 1958 par Peterson et Winckler pour indiquer un sursaut gamma solaire ; 15 ans plus tard, ce terme a été associé au phénomène qu’on vient de définir et qui est complètement différent de celui de Peterson et Winckler.

Un GRB typique à un flux de $\sim 10^{-6}$ erg/s/cm² pendant quelques secondes, et un redshift $z \sim 1$, ce qui nécessite une énorme énergie ($\sim 10^{53}$ erg si on suppose une émission isotropique), une énergie qui dépasse de loin celle consommée par le soleil (qui par une petite fraction de son énergie nourrit la terre et la civilisation humaine, depuis son existence) durant sa vie entière, \sim quelques 10^{10} années, ou comparable à celle produite par la Voie Lactée toute entière pendant des années (P. Mészáros, 2006 & D. Noyes, 2005) ! Cela équivaut à convertir une dizaine de masses solaires en rayons gamma purs en quelques secondes !

Les GRBs sont suivis par un autre rayonnement électromagnétique (l’« afterglow ») de relativement basse énergie ; celui-ci s’étend du X au radio, y compris l’ultraviolet, l’optique et l’infrarouge, et durant plus longtemps. L’afterglow radio peut rester détectable jusqu’à des années après que le GRB a eu lieu ! L’afterglow est la clé des sursauts gamma, car c’est lui qui nous fournit les informations les plus importantes sur les GRBs, comme : le redshift, l’extinction et la métallicité...

1.4 Problématique et Objectif de la Thèse

Depuis leur découverte des GRBs, les satellites dédiés à leur étude n’ont pas cessé d’augmenter en nombre et en performance. ils nous ont ainsi permis de découvrir en 1997 avec GRB 970228 que les sursauts gamma rayonnent sur d’autres domaines du spectre électromagnétique, juste après que le rayonnement gamma ait surgi. Cet afterglow est très important, il fournit des informations précieuses ; en particulier, c’est grâce à lui qu’on peut calculer le redshift de nombreux GRBs, et déterminé ainsi leur distance. Très rapidement après cela, on essaye d’associer les GRBs avec des galaxies. Dans les premières années les GRBs pour lesquels on a pu calculer le redshift étaient en petit nombre. Mais récemment la détection des GRBs a augmenté par au moins un ordre de magnitude, surtout après la mise en service du satellite Swift. Cependant, le nombre de galaxies hôtes observés pour les GRB est resté limité. Par exemple, une recherche récente (Ovaldsen et al. 2007) sur une population de

24 GRBs avec le télescope Danish de 1.54 mètre de diamètre (situé à La Silla au Chili) n'a pas pu détecter de galaxie hôte pour la majorité des sursauts de la population. Dans le cas du sursaut GRB070125 aucune galaxie n'a été trouvée même après une recherche avec un télescope de 10 mètres de diamètre (Keck I), ce qui laisse un point d'interrogation sur la source de nombreux GRBs.

Par exemple si nous examinons les GRBs que le satellite Swift est arrivé à détecter (jusqu'au 15 juin 2010) nous avons presque six cents GRBs ; parmi eux il y a 177 cas où le redshift a pu être calculé, et parmi ceux-là on a seulement 62 cas d'associations de GRBs avec une galaxie. C'est-à-dire que nous n'avons pas observé de galaxie hôte pour 65% des GRBs ayant fait l'objet d'une mesure de redshift. Cela veut dire qu'on est confronté à une pénurie de galaxies hôtes.

La question qui se pose logiquement est donc : Les GRBs peuvent-ils exister en dehors des galaxies? En d'autres termes, est-ce possible qu'il y ait des sursauts gamma en provenance du milieu intergalactique au lieu de l'intérieur des galaxies? Ou bien, proviennent-ils bel et bien des galaxies, mais dû à certaines raisons, certains paramètres, nous ne pouvons pas les détecter? Si cette hypothèse est vraie, quelles sont ces raisons, ces paramètres, qui nous empêchent de voir la galaxie hôte? Supposant que le manque de galaxies hôtes est dû à de tels paramètres. Dans ce cas, trouver ces raisons est équivalent à répondre à la question suivante : Quelle est la différence entre les GRBs pour lesquels nous avons pu observer une galaxie et les GRBs pour lesquels nous n'avons pas pu trouver de galaxie?, puisque le paramètre responsable de l'absence de galaxie hôte n'est présent que dans l'ensemble des GRBs sans galaxie hôte (notre incapacité de voir la galaxie implique la présence du paramètre), de ce fait il diffère entre les deux classes de GRBs (la classe des GRBs avec galaxie hôte et la classe des GRBs sans galaxie hôte). Donc trouver les différences conduit à trouver la raison qui nous empêche de voir la galaxie hôte dans la majorité des cas, ceci en supposant que la galaxie existe. La question ci-dessus est donc cruciale, notre objectif dans cette thèse n'est autre que de lui trouver une réponse.

Il est tout à fait clair que les GRBs sans galaxies hôtes ont quelques aspects différents par rapport à ceux possédant une galaxie hôte, ces différences peuvent être soit :

- a) L'absence physique de la galaxie hôte : ce qui veut dire que le milieu dans le quel les GRBs sans galaxie hôte ont eu lieu est complètement différent de celui des GRBs avec galaxie hôte. Si cette hypothèse est vérifiée alors elle conduit à une idée très importante pour l'astronomie toute entière, elle pourra même changer notre conception de l'Univers, puisque l'absence physique de galaxie pour la majorité des GRBs voudrait dire qu'une partie importante des étoiles dans l'Univers ne se rassemble pas dans des galaxies, au lieu de cela, elles seraient dispersées dans le milieu extragalactique, et on serait incapable de voir ces étoiles, vu leur faible luminosité/éclat (par rapport à celle des galaxies) et vu leur distance ; cependant, leur densité dans l'Univers resterait tout de même très faible, compte tenu de l'immensité du milieu extragalactique.

Ou bien :

- b) La galaxie hôte existe bel et bien ; cependant quelque chose empêche sa détection, peut être dû aux caractéristiques de ces galaxies hôtes comme : leurs distances, luminosités intrinsèques, morphologies etc. ; ou bien dû aux caractéristiques des GRBs, comme leur fluence, leur dureté, etc. ; ou bien c'est dû aux effets d'absorptions, aux coefficients d'extinction, aux taux de poussière, la métallicité, etc.

Il est difficile de dire quelle est la cause de cette absence de galaxies hôtes pour de nombreux GRBs. Il se peut que chaque sursaut ait ses propres conditions, donc les causes peuvent différer d'un sursaut à l'autre. Cependant, peu importe la réponse, cette hypothèse une fois vérifiée conduit automatiquement à une idée très importante pour l'astronomie toute entière : On est incapable d'observer un grand nombre d'objets dans l'Univers visible, la majorité écrasante des objets extragalactiques nous échappe, de la même manière que celle selon laquelle les galaxies hôtes des GRBs nous échappe ; alors le ciel que nous voyons même avec des télescopes sophistiqués ne représente pas la vraie image de l'Univers, par conséquent l'Univers nous cache alors sans doute pas mal de secrets. L'impacte scientifique de cette constatation sur l'astronomie sera, d'une manière ou d'une autre, énorme.

Dans la suite de notre recherche nous allons essayer de trancher entre ces deux possibilités. Aucune autre possibilité à notre problématique n'est envisageable. Ceci reflète à quel point le sujet traité dans cette recherche est profitable à l'astronomie.

C'est pourquoi il est important d'explorer la question : Quelle sont les différences entre les GRBs pour lesquels nous avons observé une galaxie et les GRBs pour lesquels nous n'avons pas pu en observer ? Afin d'explorer cette question, et dans le but de trouver une réponse au problème d'absence de galaxies hôtes nous allons construire deux populations/échantillons de GRBs avec toutes les données physiques appropriées et nécessaires pour effectuer des comparaisons statistiques (redshift, énergie d'émission maximale, durée du sursaut, etc...).

Nous allons ainsi rechercher un effet ou une propriété spécifique qui pourrait permettre d'expliquer l'absence des galaxies hôtes pour la classe des GRBs sans galaxie hôte.

Dans une autre étape de notre exploration, nous allons considérer les formules de corrélations des GRBs (e.g. la formule d'Amati), l'appliquer aux deux classes de GRBs, et voir si cette corrélation est conservée dans les deux sous-ensembles. Les résultats ainsi trouvés favoriseront une hypothèse au détriment de l'autre. Dans ce type de comparaison l'outil statistique est indispensable, donc nous aurons souvent recours à l'analyse statistique. Si nous trouverons que les deux classes se ressemblent (si la différence est insignifiante) ceci voudra dire qu'en fait les deux classes ne forment qu'une, c.-à-d. que les galaxies hôtes existent sûrement, mais elle n'ont pas pu être observées à cause de certains paramètres que nous avons négligé, des paramètres qui sont en dehors de la portée de ce mémoire, puisque même avec les données que nous avons pu collecter dans notre population de GRBs nous sommes toujours loin de tout avoir sur les GRBs. Dans l'autre cas, c.-à-d. où la différence trouvée entre les deux classes est importante, nous pourrions dire que nous avons mis la main sur un paramètre significatif, le paramètre clé, et qu'il y a quelque chose qui cloche entre les deux classes ; dans ce cas, ils sont vraiment différents. Ensuite, une fois le paramètre trouvé, il faudra essayer de le relier à la galaxie hôte, et voir s'il peut expliquer notre incapacité à détecter la galaxie. Une fois ces étapes correctement faites nous pouvons favoriser une possibilité (a ou b) par rapport à l'autre.

Parmi les découvertes les plus importantes effectuées récemment dans le domaine des GRBs, il y a la corrélation trouvée dans la classe des GRBs longs (dans un repère cosmologique au repos) entre l'énergie du photon à laquelle il y a un pic dans le spectre νF_ν de l'émission prompte, $E_{p,i}$, et l'énergie totale rayonnée, en supposant une émission isotropique, E_{iso} , connue sous le nom de « Relation d'Amati » (Amati et al. (2002)). Nous avons choisi cette corrélation pour l'appliquer aux deux sous classes de GRBs que nous avons, car elle présente plusieurs avantages :

- a) Elle n'est pas très compliquée.
- b) Les données ($E_{p,i}$ et de E_{iso}) sont relativement faciles à trouver.
- c) Elle est puissante, puisqu'elle s'emploie sur un intervalle d'énergies très vaste, elle est valable des basses énergies (des X-Ray flashes XRFs) aux hautes énergies (les GRBs extrêmement énergétiques) couvrant 6 ordres de magnitude !
- d) Et finalement, parce qu'elle est très célèbre.

Nous verrons ensuite quelle forme prendra la corrélation pour les deux sous ensembles, nous essayerons de voir si la différence trouvée (si différence il y a) nous renseigne sur quelques choses en rapport avec la galaxie hôte.

Chapitre II

Propriétés globales des GRBs

2.1. Introduction

L'astronomie des rayons X et gamma est aujourd'hui qualifiée d'astronomie de l'extrême. Extrême sur le plan observationnel parce que les énergies des photons X et gamma les rendent difficiles à détecter. Ces photons, dont les énergies sont supérieures à 10 keV, sont extrêmement difficiles à observer, tout d'abord parce que notre atmosphère constitue un écran totalement opaque au rayonnement X et gamma, puis parce que leurs énergies sont tellement grandes, surtout pour les gammas, que la matière les perçoit plus comme des projectiles que comme une onde que l'on pourrait réfléchir ou focaliser. Extrême enfin parce que ces photons sont issus de densités, températures, champs magnétiques, champs gravitationnels et pressions extrêmes, et dans le cas des GRBs des effondrements d'étoiles massives ou fusions d'étoiles compactes (étoiles à neutrons ou trous noirs).

2. 1. 2. Détection

Les GRBs rayonnent des photons dans un intervalle d'énergie très large, du visible (et parfois même du radio) jusqu'au gamma. Cependant, la plus grande partie de leur énergie est surtout rayonnée sous forme de photons gamma (de ce fait on les appelle "sursaut gamma"). La figure 2.1 représente l'intervalle de rayonnement des GRBs par rapport à celui des autres objets (et événements) de l'univers.

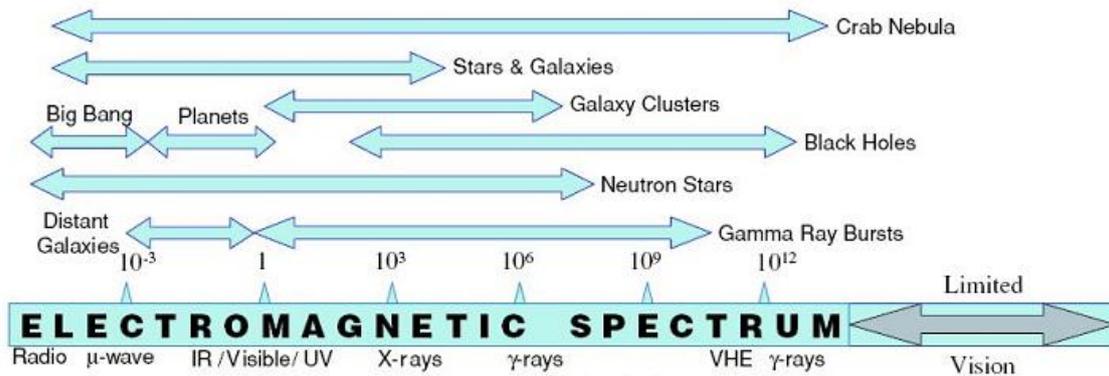


Figure 2.1 : Intervalle de rayonnement des sursauts gamma (et d'autres objets cosmiques) (B. Barish et al., 2003)

Les méthodes traditionnelles de détection des photons sont inapplicables pour les photons gamma, car ceux-ci sont très pénétrants et ils n'ionisent pas la matière. Dû à leurs petites longueurs d'ondes, les photons gamma traversent la matière souvent sans interaction nucléaire ou atomique. Donc des méthodes indirectes ont été développées pour détecter les gammas :

<i>Processus</i>	<i>Intervalle d'énergie</i>
Effet photoélectrique	$E < \sim 300 \text{ keV}$
Effet Compton	$\sim 300 \text{ keV} < E < \sim 8 \text{ MeV}$
Création de paire d'électron-positron	$E > \sim 8 \text{ MeV}$

Tableau 2.1 : Les processus d'interaction des rayons gamma (M. Stamatikos, et al., 2005).

Le tableau 2.1 donne une petite liste des processus de création de particules chargées à partir des interactions des gammas, ce qui fournit donc des méthodes de détection indirect. Et à cause de la faible probabilité (section efficace) d'interaction, les détecteurs des photons gammas doivent avoir une grande densité, et le détecteur doit avoir un mécanisme qui transforme l'énergie des paires d' $e^- e^+$ créées en une quantité d'énergie mesurable.

Un des choix largement utilisé est le scintillateur, où les rayons gamma produisent des photons optiques mesurables après le passage par une paire $e^- e^+$ (électron-positron) qui s'annihilent après avoir perdu le gros de leurs énergies cinétiques (M. Stamatikos et al., 2005).

2.2 Missions spatiales

Comme nous l'avons expliqué auparavant, les GRBs ont été découverts par coïncidence durant les années soixante par les satellites Vela – voir la figure 2.2.

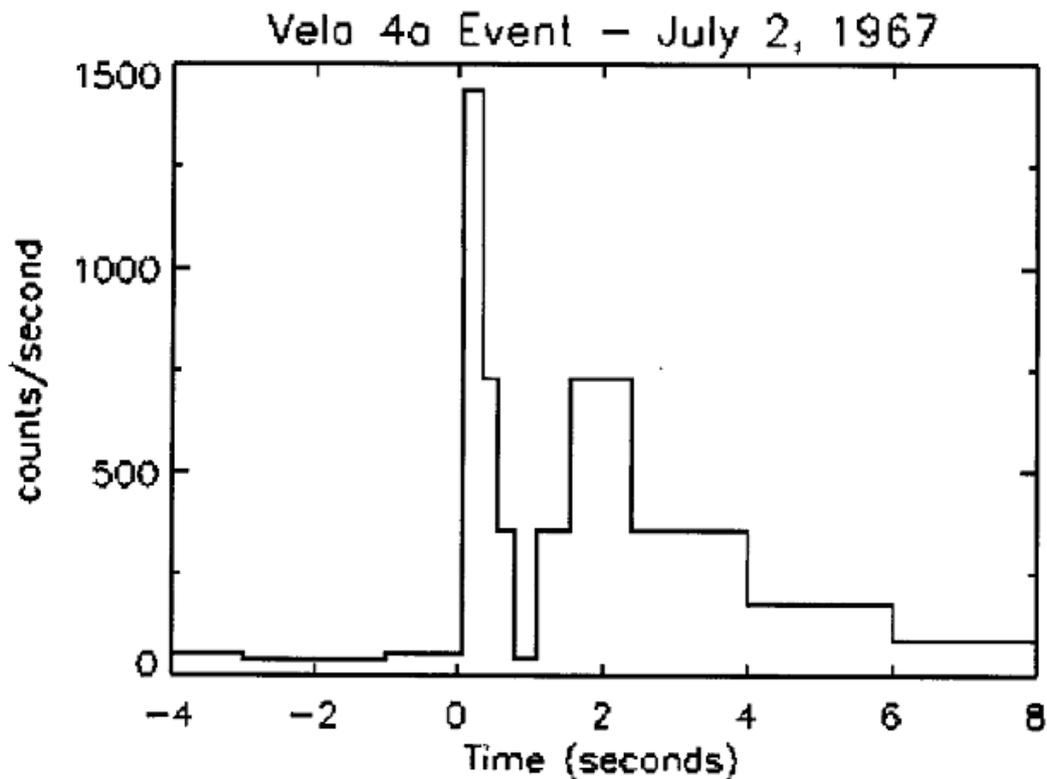


Figure 2.2 : Courbe de lumière du premier sursaut gamma (R. Klebesadel et al. 1973). Il a été observé par VELA 4a le 2 juillet 1967. La courbe de lumière montre les coups (photons) accumulés par seconde par le détecteur.

2. 2. 1. BeppoSAX (1996-2002)

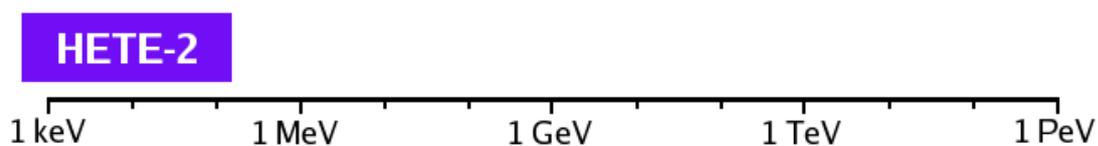
Depuis leur découverte nous sommes restés incapables d'observer ces GRBs sur d'autres longueurs d'ondes ; on ne détectait que des flashes gamma qui duraient entre une fraction de seconde et quelques dizaines ou centaines de seconds, et puisque il est difficile, voire impossible, de focaliser les rayons gamma comme nous faisons avec les autres longueurs d'ondes il était très difficile de faire une imagerie dans le domaine gamma ; par conséquent on ne disposait ni d'informations directionnelles ni d'estimation de distance. Ceci a changé en

1997 avec le satellite BeppoSAX, lancé en 1996 ; il était équipé d'un détecteur de rayonnement gamma mais aussi d'un détecteur de rayons X avec une résolution spatiale plus grande, permettant ainsi de « pointer » vers la source gamma supposée. Il a réussi à donner la position du GRB en se basant sur l'observation du sursaut dans le domaine X. Une fois la position du sursaut obtenu, il devient alors possible de continuer à observer le rayonnement du sursaut sur d'autres longueurs d'ondes (l'afterglow, qui se déclenche après la bouffe de gamma), comme le visible, et il est ainsi devenu possible de faire une imagerie spatiale de la source (sur d'autres longueurs d'ondes) (P. Mészáros, 2006). Tout aussi important, il est devenu possible de faire de la spectroscopie optique, et ainsi de mesurer le décalage des raies obscures du spectre EM, ce qui nous a permis de mesurer le redshift ; et en utilisant la loi de Hubble (puisque les GRBs sont « cosmologiques »), il est devenu possible d'obtenir la distance du sursaut, ce qui a permis l'identification de galaxies hôtes et de confirmer d'une autre manière la nature extragalactique des GRBs.



2. 2. 2. HETE-2

Une consolidation du progrès accompli par BeppoSAX a été rendue possible par le satellite HETE-2 lancé en l'an 2000. Il a fourni un flux continu des positions d'afterglows, avec un retard de quelques heures seulement, et contribué à la caractérisation d'une nouvelle classe de sources, appelées les flashes de X-ray (XRF), ressemblant à un GRBs plus doux, qui avait été identifié plus tôt avec BeppoSAX. Il a également localisé GRB 030329, qui a eu comme conséquence la première association non ambiguë avec une supernova (SN2003dh).



2. 2. 3. SWIFT

La troisième vague d'avancées significatives dans le domaine des GRBs s'est produite grâce au satellite SWIFT, à multi-longueurs d'ondes pour observer les afterglow. Lancé en novembre 2004, il a réalisé le but attendu depuis longtemps en donnant une localisation exacte des afterglows X et optiques, environ une minute seulement après le déclenchement du GRB, dans le domaine gamma. Ceci a indiqué le comportement jusqu'alors inconnu de l'afterglow entre les minutes et les heures, permettant une étude de l'émission prompte (gamma) et de l'afterglow. Il a également réalisé la découverte attendue depuis longtemps des afterglows des GRBs "courts" (dont la durée est inférieure de 2 s) (P. Mészáros, 2006). En outre, il est arrivé jusqu'à franchir la limite "6" du déplacement vers le rouge (redshift), au-delà de laquelle très peu d'objets ont été détectés jusqu'à aujourd'hui (2010). Le 23 avril 2009, Swift a pu mesurer un redshift de 8.26 pour GRB 090423, faisant de lui l'événement le plus lointain jamais détecté. La mission Swift n'est pas encore terminée, le satellite contribue et contribue encore aujourd'hui à la compréhension des GRBs.



2. 3. Propriétés Observationnelles

2. 3. 1. Distribution isotropique des GRBs avec BATSE (CGRO 1991-2000)

Au début (des années 70 jusqu'aux années 90), l'origine de ces sursauts était mystérieuse, on pensait en fait qu'ils étaient d'origine galactique. Des soupçons ont été portés sur les étoiles à neutrons pour cause de leur très fort champ magnétique. La première pièce du puzzle a pris sa place après la mise en service de CGRO (Compton Gamma-Ray Observatory), lancé en 1991, dont l'un des instruments était BATSE (Burst And Transient Source Experiment), qui a réussi à cataloguer dans une carte du ciel la position de plus de 2700 sursauts (E. Costa, et al., 1997). Et dès les premiers six mois d'observation on s'apercevait que la distribution des GRB dans le ciel ne correspondait pas à celle de notre galaxie, qui a la

forme d'un disque, les sources galactique devant alors être distribuées plus fortement dans le plan galactique ; cependant BATSE montrait que les GRBs étaient distribués de manière tout fait isotropique, c.-à-d. plus largement cosmique ; ceci a donc forcé l'admission de l'origine extragalactique des GRBs. Par la suite on a conclu que pour un GRB de flux moyen, situé à une distance cosmologique, la luminosité totale était énorme, de l'ordre de $\sim 10^{51}$ erg/s !

BATSE avait une sensibilité entre 5 et 10 fois supérieure à celles des expériences antérieures, il détecta en moyenne un GRB par jour pendant 9 années. Grâce à lui les caractéristiques observationnelles ont pu être établies, ainsi que les caractéristiques temporelles et spectrales des GRBs. De ce fait, le côté théorique lui aussi s'est activé et a fourni plusieurs nouveaux modèles. Le succès de l'expérience BATSE vient principalement du fait qu'elle fournit la position de plus de 2700 GRBs (figure 2.3).

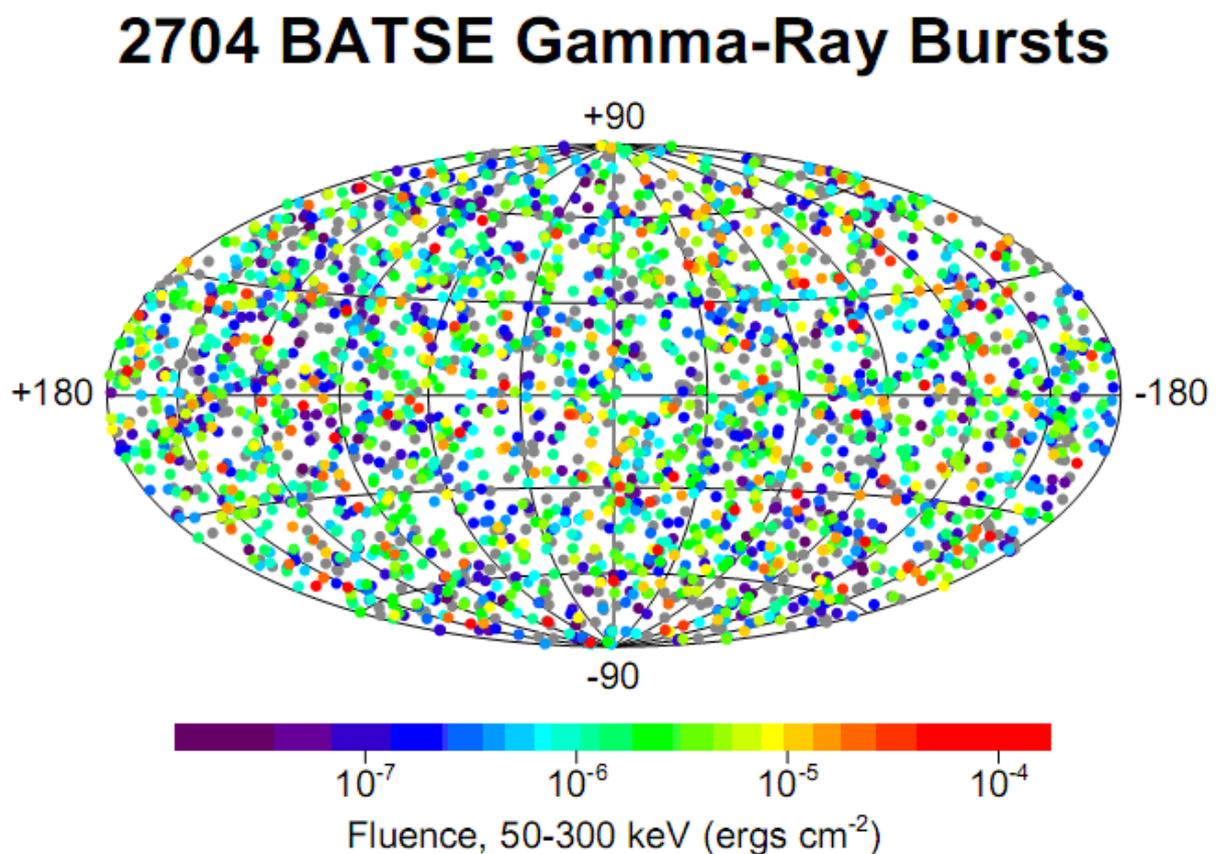


Figure 2.3 : Répartition isotropique dans le ciel des 2704 sursauts catalogués par BATSE durant ses 9 années de service (E. Costa et al., 1997).

La figure 2.4 montre la distribution de l'intensité des sursauts de la mission BATSE. Afin d'avoir cette distribution, on utilise le flux au maximum des GRBs en "photon.cm⁻².s⁻¹". Si les sursauts gamma étaient distribués de façon homogène dans un espace euclidien (les fonctions de densité et de luminosité seraient indépendantes de la position dans l'espace), dans ce cas la distribution devrait suivre l'évolution de la fonction $N(>P)$ proportionnelle à $P^{-3/2}$, où N est le nombre de sursauts gamma dont l'intensité au maximum est supérieure au seuil P , qui représente le flux de photons. Nous remarquerons que cette distribution s'écarte de la pente en $-3/2$ pour des sursauts ayant un flux P petit (sursauts faibles). Ainsi cette distribution révèle donc un déficit de sursauts ayant un faible flux au maximum, ce qui est très probablement dû à des effets d'absorptions et aux caractéristiques du détecteur. De ce fait l'origine des sursauts fut alors remise en question et l'hypothèse d'une origine cosmologique a commencé à obtenir un support grandissant dans la communauté des sursauts gamma. Si nous supposons une origine cosmologique, l'isotropie est alors naturelle et l'inhomogénéité en distance s'interprète comme un effet dû à l'expansion de l'univers qui se fait sentir dès lors que les distances deviennent cosmologiques ($z \sim 1$).

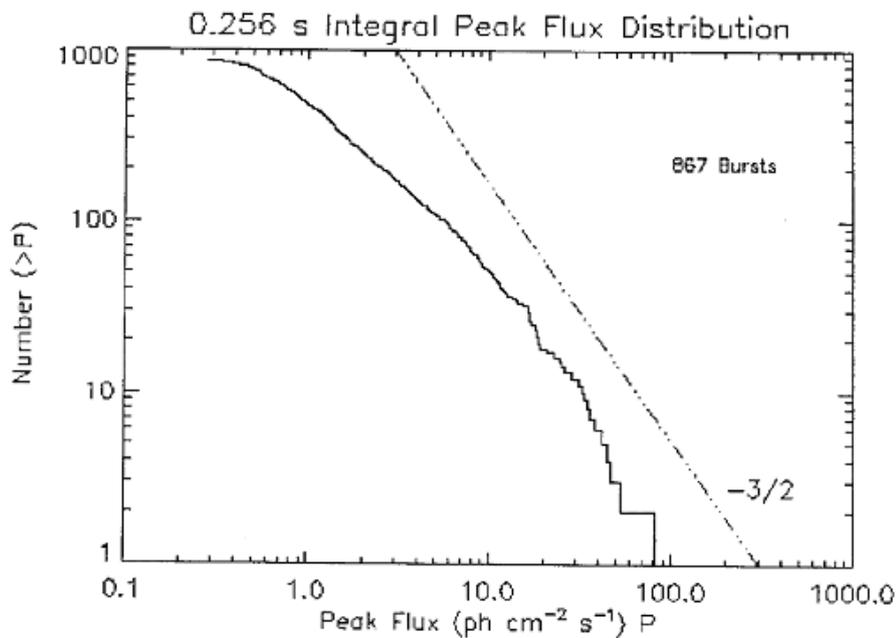


Figure 2.4 Distribution d'intensité pour les sursauts gamma de BATSE ; le nombre N de sursauts dont le flux au maximum est supérieure au seuil P en fonction du flux P au maximum. Le flux est exprimé en photons.cm⁻².s⁻¹. Si les sources étaient représentées par une distribution homogène dans un espace euclidien,

la distribution devrait suivre la fonction $N(>P)$ proportionnelle à $P^{-3/2}$. Donc il est évident que les GRBs ont une distribution homogène, et ainsi une origine extragalactique. On remarque aussi sur cette figure qu'il y a un déficit de sursauts de faible flux (W. S. Paciesas et al., 1999).

Cette distribution isotrope et inhomogène en distance des sursauts gamma s'explique alors simplement, et uniquement, si leurs sources sont situées à des distances cosmologiques favorisant des modèles de sources extragalactiques, et cosmologiques. Ce résultat éliminait définitivement le modèle des étoiles à neutron dans un disque galactique, cependant le modèle du même genre mettant en jeu des étoiles à neutrons situées dans un halo galactique étendu persista jusqu'à la découverte des premiers redshifts, en 1997 grâce au satellite BeppoSAX, où l'origine cosmologique des sources fut finalement établie de manière irréfutable.

Les localisations de BATSE n'étaient en effet pas assez précises pour permettre aux observatoires du sol de chercher rapidement d'éventuelles contreparties optiques, radio, ou X (les afterglows), en provenance de la position du GRB dans les heures qui le suivent.

Les localisations rapides de BeppoSAX ont permis de démarrer la recherche des afterglow dans quelques heures après l'alerte alors que cela nécessitait des semaines pour BATSE. Les observations de BeppoSAX ont par conséquent permis de déterminer le premier redshift grâce à la aux raies d'absorption dans les spectres des afterglows, et la première valeur obtenue était $z = 0.835$ pour le GRB 970508 (M. R. Metzger, et al., 1997), et quelques mois plus tard la galaxie hôte elle aussi a pu être observée avec Keck et HST, et pour GRB 971214 le redshift calculé a été de $z = 3.418$! (S. Kulkarni et al., 1998), ce qui a mis fin aux hypothèses des GRBs galactiques et ne laissa plus aucun doute sur l'origine cosmologique des GRBs.

2. 3. 2. Classification de GRB suivant la durée T_{90} (CGRO 1991-2000)

Les durées de rayons gamma s'étendent de 10^{-3} s à environ 10^3 s. On s'accorde à définir les GRB comme « longs » s'ils ont une durée T_{90} de plus de 2 secondes environ (T_{90} est le temps durant lequel 90 % de l'émission gamma du sursaut aura été faite), et « courts » s'ils ont un T_{90} de moins de 2 s. Cette classification est sortie assez « naturellement » des

données de BATSE (Kouveliotou et al., 1993). La figure 2.5 représente la distribution bimodale des GRBs, la limite se situant à 2 s.

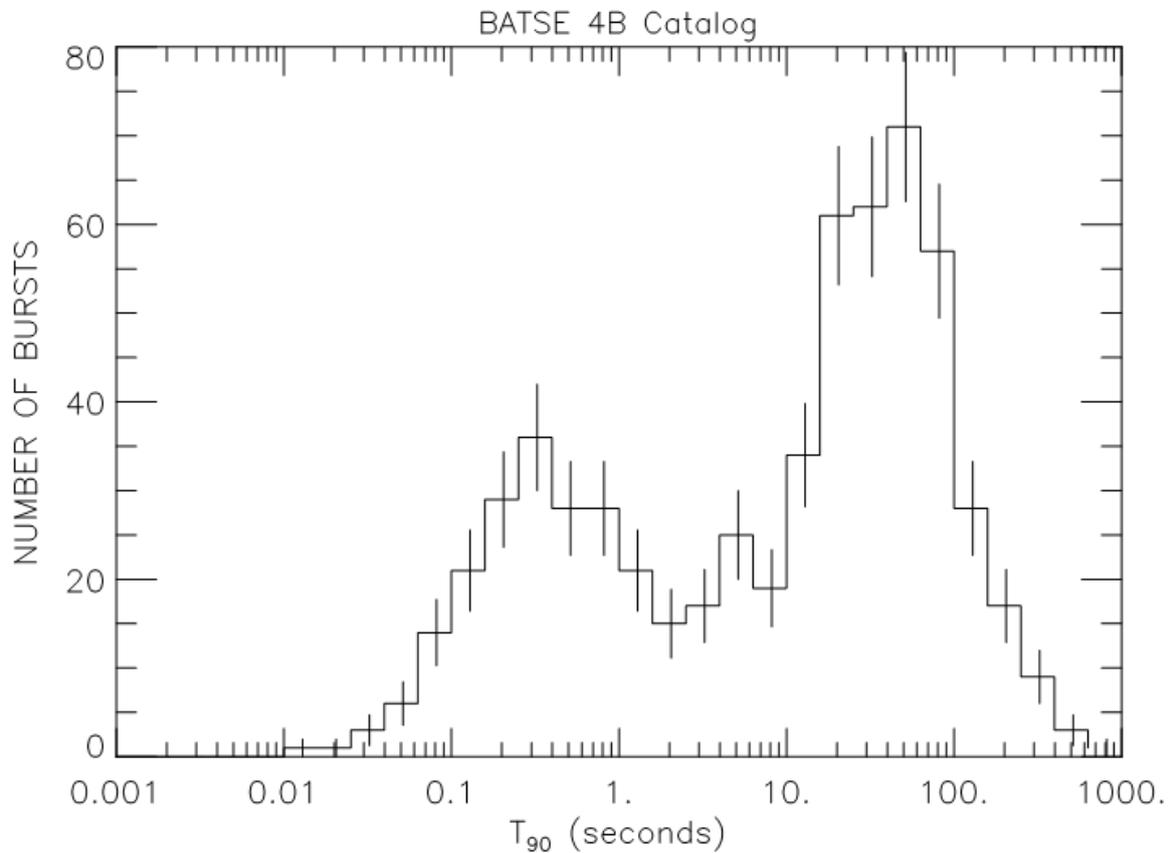


Figure 2.5 : La distribution bimodale des GRBs observés par BATSE (4B, Paciesas et al., 1999).

2. 3. 3. L'Afterglow

Les afterglows couvrent une large gamme d'énergie incluant les domaines X, optique, infrarouge et radio. Dans chaque gamme d'énergie, le comportement de la courbe de lumière suit généralement une loi de puissance (Zhang et al., 2003).

2. 3. 3. 1. *L'afterglow X*

C'est dans cette gamme d'énergie que les premiers afterglows ont été découverts. Le spectre continu est une loi de puissance en fonction du temps et de la fréquence:

$$F_x(t, \nu) \propto t^\alpha \nu^\beta$$

avec, typiquement, pour les indices de la loi de puissance, $\alpha \sim -0.9$ et $\beta \sim -1.4$.

2. 3. 3. 2. *L'afterglow optique*

Au début, les GRB avec un afterglow optique était rares, (35% seulement dans le cas de BeppoSAX) mais avec le temps on a détecté pour majorité des GRBs un afterglow optique (avec HETE-2, 90%). le spectre continu est aussi une loi de puissance en fonction du temps et de la fréquence:

$$F_x(t, \nu) \propto t^\alpha \nu^\beta$$

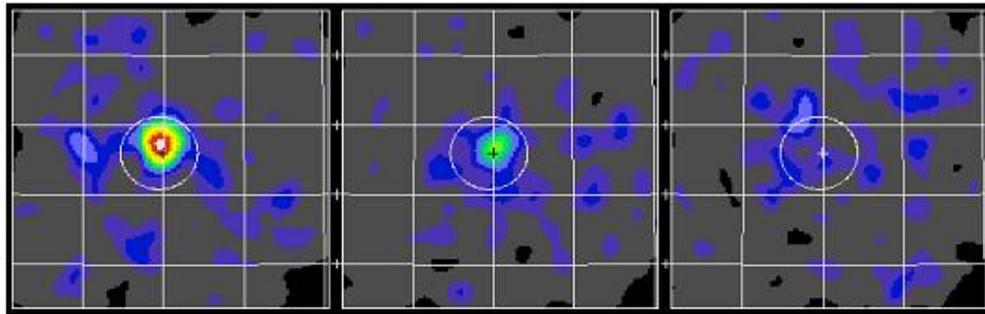
avec $\alpha \sim -1$ et $\beta \sim -0.7$.

Dans certains sursauts, la courbe de lumière devient encore plus raide après un "break" situé à un temps t_{break} . Ce break dit « achromatique » est attribué à la présence d'un jet relativiste, d'où son autre nom "jet break".

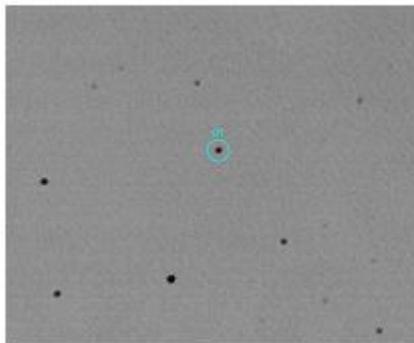
2. 3. 3. 3. *L'afterglow radio*

Il commence par croître puis il décroît après une période d'une dizaine de jours. Il a été détecté dans à peu près la moitié des sursauts et il peut être suivi pendant des mois voir des années suivant le sursaut avec une courbe de lumière décroissante.

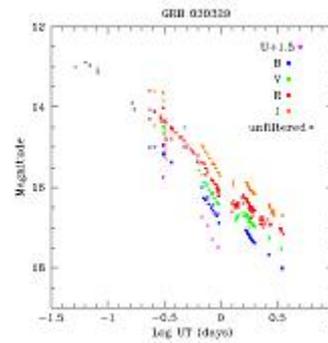
Ci-dessous quelques exemples d'afterglows :



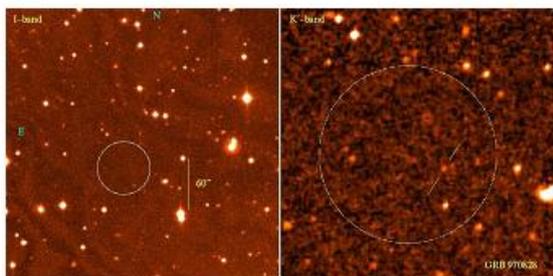
Afterglow de GRB971214 détecté par BeppoSAX .



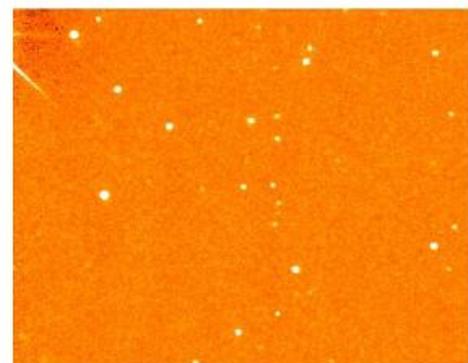
Afterglow optique de GRB030329



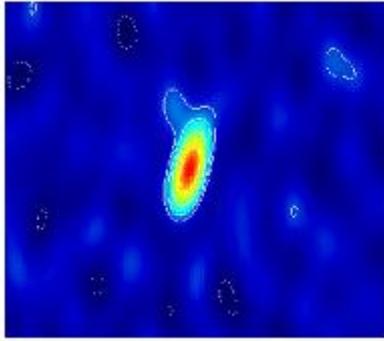
Courbe de lumière de l'afterglow optique de GRB030329



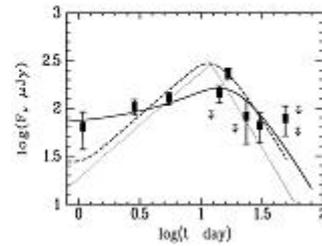
Afterglow infrarouge (NIR) de GRB 970828



GRB 030115 en infrarouge



Afterglow radio de GRB030329



Courbe de lumière de l'afterglow radio de GRB980519

Figures 2.6 : Quelques exemples d'afterglows pour certains GRBs, (Prises de : Antonelly et al., 1997, Sato et al., 2003, Zeh et al., 2003, Klose et al., 1997, Levan et al., 2003, Taylor et al., 2003 & Wang et al., 2000, respectivement)

De nombreux afterglows présentent néanmoins de nombreuses déviations autour de cette décroissance en loi de puissance, déviations qui peuvent être interprétées par différents phénomènes tels qu'un environnement inhomogène, la signature d'un jet relativiste, l'apparition d'une supernova, etc.

Les afterglows contribuent fortement à l'identification de la galaxie hôte du sursaut et à déterminer les propriétés de celle-ci, telle que la magnitude, le redshift, la morphologie, etc. La position de l'afterglow dans la galaxie hôte coïncide généralement avec les régions de formation d'étoiles des galaxies, comme dans la figure ci-dessous qui montre la position de l'afterglow dans un des bras spiraux de la galaxie hôte, région relativement plus active.

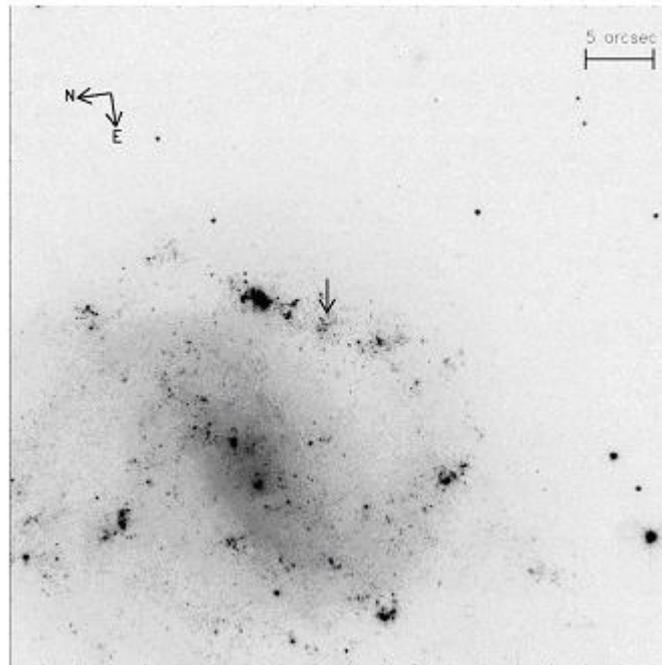


Figure 2.7 : Galaxie hôte du sursaut GRB980425. La position du sursaut est indiquée par une flèche (Fynbo et al., 1998).

2. 3. 3. 4. Sursaut obscurs

Ce type de sursauts est appelé aussi « dark » ou encore « sombres ». C'est le satellite BeppoSAX qui a mis en évidence cette catégorie. Elle regroupe tous l'ensemble des sursauts longs qui n'ont pas eu d'afterglows optiques détectés, alors que les positions étaient fournies rapidement par le satellite. Le premier est le GRB 970828 de BeppoSAX. Plusieurs explications sont encore discutées pour résoudre ce problème. La première explication fait appel à des sursauts à très grand redshift, une seconde explique l'absence d'afterglow par le fait qu'ils sont affaiblis par la poussière, et une troisième explication suppose que les sursauts aient des afterglow intrinsèquement très faibles.

Certaines observations ont révélé que certains afterglows décroissaient très rapidement et étaient plus faibles que ceux habituellement étudiés. Ceci explique en partie la raison des sursauts obscurs, qui peuvent aussi être expliqués par un environnement poussiéreux autour de la source ou par des sursauts situés à très grand redshift.

2. 3. 4. Les XRFs

Les flashes de rayon X (XRFs) sont une classe de sursauts dont les courbes de lumières et les spectres ressemblent à ceux d'un GRB typique, excepté le fait que leurs spectres sont beaucoup plus doux, leurs pics spectraux E_p étant typiquement à des dizaines keV ou moins. Les XRFs ont été identifiés la première fois avec le satellite de BeppoSAX, et ont été étudiés en détail, et plusieurs autres ont été découverts par le satellite HETE-2. Leurs flux et luminosités isotropiques tendent à être plus faibles que pour les GRBs, ce qui rend la recherche sur leurs afterglows plus difficiles. Néanmoins, plusieurs de tels afterglows ont été détectés, et des déplacements vers le rouge ont été mesurés pour certains d'entre eux.

2. 3. 5. Relation d'Amati

En 2002, Amati et al., ont étudié 12 GRBs de BeppoSAX pour lesquels un redshift avait été mesuré ; ces chercheurs ont montré qu'il existe une relation purement observationnelle entre la valeur de l'énergie du photon, selon laquelle il y a un pic dans le spectre νF_ν , de l'émission prompte, E_p à la source (c'est-à-dire dans un repère au repos par rapport à la source), notée $E_{p,i}$ (en keV), et la valeur de l'énergie totale isotropique équivalente E_{iso} mesurée entre 1 keV et 10 000 keV, c'est à dire l'énergie rayonnée par la source dans cette gamme d'énergie, en admettant l'hypothèse d'une émission isotrope.

La relation d'Amati exige un redshift mesurable, car avec z il est possible de connaître le spectre dans un repère au repos par rapport à la source, ce qui conduit à connaître les propriétés intrinsèques du GRB, comme le pic d'énergie intrinsèque, puisque :

$$E_{p,i} = E_p \times (1 + z)$$

Où, E_p est l'énergie pic que nous mesurons. Et pour l'énergie totale rayonnée (isotropique) dans un intervalle bolométrique (en générale, on adopte l'intervalle 1-10000 keV dans un repère cosmologique au repos) nous avons la formule, un peu plus compliqué, suivante:

$$E_{iso} = \frac{4\pi D_l^2}{(1+z)} \int_{10^{44}}^{10^{47}} \frac{EN(E)dE}{1+z} \quad \text{erg}$$

Où : $N(E)$ est le spectre du GRB intégré dans le temps et D_l est la distance lumineuse « luminosity distance » (Amati et al., 2002).

La relation trouvée était la suivante (Amati et al., 2002):

$$E_{p,i} = K \times E_{iso}^m$$

avec E_{iso} , l'énergie isotrope en unités de 10^{52} erg, K et m sont des constantes, avec $K \sim 95$ et $m \sim 0.5$, alors que $E_{p,i}$, est l'énergie du photon (en keV) selon laquelle le spectre νF_ν est au maximum.

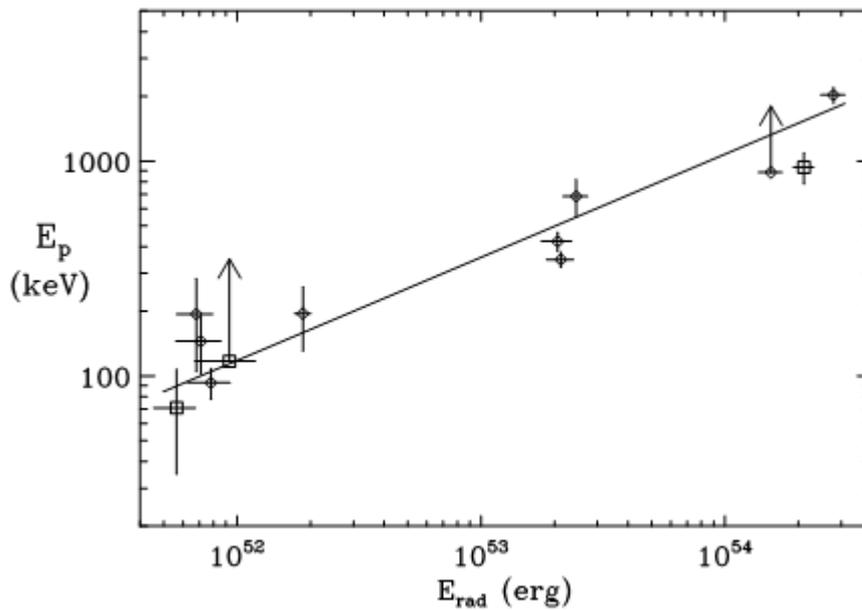


Figure 2.9 Relation d'Amati pour les 12 sursauts de BeppoSAX (Amati et al. 2002).

La relation découverte par Amati et al., pour 12 GRBs fut non seulement confirmée et étendue pour la majorité des GRBs, mais elle s'appliquait aussi aux XRFs. De ce fait elle nous a aidé à en déduire que les XRFs sont issus du même phénomène que les GRBs et ont leur place dans les différentes relations spectrales définies pour les GRBs. La relation d'Amati peut être aussi utilisée comme indication sur la distance du sursaut. Atteia (2003) a utilisé cette relation combinée avec les durées afin de proposer une relation empirique permettant de déterminer une valeur indicative du redshift (pseudo-redshift), à partir des paramètres spectraux, de la durée et des fluences dans différentes gammes d'énergie.

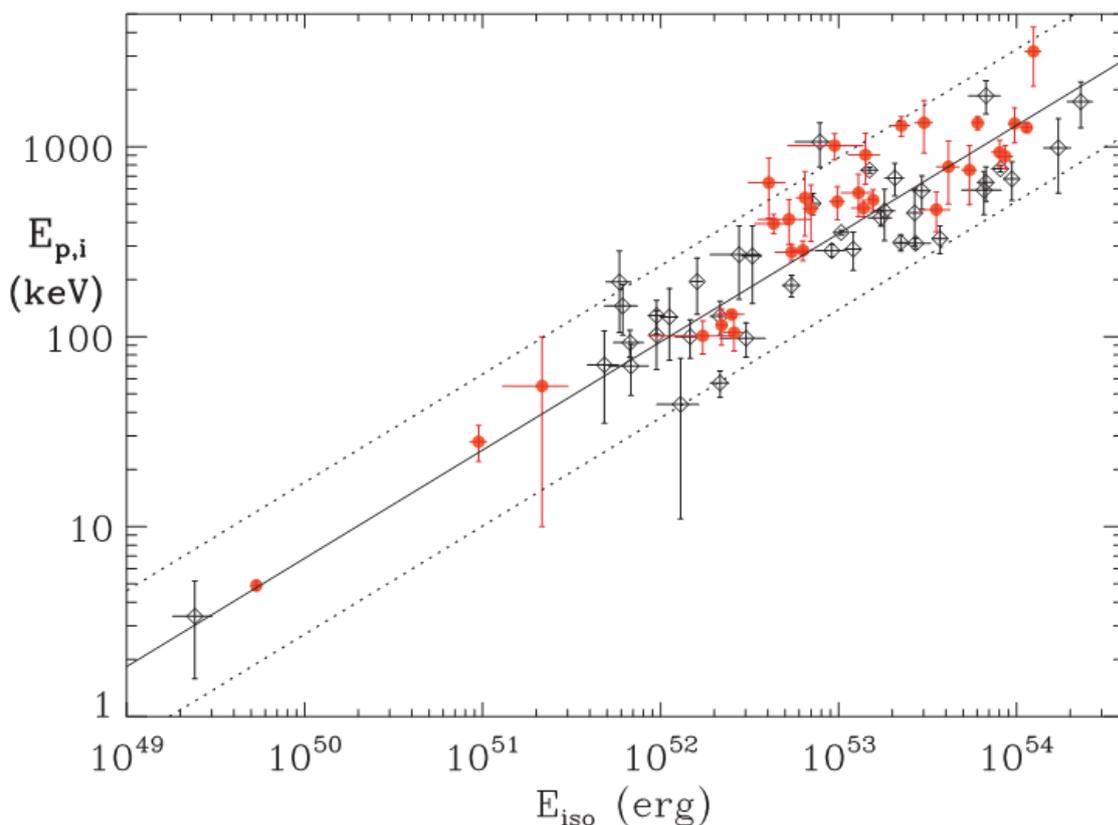


Figure 2.10 : Relation d'Amati pour 70 sursauts avec une estimation de E_{iso} , $E_{p,i}$ et z . Les points représentent les sursauts détectés par Swift (en rouge) et les autres satellites (en noir). La ligne représente le meilleur « fit » (Amati et al., (2008)).

La relation d'Amati a eu un effet magique sur la stimulation du côté observationnel et théorique des GRBs, en moins d'une demi décennie plusieurs autres découvertes, en particulier d'autres corrélations, émergent. Parmi ces découvertes il y a la relation de Ghirlanda et son modèle de jet (émission collimatée).

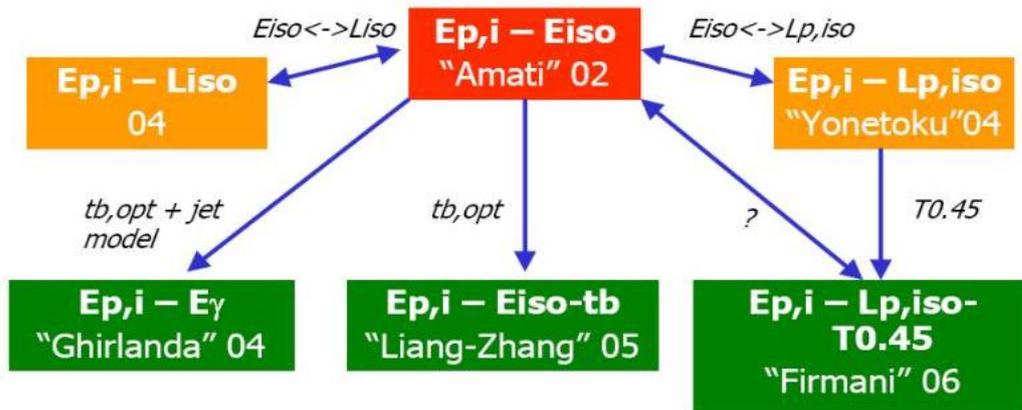


Figure 2.11 La relation d'Amati et ses liens avec les principales autres corrélations dans le domaine des sursauts gamma (Amati et al., 2008b).

2. 4. Intérêt des sursauts gamma

Les GRBs sont, après le Big Bang, le phénomène ultra relativiste le plus énergétique, détecté dans l'univers. Bien que les modèles restent incertains et les GRBs sont souvent divisés en sous-classes, un schéma General du mécanisme d'émission de telles énergies extrêmes est peut-être celui d'une éjection relativiste par un trou noir accrétant de la matière. Les GRBs jouent donc un rôle essentiel dans la compréhension des mécanismes présents autour des trous noirs. En ce qui concerne leurs vitesses ultra relativistes, elles sont de loin nettement supérieures ($\gamma > 100$) à celles observées dans les microquasars et blazars ($\gamma \sim 20$) et ainsi elles permettent d'explorer des régimes hydrodynamiques présents dans aucun autre type de source

2. 4. 1. Accélérateurs de particules

Dans certains sursauts des photons avec des énergies supérieures au GeV ont été observés. On croit aussi que les sursauts sont susceptibles d'accélérer des particules ultra énergétiques (10^{19} eV), qui donneraient comme sous-produits des neutrinos ultra-énergétiques

(10^{14} eV) que l'on peut détecter sur terre en tant que rayons cosmiques de très haute énergie et dont la provenance reste aujourd'hui encore mystérieuse. Cette hypothèse n'est pas déraisonnable surtout lorsqu'on sait qu'une quantité plus ou moins importante de baryons est susceptible de faire partie du vent relativiste et donc peut être accélérée comme les électrons.

2. 4. 2. Rayonnement gravitationnel

Avec les énergies phénoménales dégagées par les sursauts gamma, les sources pourraient aussi émettre des ondes gravitationnelles que l'on cherche à détecter aujourd'hui. Parmi les deux sources des GRBs envisagées aujourd'hui il y a l'effondrement d'une étoile supermassive et la fusion d'objets compacts, c'est cette dernière configuration qui semble la plus prometteuse, car des ondes gravitationnelles très puissantes pourraient être formées à la suite de la fusion du système binaire compact, modèle envisagé dans le cas des SGRBs (short GRBs), et donc être détectées dans le cas des sursauts les plus proches.

2. 4. 3. Galaxies lointaines

La détection des galaxies abritant des sursauts gamma situé à des distances cosmologiques et leur étude spectroscopique permet de contraindre les modèles de galaxies lointaines. Les GRBs permettent aussi de mesurer le taux de formation d'étoiles (Star Formation Rate SFR) dans l'univers et d'étudier le milieu interstellaire à des âges très reculés dans le temps.

2. 4. 3. Cosmologie

Les distances auxquelles les sursauts gamma sont émis, et détectables, font d'eux d'excellentes chandelles pour sonder les conditions qui prévalaient à des époques extrêmement reculées dans le temps. Il n'y a pratiquement pas de doute sur l'origine des sursauts gamma longs, c'est explosions d'étoiles massives et ces dernières sont à priori formées très tôt dans l'univers, à $z \sim 20$ (époque de la reionization). On s'attend alors à découvrir des GRBs à des redshifts très grands. De plus, ces GRBs à grands redshifts sont détectables, contrairement aux quasars qui émettent leurs énergies dans des intervalles de temps plus long, la luminosité des GRB ne diminue pas aussi rapidement avec la distance. On s'attend donc à mesurer des

sursauts jusqu'à des redshifts de ~ 12 pour les afterglows et même jusqu'à $\sim 15 - 20$ pour l'émission prompte. Les sursauts mesurés avec un grand redshift ne présentent pas de différences fondamentales dans la luminosité de leurs émissions promptes et l'afterglow comparé aux autres sursauts relativement plus proches. De ce fait, les GRBs à grand z sont de très bons traceurs de l'univers primordial. Leur détection devrait aussi pouvoir contraindre le taux de formation d'étoiles à grand redshift. De plus, les étoiles massives sont sources de métaux, et donc la spectroscopie d'afterglows lointains pourrait permettre de comprendre l'univers, en particulier sa composition chimique, à des époques très lointaines (reionization) en calculant des taux de métallicité sur la ligne de visée, et dans le milieu environnant de la source. En effet l'afterglow "éclaire" le milieu environnant et les systèmes présents sur la ligne de visée.

Depuis plus de quarante ans qu'ils ont été découverts, les GRBs restent encore mal compris et sont potentiellement porteurs de nombreuses découvertes qui pourraient permettre une meilleure compréhension de l'univers lointain. Bien que plusieurs perspectives restent loin d'être utilisables, la valeur des GRBs est sans doute inestimable. Notre mémoire et son objectif sont au cœur de certains de ces intérêts et pourraient (je l'espère) contribuer un tant soit peu à la compréhension des phénomènes liés aux GRBs.

Chapitre III

Progéniteurs et galaxies hôtes des GRBs

3. 1. Les Progéniteurs

Les GRBs, que nous observons avec une fréquence moyenne de $300 \text{ GRB.yr}^{-1}.\text{sr}^{-1}$ (Lapi et al., 2008), sont tout de même des événements rares dans une galaxie, avec un taux estimé à 1 événement tous les 10^5 ans (par galaxie) (Savaglio et al., 2008).

Les observations nous indiquent que les GRBs résultent d'une petite fraction ($\sim 10^{-6}$) d'étoiles qui subissent un dégagement catastrophique d'énergie à la fin de leur évolution (le modèle du "collapsar") (Mészáros 2006). Les progéniteurs des GRBs diffèrent selon le type de sursauts (court ou long). Pour les longs GRBs (LGRBs) il y a presque une certitude que les candidats sont des étoiles massives avec une masse allant jusqu'à une centaine de masse solaire (telle que les étoiles de Wolf-Rayet). Il est avéré que plus la masse d'une étoile est grande plus sa consommation d'énergie par fusion sera grande et rapide, et par conséquent plus sa vie sera courte ; ainsi l'âge des étoiles massives se compte par millions d'années, alors que pour une étoile ordinaire comme notre soleil l'âge est estimé à 10 000 millions d'années. En général les étoiles massives se retrouvent avec un noyau lourd peu après leurs naissances, de ce fait la fusion s'arrête au cœur de l'étoile et rien ne peut contrer la force gravitationnelle terrible du poids de l'étoile elle-même qui la comprime en un petit volume. Ainsi l'équilibre de l'étoile est rompu et l'étoile s'effondre sous l'effet de son propre poids. De ce fait l'étoile se transforme en supernova Type I (ou hypernova si la masse est de l'ordre de cent fois la masse solaire) et le noyau effondré crée une singularité dans l'espace-temps donnant naissance à un trou noir (figure 3.1). Il est possible aussi qu'un trou noir surgisse après un incident d'accrétion soudain, probablement au cours du fusionnement avec un compagnon. Mais d'après ce modèle la création d'un trou noir n'implique pas toujours la production d'un GRB, il est impératif que le trou noir résultant dispose d'une grande vitesse de rotation sur lui-même.

Mais en générale les étoiles perdent leur moment angulaire sous forme de vent stellaire, semblable au vent solaire ; de plus le vent des étoiles dépend du niveau de métallicité

de l'étoile (l'abondance en éléments lourds) : plus le niveau de métallicité de l'étoile est grand, plus le vent de l'étoile sera plus important, plus l'étoile perd son moment angulaire et moins sera la rotation du trou noir (résultant de la mort de l'étoile) sur lui-même. Ainsi la rotation rapide du trou noir, indispensable pour la création d'un LGRB, nécessite que le progéniteur soit d'une basse métallicité pour avoir moins de vent stellaire et ne pas perdre le moment angulaire de l'étoile et la garder en rotation sur elle-même. Puis suite à l'effondrement de l'étoile sur elle-même, et compte tenu de la loi de conservation du moment angulaire, le trou noir, dont le diamètre est très petit par rapport à celui de l'étoile, compense la perte en diamètre par une augmentation extraordinaire en vitesse de rotation, ce qui assure la conservation du moment angulaire. Ainsi les trous noirs peuvent atteindre des vitesses de rotations vertigineuses. Ce scénario est désigné sous le nom du scénario de trou noir ou d'hypernova. Il est possible aussi que l'effondrement du noyau de l'étoile crée une étoile à neutron, au lieu d'un trou noir, avec une aussi grande rotation ; cela peut aussi donner naissance à un GRB.

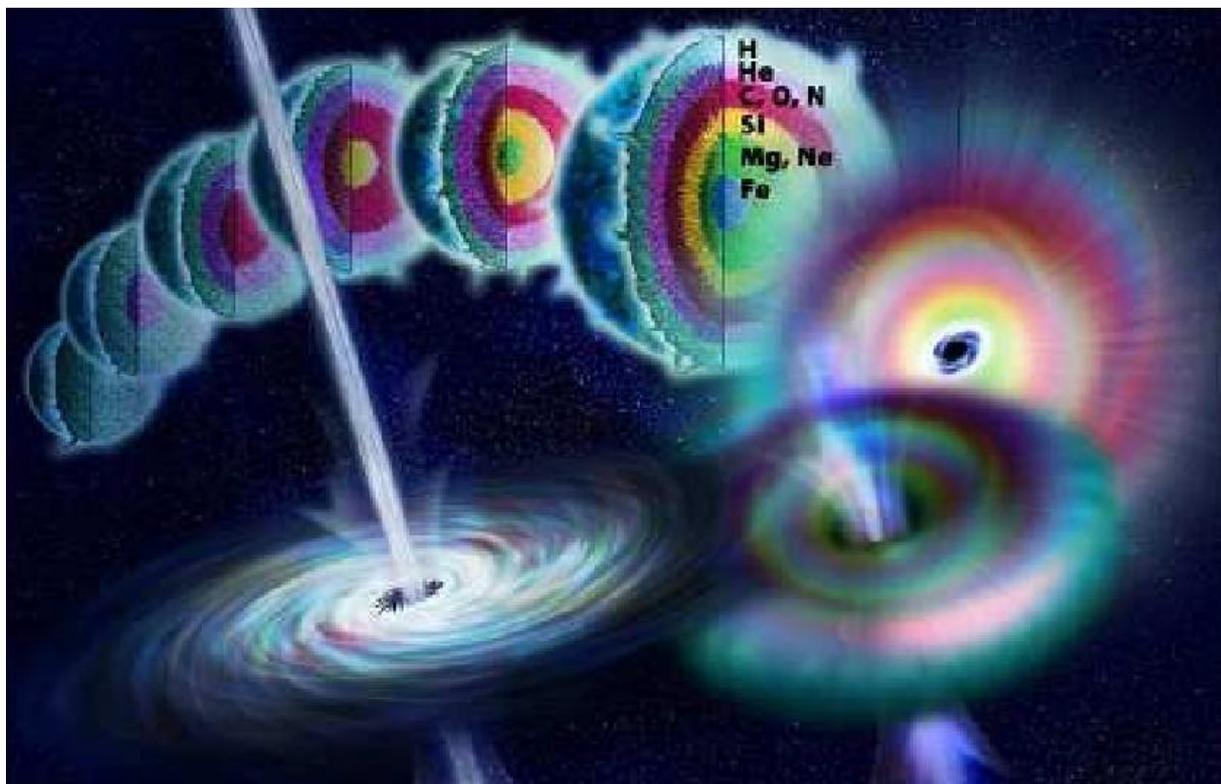


Figure 3.1. Imagination d'un artiste des phases du modèle de production de GRB (collapsar) à partir d'étoile massive (Campisi 2009).

Pour les GRBs courts, ce n'est pas encore aussi claire mais le scénario le plus considéré fait appel à la fusion d'un système binaire formé d'objets compacts, par exemple la fusion de deux étoiles à neutrons (NS-NS) ou d'une étoile à neutron avec un trou noir (NS-BH), les deux objets compacts perdent du moment angulaire orbital en rayonnant des ondes gravitationnelles et finissent par fusionner (figure 3.2). Ce deuxième scénario de progéniteur, est apparu suite à la détection des afterglows des sursauts courts par Swift. Contrairement au scénario des LGRBs, celui des SGRBs n'exige pas une basse métallicité chez les progéniteurs des SGRBs.

Ces deux scénarios ont comme conséquence la formation d'un trou noir de quelques masses solaires et d'une vitesse de rotation vertigineuse, avec un énorme potentiel gravitationnel qui se libère suite à l'accrétion qui fournit de l'énergie nécessaire pour le déclenchement du sursaut. L'accrétion rapide de la matière stellaire par le trou noir libère une énergie énorme ($\sim 10^{51}$ ergs) via le champ magnétique sous forme de deux jets. L'émission prompte (l'émission gamma) du sursaut sera collimatée dans la direction des jets, et l'interaction de cette émission avec le milieu interstellaire produit l'afterglow.

La durée du sursaut dans ce modèle est liée au temps que met la matière dispersée pour retomber et former un disque d'accrétion autour du BH, ou à la période d'accrétion du disque.

D'autres scénarios moins élaborés et acceptés se basent sur l'effondrement stellaire d'une étoile à neutron avec une rotation extra rapide et un champ magnétique très intense.

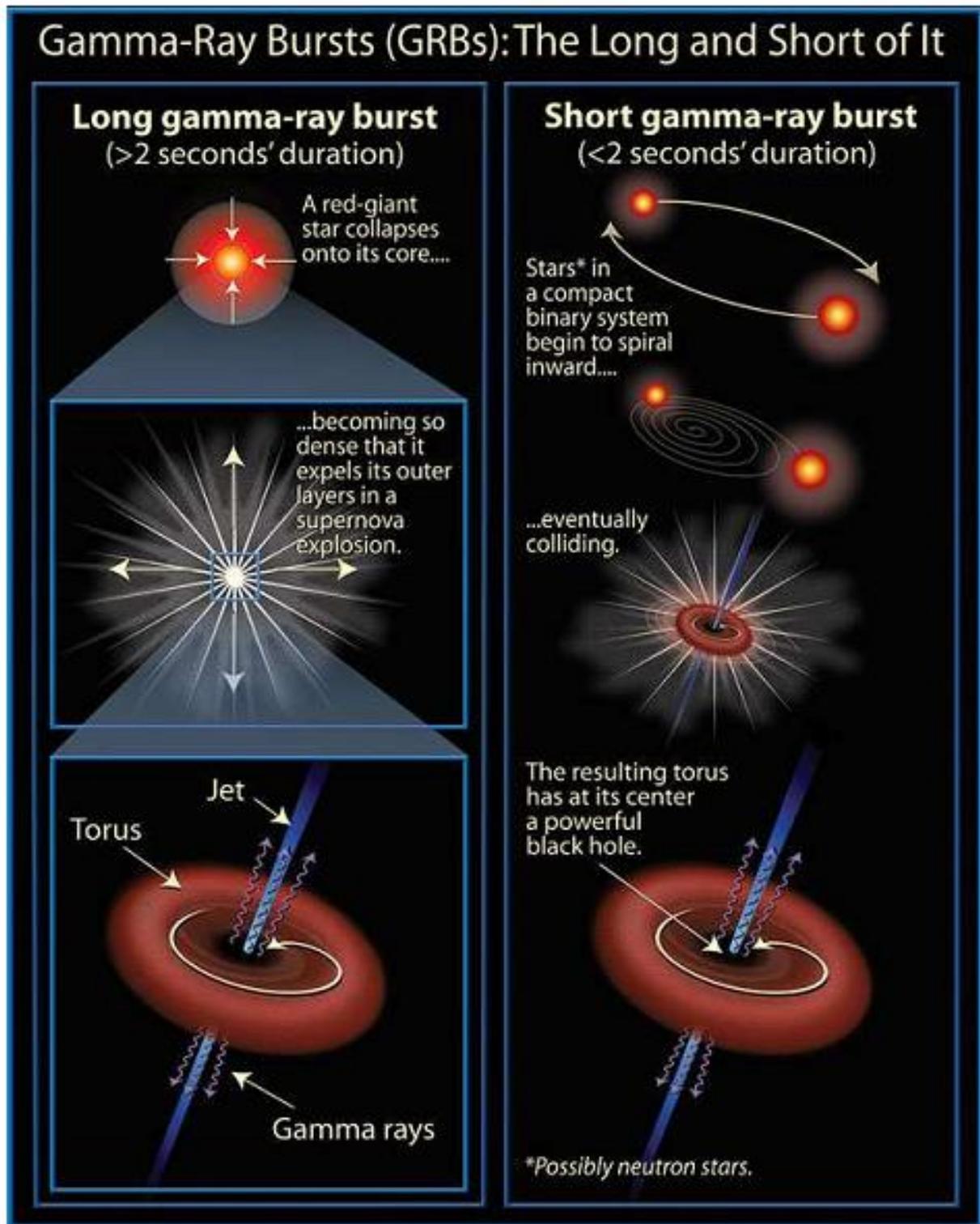


Figure 3.2. Vue d'artiste des phases du modèle de collapsar pour les LGRB (à gauche) et du modèle de fusion de deux objets compacts des SGRBs (à droite) (Campisi 2009).

3. 1. 1. Association avec supernovae

Au moins quelques longs GRBs sont associés à des supernovae (SNe). Le premier cas est celui de GRB 980425 avec SN 1998bw, qui était une supernova particulièrement énergétique (du type Ib/c). En l'utilisant comme étalon, d'autres associations possibles ont été proclamées : GRB 980326, GRB 970228, GRB 000911, GRB 991208, GRB 990712, GRB 011121, GRB 020405 et GRB 031203 (Mészáros 2003 et ses références additionnelles). La première signature claire de supernova (SN 2003dh) a été détectée à $z = 0.168$ GRB 030329, établissant solidement les associations de GRB avec SNe (figure 3.3). Ces connexions pèsent lourdement en faveur du scénario d'effondrement des étoiles massives. Contrairement aux LGRBs, les SGRBs n'ont jamais pu être associés avec une SN, ce qui témoigne de la différence fondamentale entre les deux classes.

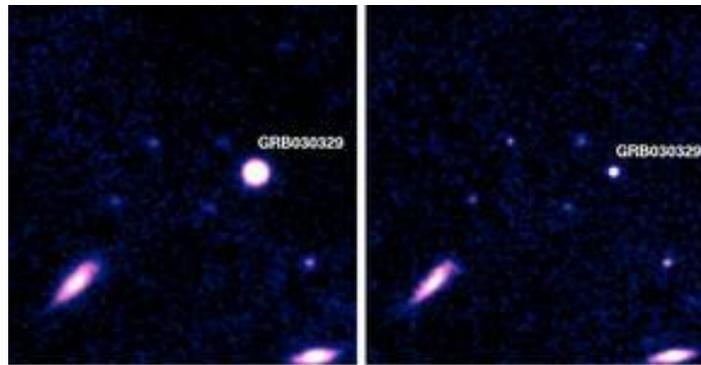


Figure 3.3. L'afterglow de GRB 030329 ($z = 0.168$, à gauche l'image a été prise le 3 Avril, soit 5 jours après le sursaut. L'image à droite a été prise le 1 Mai. Le spectre de l'afterglow a une forme (et une évolution) typique d'une supernova (Stanek et al., 2003). Images prises avec VLT telescope (ESO).

3. 2. Les galaxies hôtes

L'observation des galaxies hôtes est très importante pour la compréhension des GRBs. Les observations actuelles révèlent que les longs sursauts gamma ($T_{90} > 2s$) ont lieu dans des galaxies de formations d'étoiles, ce qui est consistant avec le fait que les GRBs longs sont produits par la mort d'étoiles massives (Conselice et al., 2005 ; Fruchter et al., 2006 ; Tanvir & Levan, 2007 ; Wainwright et al., 2007, et les références additionnelles dans celles-ci). La découverte de la connexion entre les longs GRBs et l'effondrement des noyaux des supernovae de type Ic (Galama et al., 1998 ; Li, 2006 ; Woosley and Heger, 2006) a soutenu

le modèle du collapsar des longs GRBs (MacFadyen and Woosley, 1999 ; MacFadyen et al., 2001).

D'autre part, les GRBs courts ($T_{90} < 2s$) ont été détectés dans des jeunes galaxies tout comme dans de vieilles galaxies, ce qui est similaire à la situation des supernovae de type Ia. Le taux de formation d'étoiles (Star formation Rate, SFR) dans les galaxies hôtes des sursauts courts est plus bas que celui des galaxies hôtes des GRBs longs (Berger et al. (2006), et ses références).

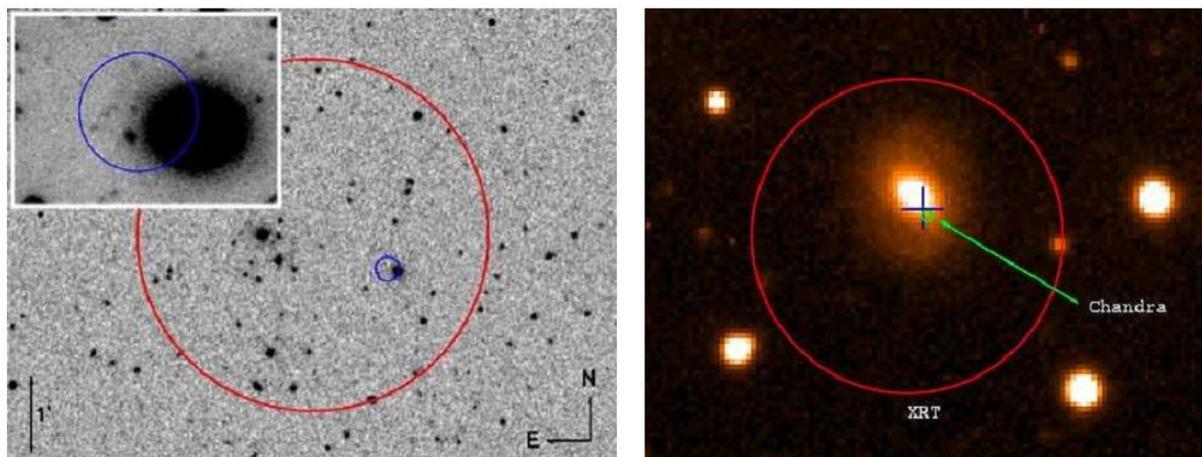


Figure 3.4. Deux GRBs courts observés par Swift et associés avec de vieilles galaxies elliptiques. A gauche : GRB 050509B (Gehrels et al. 2005 ; Bloom et al. 2006a) et à droite : GRB 050724 (Barthelmy et al. 2005b ; Berger et al. 2005a). Les cercles rouges et bleus représentent respectivement l'erreur angulaire des instruments BAT et XRT (de Swift), respectivement.

Jusqu'à présent (Juin 2010), il y a eu environ 150 GRBs avec un redshift mesuré, mais seulement 50 d'entre eux ont une estimation de la masse stellaire de leurs galaxies hôtes (<http://www.grbhost.org>). Celles-ci sont souvent à grand redshift (une moyenne d'environ 1), de ce fait leur étude est très difficile, surtout du côté observationnel, ce qui explique le faible pourcentage des galaxies hôtes trouvées. De plus il est parfois possible que des galaxies proches se trouvent dans la direction de certains GRBs (et couvrent alors les vraies galaxies hôtes), ce qui fait apparaître les galaxies proches comme des galaxies hôtes, le risque étant plus grand à grands redshifts. Le HST (Hubble Space Telescope), est unique dans sa capacité à distinguer entre les galaxies hôtes et les autres objets extragalactiques.

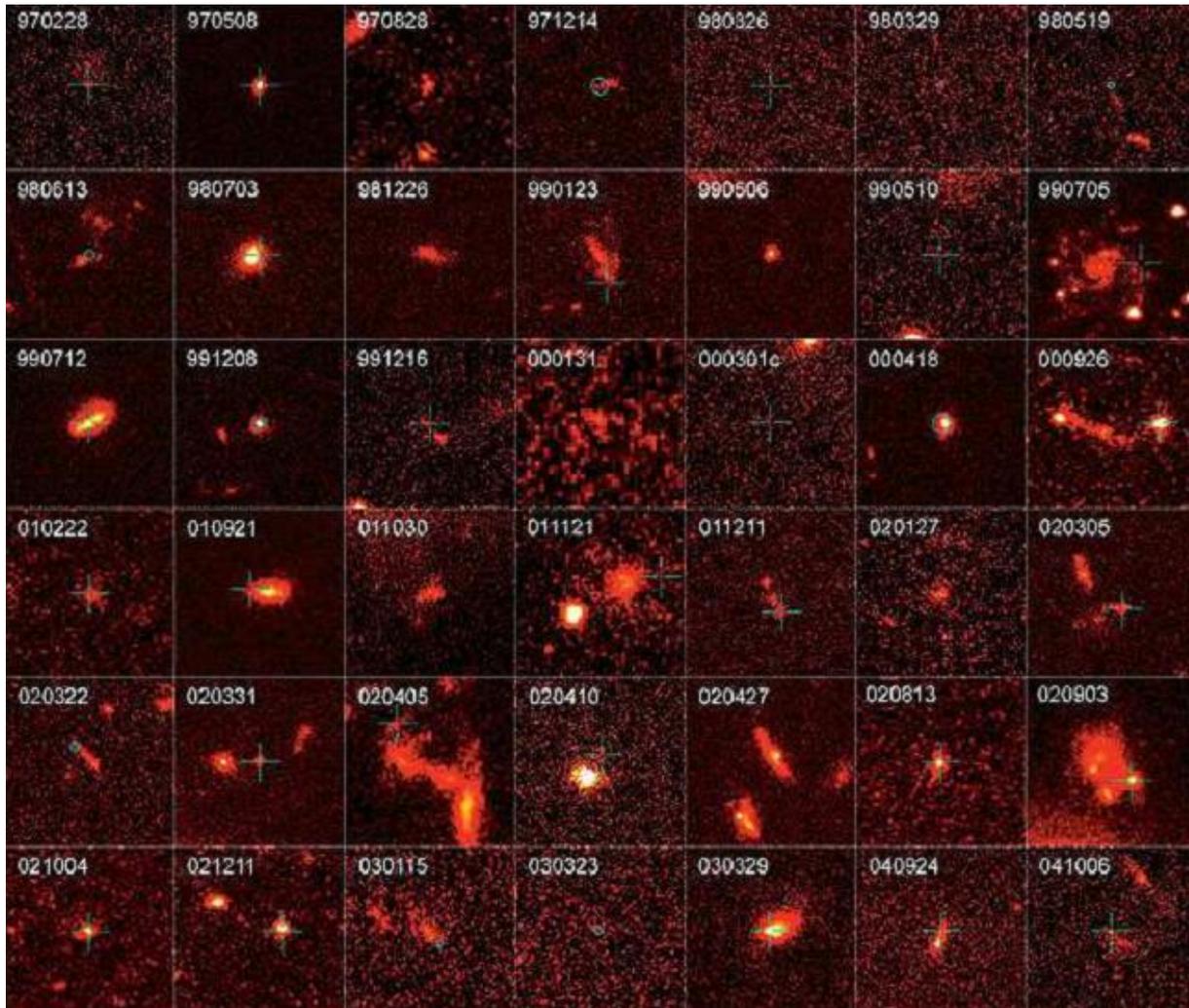


Figure 3.5. Prises de Fruchter et al. 2006: Chaque image correspond à une région carrée du ciel de $3.75'' \times 3.75''$. Ces images ont été prises avec les instruments Space Telescope Imaging Spectrograph (STIS), le Wide-Field et la Planetary Camera 2 (WFPC2) et l'Advanced Camera for Surveys (ACS) sur HST (Hubble Space Telescope). Dans le cas où la position de la galaxie hôte du GRB est connue avec une précision supérieure à $0.15''$, la position du GRB est indiquée avec une marque verte. Si l'erreur en position est plus petite que le point de la fonction de distribution de l'image ($0.07''$ pour STIS et ACS, $0.13''$ pour WFPC2) la position est marquée par une croix, sinon l'erreur positionnelle est indiquée par un cercle. Les images du STIS ont toutes été prises en lumière blanche (pas de filtre), et pour la plupart des images du WFPC2 et du ACS, le filtre F606W est utilisé (mais dans certains cas où les images avec ce filtre ne sont pas disponibles, nous avons des images avec le filtre F555W ou F775W). Les images du STIS et du F606W peuvent être considérées comme des images visuelles, elles représentent des galaxies montrant les couleurs typiques de la bande V des GRBs, et F775W correspond à la bande Johnson 1 basé au sol. Dû au redshift des galaxies hôtes, les couleurs de ces images correspondent généralement au bleu ou l'ultraviolet dans un repère au repos par rapport à la galaxie hôte, ainsi la lumière de ces galaxies est celle produite par des étoiles massives présentes en grands nombres dans ces galaxies.

La figure 3.5 représente les images de 42 galaxies hôtes. Tous les GRBs de ces galaxies sont du type long, avec des émissions afterglow permettent de bien les localiser et de déterminer la galaxie hôte dans chaque cas.

Du fait qu'il est difficile de détecter et localiser les GRBs courts, vu que leurs afterglows sont de courte durée, la plupart des études, des observations et des découvertes se font sur les galaxies hôtes des LGRBs ; c'est pourquoi le gros de ce chapitre sera consacré à résumer les propriétés importantes des galaxies hôtes des LGRBs.

Les informations observationnelles récoltées jusqu'à présent indiquent que la plupart des LGRBs sont présent dans des galaxies formatrices d'étoiles, de faible luminosité, dominées par une jeune population stellaire avec une phase de gaz et une métallicité en dessous de celles du soleil, quoiqu'il y ait quelques cas de galaxies hôtes avec une grande métallicité (Prochaska et al., 2004 ; Wolf and Podsiadlowski, 2007 ; Fynbo et al., 2006 ; Price et al., 2007 ; Savaglio et al., 2003 ; Savaglio, 2006 ; Savaglio et al., 2008 ; Stanek et al., 2006). Elles possèdent aussi d'importantes raies émissions, ce qui est similaire aux caractéristiques des galaxies Lyman- α , ces deux derniers sont très semblables aux galaxies hôtes à des redshifts proches (Tanvir & Levan 2007).

Dans une étude récente, Savaglio et al. (2009) ont présenté une analyse complète sur la plus grande population des galaxies hôtes de redshifts $0 < z < 6.3$. Les galaxies hôtes des GRBs peuvent avoir un rôle très important pour sonder l'histoire cosmique de la formation et l'évolution de la galaxie. La plupart des GRBs sont associés avec la mort des étoiles jeunes, ce qui est plus commun dans les galaxies de grande formation d'étoiles. De ce fait les GRBs représentent un outil performant dans la détection des galaxies à grand SFR. Comme le montrent des études récentes, la formation d'étoiles dans l'univers à $z < 1$ est dominée par des petites galaxies formatrices d'étoiles, peu lumineuses, de petites masses et avec des caractéristiques similaires aux propriétés typiques des galaxies hôtes des GRBs. De plus dans l'univers à $z \sim 5$, les galaxies hôtes des GRBs observés avec le télescope SPITZER sont environ 3 fois plus faibles en luminosité que les galaxies typiques, ce qui a été confirmé spectroscopiquement dans le projet GOODS (The Great Observatories Origins Deep Survey), ce qui laisse croire que toutes les galaxies formatrices d'étoiles ne sont pas détectables dans les "deep surveys". Cependant il est tout à fait clair que notre vue sur les galaxies hôtes des GRBs est encore partielle, puisque nous détectons principalement à $z < 1.5$. Les galaxies

hôtes à grands redshifts sont difficiles à observer. Il est possible que les galaxies hôtes à grands redshift soient plus massives que celles avec un faible redshift, puisque la formation d'étoiles peut être produite par des galaxies plus massives dans l'univers lointain. Ce problème ne peut être résolu que par des futures observations plus profondes sur les galaxies hôtes à grand redshift.

3. 2. 1. Les galaxies hôtes des LGRBs

3. 2. 1. 1. Où se trouvent les LGRBs dans les galaxies hôtes?

Les GRBs ne se produisent pas dans des endroits aléatoires dans les galaxies hôtes, l'observation et la théorie sont d'accord sur ce point. Les GRBs liés à la formation des étoiles, sont observés généralement dans les régions actives des galaxies, les régions de formation d'étoiles. La figure 3.6 est un exemple parfait, elle montre la position du sursaut GRB980425 dans sa galaxie. Le sursaut se situe dans un bras de la galaxie, région de formation d'étoiles. (Fynbo et al., 1998). Dans les galaxies où la formation d'étoiles est presque homogène dans la galaxie (telle que les galaxies naines irrégulières très actives), les GRBs peuvent se produire partout dans la galaxie.

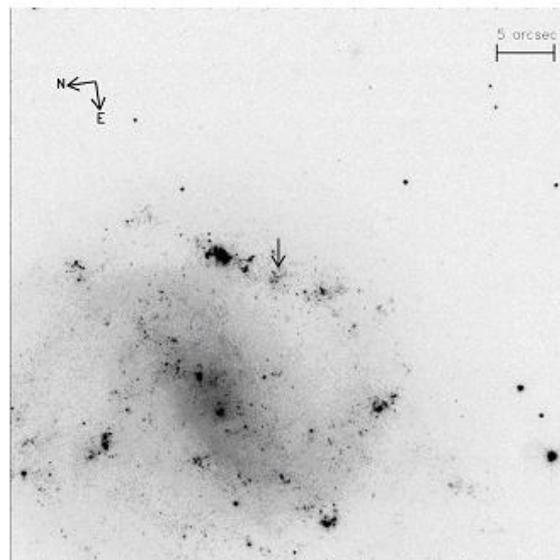


Figure 3.6. Galaxie hôte du sursaut GRB980425. La flèche indique la position du sursaut (Fynbo et al., 1998).

3. 2. 1. 2. Les galaxies hôtes des LGRBs à grand redshift

Une autre étude très intéressante et qui mérite d'être citée est celle de Lapi, A. et al. (2008), dont les résultats principaux sont résumés dans la figure 3.7, qui représente les variations des propriétés des halos de masses (M_H) de 10^{10} , 10^{11} , 10^{12} et 10^{13} masses solaires, respectivement, à $z = 6$.

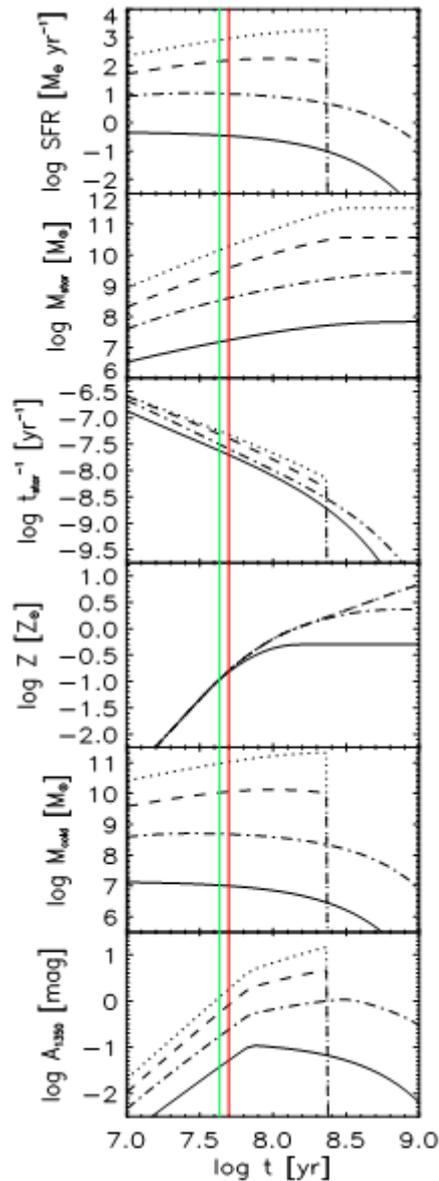


Figure 3.7. (Prise de Lapi et al., 2008) De haut en bas :Taux de formation stellaire SFR, masse stellaire, taux de formation stellaire spécifique SSFR, métallicité moyenne du gaz froid, masse du gaz froid et l'extinction à 1350 \AA , le tout en fonction de l'âge galactique, pour les masses du halo galactique de $10^{10} M_{\odot}$ (lignes continues), $10^{11} M_{\odot}$ (lignes discontinues pointées), $10^{12} M_{\odot}$ (lignes discontinues), $10^{13} M_{\odot}$ (lignes

pointées) à $z = 6$. Les lignes verticales indiquent la période où la métallicité du gaz froid atteint les valeurs critiques (de seuil) de $Z_{\odot}/10$ (en vert) et $Z_{\odot}/5$ en rouge.

L'enrichissement en métallicité est très rapide, indépendamment de la masse galactique, puisque les galaxies doublent leur métallicité (passent de 0.1 à 0.2) en un temps incroyablement court (voir la différence entre les lignes rouge et verte) ; ceci est dû à l'évolution chimique rapide des étoiles massives (abondantes dans les jeunes galaxies), ainsi qu'à leur cycle de vie très court.

Pour les masses $M_H \geq 10^{12}$ masses solaires, le SFR croît à peu près linéairement avec l'âge de la galaxie, puis s'arrête soudainement à cause du trou noir galactique ; mais pour $M_H \leq 10^{12}$ masses solaires, c'est le contraire, le SFR est constant au début, puis il diminue linéairement, ce qui est dû à l'appauvrissement du gaz du milieu interstellaire (ISM), matière première de la formation stellaire.

Et puisque les GRBs sont associés à l'effondrement des jeunes étoiles massives (avec un grand SFR) et une faible métallicité, l'époque durant laquelle les progéniteurs des LGRBs sont abondants est durant la jeunesse de la galaxie. On remarque aussi que les halos de galaxies hôtes des GRBs ont tendance à avoir une faible masse ($\leq 10^{11} M_{\text{solaire}}$).

Ainsi Lapi, A. et al., (2008) sont arrivés à la conclusion que les galaxies hôtes sont des galaxies très jeunes (moins de 5×10^7 ans) avec un faible taux de poussière et d'intenses radiations UV, ce qui détruit beaucoup de molécules d'hydrogène. Elles ont aussi des raies d'hydrogène très larges, ce qui indique la richesse des galaxies hôtes en gaz, chose qui a été confirmée par l'observation.

3. 2. 1. 3. Galaxies hôtes des LGRBs vs Galaxies hôtes des SNe

Une comparaison des galaxies hôtes des LGRBs avec les hôtes des SNe au même redshift ($z = 0.5-1$) faite par Tanvir & Levan (2007) (figure 3.8) a montré que les LGRBs se trouvent dans des galaxies naines irrégulières en général et rarement dans des galaxies spirales âgées, alors que les SNe ne se trouvent pas seulement dans les petites galaxies, on les voit aussi dans les galaxies spirales, ceci étant dû au fait que les SNe n'exigent pas une basse

métallicité, contrairement au GRBs. Ceci confirme que les LGRBs sont formés par des SNe (Type I) de faible métallicité, disponibles dans les jeunes galaxies naines et irrégulières.

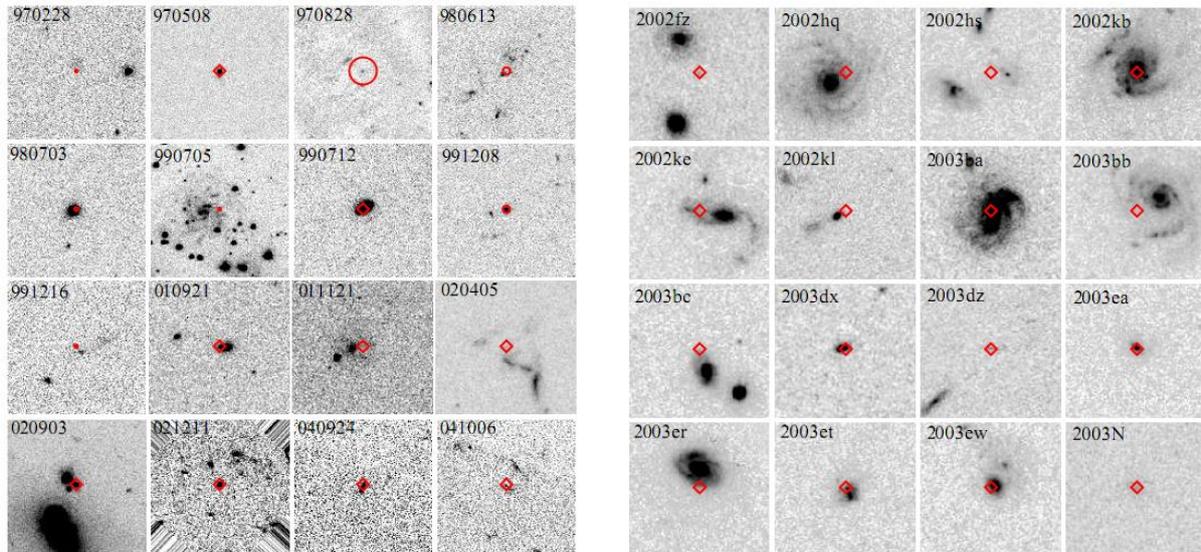


Figure 3.8. A gauche, mosaïque de 16 images du HST des galaxies hôtes des LGRBs avec $0.3 < z < 1.0$, les tailles d'images étant de 7.5 arc seconde sur chaque côté. Les cercles indiquent l'incertitude dans la position du GRB. La position est indiquée par un diamant dans le cas où les positions sont données avec une erreur de moins de 0.05 arcsec. A droite, comme pour la figure à gauche (et au même redshift), mais pour les images représentées les galaxies hôtes des supernovae retrouvées dans le Survey de GOODS. La différence est claire à l'œil, puisque les grandes galaxies sont plus rares dans la population des galaxies hôtes des GRBs (Voir Fruchter et al., 2006).

3. 2. 1. 4. Propriétés des galaxies hôtes des LGRBs

En résumé, les récents travaux, notamment ceux de Savaglio et al. (2009), ont décrit les propriétés des galaxies hôtes des LGRBs comme nous avons présenté ci-dessous. Les principales techniques utilisées pour avoir la masse stellaire, le SFR, la métallicité, etc., sont la spectroscopie et la photométrie (dans le domaine optique et NIR) ; d'autres techniques sont utilisées dans le cas où celles-là ne peuvent pas être utilisées.

3. 2. 1. 4. 1. Morphologie

La plupart des longs GRBs se produisent dans de petites galaxies, des galaxies naines irrégulières, alors que les SN Ic se trouvent dans les galaxies naines irrégulières aussi bien que dans les galaxies spirales géantes. D'après l'étude de Bogomazov et al., (2008), seulement une galaxie hôte d'une population totale de 42 galaxies hôtes des LGRBs est une galaxie spirale, les autres 41 sont des galaxies naines irrégulières ; si on limite le redshift à 1.2, la fraction des GRBs trouvées dans des géantes spirales est alors de 1/18.

3. 2. 1. 4. 2. Métallicité

La métallicité stellaire a un effet très important sur le vent stellaire, et la métallicité des galaxies augmente avec l'âge et la masse des galaxies (Bogomazov et al., 2008). Les observations ont confirmé cette idée, surtout pour $z > 2$, et bien que les régions de formation d'étoiles soient supposées avoir en général une grande métallicité, il y a une préférence pour les basses métallicités. Il est important à noter qu'il y a là un effet de sélection au moins partiel, puisque la lumière optique dans un milieu à grande métallicité est plus absorbable (Tanvir & Levan 2007).

L'abondance chimique du gaz dans le milieu interstellaire des galaxies hôtes peut être estimée directement par la spectroscopie de l'afterglow du GRB, mais l'afterglow (qui est brillant tant que la métallicité est grande) doit être intense pour permettre de faire la spectroscopie, ce qui explique la tendance parfois vers une haute métallicité. Les abondances varient de 1% à 100% de l'abondance solaire (Tanvir & Levan 2007).

Les métallicités calculées à partir des lignes d'émission des galaxies hôtes à $z < 1$ sont relativement petites, généralement entre 1 et 1/10 de la métallicité solaire. Les métallicités mesurées à partir des lignes d'absorptions UV à $z > 2$ sont dans le même intervalle. En combinant ceci avec les résultats à $z < 1$, nous ne voyons pas d'évolution significative dans la métallicité des galaxies hôtes des GRBs dans l'intervalle $0 < z < 6$ (figure 3.9).

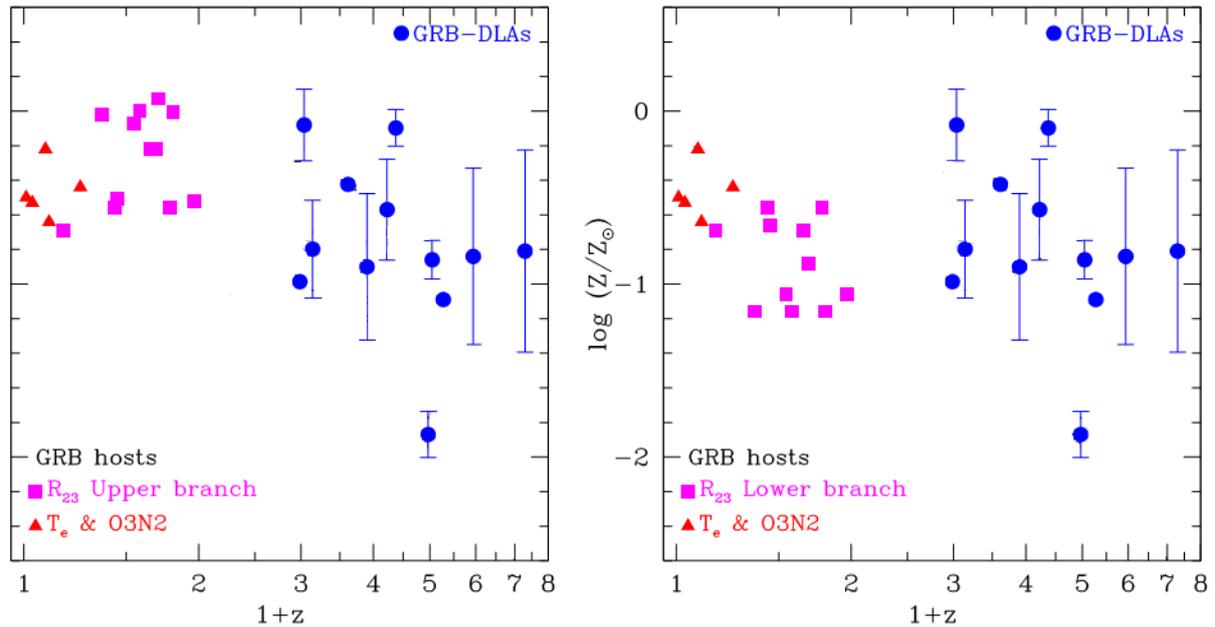


Figure 3.9. La métallicité en fonction du redshift pour 12 GRB mesuré avec la technique DLA (c'est-à-dire dans des systèmes « Dumped Lyman Alfa » en utilisant la spectroscopie de l'afterglow) (les cercles), et 17 galaxies hôtes de GRBs (mesuré avec les techniques « T_e &O3N2 » et « R23 », cette dernière a deux solutions supérieur et inférieur) (triangles et carrés). Les graphes à gauche et à droite, montrent les branches supérieures et inférieures, respectivement, du sous-ensemble des GRBs mesurés avec R23. Pour les deux graphes il est tout à fait claire qu'il n'y a pas d'évolution importante de la métallicité en fonction du redshift (dans l'intervalle $0 < z < 6.3$). (Savaglio et al. 2008).

3. 2. 1. 4. 3. Taux de poussière

Les galaxies hôtes sont très riches en gaz. Malgré le fait que les régions de formation d'étoiles sont riches en poussières, les observations ont montré que les hôtes des LGRBs ont un faible taux de poussière par rapport au gaz, plus faible que celui de la Voie Lactée, sûrement à cause de leurs faibles abondances chimiques (Lapi et al., 2008 & Li et al., 2007).

3. 2. 1. 4. 4. L'extinction

La spectroscopie et/ou la photométrie sur les afterglows peuvent donner une estimation sur l'extinction des GRBs durant leur chemin jusqu'au détecteur. L'absorption dans notre galaxie peut être estimée, mais l'absorption intrinsèque des galaxies hôtes

(l'absorption en fonction de la longueur d'onde) est difficile à estimer car elle dépend de la métallicité des ces galaxies hôtes (Starling et al., 2007).

La poussière dans les galaxies hôtes des GRBs assombrit les afterglow de ces GRBs et fait pencher leurs spectres vers le rouge (« reddening »). Les GRBs (les afterglows) subissent une extinction dans leurs galaxies hôtes causée par la poussière de la galaxie hôte, ceci a été confirmé par plusieurs effets, tels que (Li et al. 2008) :

- Les « Dark bursts » : des GRBs avec un afterglow du radio au rayon X, avec un déficit dans le domaine optique, la seule explication étant que l'afterglow a été absorbé par quelque chose (la poussière, très probablement) dans la galaxie hôte.
- Le reddening de certains afterglow de GRBs de petits redshifts, est forcément un phénomène d'extinction, puisque le rayonnement UV-optique est absorbé plus facilement par la poussière que le rayonnement rouge.
- La poussière est formée d'éléments lourds, donc les galaxies hôtes très actives doivent en être très riches (puisque les GRBs sont associés avec la mort des étoiles massives). C'est cette poussière qui joue un rôle dans l'extinction des afterglows.

La majorité des galaxies hôtes est estimée avoir une faible extinction ($A_v \geq 0.1$) causée par leurs faibles abondances chimiques qui sont semblables à celle des supernovae de type II, et à cause de leur faible taux de poussières (Lapi et al., 2008).

Dans Savaglio et al. (2009), l'extinction de poussière dans le domaine visuel a été calculée pour un sous ensemble de 10 galaxies hôtes, la moyenne était $A_v = 0.53$. L'absorption stellaire de Balmer est généralement petite, mais non négligeable (Starling et al., 2007).

3. 2. 1. 4. 5. Luminosité de la raie Lyman α ($L_{y\alpha}$)

Les hôtes des GRBs possèdent en générale plus de raies $L_{y\alpha}$ que les « Lyman-break galaxies » (LBGs, Erb et al. 2006; Reddy et al. 2006) pour un redshift égal et une luminosité $L_{y\alpha}$ entre $2 \cdot 10^{40}$ et $2 \cdot 10^{42}$ erg s⁻¹ (Fynbo et al., 2007 & Lapi et al., 2008).

Les LBGs, sont des galaxies sombres dans les longueurs d'ondes inférieures à 91.2 nm (la limite Lyman) ce qui est due aux abondances d'hydrogène qui absorbe efficacement toutes les longueurs d'ondes inférieures à 91.2 nm. Cette coupure dans le spectre de la galaxie est

appeler « Lyman Break », et les galaxies qui la possèdent sont appelées « Lyman Break Galaxies ». Plus de 1000 LBGs sont connues jusqu'à présent.

3. 2. 1. 4. 6. *Magnitude UV*

Lapi et al., (2008) a conclu que la magnitude UV à 1350 Å, M_{1350} , de la plupart des galaxies hôtes des GRBs doit être dans l'intervalle $-20 \leq M_{1350} \leq -16$. Les rayonnements UV dans les galaxies hôtes sont intenses, ce qui détruit beaucoup de molécules d'hydrogène dans ces galaxies.

3. 2. 1. 4. 7. *Masse stellaire*

Les galaxies hôtes des GRBs sont en générales de petites galaxies de formations d'étoiles. Environ 83% de la population de Savaglio et al. (2009) avait une masse dans l'intervalle $10^{8.5} - 10^{10.3} M_{\odot}$. La masse stellaire moyenne est équivalente à celle du LMC, $M_{*} \sim 10^{9.3} M_{\odot}$, ce qui est plus petit que la masse moyenne des galaxies du GDDS (Gemini Deep Deep Survey, Abraham et al., 2004) avec un ordre de magnitude.

D'après Savaglio et al. (2009), une corrélation existe entre la magnitude absolue dans la bande photométrique K (La bande K se trouve dans le domaine proche de l'infrarouge "NIR", entre 2190 et 390 nm) " M_K ", dans un repère au repos, et la masse stellaire M_{*} des galaxies, cette corrélation est décrite suivant l'équation suivante (figure 3.10) :

$$\log M_{*} = -0.467 \times M_K - 0.179, \quad (3.1)$$

Cette corrélation peut être utilisée pour estimer la masse des galaxies hôtes à partir du spectre des GRBs.

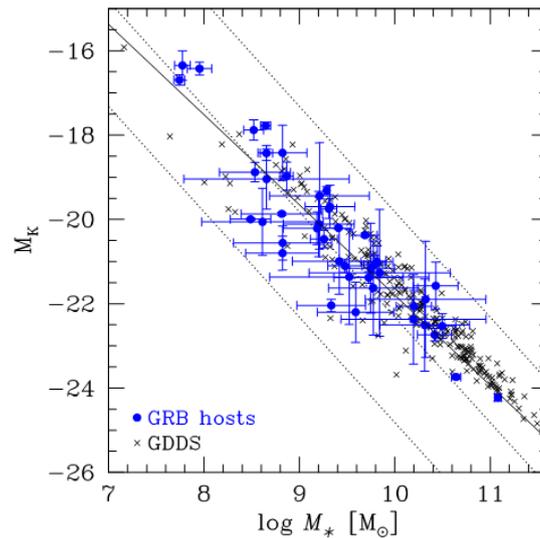


Figure 3.10. Magnitude absolue dans la band K (AB K) en fonction de la masse stellaire pour les galaxies hôtes des GRBs (cercle en bleu) et les galaxies du GDDS (en croix). Seulement les galaxies hôtes des GRBs dont l'incertitude $\Delta \log M_* < 1$ sont représentées. La ligne solide représente la corrélation linéaire définie par l'équation (3.1). Les lignes en pointillé indiquent (de la gauche à la droite), les rapports (constants) entre masse stellaire et luminosité $M_*/L_K = 0.01, 0.1$ et $1 (M/L_K)_\odot$ respectivement.

3. 2. 1. 4. 8. SFR

Le taux de formations d'étoiles (SFR) dans les galaxies hôtes est généralement élevé. Pour la population de Savaglio et al. (2009), le taux moyen est de $2.5 M_\odot/\text{yr}$, ce qui est 5 fois plus que le SFR du LMC, sachant que les valeurs du SFR couvraient un intervalle de plus de trois ordres de magnitudes, de $0.01 M_\odot/\text{yr}$ à $36 M_\odot/\text{yr}$.

Le SFR exprime le taux de formation d'étoiles dans une galaxie, mais il ne fait pas intervenir la masse stellaire de la galaxie, donc le SFR classe une grande et une petite galaxie qui forment le même nombre d'étoiles dans une période « t » dans le même niveau d'activité, alors que la grande galaxie est moins active que la petite ; donc un autre paramètre, le « Specific SFR, SSFR » (SFR normalisé à la masse de la galaxie) est préférable pour mieux décrire l'activité de chaque galaxie.

Dans la figure 3.11 le SSFR est donné en fonction de la masse stellaire des galaxies (les GRB hôtes, les galaxies du GDDS et celle du LBGs en comparaison). La moyenne du

SSFR pour la population de Savaglio et al. (2009) est de $\sim 0.8 \text{ Gyr}^{-1}$, avec une petite dispersion, telle que le SFR est proportionnel à la masse stellaire M_* (voir les lignes en pointillé de la figure 3.11), un résultat inattendu en quelques sorts.

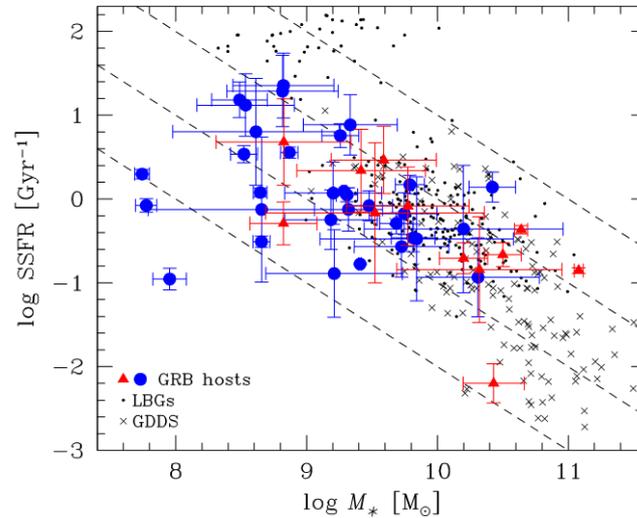


Figure 3.11. SSFR en fonction de la masse stellaire. Les cercles et les triangles sont les galaxies hôtes avec des mesures du SFR à partir des lignes d'émission ($0 < z < 1.3$) et la luminosité UV ($0.2 < z < 1.7$), respectivement. Seulement les galaxies hôtes des GRBs dont l'incertitude $\Delta \log M_ < 1$ sont représentées. Les petites croix sont les galaxies de formation d'étoiles du GDDS avec $0.5 < z < 1.7$ (Juneau et al., 2005 ; Savaglio et al., 2005) ; les points sont les LBGs à $\sim 1.3 \leq z \leq \sim 3$ (Reddy et al. 2006). Les lignes discontinues représentent les valeurs constantes du SFR : $0.1, 1, 10$ et $100 M_\odot \text{yr}^{-1}$.*

Il semble que les galaxies hôtes montrent des propriétés différentes de celles des GDDS, avec moins de masse et plus d'activité (SSFR). Le SSFR est à peu près le même pour les GRBs hôtes et les LBGs, mais la masse (moyenne) des GRB hôtes ($10^{9.3}$ masses solaires) est 6 fois moins que celle des LBGs ($10^{10.1}$ masses solaires).

L'inverse du SSFR est le temps de croissance de la galaxie ρ_* , et c'est le temps requis par la galaxie pour former sa masse stellaire observée, en supposant que le SFR est constant durant l'histoire de la galaxie.

3. 2. 1. 4. 9. Âge

Comme indiqué précédemment, les galaxies s'enrichissent rapidement en métallicité, et le taux d'activité diminue à mesure que la galaxie vieillit (dû à l'appauvrissement du gaz du ISM), donc les galaxies typiques pour abriter des GRBs (avec une basse métallicité et la grande activité) doivent être jeunes (moins de $\sim 5 \cdot 10^7$ ans) (Lapi et al., 2008).

3. 2. 1. 4. 10. Luminosité & couleur

Les galaxies hôtes sont de couleur bleue, dû à leur richesse en étoiles massives très chaudes connues pour leur couleur bleue. La luminosité des galaxies hôtes est très faible ; celles-ci sont à peine visibles.

3. 2. 1. 4. 11. Redshift

La distribution des valeurs du redshift n'est pas aléatoire dans cet intervalle. Plus z augmente moins il y a de galaxies hôtes observées. Le redshift de la population des galaxies hôtes de Savaglio et al., 2008 (constitué de 46 galaxies hôtes), se situe dans l'intervalle $0 < z < 6.3$, avec un redshift moyen de 0.96 et avec $z \leq 1.6$ pour 89% de la population. La galaxie hôte du sursaut (long) GRB 050904 possède le plus grand redshift, $z = 6.295$!

3. 2. 2. Les galaxies hôtes des SGRBs

Les hôtes des SGRBs sont en général à plus grand redshift ($z > 1$) et avec un faible taux de formation d'étoiles, ce qui dû au fait que les SGRBs sont produit pas la fusion d'objets compacts (NS-NS ou NS-BH) présents dans les jeunes comme dans les vieilles galaxies. Une des conséquences de la fusion NS-NS, source des SGRBs, est que le sursaut est visible de loin (grâce a l'énorme énergie dégagée suite à la fusion), bien loin du rayonnement optique de la galaxie hôte ce qui rend l'association des SGRBs avec leurs galaxies hôtes difficile (Tanvir & Levan 2007).

Les SGRBs n'ont pas été observés seulement dans les galaxies à grands SFR, mais également dans les galaxies elliptiques, alors que les LGRBs ont des hôtes à grands SFR seulement (Rhoads et al., 2008). La masse stellaire moyenne (de la galaxie) est estimée aux alentours de $10^{10.1}$ masses solaires. Le sous-ensemble de Savaglio et al. (2009) contient 6 SGRBs, la masse stellaire est entre : $10^{8.7} M_{\odot} < M_{*} < 10^{11.0} M_{\odot}$, et le SSFR est dans l'intervalle $0.006 - 6 \text{ Gyr}^{-1}$.

Une étude effectuée par Rhoads et al. (2008) en utilisant une population de 23 SGRBs avec 12 entre eux ayant un redshift et un autre groupe de 34 LGRBs pour la comparaison, montre que l'énergie isotropique du SGRB est anti-corrélée (avec un facteur de 0.6) avec la magnitude absolue de sa galaxie hôte, ce qui veut dire que plus le SGRB est brillant plus il est difficile de voir sa galaxie hôte, alors que pour les LGRBs on a une corrélation positive. C'est à dire que les galaxies hôtes des SGRBs les plus proches sont les moins lumineuses, (figure 3.12).

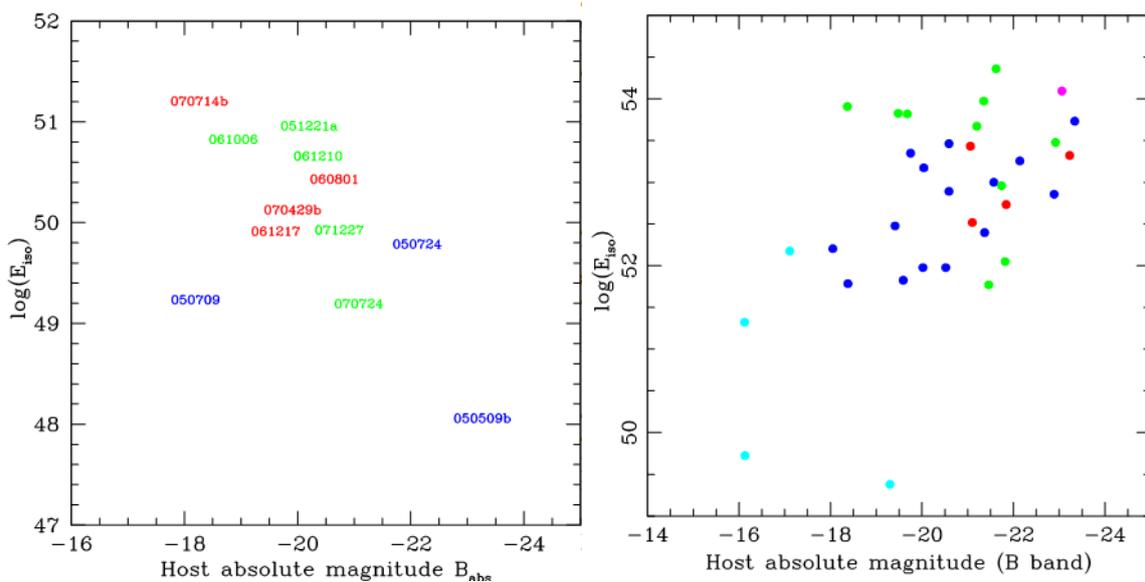


Figure 3.12. La relation entre l'énergie isotropique du GRB et la galaxie hôte pour les SGRBs (à gauche) et les LGRBs (à droite). La corrélation dans la population des SGRBs est significative à un niveau de 99%. L'intervalle du redshift est décrit en couleur : pour les SGRBs, $z < 0.3$ (bleu), $0.3 < z < 0.7$ (vert) et $z > 0.7$ (rouge) ; pour les LGRBs, $z < 0.3$ (cyan), $0.3 < z < 1.0$ (bleu), $1.0 < z < 2.0$ (vert), $2.0 < z < 3.5$ (rouge) et $z > 3.5$ (magenta)(Prises de Rhoads et al., 2008).

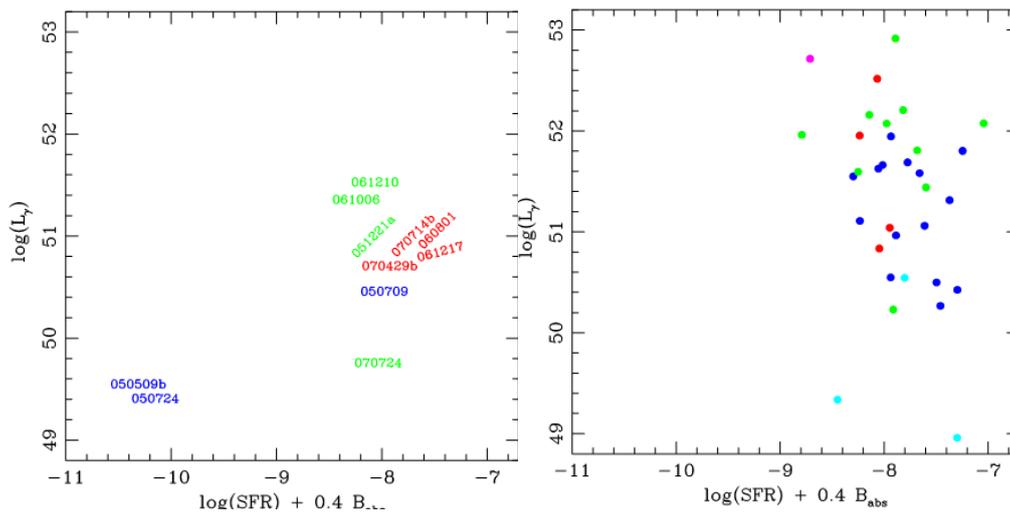


Figure 3. 13. (Prises de Rhoads et al., 2008) La relation entre la luminosité du GRB et le SSFR de la galaxie, pour les SGRBs (à gauche) et les LGRBs (à droite). Les galaxies massives (avec faible SSFR) sont les moins lumineuses, alors que certains GRBs dans des galaxies actives sont moins lumineux (comme GRB 070724). Pour les LGRBs, il n'y a pas de corrélation visible entre la luminosité et le SSFR.

La figure 3.13 montre la corrélation entre la luminosité des GRBs et le SFR, les SGRBs les moins lumineux ont en général de vieilles galaxies hôtes alors que les plus lumineux ont des galaxies avec un grand SFR. Alors que pour les LGRBs il n'y a pas de corrélation entre la luminosité et le SFR. La comparaison des deux graphes montre que les galaxies hôtes des LGRBs ont un SFR plus grand que celui des hôtes des SGRBs.

3. 3. Conclusion

Les galaxies hôtes des LGRBs sont des galaxies petites avec un grand taux de formation d'étoiles, et avec une métallicité inférieure à celle du soleil, mais une extinction de poussière non négligeable. Elles disposent d'une jeune population d'étoiles et sont très riches en SNe. La situation ressemble à notre galaxie voisine LMC si elle est située à $z = 0.7$ (ici $z = 0.7$ ne représente pas une distance, il représente un temps, c'est-à-dire si la LMC se situait tous comme elle est à $z = 0.7$, dans ce cas nous la voyons pas comme elle est, nous voyons son image dans le passé, lorsque elle était plus jeune), lorsqu'elle était plus active, quand son SFR était 5 fois plus grand qu'aujourd'hui (Savaglio et al., 2008). Ainsi, les galaxies hôtes des LGRBs représentent la jeunesse active des galaxies de l'univers.

Les SGRBs sont présents dans des galaxies petites mais à grands SFR tout comme dans des galaxies elliptiques géantes (avec un faible SFR et une plus grande métallicité), alors que les LGRBs ont des hôtes à grand SFR seulement (Rhoads et al., 2008).

Il n'y a pas d'indication claire que les galaxies hôtes des GRBs appartiennent à une population spéciale. Leurs propriétés, de l'univers local aux confins de l'univers, sont celles attendues des galaxies de formation d'étoiles normales. Elles n'ont rien de spécial, surtout si on prend en considération leur redshift (le fait qu'elles soient du passé).

3. 4. Intérêts de l'étude des GRBs et galaxies hôtes

3. 4. 1. Progéniteurs des GRBs

La nature des galaxies hôtes des GRBs est aussi un outil pour connaître le type des progéniteurs des GRBs. Le fait que les LGRBs ont été détectés dans des galaxies jeunes et actives, riches en étoiles massives, a permis de mieux comprendre le phénomène en confirmant l'association des LGRBs avec la mort des étoiles massives (Tanvir & Levan 2007)

3. 4. 2. Formation et Evolution des Galaxies

Les GRBs nous permettent de détecter les galaxies avec un grand SFR, et comme la densité du SFR dans l'univers est fonction de la masse stellaire des galaxies, les hôtes des GRBs sont un outil important pour étudier la formation et l'évolution des galaxies.

3. 4. 3. Milieu interstellaire des galaxies lointaines

Les GRBs peuvent provenir des régions les plus denses et les plus éloignées de l'univers grâce à leur émission prompte, mais ce n'est pas le cas pour les afterglows (qui fournissent des informations très précieuses, y compris le redshift, du GRB) puisqu'ils ne peuvent pas être détectés si le GRB se trouve dans une région très riche en poussière, de ce fait les afterglow peuvent donner une idée sur le taux de poussière dans la région du GRB, si

on arrive à les « étalonner » (Fynbo et al., 2007). Donc l'étude de l'extinction dans les galaxies hôtes permet de comprendre le milieu interstellaire des galaxies actives et l'évolution de la poussière dans ce milieu.

3. 4. 4. Région de formation d'étoile

La brillance des GRBs permet de voir à travers le passé. Si on suppose que la probabilité de production de GRBs est égale pour toutes les populations stellaires des jeunes étoiles, alors cela veut dire que les GRBs nous permettent de détecter ces régions de formations d'étoiles et de déterminer les types des galaxies formatrices d'étoiles (Tanvir & Levan 2007).

3. 4. 5. Comprendre les sursauts obscurs

Enfin, la nature mystérieuse des “dark bursts” (sursauts obscurs) avec un afterglow X et Radio mais pas optique, ne peut être étudiée qu'en faisant appel aux galaxies hôtes et leurs milieux interstellaires.

Chapitre IV

Analyse des GRBs de Swift

4.1 Introduction

Les GRBs étant issus de phénomènes compliqués, leur étude nécessite des données de bonne qualité et en masse afin d'avoir de bonnes statistiques. La mission "Swift" dédiée à l'étude des GRBs, lancée en novembre 2004, a révolutionné le domaine des GRBs. Pendant plus de cinq ans les données sur les GRBs, fournies en grande quantité, ont permis d'ouvrir de nouvelles perspectives et de faire des percées dans la compréhension des phénomènes responsables de l'occurrence des GRBs. Les données fournies par Swift n'étaient pas comme celles des missions précédentes, les événements avec un grand redshift sont devenus accessibles grâce à Swift, comme pour GRB090423. Au 15 juin 2010, Swift a pu détecter un total d'environ 560 événements, parmi lesquels nous comptons 177 cas où le redshift a été mesuré.

Néanmoins, même avec Swift, le nombre des GRBs pour lesquels nous avons pu détecter la galaxie hôte reste limité ; ils ne sont qu'au nombre de 62 parmi les GRBs avec redshift mesuré, ce qui ne représente que 35% du groupe. Par conséquent, la question cruciale que nous devons nous poser est: Y a-t-il des explications physiques à ce manque de galaxies hôtes ? Autrement dit, est-ce que le faible taux de détection de galaxies hôtes est seulement dû à des effets de sélection ou bien (au moins en partie) dû aux propriétés intrinsèques des galaxies hôtes ou des GRBs? »

Dans ce chapitre nous allons faire une étude statistique sur les deux populations de GRBs (avec et sans galaxie hôte) afin de voir s'il existe une différence significative entre les deux populations par rapport à certaines propriétés physiques.

Nous incluons aussi une série de tests non paramétriques, de type Kolmogorov-Smirnov, afin de voir si les données des deux groupes sont issues de la même distribution ou pas. Ainsi nous verrons s'il y a une différence fondamentale entre les deux groupes à travers les données de Swift. Notre objectif est de comprendre au mieux pourquoi nous échouons encore dans la détection de la galaxie hôte des sursauts gamma dans beaucoup de cas.

4.2 La population

Notre population contient tous les GRBs de Swift (détectés jusqu'au 15 Juin 2010) pour lesquels nous avons pu obtenir le redshift, ce qui fait un total de 177 GRBs.

Pour tous les événements, nous avons collecté cinq variétés de données (en fonction leur disponibilité) : Le redshift z , la durée de 90% de l'énergie du sursaut T_{90} , la fluence (mesurée dans l'intervalle d'énergie 15-150 keV), le pic du flux de photons (toujours dans la bande 15-150 keV), ainsi que la « densité colonnaire » (column density) N_H . Ces données ont été collectées du site officiel de Swift (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov>), alors que pour le redshift nous avons comparé et complété sur le site de J. Greiner (<http://www.mpe.mpg.de/~jvg/grbgen>). Les 177 événements de GRBs sont divisés, selon la détection de la galaxie hôte, en deux groupes: sursauts gamma avec galaxie hôte (62 événements) et GRBs sans détection de galaxie hôte (115 cas). La liste des GRBs pour lesquels nous avons pu détecter une galaxie hôte a été construite à l'aide du site de S. Savaglio qui contient la collection de toutes les galaxies hôtes publiées jusqu'à ce jour (<http://www.grbhost.org>), mais nous avons aussi vérifié et complété par d'autres papiers (e.g. Schaefer 2007).

Le site officiel de Swift signale la détection de la galaxie hôte pour ces événements, ce qui nous a permis d'avoir tous les cas pour lesquels une galaxie hôte a été observée. Parmi les 177 GRBs de notre population, 11 d'entre eux sont des sursauts courts ($T_{90} < 2$ s), dont 9

ayant une galaxie hôte. 9 de ces 11 SGRBs ont un redshift $z < 1$, et la valeur moyenne des redshifts est de 2.06.

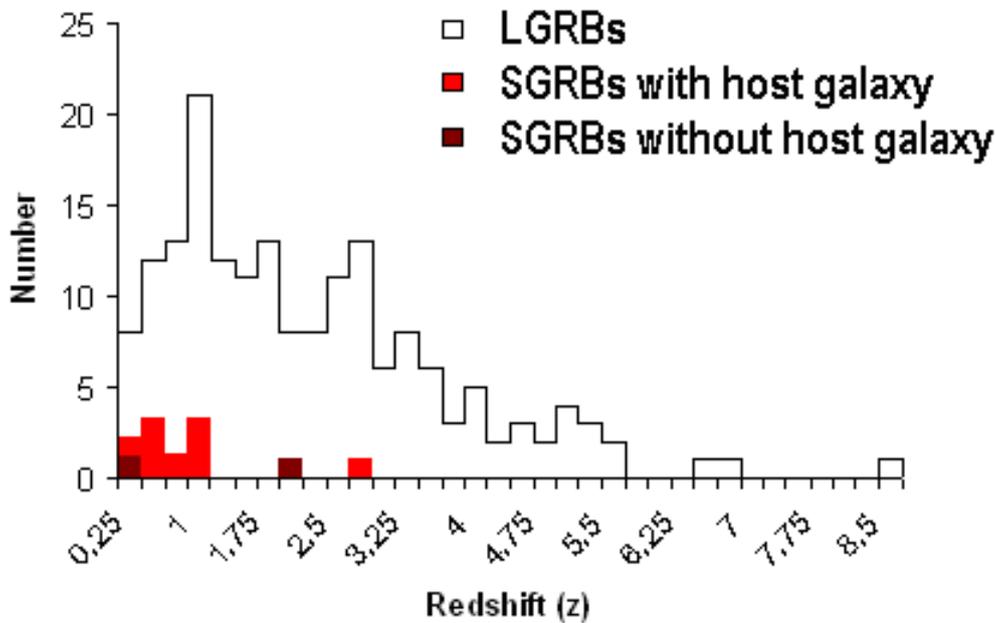


Figure 4.1 La distribution de redshifts z pour la population des GRBs de Swift pour lesquels un redshift a été mesuré.

4.3 Le redshift

On remarque très rapidement qu'en moyenne, le redshift des GRBs avec galaxie hôte est inférieur à celui des GRBs sans galaxie. D'après le tableau 4.1, 47% des événements de la première population ont un $z < 1$ et 68% ont un $z < 2$ alors que pour la deuxième population (GRBs sans galaxies hôte) le redshift a tendance à avoir des valeurs plus grandes puisque nous avons 22% des événements avec $z < 1$ et 48% avec $z < 2$. La moyenne du redshift pour la population des GRBs avec galaxie hôte est de 1.75 alors que pour l'autre population il est de 2.22. En d'autres termes, les GRBs avec galaxie hôte se trouvent beaucoup plus proches de nous (Figure 4.2).

De plus, il est tout-à-fait clair, d'après les figures 4.2, 4.3 et 4.4, que le nombre de GRBs avec galaxie hôte diminue très rapidement quand z augmente ; par contre, pour la classe des GRBs sans galaxie hôte, tout comme pour l'ensemble des GRBs de notre population, nous voyons une diminution beaucoup moins forte des événements en fonction du redshift.

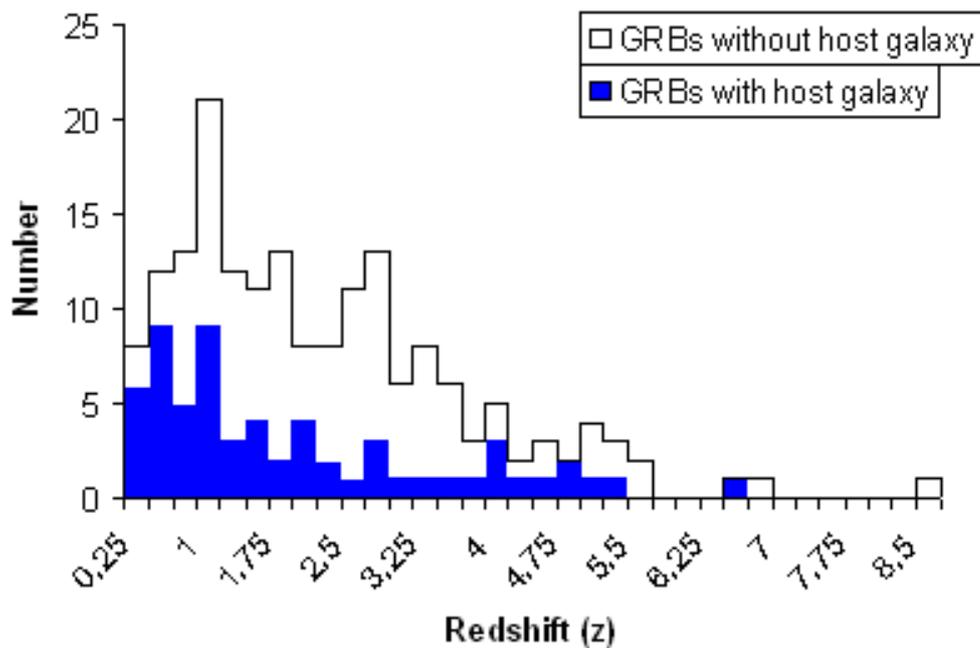


Figure 4.2 Distribution de z pour la population des GRBs de Swift avec redshift mesuré (177 événements), avec en bleu les GRBs pour lesquels nous avons pu détecter la galaxie hôte.

Redshift	$z < 1$	$z < 2$	z_{moyen}
Groupe des GRBs avec galaxie hôte	47%	68%	1,75
Groupe des GRBs sans galaxie hôte	22%	48%	2,22

Tableau 4.1 Le redshift des deux classes de GRB.

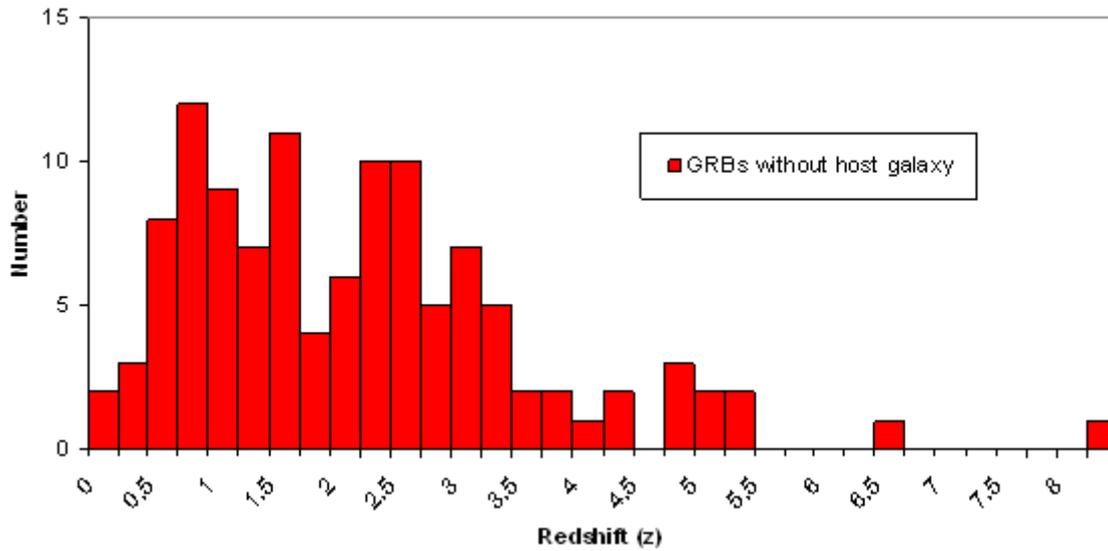


Figure 4.3 Distribution de z pour la population des GRBs sans galaxie hôte.

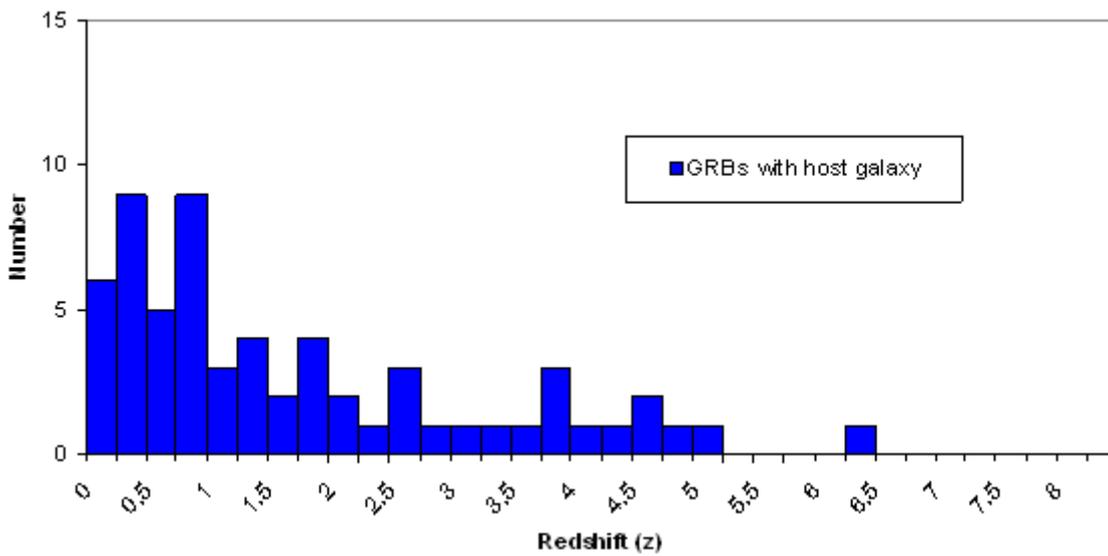


Figure 4.4 Distribution de z pour la population des GRBs avec galaxie hôte.

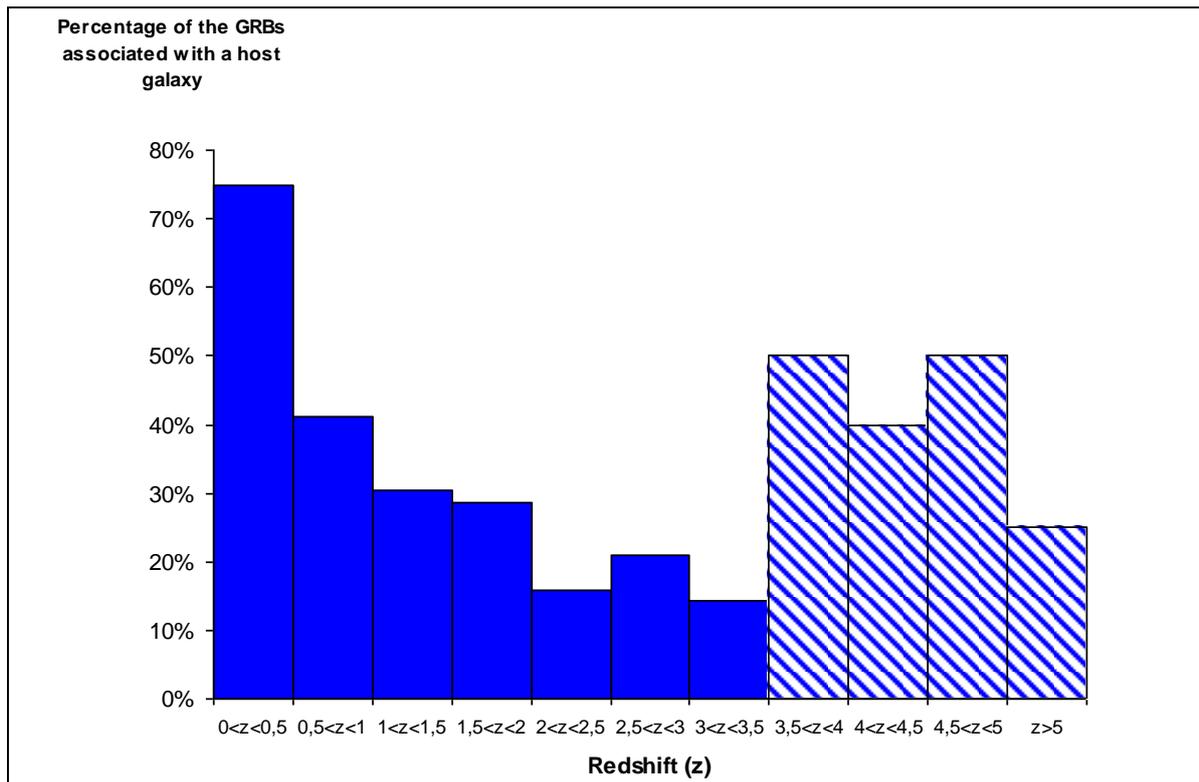


Figure 4.5 Pourcentage, des GRBs associés avec une galaxie hôte par rapport à la population totale des GRBs avec redshift, en fonction de z . Les régions où la statistique est bonne sont remplies en bleu. À partir de $z \sim 4$ la statistique devient très mauvaise, parfois avec seulement un événement par case.

Dans la figure 4.5 nous avons représenté le pourcentage d'association des GRBs avec la galaxie hôte en fonction du redshift. Ce n'est que quand z est petit (< 0.5) que la majorité des GRBs sont associés avec une galaxie hôte (80%), puis, à mesure que z augmente, le taux d'association décroît, 41% puis 30% ensuite 28% avant d'arriver à environ 14% dans l'intervalle $3 < z < 3.5$. Pour $z > 3.5$ les pourcentages obtenus n'ont pas de sens parce que dans ces intervalles on manque terriblement d'événements (dans plusieurs cas nous avons un total de 1 événement seulement) ! Donc si on nous exclut les pourcentages quand z est supérieur à 3.5, on voit que la forme de notre distribution transmet un message très clair : Les cas de GRBs avec galaxie hôte deviennent rares à mesure que le redshift augmente.

La chute des GRBs avec redshift peut être expliquée par notre difficulté observationnelle à détecter et à analyser l'afterglow, par conséquent il est plus difficile de

mesurer le redshift ; cet effet de sélection explique aussi pourquoi la distribution du redshift de la population globale (les 177 GRBs) décroît à mesure que z augmente (figure 4.1 ou 4.2).

Cependant la diminution encore plus rapide et plus forte des GRBs avec galaxie hôte est sans doute renforcée par un troisième effet : Les galaxies qui rayonnent dans le visible, contrairement aux GRBs, sont très difficiles à imager lorsque le redshift est grand ; de plus on sait bien (voir chapitre précédent) que les galaxies hôtes sont souvent des galaxies naines avec une faible luminosité. Dans cette logique, la distribution différente du redshift des deux groupes de GRBs (avec/sans galaxies hôtes) ne serait due qu'à un effet de sélection, rien de plus.

4.3.1 Test de Kolmogorov-Smirnov pour le redshift

Le test de Kolmogorov-Smirnov est un test statistique, non paramétrique, il vise à déterminer si les fonctions de répartition de deux populations d'échantillons se ressemblent ou pas (si ils sont issue de la même loi de distribution ou pas). C'est un test d'hypothèse, dont l'hypothèse nulle H_0 est que les deux distributions sont issue de la même loi. Il se base sur la distance maximale entre les deux fonctions de répartition « D » pour donner la « p -value » (la probabilité que l'hypothèse nulle est vraie). Si la « p -value » est supérieure au niveau de signification « α », l'hypothèse nulle est rejetée, est une hypothèse alternative H_a est retenue (l'hypothèse alternative est que les deux distributions sont différentes).

Nous avons utilisé le test de Kolmogorov Smirnov pour comparer les distributions de z des deux groupes de GRBs. Les résultats du test montrent qu'avec un α égal à 0.05 on trouve un D de 0.285, donc la valeur de la probabilité p est égale à 0.002. Etant donné que la p -value calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha = 0,05$, nous devons rejeter l'hypothèse nulle H_0 (H_0 : Les deux échantillons suivent la même loi de distribution), et retenir l'hypothèse alternative H_a (Les distributions des deux échantillons sont alors différentes). Donc nous avons confirmé que les deux distributions de z ne se ressemblent pas.

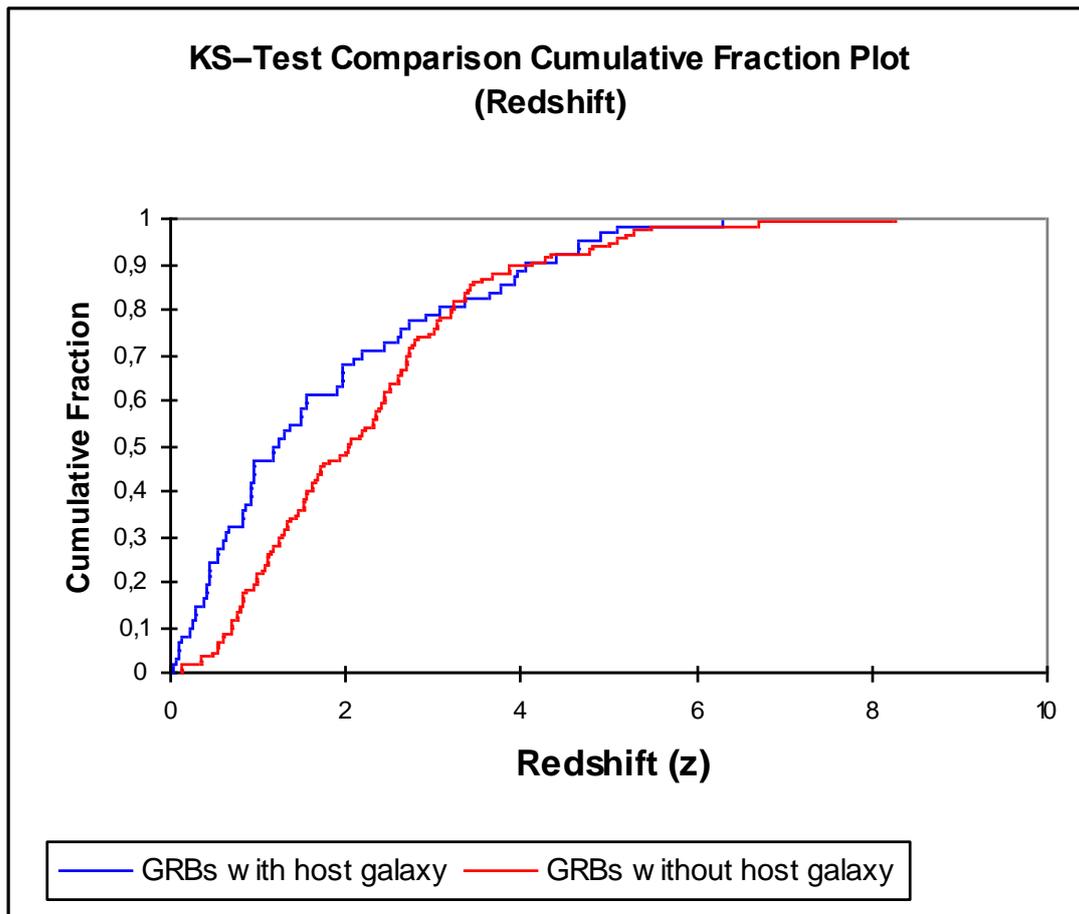


Figure 4.6 K-S test pour la distribution de z des deux classes. La différence est significative comme les résultats numériques du test (voir texte) le montrent.

4.4 La durée T_{90}

Une comparaison entre T_{90} des deux populations montre que les GRBs avec galaxie hôte ont un T_{90} un peu plus inférieur à celui des GRBs sans galaxies hôte (voir le tableau 4.2 et la figure 4.7). Pour les 11 SGRBs avec redshift détectés avec Swift, la différence entre les deux distributions de T_{90} n'est pas importante, mais une explication logique est le fait que plus la durée du sursaut est courte plus il est dur et donc plus il est intense (selon la relation durée-dureté et la corrélation dureté-intensité), et par conséquent plus on aura d'informations directionnelles sur la galaxie hôte, et l'association avec la galaxie hôte sera plus facile et donc plus probable.

T_{90} (sec)	$T_{90} < 5$	$T_{90} < 50$	$T_{90\text{moyen}}$
Groupe des GRBs avec galaxie hôte	25,5%	61,8%	61,3*
Groupe des GRBs sans galaxie hôte	6,5%	48,6%	90,5

Tableau 4.2 T_{90} pour les deux groupes de notre population totale de GRBs.

* La moyenne est calculée après avoir éliminé l'événement extrêmement long GRB060218 qui a une durée de 2100 secondes, afin de normaliser au mieux T_{90} de notre population (voir les tableaux 4.3 et 4.4).

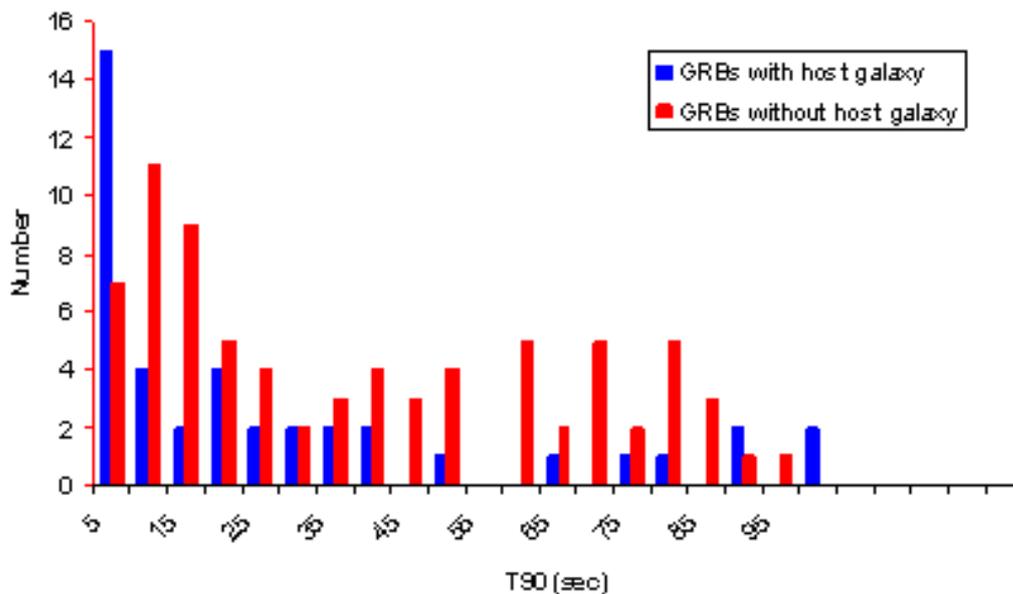


Figure 4.7 Distributions de T_{90} pour la classe des GRBs avec galaxie hôte (en bleu) et celle des GRBs sans galaxie hôte (en rouge).

4.5 La corrélation entre T_{90} et la fluence

4.5.1 Les coefficients de corrélation

4.5.1.1. Le coefficient de corrélation r

Le coefficient de corrélation r (ou coefficient de Bravais Pearson) est égal au rapport entre la covariance de (x, y) et le produit des écarts-types de x et y :

$$r = \frac{Cov(x, y)}{Ety(x) \times Ety(y)} \quad (4.1)$$

Où $Ety(x)$ et $Ety(y)$ sont l'écart type de x et de y respectivement, et $Cov(x, y)$ est la covariance de x et y . La covariance (x, y) est la moyenne arithmétique du produit des écarts à la moyenne des deux variables x et y . Elle donne la co-variation des deux variables l'une par rapport à l'autre et prend en compte leur variation commune. Elle peut être calculée à partir de l'équation (4.2) :

$$Cov(x, y) = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{n} \quad (4.2)$$

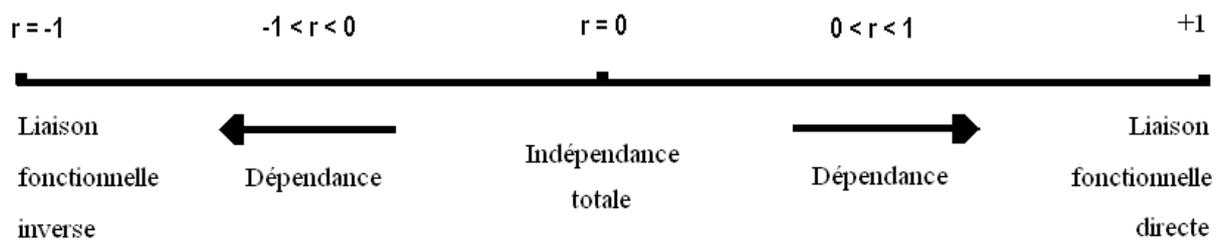
où :

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

La covariance est au plus égale au produit des deux écart-types:

$$Cov(x, y) \leq Ety(x) \times Ety(y)$$

De ce fait le coefficient de corrélation linéaire varie de -1 à 1. Le signe plus (+) indique une corrélation positive alors que le moins (-) indique une corrélation négative (une décroissance). Il est égal à 0 en cas d'une indépendance totale entre x et y .



4.5.1.2 Le coefficient de détermination R^2

Plus la valeur absolue de r est proche de 1 plus la corrélation est significative. De ce fait une autre quantité est introduite pour mesurer la corrélation, c'est le coefficient de détermination R^2 il est égal au carré du coefficient de corrélation r , de ce fait il mesure le degré de puissance d'une corrélation donnée, tout comme r , plus il est proche de 1 plus la corrélation est importante.

$$R^2 = r^2$$

4.5.1.3 Le coefficient de corrélation de Spearman

La corrélation de Spearman est étudiée lorsque deux variables statistiques semblent corrélées. Elle consiste à trouver un coefficient de corrélation (le coefficient de Spearman), non pas entre les valeurs prises par les deux variables mais entre les rangs de ces valeurs. Elle permet de repérer des corrélations monotones. Il faut également souligner que la corrélation de Spearman utilise les rangs plutôt que les valeurs exactes.

4.5.2 Les résultats

Nous avons aussi tracé la fluence en fonction de T_{90} (en échelle logarithmique) pour comparer le comportement des deux groupes. Les résultats montrent qu'il y a une corrélation entre T_{90} et la fluence, et que les GRBs avec galaxie hôte sont plus consistants avec la corrélation que les GRBs sans galaxie hôte.

Pour le premier groupe (avec galaxie hôte) nous avons un coefficient de détermination R^2 égal à 0.569. Le coefficient de détermination de Spearman dans notre cas est de 0.606. En ce qui concerne la deuxième population nous avons un R^2 de 0.140 et le coefficient de Spearman vaut 0.082.

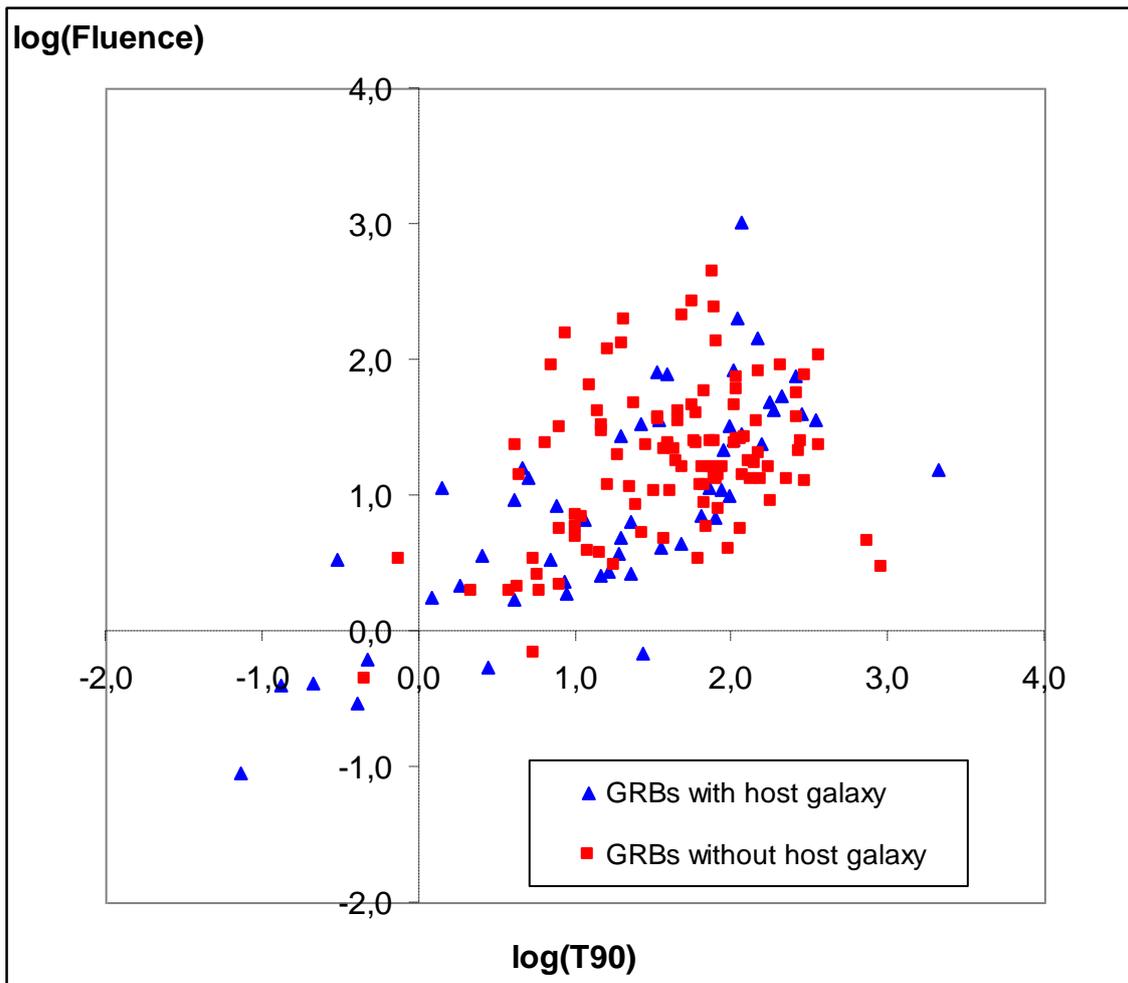


Figure 4.8 Corrélation Fluence-Durée pour les GRBs avec galaxie hôte (en bleu) et les GRBs sans galaxie hôte (en rouge).

Donc la différence est très importante entre les deux classes, mais si on réfléchit un peu sur la raison d'une telle différence, il est très probable que cela soit dû à la nature des données dont nous disposons, puisque la fluence que nous avons est calculée dans l'intervalle d'énergie 15 - 150 keV seulement, ce qui est très petit comme intervalle, alors que dans certaines corrélations, comme celle d'Amati, l'intervalle d'énergie est 1 - 10000 keV. Pour avoir de meilleures données sur la fluence il faudrait reprendre le spectre pour chaque sursaut... Donc il n'est pas raisonnable de justifier cette différence (qui paraît significative) par autre chose que l'intervalle d'énergie suivant lequel la fluence a été obtenue, surtout dans notre cas où nous avons un groupe un peu plus dur que l'autre (et du fait que nos deux classes de GRBs diffèrent dans leurs T_{90} , ils diffèrent aussi forcément dans la dureté).

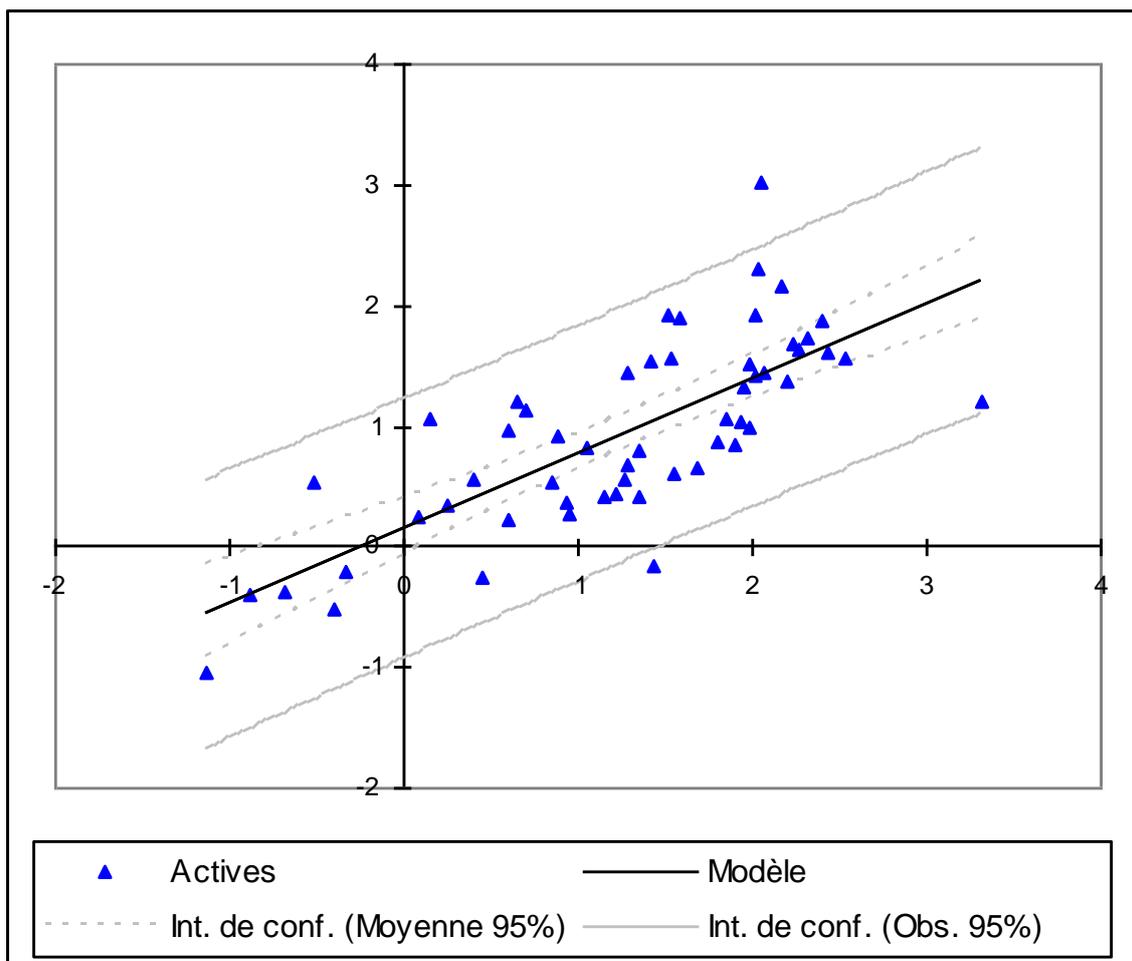


Figure 4.9 Corrélation Fluence-Durée pour les GRBs avec galaxie hôte, la droite au milieu représente le meilleur ajustement. R^2 est égal à 0.569.

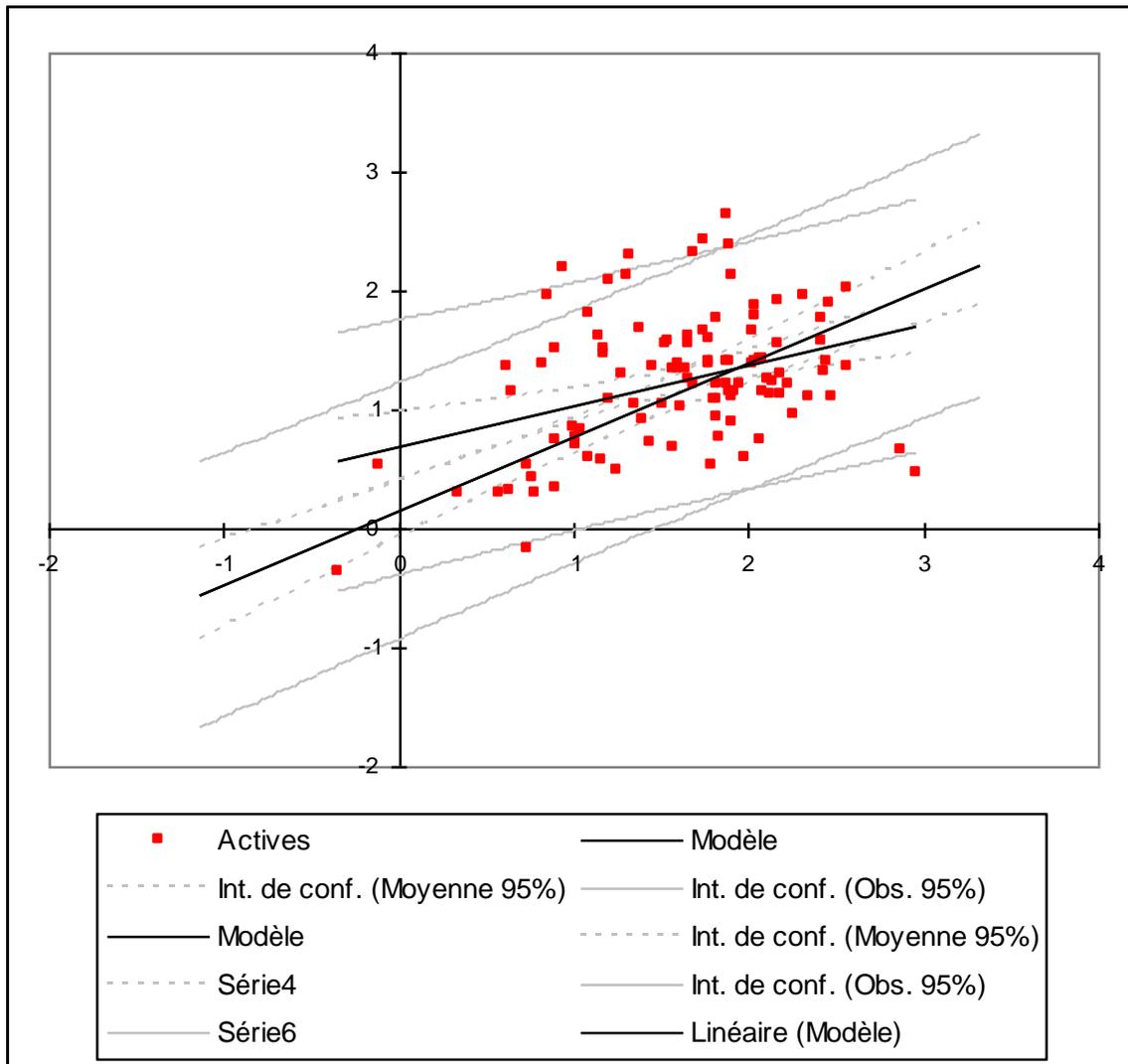


Figure 4.10 Corrélation Fluence-Durée pour les GRBs sans galaxie hôte, la droite au milieu représente le meilleur ajustement. R^2 est égal à 0.140.

4.6 Le test Kolmogorov-Smirnov

Afin de voir si la différence entre la distribution des données des deux groupes populations est fondamentale ou non, nous avons fait une comparaison entre les données des deux populations (fluence, T_{90} , pic du flux des photons, column density N_H). Nous avons trouvé que les distributions des N_H et celle des pics du flux des photons ne diffèrent pas entre les deux groupes de manière significative. C'est seulement pour la fluence qu'on a trouvé que

la différence entre les deux groupes est significative, mais nous avons expliqué que cela pouvait être dû à l'intervalle d'énergie utilisé dans la mesure de la fluence...

4.6.1 Column density (N_H)

Les résultats statistiques obtenus dans ce cas sont: $D = 0.126$, $p\text{-value} = 0.643$, $\alpha = 0.05$. Etant donné que la valeur de p calculée est supérieure au niveau de signification $\alpha=0,05$, nous pouvons valider l'hypothèse nulle, selon laquelle les deux échantillons suivent la même loi de distribution. Le risque de rejeter l'hypothèse nulle alors qu'elle est vraie est de 64,26%.

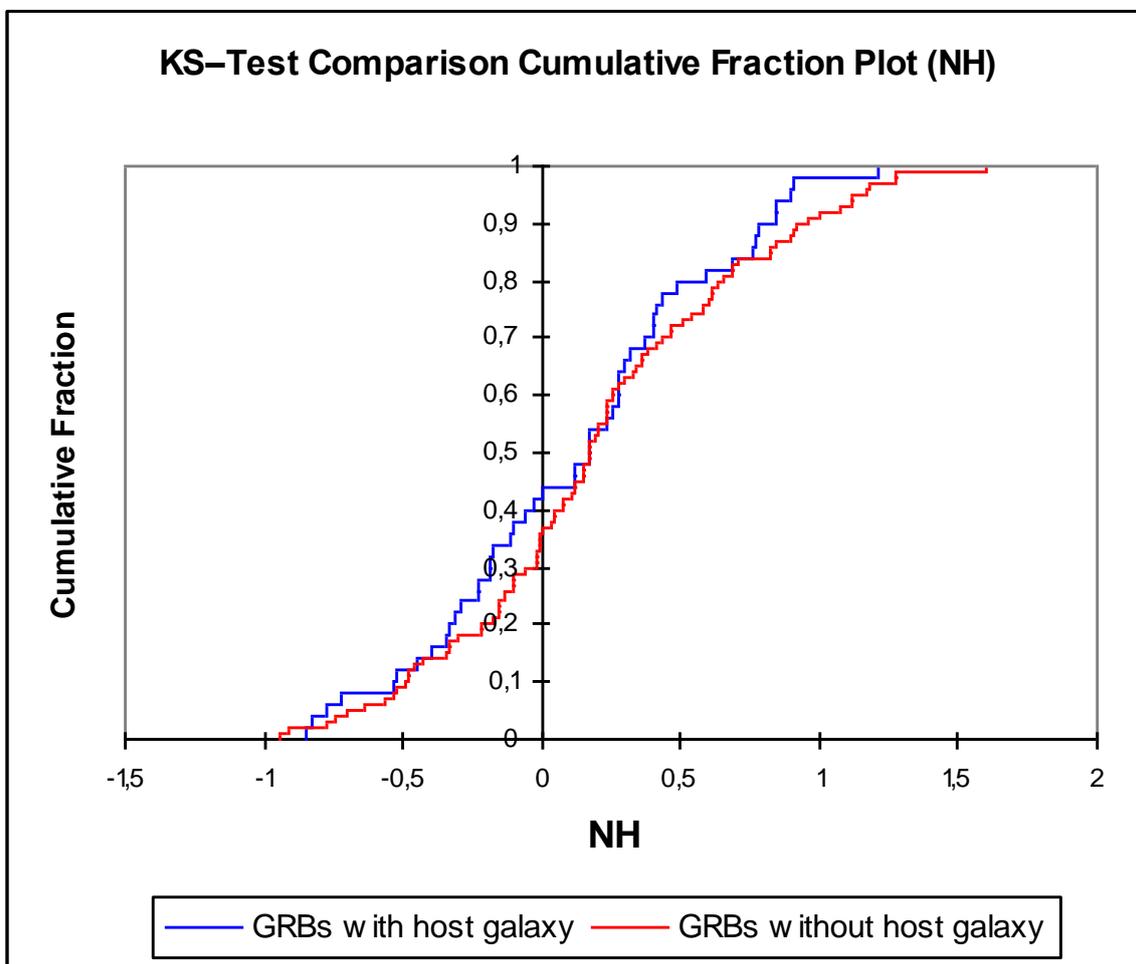


Figure 4.11 K-S test pour la distribution de N_H des deux groupes. La différence est insignifiante et les deux groupes suivent la même loi.

4.6.2 1-sec Photon Flux

Les résultats statistiques obtenus dans ce cas sont: $D = 0.113$, $p\text{-value} = 0.701$, $\alpha = 0.05$. Puisque la valeur de p obtenue est supérieure au niveau de signification $\alpha = 0,05$, nous pouvons valider l'hypothèse nulle selon laquelle les deux échantillons suivent la même loi de distribution. Le risque de rejeter l'hypothèse nulle alors qu'elle est vraie est de 70.1%.

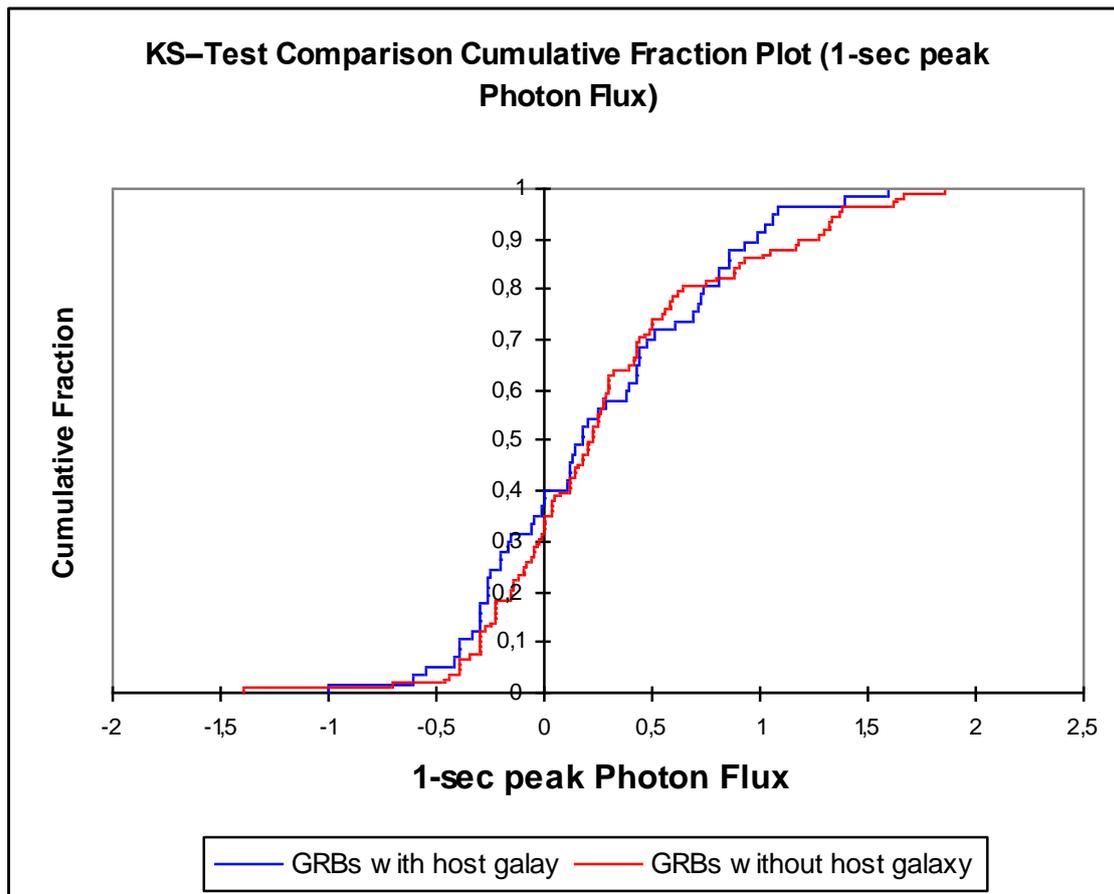


Figure 4.12 K-S test pour la distribution de 1 sec du pic du flux des photons des deux groupes. La différence est insignifiante et les deux groupes suivent la même loi.

4.6.3 Pour la durée T_{90}

Les résultats statistiques obtenus dans ce cas sont: $D = 0.207$, $p\text{-value} = 0.078$, $\alpha = 0.05$. Du fait que la valeur de p calculée est supérieure au niveau de signification $\alpha = 0,05$,

nous pouvons valider l'hypothèse nulle selon laquelle les deux échantillons suivent la même loi de distribution. Le risque de rejeter l'hypothèse nulle alors qu'elle est vraie est de 7.8%.

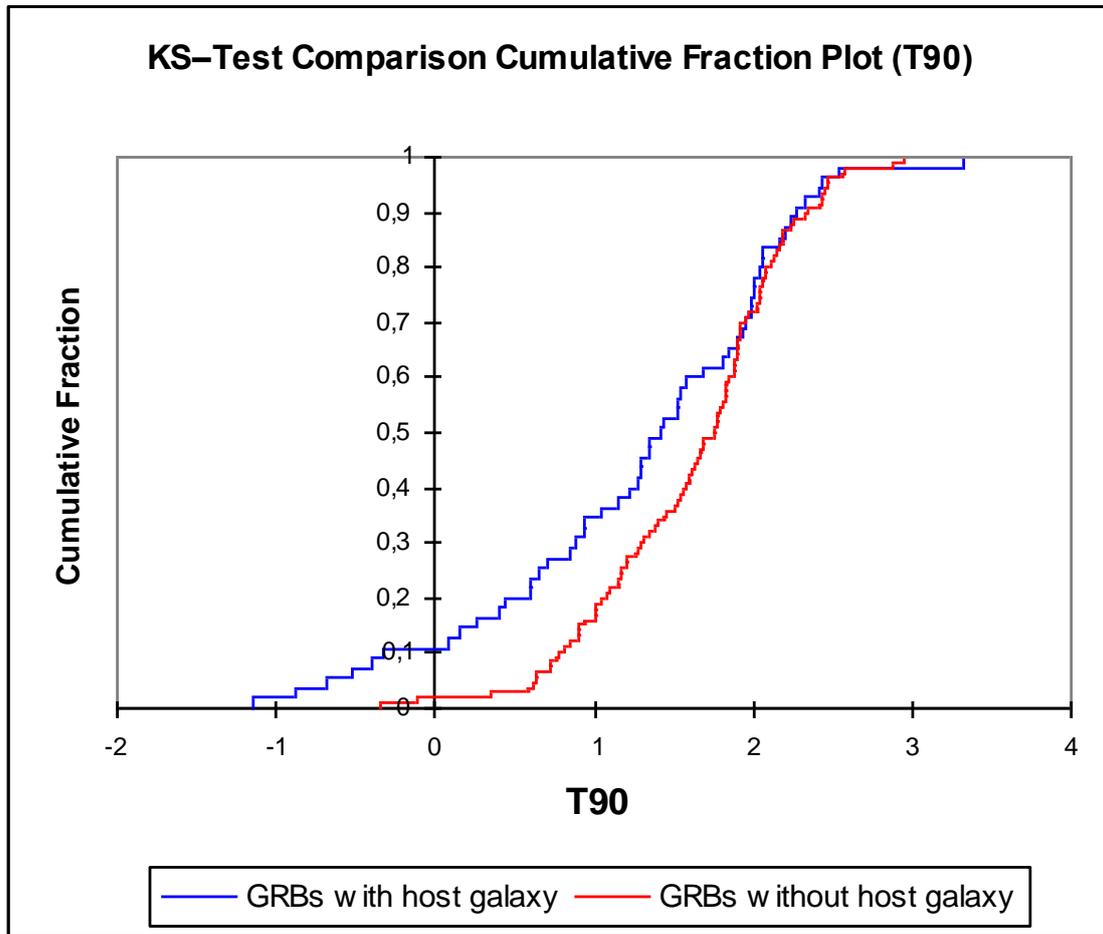


Figure 4.13 K-S test pour la distribution de T_{90} des deux groupes. La différence est insignifiante et les deux groupes suivent la même loi.

4.6.4 La fluence

Les résultats statistiques obtenus dans ce cas sont: $D = 0.264$, $p\text{-value} = 0.009$, $\alpha = 0.05$. Etant donné que la valeur de p calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha = 0,05$, nous devons rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle les deux échantillons suivent la même loi de distribution, et retenir l'hypothèse alternative, c'est-à-dire que les deux distributions sont différentes. Le risque de rejeter l'hypothèse nulle alors qu'elle est vraie, est inférieur à 0.9%.

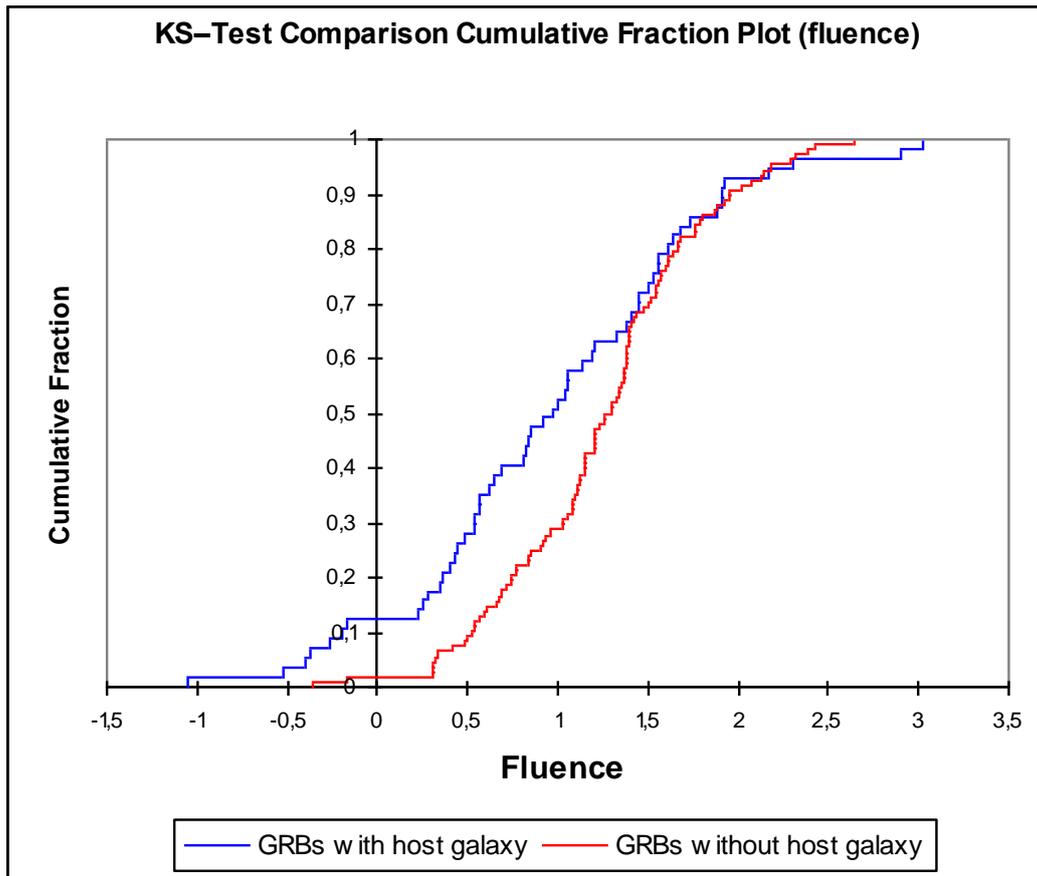


Figure 4.14 K-S test pour la distribution de la fluence des deux groupes. La différence est significative et les deux groupes ne suivent pas la même loi.

4.5 Conclusion

Grosso modo, les propriétés des GRBs avec galaxie hôte sont similaires à ceux des GRBs sans galaxie hôte. A l'exception des deux différences significatives trouvées dans la corrélation Fluence- T_{90} et entre les deux distributions de la fluence des deux groupes de GRBs, mais qu'on peut justifier sur la base de l'intervalle d'énergie plutôt réduit (15-150 keV) utilisé dans la mesure de la fluence, et à l'exception aussi de la différence trouvée dans la distribution du redshift, qui elle aussi peut être expliquée par un effet de sélection, par le fait que les galaxies lointaines sont plus difficiles à voir. A part ces différences, les données des deux groupes semblent être issues de la même distribution. Rien n'indique que les GRBs avec galaxie hôte sont différents des GRBs sans galaxie.

Donc à la fin, nous pouvons dire que nous n'avons pas trouvé de phénomène physique sous-jacent expliquant le manque de galaxies hôtes ; il est très probable que des effets de sélections, comme ceux mentionnés plus haut, sont derrière ce manque. Pour les GRBs sans galaxies hôte, on peut dire qu'une fois ces effets de sélection dépassés, nous pourrions détecter la galaxie hôte dans la majorité des cas, en d'autre terme, d'après ce que nous avons fait dans ce chapitre, nous pouvons prévoir l'existence de la galaxie hôte pour notre groupe de GRBs sans galaxie hôte!

Tableau 4.3 : Données utilisées dans notre étude statistique de GRBs avec galaxie hôte détectée : T_{90} , fluence, pic du flux des photons, column density N_H , et redshift z .

GRB	T_{90} [Secondes]	Fluence ^a (15-150 keV) [10^{-7} erg/cm ²]	pic du flux de photons (15-150 keV) [ph/cm ² /sec]	Column Density (N_H) [10^{21} cm ⁻²]	Redshift ^b	Galaxie hôte ^c	Références ^d
100418A	7	3,4	1	2,1	0,6235	Détectée	(1)
100316D	n/a	3	0,1	5,9	0,059	Détectée	(1)
100219A	18,8	3,7	0,4	0,88	4,6667	Détectée	(1)
090618	113,2	1050	38,9	1,78	0,54	Détectée	(1)
090510	0,3	3,4	9,7	0,166	0,903	Détectée	(1)
090426	1,2	1,8	2,4	0,15	2,609	Détectée	(1)
090205	8,8	1,9	0,5	0,77	4,6497	Détectée	(1)
090102	27	0,68	5,5	7	1,547	Détectée	(1)
081008	185,5	43	1,3	0,59	1,9685	Détectée	(1)
080520	2,8	0,55	0,5	0,648	1,545	Détectée	(1)
080319C	34	36	5,2	1,5	1,95	Détectée	(1)
080319B	>50	810	24,8	2,35	0,937	Détectée	(1)
071227	1,8	2,2	1,6	0,93	0,383	Détectée	(1)
070802	16,4	2,8	0,4	0,29	2,45	Détectée	(1)
070724A	0,4	0,3	1	0,143	0,457	Détectée	(1)
070721B	340	36	1,5	0,19	3,626	Détectée	(1)
070714B	64	7,2	2,7	1,3	0,92	Détectée	(1)
070521	37,9	80,1	6,53	7	1,35	Détectée	(1)
070429B	0,47	0,63	1,76	<5,9	0,904	Détectée	(1)
070306	209,5	53,8	4,07	3,9	1,4959	Détectée	(1)
070208	47,7	4,45	0,9	2,6	1,165	Détectée	(1)
061222	n/a	n/a	n/a	n/a	2,088	Détectée	(1)
061217	0,21	0,42	1,49	0,451	0,827	Détectée	(1)

061210	85,3	11,1	5,31	n/a	0,4095	Détectée	(1)
061126	n/a	n/a	n/a	n/a	1.1588	Détectée	(1)
061006	n/a	n/a	n/a	n/a	0.4377	Détectée	(1)
060912	5	13,5	8,58	1,7	0,937	Détectée	(1)
060908	19,3	28	3,03	0,8	1.8836	Détectée	(1)
060814	145,3	146	7,27	2,7	0,84	Détectée	(1)
060801	n/a	n/a	n/a	n/a	1,3	Détectée	(1)
060714	115	28,3	1,28	1,89	2,711	Détectée	(1)
060614	108,7	204	11,5	1,3	0,125	Détectée	(1)
060607A	102,2	25,5	1,4	7,9	3,082	Détectée	(1)
060605	79,1	6,97	0,46	0,51	3,78	Détectée	(1)
060522	71,1	11,4	0,55	0,46	5,11	Détectée	(1)
060512	8,5	2,32	0,88	0,49	0,4428	Détectée	(1)
060510B	275,2	40,7	0,57	1,5	4,9	Détectée	(1)
060505	4	9,44	2,65	n/a	0,089	Détectée	(1)
060502B	0,131	0,4	0,62	n/a	0,287	Détectée	(1)
060418	103,1	83,3	6,52	1,9	1,489	Détectée	(1)
060223A	11,3	6,73	1,35	0,59	4,41	Détectée	(1)
060218	2100	15,7	0,25	1,9	0,0331	Détectée	(1)
060210	255	76,6	2,72	16,4	3,91	Détectée	(1)
060206	7,6	8,31	2,79	0,4	4,048	Détectée	(1)
051221A	1,4	11,5	12	0,67	0,547	Détectée	(1)
051109B	14,3	2,56	0,55	3,1	0,08	Détectée	(1)
051016B	4	1,7	1,3	4,8	0,9364	Détectée	(1)
050922C	4,5	16,2	7,26	0,65	2,198	Détectée	(1)
050908	19,4	4,83	0,7	0,3	3,344	Détectée	(1)
050904	174,2	48,3	0,62	1,5	6,29	Détectée	(1)
050826	35,5	4,13	0,38	8	0,297	Détectée	(1)
050824	22,6	2,66	0,5	0,36	0,83	Détectée	(1)
050820A	26	34,4	2,45	6	2,612	Détectée	(1)

050803	87,9	21,5	0,96	1,98	0,422	Détectée	(1)
050730	156,5	23,8	0,55	1	3,967	Détectée	(1)
050724	96	9,98	3,26	5,7	0,258	Détectée	(1)
050509B	0,073	0,09	0,28	n/a	0,226	Détectée	(1)
050416A	2,5	3,67	4,88	2,5	0,6535	Détectée	(1)
050408	n/a	n/a	n/a	2,5	1,23	Détectée	(1)
050401	33,3	82,2	10,7	n/a	2,9	Détectée	(1)
050315	95,6	32,2	1,93	n/a	1,949	Détectée	(1)
050223	22,5	6,36	0,69	n/a	0,5915	Détectée	(1)

Tableau 4.4 : Données utilisées dans notre étude statistique de GRBs sans galaxie hôte détectée : T_{90} , fluence, pic du flux des photons, column density N_H , et redshift z

GRB	T_{90}	Fluence ^a (15-150 keV)	du flux de photons (15-150 keV)	Column Density (N_H)	Redshift ^b	Galaxie hôte	Références ^a
	[Secondes]	[10^{-7} erg/cm ²]	[ph/cm ² /sec]	[10^{21} cm ⁻²]			
100513A	84	14	0,6	19	4,772	?	(1)
100425A	37	4,7	1,4	14,9	1,755	?	(1)
100316B	3,8	2	1,3	4,1	1,18	?	(1)
100302A	17,9	3,1	0,5	1,1	4,813	?	(1)
091208B	14,9	33	15,2	2,9	1,063	?	(1)
091127	7,1	90	46,5	0,98	0,49	?	(1)
091109A	48	16	1,3	0,99	3,067	?	(1)
091029	39,2	24	1,8	0,114	2,752	?	(1)
091024	109,8	61	2	4,86	1,092	?	(1)
091020	34,6	37	4,2	5,1	1,71	?	(1)
091018	4,4	14	10,3	1,4	0,971	?	(1)
090927	2,2	2	2	0,292	1,37	?	(1)

090926B	109,7	73	3,2	1,7	1,24	?	(1)
090814A	80	13	0,6	1,3	0,696	?	(1)
090812	66,7	58	3,6	10	2,452	?	(1)
090809	5,4	3,4	1,1	2,4	2,737	?	(1)
090726	67	8,6	0,7	1,2	2,71	?	(1)
090715B	266	57	3,8	1,09	3	?	(1)
090529	>100	6,8	0,4	0,23	2,625	?	(1)
090519	64	12	0,6	19	3,85	?	(1)
090516A	210	90	1,6	1,57	4,109	?	(1)
090424	48	210	71	2,7	0,544	?	(1)
090423	10,3	5,9	1,7	0,87	8,26	?	(1)
090418A	56	46	1,9	12	1,608	?	(1)
090417B	n/a	n/a	n/a	n/a	0,345	?	(1)
090313	79	14	0,8	1,29	3,375	?	(1)
081222	24	48	7,7	0,461	2,77	?	(1)
081203A	294	77	2,9	0,6	2,05	?	(1)
081121	14	41	4,4	0,97	2,512	?	(1)
081118	67	12	0,6	0,37	2,58	?	(1)
081029	270	21	0,5	0,27	3,8479	?	(1)
081028A	260	37	0,5	0,8	3,038	?	(1)
081007	10	7,1	2,6	6,6	0,5295	?	(1)
080928	280	25	2,1	1,7	1,692	?	(1)
080916A	60	40	2,7	2,6	0,689	?	(1)
080913	8	5,6	1,4	0,32	6,695	?	(1)
080906	147	35	1	0,97	2	?	(1)
080905S	n/a	n/a	n/a	n/a	0,1218	?	(1)
080905B	128	18	0,5	13,2	2,374	?	(1)
080810	106	46	2	0,328	3,35	?	(1)
080805	78	25	1,1	0,35	1,505	?	(1)
080804	34	36	3,1	1,7	2,2045	?	(1)

080721	16,2	120	20,9	1,1	2.591	?	(1)
080710	120	14	1	1,6	0,845	?	(1)
080707	27,1	5,2	1	0,699	1,23	?	(1)
080607	79	240	23,1	40	3,036	?	(1)
080605	20	133	19,9	6,6	1,6398	?	(1)
080604	82	8	0,4	0,8	1,416	?	(1)
080603B	60	24	3,5	7,9	2,69	?	(1)
080516	5,8	2,6	1,8	13	3,2	?	(1)
080430	16,2	12	2,6	0,46	0,767	?	(1)
080413B	8	32	18,7	3,2	1,1	?	(1)
080413A	46	35	5,6	15,3	2,433	?	(1)
080411	56	264	43,2	1,5	1,03	?	(1)
080330	61	3,4	0,9	0,123	1,51	?	(1)
080310	365	23	1,3	7	2,42	?	(1)
080210	45	18	1,6	2,15	2,641	?	(1)
080129	n/a	n/a	n/a	n/a	4,349	?	(1)
071122	68,7	5,8	0,4	0,99	1,14	?	(1)
071117	6,6	24	11,3	2,3	1,331	?	(1)
071112C	15	30	8	0,74	0,823	?	(1)
071031	180	9	0,5	0,7	2,692	?	(1)
071025	n/a	n/a	n/a	n/a	5,2	?	(1)
071021	225	13	0,7	1,8	5	?	(1)
071020	4,2	23	8,4	4,3	2,145	?	(1)
071010B	>35,7	44	7,7	n/a	0,947	?	(1)
071010A	6	2	0,8	n/a	0,98	?	(1)
071003	150	83	6,3	1,4	1,60435	?	(1)
070810A	11	6,9	1,9	1,3	2,17	?	(1)
070612A	368,8	106	1,51	n/a	0,617	?	(1)
070611	12,2	3,91	0,82	0,5	2,04	?	(1)
070529	109,2	25,7	1,43	3,5	2,4996	?	(1)

070508	20,9	196	24,1	3,8	0,82	?	(1)
070506	4,3	2,1	0,96	1,8	2,31	?	(1)
070419A	115,6	5,58	0,2	1,9	0,97	?	(1)
070411	121,5	27	0,91	2,9	2,954	?	(1)
070318	74,6	24,8	1,76	1,5	0,836	?	(1)
070110	88,4	16,2	0,6	0,3	2,352	?	(1)
061222B	40	22,4	1,59	4	3,355	?	(1)
061201	0,76	3,34	3,86	1,2	0,111	?	(1)
061121	81,3	137	21,1	2,3	1,314	?	(1)
061110B	134	13,3	0,45	4,83	3,44	?	(1)
061110A	40,7	10,6	0,53	1,6	0,758	?	(1)
061021	n/a	n/a	n/a	n/a	0,3463	?	(1)
061007	75,3	444	14,6	1,4	1,261	?	(1)
060927	22,5	11,3	2,7	0,8	5,47	?	(1)
060926	8	2,19	1,09	2,2	3,2	?	(1)
060906	43,5	22,1	1,97	0,966	3,686	?	(1)
060904B	171,5	16,2	2,44	4,09	0,703	?	(1)
060729	115,3	26,1	1,17	1	0,54	?	(1)
060708	10,2	4,94	1,94	1,5	1,92	?	(1)
060707	66,2	16	1,01	0,18	3,425	?	(1)
060604	95	4,02	0,34	0,457	2,68	?	(1)
060602A	75	16,1	0,56	n/a	0,787	?	(1)
060526	298,2	12,6	1,67	0,6	3,221	?	(1)
060502A	28,4	23,1	1,69	4,5	1,51	?	(1)
060202	n/a	n/a	n/a	n/a	0,783	?	(1)
060124	750	4,61	0,89	1,72	2,296	?	(1)
060123	900	3	0,04	2	1,099	?	(1)
060116	105,9	24,1	1,11	8,1	5,1	?	(1)
060115	139,6	17,1	0,87	1,5	3,53	?	(1)
060108	14,3	3,69	0,77	0,17	2,03	?	(1)

051111	46,1	40,8	2,66	9	1,55	?	(1)
051109A	37,2	22	3,94	8,2	2,346	?	(1)
050814	150,9	20,1	0,71	0,694	5,3	?	(1)
050813	0,45	0,44	0,94	n/a	1,8	?	(1)
050802	19	20	2,75	0,66	1,71	?	(1)
050801	n/a	n/a	n/a	n/a	1,56	?	(1)
050603	12,4	63,6	21,5	0,2	2,821	?	(1)
050525A	8,8	153	41,7	n/a	0,606	?	(1)
050505	58,9	24,9	1,85	n/a	4,27	?	(1)
050406	5,4	0,68	0,36	0,33	2,44	?	(1)
050319	152,5	13,1	1,52	n/a	3,24	?	(1)
050318	32	10,8	3,16	n/a	1,44	?	(1)
050126	24,8	8,38	0,71	n/a	1,29	?	(1)

n/a : la donnée n'est pas disponible (not available).

^a La fluence est mesurée dans l'intervalle d'énergie 15-150 keV.

^b Les valeurs du redshift sont prises à partir du tableau des GRBs de J. Greiner (<http://www.mpe.mpg.de/~jcg/grbgen.html>).

^c Le site officiel de Swift (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov>) et le tableau de S. Savaglio de toutes les galaxies hôtes publiées : (<http://www.grbhost.org>).

^d Les données T_{90} , peak photon flux, N_H et la fluence sont prises du site officiel de Swift (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov>).

Chapitre V

Y a-t-il un lien entre la relation d'Amati et l'existence (la détection) de la galaxie hôte ?

5.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons explorer le lien entre l'existence de la galaxie hôte des sursauts gamma et la relation d'Amati, en d'autres termes nous allons essayer de voir si les deux groupes de GRBs (avec, et sans, galaxies hôtes) obéissent différemment à cette corrélation. La relation d'Amati, qui est une des découvertes les plus importantes effectuées récemment dans le domaine des sursauts gamma, est une corrélation établie pour la classe des longs GRBs, entre l'énergie $E_{p,i}$ (dans un repère cosmologique au repos) à laquelle il y a un pic dans le spectre νF_ν de l'émission prompte, et l'énergie totale rayonnée, E_{iso} , en supposant une émission isotropique. C'est une corrélation logarithmique très puissante, elle s'applique aussi aux sursauts gammas mous (XRFs) tout comme pour les GRBs extrêmement énergétiques ; ainsi elle couvre plus de 5 ordres de grandeur d'énergie isotropique, s'étendant de $\sim 10^{49}$ jusqu'à $\sim 10^{54}$ erg. De plus, la majorité écrasante des GRBs obéissent à cette relation, ce qui l'a rendue très connue dans le domaine des GRBs.

Comme dans le chapitre précédent, nous avons construit une population de GRBs divisée en deux groupes, suivant la détection ou non de la galaxie hôte. Nous comparerons donc statistiquement les paramètres définissant la relation d'Amati pour chaque groupe.

5.2 La population

La population totale utilisée est composée de 88 sursauts gamma détectés par les instruments des satellites suivants : HET (HETE-2), BAT (Swift), WIND (Konus), WAM (Suzaku), GBM (Fermi), BATSE (CGRO), SAX (Beppo-SAX). Les données de cette population ont été publiées récemment (en 2008 et 2009), par Lorenzo Amati et son équipe.

La population contient des événements d'énergies isotropiques les plus extrêmes jamais détectées, comme pour GRB080916C et GRB090323 ($\sim 4 \cdot 10^{54}$ erg). D'autre part des GRBs très mous ($\sim 10^{49}$ erg), des flashes-X (XRFs), comme GRB020903 et GRB060218 sont aussi inclus dans cette population. Les incertitudes des valeurs de $E_{p,i}$ et E_{iso} sont grandes, elles atteignent jusqu'à 50 % de la valeur de l'énergie ! Cependant nous n'avons pas le choix ; de plus ce problème de la grande incertitude sur les énergies peut être amorti en utilisant le logarithme, ce que nous allons faire. Les données utilisées pour ces 88 GRBs sont présentées dans les tableaux à la fin de chapitre. Nous comptons 45 GRBs avec galaxies hôtes et 43 sursauts pour lesquels les galaxies n'ont pas encore été détectées.

5.3 L'énergie isotropique E_{iso} et sa distribution dans la population considérée

Voyons d'abord comment les valeurs de l'énergie isotropique de notre population sont distribuées pour chaque groupe. L'histogramme 5.1 montre comment les énergies isotropiques des deux groupes sont réparties : quand l'énergie isotropique est de l'ordre de 10^{53} à 10^{54} erg, les distributions de l'énergie isotropique des deux groupes sont similaires, mais à basses énergies on trouve plus de GRBs avec galaxie hôte, et la situation s'inverse aux énergies extrêmes. De ce fait, la moyenne de l'énergie isotropique de la classe des GRBs avec galaxies hôtes est inférieure à celle des GRBs sans galaxies hôtes, c.-à-d. que les GRBs avec des galaxies connues sont en moyenne un peu plus mous (soft) que les GRBs sans galaxie hôte, mais la différence n'est pas significative, surtout si nous prenons en considération les incertitudes énormes que nous avons sur les énergies. De plus les énergies des deux groupes sont du même ordre.

Energie isotropique (erg)	$<10^{52}$	$<10^{53}$	$<10^{54}$	$\langle E_{iso} \rangle$ (10^{52} erg)
Groupe des GRBs avec galaxie hôte	22%	53%	96%	29,9
Groupe des GRBs sans galaxie hôte	2%	42%	88%	43,6

Tableau 5.2. Comparaison statistique entre les énergies isotropiques des deux groupes.

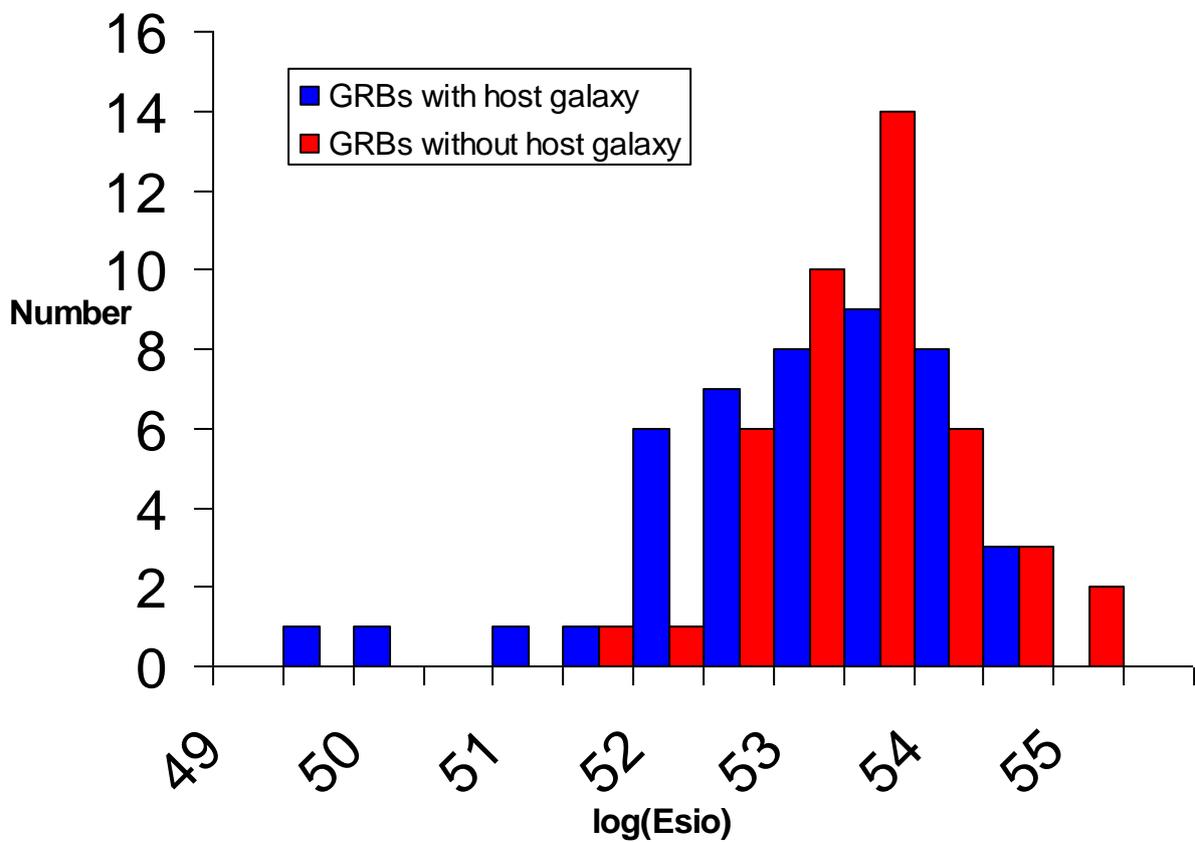


Figure 5.1. Histogramme des valeurs de l'énergie isotropique des deux groupes de GRBs de notre population.

5.4 E_{iso} et $E_{p,i}$ en fonction de z

Nous pouvons voir à partir des graphes 5.2 et 5.3, représentant E_{iso} et $E_{p,i}$ des deux groupes en fonction de z , que la différence entre les deux classes est loin d'être significative, les deux nuages de points semblent avoir le même profil logarithmique. Nous remarquons aussi que E_{iso} et $E_{p,i}$ semblent avoir la même évolution en fonction de z , ce qui est normal puisque les deux grandeurs sont corrélées entre elles (via la relation d'Amati).

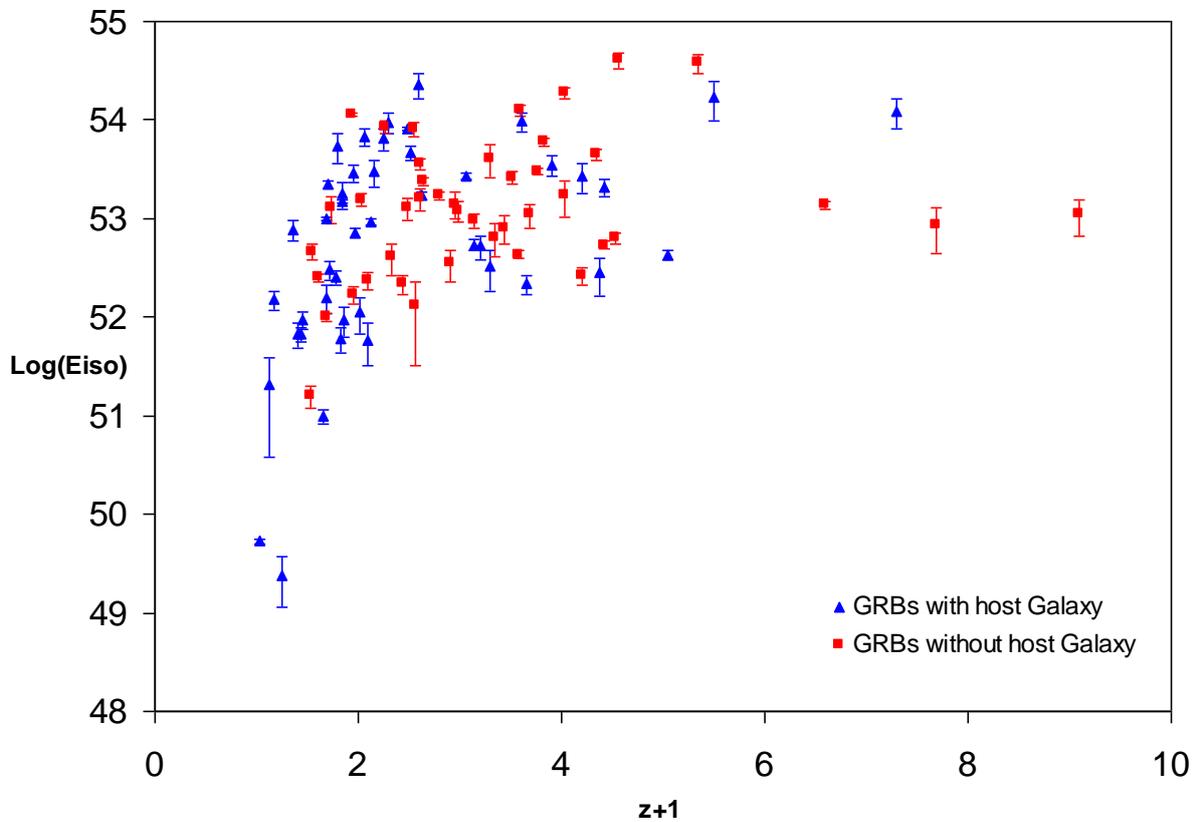


Figure 5.2. Profil logarithmique de l'énergie isotropique en fonction de z pour les deux groupes de GRBs. En triangles bleus les GRBs avec galaxie hôte et en carrés rouges les GRBs sans galaxie hôte. L'incertitude dans la mesure de l'énergie isotropique E_{iso} est représentée pour chaque point.

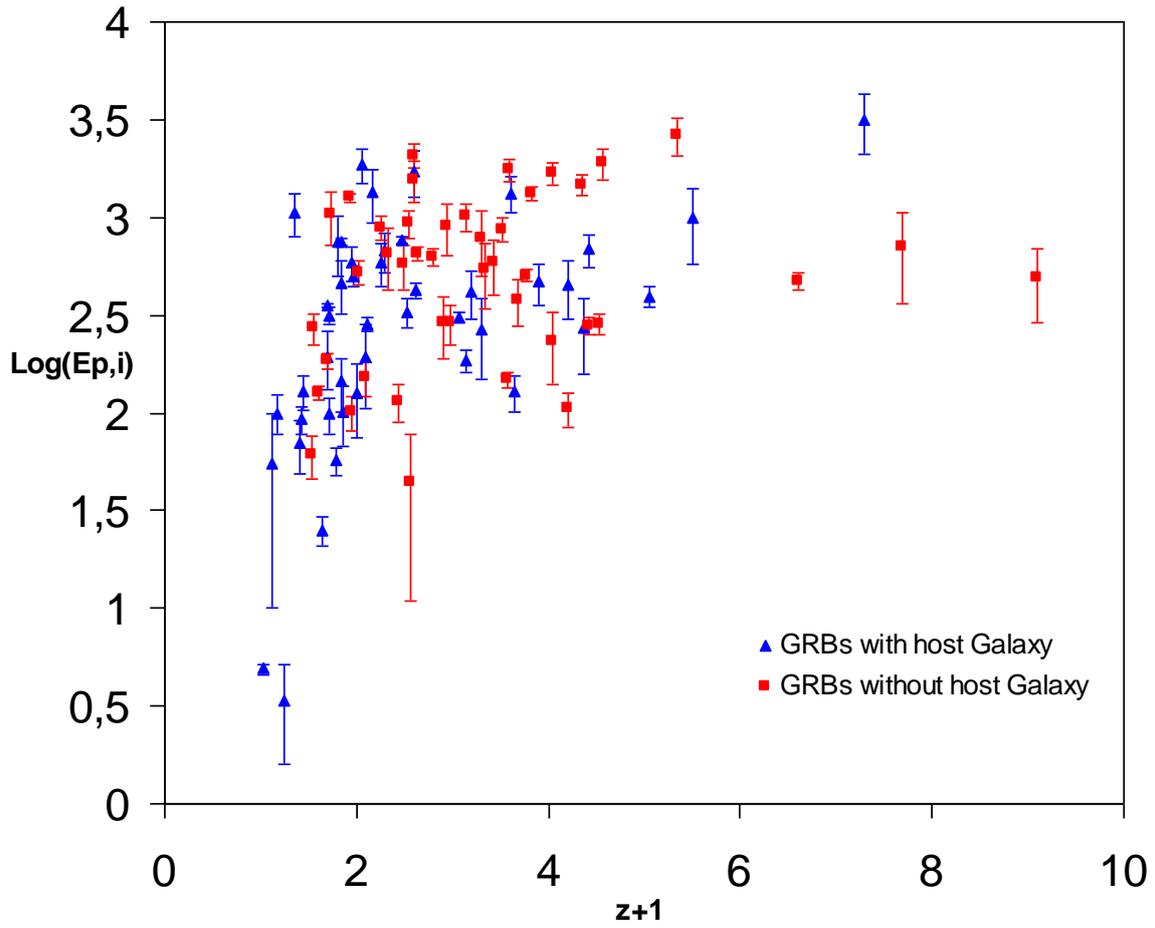


Figure 5.3. Profil logarithmique du pic d'énergie $E_{p,i}$ en fonction de z pour les deux groupes de GRBs. En triangles bleus les GRBs avec galaxie et en carrés rouges les GRBs sans galaxie hôte. L'incertitude dans la mesure de l'énergie isotropique E_{iso} est représentée pour chaque point.

5.5 Relation d'Amati

La relation d'Amati s'exprime selon l'équation suivante :

$$E_{p,i} = K \times E_{iso}^m \quad (5.1)$$

où m et K sont des constantes d'ajustement (de « fit »). En d'autres termes, c'est une corrélation linéaire entre les logarithmes des énergies: $\log(E_{iso})$ et $\log(E_{p,i})$:

$$\log(E_{p,i}) = m \times \log(E_{iso}) + \log K \quad (5.2)$$

5.5.1 Les méthodes utilisées

Afin d'ajuster notre droite représentant la régression d'Amati (représenté ci-dessous dans l'équation (5.3)) pour les données que nous avons collectées et que nous avons partagées en deux groupes (les GRBs avec et les GRBs sans galaxie hôte), nous avons eu recours à deux techniques différentes dans l'ajustement et la détermination des paramètres de la corrélation m (qui représente la pente de la droite d'Amati ("a")) et $\log K$ (qui est égal au paramètre "b").

$$y = a \times x + b \quad (5.3)$$

5.5.1.1 Méthode du coefficient de corrélation.

Les paramètres de la corrélation peuvent être calculés analytiquement en utilisant les équations (4.1) et (4.2) définissant "r", puisque a et b peuvent être calculés par les formules suivantes :

$$a = \frac{\text{Cov}(x, y)}{\text{Var } x} = r \times \frac{\text{Ety } y}{\text{Ety } x}$$

Et :

$$b = \bar{y} - a \bar{x}$$

Une fois a et b obtenu pour les deux groupes de GRBs, nous pouvons tracer la droite de la relation d'Amati pour chaque groupe et faire une comparaison quantitative des résultats obtenus.

5.5.1.2 Méthode classique du Khi deux χ^2

La deuxième méthode d'ajustement que nous utilisons est la technique du Khi deux (Chi-Square en Anglais).

Si on suppose que chaque point de donnée (x_i, y_i) a sa propre erreur (incertitude), (écart type σ_i), donc le khi deux est définie comme :

$$\chi^2 \equiv \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - f(x_i)}{\sigma_i} \right)^2$$

Avec :

N : Le nombre de points

σ_i et σ_i^2 : sont respectivement l'écart type est la variance, ils sont reliés à l'erreur de mesure du point i , dans notre cas les x_i tout comme y_i sont mesurés avec une erreur. C'est comme si la valeur exacte de x_i ou y_i est une moyenne et la barre d'erreur est un écart type.

x et y : sont des variables indépendantes

f : est la relation supposée entre x et y , dans notre cas c'est une régression linéaire, l'équation d'une droite.

y_i et $f(x_i)$: sont les valeurs observées (détectées) et prédites respectivement.

Dans notre cas nous avons une Régression linéaire, c'est-à-dire :

$$y(x) = y(x|a,b) = ax + b$$

Donc le Khi deux devient :

$$\chi^2(a,b) \equiv \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{y_i - ax_i - b}{\sigma_i} \right)^2$$

La technique d'ajustement (fitting) de Khi deux consiste à trouver les paramètres de la régression linéaire en minimisant la quantité ci-dessus. Le Khi deux est donc la somme de N carrés de quantité normalisée à l'unité de la variance.

Le nombre de degré de liberté, ν (degree of freedom en anglais), se définit par $\nu = N - m$, où m est le nombre de paramètres de notre fonction de fit, pour un fit linéaire comme dans notre cas nous avons $m = 2$, car $f(x) = ax + b$.

Mais ce n'est pas encore fini, après avoir trouvé les paramètres idéals a et b , il reste à calculer Q (ou son complément $P = 1 - Q$) qui est la probabilité que Khi deux dépasse une valeur particulière de χ^2 par chance. Cette probabilité calculée donne une mesure quantitative de la qualité du fit du modèle. Si la probabilité Q est très petite pour certaines données, donc la différence apparente est invraisemblablement due à la chance (à des fluctuations). Ceci veut automatiquement dire que soit :

- Le modèle est faux et peut être rejeté
- Les erreurs sont peut être plus grandes et elles ont été sous-estimées.

Si Q est plus petit que 0.001 alors le modèle ou l'estimation des erreurs doit être mise en question. D'autre part, si le Q trouvé est très large, très proche de 1, ceci veut dire que, littéralement, c'est trop beau pour être vrai ! C'est-à-dire qu'il est très probable que les erreurs (σ_i) ont été surestimées. Généralement la cause d'un bon fit de Khi deux est que les erreurs ont été surestimées.

La quantité Q , ou son complément P sont tabulés dans des tableaux puisque la probabilité ne peut pas être calculée analytiquement

Une règle simple est que la valeur typique de Khi deux pour un bon fit est $\chi^2 \sim \nu$. Plus précisément, la statistique des valeurs de Khi deux pour un bon fit a une moyenne ν et un écart type $\sqrt{2\nu}$ et, asymptotiquement pour un large ν , la statistique est distribuée normalement.

Le Khi deux réduit est défini comme suit:

$$\chi_{red}^2 = \frac{\chi^2}{\nu}$$

Avec ν le degré de liberté. Comme nous avons mentionné précédemment la valeur idéale de Khi deux pour un bon fit est $\chi^2 \sim \nu$. De ce fait, pour un bon fit le Khi deux réduit doit être proche de 1.

5.5.2 Les résultats

Après avoir effectué le calcul indiqué ci-haut, nous avons obtenu les résultats suivants :

5.5.2.1 Les résultats pour la population totale

Pour la population toute entière (88 GRBs) nous avons trouvé un coefficient de corrélation « r » égal à 0,91, ce qui indique une corrélation positive très significative, confirmant ainsi la « relation d'Amati », puisque le coefficient de détermination R^2 ($R^2 = r^2$) est égal à 0,84, ce qui est très proche de 1, traduisant à quel point cette relation s'applique aux GRBs. Pour les paramètres de la droite on a trouvé :

- 1- Avec la première méthode $a = 0.53$ et $b = -25.66$.
- 2- Avec la deuxième méthode, nous avons un degré de liberté égale à 86, et pour un $\chi_{red}^2 = 5.34$, nous avons eu : $a = 0.56$ et $b = -27.28$. P est pratiquement égal à 0.

5.5.2.2 Les résultats pour la population des GRBs avec galaxies hôtes

Pour cette population, on a $r = 0,93$ et $R^2 = 0,87$, toujours très proche de 1. Pour les paramètres de la droite, nous obtenons :

- 1- Suivant la première méthode on a eu: $a = 0.52$ et $b = -24.98$. Avec ces valeurs le Khi deux est égal à 2.04 (dans une échelle logarithmique)
- 2- La deuxième méthode donne : $\nu = 43$, $\chi^2_{red} = 6.03$, $a = 0.56$ et $b = -27.37$. P est pratiquement égal à 0.

5.5.2.3 Les résultats sur la population des GRBs sans galaxies hôtes

Pour cette population, on trouve $r = 0,87$ et $R^2 = 0,75$ ce qui est moins important, à cause du fait que nous n'avons pas suffisamment de cas avec une énergie isotropique faible dans notre population ; autrement dit, la corrélation n'est pas étendue jusqu'aux basses énergies, ce qui a affecté le coefficient de corrélation, qui reste toutefois une relation puissante. Pour les paramètres de la droite nous trouvons:

- 1- Avec la première méthode on a eu: $a = 0.54$ et $b = -25.93$. Le Khi deux pour ces deux valeurs est égal à 2.00 (toujours dans une échelle logarithmique)
- 2- La deuxième méthode donne : $\nu = 41$, $\chi^2_{red} = 4.59$, $a = 0.54$ et $b = -25.89$. P est pratiquement égal à 0.

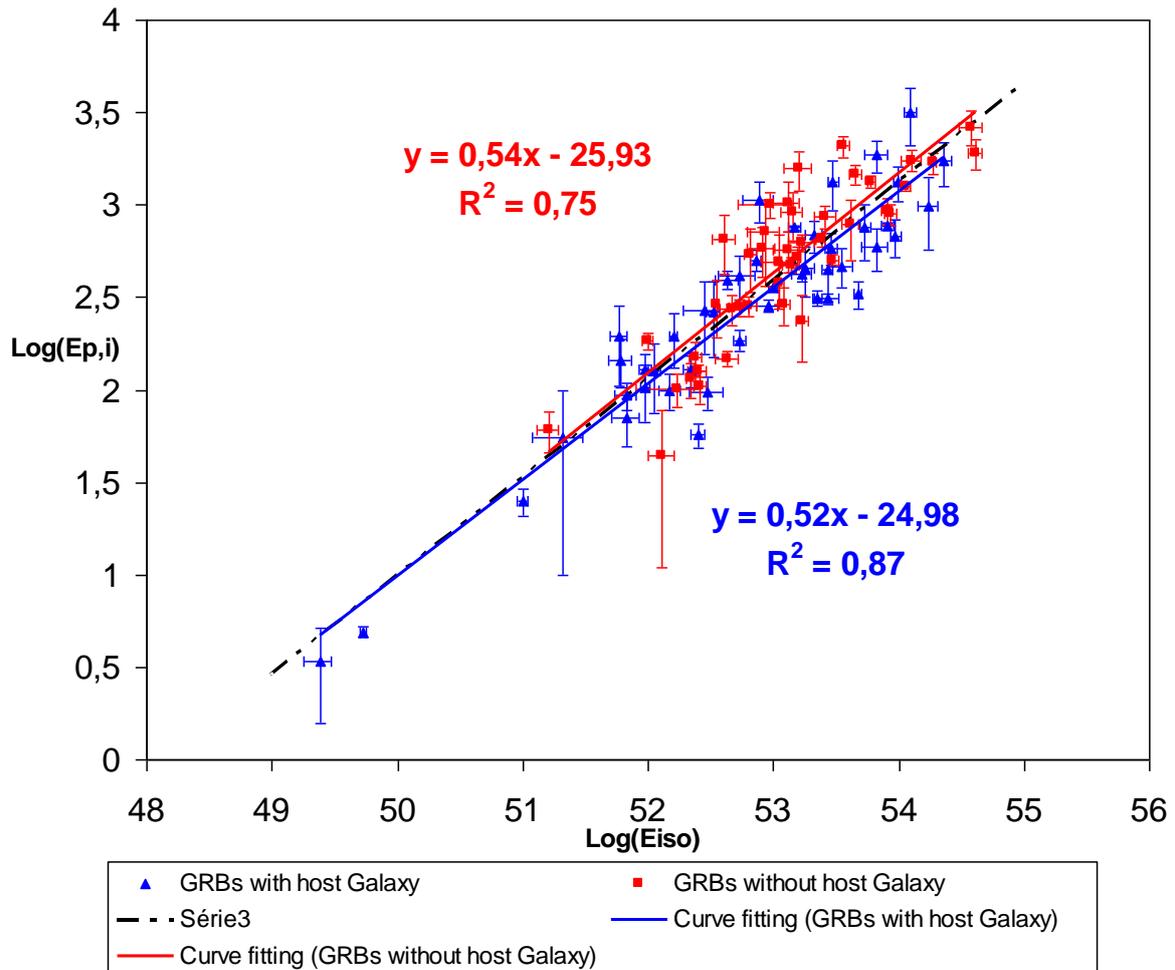


Figure 5.4. Relation d'Amati pour les deux classes de GRBs avec la première méthode. En triangles bleus les GRBs avec galaxies hôtes et en carrés rouges les GRBs sans galaxies hôtes. L'incertitude dans la mesure de l'énergie du pic $E_{p,i}$ (l'axe y) et l'énergie isotropique E_{iso} (l'axe x) est représentée pour chaque point. Les droites en bleu et en rouge représentent la relation d'Amati pour chaque groupe. La ligne discontinue représente la relation d'Amati pour la population toute entière. Il est clair que la différence entre les trois régressions est négligeable.

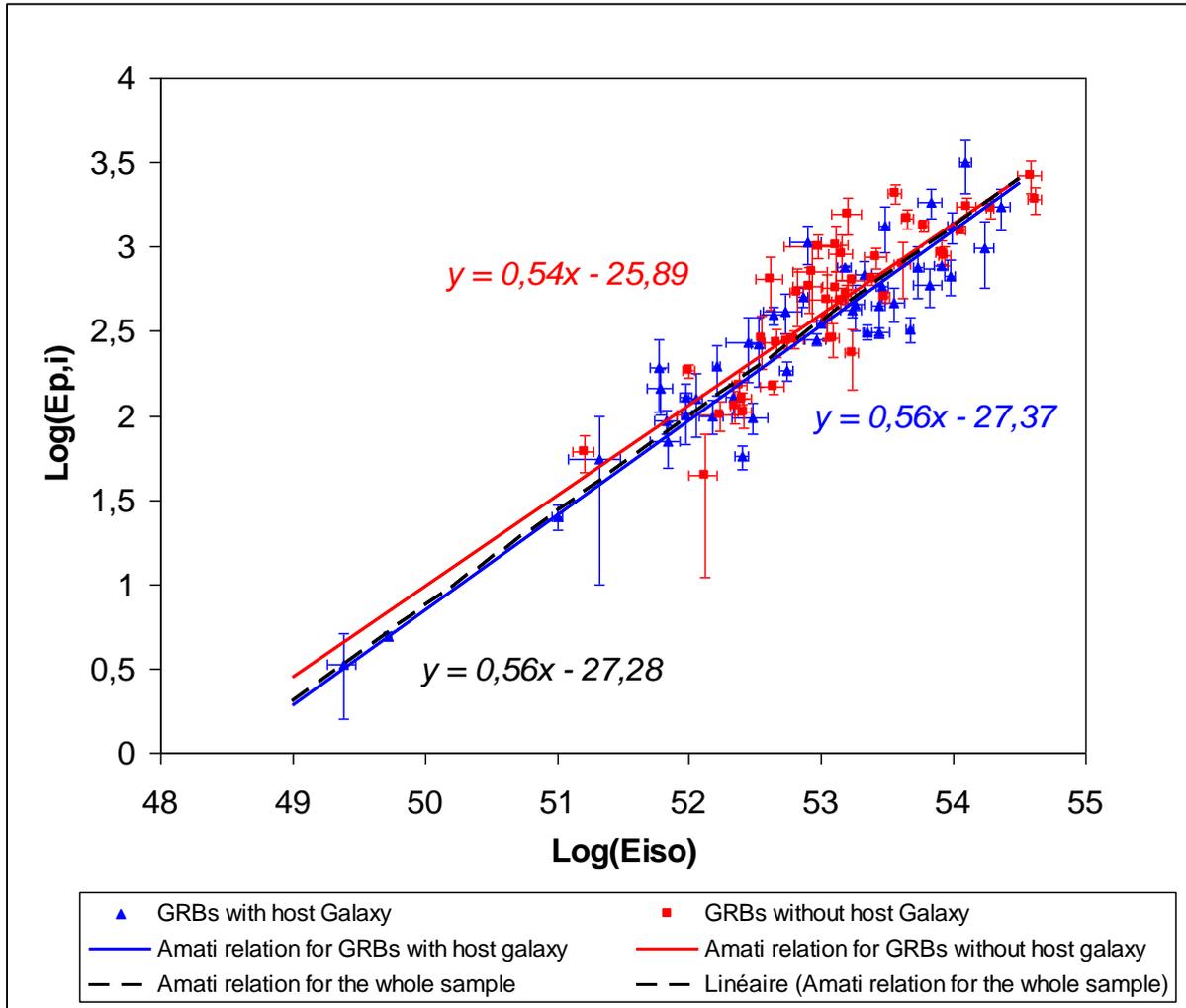


Figure 5.5. Relation d'Amati pour les deux classes de GRBs, l'ajustement a été fait avec la deuxième méthode (Khi deux). En triangles bleus les GRBs avec galaxies hôtes et en carrés rouges les GRBs sans galaxies hôtes. L'incertitude dans la mesure de l'énergie du pic $E_{p,i}$ (l'axe y) et l'énergie isotropique E_{iso} (l'axe x) est représentée pour chaque point. Les droites en bleu et en rouge représentent la relation d'Amati pour chaque groupe. La ligne discontinue représente la relation d'Amati pour la population toute entière. La différence entre les trois droites est insignifiante.

5.6 Conclusion

Nos résultats ont montré une très petite différence, négligeable, entre les fonctions de corrélation des deux groupes de GRBs. L'analyse des valeurs de R^2 pour les deux groupes

montre que les deux classes obéissent fortement à la corrélation d'Amati de manière quasi-identique.

Avec la méthode du Khi deux nous avons obtenu des valeurs de probabilités P pratiquement nulles dans tous les cas, ce qui veut dire que les erreurs mises en jeu ont été largement surestimées. Et c'est logique ! Avec les données que nous avons et qui contiennent des erreurs arrivant souvent jusqu'à $\sim 80\%$ de la valeur tout s'explique (comme dans le cas de l'événement GRB 060614). Mais on n'a pas le choix, puisque ceux sont les meilleures données sur les GRBs qu'on peut obtenir à présent, les instruments actuels ne peuvent pas fournir mieux que ça. Mais le fit est beau, et en ce qui concerne la consistance et les paramètres de corrélation obtenus, la ressemblance est éclatante. Les deux régressions linéaires sont très proche au point de se superposées l'une sur l'autre quand la statistique devient bonne (c'est-à-dire quand le nuage de points devient plus dense, à haute énergie pour $E_{iso} > 10^{53}$ erg), et nous avons du mal à distinguer l'une de l'autre comme si la séparation entre les deux sous-ensembles n'existe pas. La différence statistique entre les deux groupes est incontestablement insignifiante avec les deux méthodes, quasiment nulle et à peine visible, elle peut être expliquée par les fluctuations et les erreurs dans nos données.

Le profil logarithmique du pic d'énergie $E_{p, i}$, et de l'énergie isotropique E_{iso} , en fonction de z , lui aussi a la même forme dans les deux sous ensembles.

Ces résultats impliquent forcément que :

a) Soit que les GRBs sans galaxies hôtes connues proviennent du même type de source que celles qui ont des galaxies, c.-à-d. qu'on n'a juste pas encore détecté les galaxies hôtes pour un certain nombre de sursauts.

b) Soit que, tout simplement, le fait d'avoir ou de ne pas avoir de galaxie hôte n'a pas d'influence sur la relation d'Amati, c'est-à-dire que même si la galaxie hôte n'existe vraiment pas (du moins dans certains cas), cela n'a pas d'effet sur la relation d'Amati.

Mais globalement, puisque nous n'avons pas trouvé de différence significative entre les deux groupes (à part pour le z qui, en augmentant, rend l'observation de la galaxie très

difficile, voir impossible, ce qui constitue un effet de sélection), surtout pour la relation d'Amati où les deux groupes semblent indistinguables, nous pouvons pencher vers l'explication a). En d'autres termes nous prévoyons l'existence de galaxies hôtes pour la grande majorité, sinon tous les GRBs.

Tableau 5.2 : L'énergie isotropique équivalente, le pic d'énergie dans un repère cosmologique au repos et le redshift des 45 sursauts gamma avec des galaxies hôtes connues.

GRB	z	$E_{p,i}$ (keV)	Erreur sur $E_{p,i}$ (keV)	E_{iso} (10^{52} erg)	Erreur sur E_{iso} (10^{52} erg)	Galaxie hôte ^b	Références ^a
060218	0,0331	4,9	0,3	0,0053	0,0003	Détectée	(1)
060614	0,125	55	45	0,21	0,09	Détectée	(1)
030329	0,17	100	23	1,5	0,3	Détectée	(1)
020903	0,25	3,37	1,79	0,0024	0,0006	Détectée	(1)
011121	0,36	1060	265	7,8	2,1	Détectée	(1)
020819B	0,41	70	21	0,68	0,17	Détectée	(1)
990712	0,434	93	15	0,67	0,13	Détectée	(1)
010921	0,45	129	26	0,95	0,1	Détectée	(1)
050416A	0,65	25,1	4,2	0,1	0,01	Détectée	(1)
020405	0,69	354	10	10	0,9	Détectée	(1)
970228	0,695	195	64	1,6	0,12	Détectée	(1)
991208	0,706	313	31	22,3	1,8	Détectée	(1)
041006	0,716	98	20	3	0,9	Détectée	(1)
030528	0,78	57	9	2,5	0,3	Détectée	(1)
051022	0,8	754	258	54	5	Détectée	(1)
970508	0,835	145	43	0,61	0,13	Détectée	(1)
990705	0,842	459	139	18	3	Détectée	(1)
000210	0,846	753	26	14,9	1,6	Détectée	(1)
040924	0,859	102	35	0,95	0,09	Détectée	(1)
970828	0,958	586	117	29	3	Détectée	(1)
980703	0,966	503	64	7,2	0,7	Détectée	(1)
021211	1,01	127	52	1,12	0,13	Détectée	(1)
000911	1,06	1856	371	67	14	Détectée	(1)

980613	1,096	194	89	0,59	0,09	DéTECTÉE	(1)
000418	1,12	284	21	9,1	1,7	DéTECTÉE	(1)
061126	1,1588	1337	410	30	3	DéTECTÉE	(1)
020813	1,25	590	151	66	16	DéTECTÉE	(1)
990506	1,3	677	156	94	9	DéTECTÉE	(1)
010222	1,48	766	30	81	9	DéTECTÉE	(1)
030328	1,52	328	55	47	3	DéTECTÉE	(1)
990123	1,6	1724	466	229	37	DéTECTÉE	(1)
990510	1,619	423	42	17	3	DéTECTÉE	(1)
000926	2,07	310	20	27,1	5,9	DéTECTÉE	(1)
011211	2,14	186	24	5,4	0,6	DéTECTÉE	(1)
050922C	2,198	415	111	5,3	1,7	DéTECTÉE	(1)
021004	2,3	266	117	3,3	0,4	DéTECTÉE	(1)
050820	2,612	1325	277	97,4	7,8	DéTECTÉE	(1)
030429	2,65	128	26	2,16	0,26	DéTECTÉE	(1)
050401	2,9	467	110	35	7	DéTECTÉE	(1)
020124	3,2	448	148	27	3	DéTECTÉE	(1)
030323	3,37	270	113	2,8	0,9	DéTECTÉE	(1)
971214	3,42	685	133	21	3	DéTECTÉE	(1)
060206	4,048	394	46	4,3	0,9	DéTECTÉE	(1)
000131	4,5	987	416	172	30	DéTECTÉE	(1)
050904	6,29	3178	1094	124	13	DéTECTÉE	(1)

Tableau 5.3 : L'énergie isotropique, le pic d'énergie dans un repère cosmologique au repos et le redshift de 43 sursauts gamma pour lesquels nous n'avons pas de détection de galaxie hôte (jusqu'à Novembre 2009).

GRB	z	$E_{p,i}$ (keV)	Erreur sur $E_{p,i}$ (keV)	E_{iso} (10^{52} erg)	Erreur sur E_{iso} (10^{52} erg)	Galaxie hôte	Références ^a
081007	0,5295	61	15	0,16	0,03	?	(2)
090424	0,544	273	50	4,6	0,9	?	(2)
050525A	0,606	127	10	2,5	0,43	?	(1)
080916	0,689	184	18	1	0,1	?	(2)
090328	0,736	1028	312	13	3	?	(2)
080319B	0,937	1261	65	114	9	?	(1)
071010B	0,947	101	20	1,7	0,9	?	(1)
080411	1,03	524	70	15,6	0,9	?	(1)
080413B	1,1	150	30	2,4	0,3	?	(2)
061007	1,261	890	124	86	9	?	(1)
071117	1,331	647	226	4,1	0,9	?	(1)
050318	1,44	115	25	2,2	0,16	?	(1)
060418	1,489	572	143	13	3	?	(1)
070125	1,547	934	148	80,2	8	?	(1)
040912	1,563	44	33	1,3	0,3	?	(1)
071003	1,604	2077	286	36	4	?	(2)
090418	1,608	1567	384	16	4	?	(2)
080605	1,6398	650	55	24	2	?	(2)
080514B	1,8	627	65	17	4	?	(2)
020127	1,9	290	100	3,5	0,1	?	(2)
080319C	1,95	906	272	14,1	2,8	?	(1)
030226	1,98	289	66	12,1	1,3	?	(1)
071020	2,145	1013	160	9,5	4,3	?	(1)
060124	2,296	784	285	41	6	?	(1)

051109A	2,346	539	200	6,5	0,7	?	(1)
080413	2,433	584	180	8,1	2	?	(2)
081121	2,512	871	123	26	5	?	(2)
081118	2,58	147	14	4,3	0,9	?	(2)
080721	2,591	1741	227	126	22	?	(2)
080603B	2,69	376	100	11	1	?	(2)
081222	2,77	505	34	30	3	?	(2)
050603	2,821	1333	107	60	4	?	(1)
080607	3,036	1691	226	188	10	?	(2)
081028	3,038	234	93	17	2	?	(2)
060526	3,21	105	21	2,6	0,3	?	(1)
080810	3,35	1470	180	45	5	?	(2)
060707	3,425	279	28	5,4	1	?	(1)
060115	3,53	285	34	6,3	0,9	?	(1)
090323	3,57	1901	343	410	50	?	(2)
080916C	4,35	2646	566	380	80	?	(2)
060927	5,6	475	47	13,8	2	?	(1)
080913	6,695	710	350	8,6	2,5	?	(2)
090423	8,1	491	200	11	3	?	(2)

^a Références pour les données $E_{p,b}$, E_{iso} et z : (1) Amati et al. (2008), (2) Amati et al. (2009).

^b Prises à partir du catalogue des galaxies hôtes connues, de S. Savaglio, disponible à (<http://www.grbhost.org>).

Conclusion

Dans les dernières décennies, l'astronomie a subi une évolution fulgurante. Des objets avec un très grand redshift ($z > 6$), que personne n'aurait imaginé, sont devenus accessibles. Depuis leurs découvertes, et même avant la mise en évidence de leurs origines cosmologiques, les GRBs promettaient de devenir des outils efficaces pour sonder l'évolution des galaxies et de l'Univers. De nos jours, l'étude des GRBs cosmologiques et de leurs galaxies hôtes commence à donner des renseignements intéressants sur l'univers primordial. C'est dans ce contexte d'évolution rapide de la compréhension des sursauts gamma à travers les différentes détections (surtout celle de Swift) que nous avons exploré cet aspect des galaxies hôtes des sursauts gamma.

Mais les galaxies hôtes, incontournables pour étudier les GRBs et leurs milieux, n'ont pas été détectées dans la majorité des cas ; parfois même des télescopes de 10 mètres n'avaient pas signalé la présence du moindre objet extragalactique abritant le sursaut gamma.

Le but de notre mémoire était simple : trouver une explication à cette pénurie de galaxies hôtes. Il se pourrait que la galaxie existe, dissimulée, tout comme il se pourrait qu'elle n'existe pas du tout. Notre raisonnement a été le suivant : « **Les GRBs pour lesquels on n'a pas pu détecter la galaxie pourraient avoir quelque chose de différent de ceux qui ont fait l'objet d'une détection de leur galaxie** ». Et comme les galaxies sont absentes, la seule option restant était de comparer les GRBs avec galaxies hôtes et les GRBs sans galaxies hôtes.

Ainsi, au chapitre IV nous avons construit une population rassemblant tous les GRBs détectés par Swift (jusqu'au 15 juin 2010). Nous avons comparé les 115 événements sans galaxies hôtes avec les 62 événements avec galaxies hôtes. Après avoir comparé statistiquement les données des deux sous-populations (redshift, fluence, durée, column density et pic d'énergie), et après avoir appliqué le test de Kolmogorov-Smirnov, nous avons pu prouver qu'à l'exception de quelques effets de sélections, **les deux sous-populations ne présentent pas de différence significative , ils semblent former une même population.**

Nous avons consolidé ce résultat dans le Chapitre V avec une seconde comparaison, sur un autre aspect et d'autres données. Avec l'énergie isotropique, et le pic d'énergie dans un repère au repos, ainsi que le redshift pour 88 événements, nous avons cherché une quelconque différence dans l'application de la relation d'Amati, mais comme dans le chapitre précédent, **les données montrent que les GRBs avec galaxie hôte n'ont rien de différent des GRBs sans galaxie hôte.**

Donc, en résumé, **nous n'avons pas trouvé de phénomène physique sous-jacent responsable du manque de galaxies hôtes**, il est très probable que d'autres effets de sélections sont la cause de la pénurie actuelle en galaxies hôtes. Ainsi, notre problème s'expliquerait par une des deux hypothèses suivantes:

- Soit les données considérées (redshift, énergie isotropique, pic d'énergie, fluence, durée et NH) sont indépendantes de la présence de la galaxie.
- **Soit la galaxie existe, et dans ce cas notre incapacité à la détecter est due à des effets autres que ceux pris en considération jusqu'ici (nous avons mentionné quelques possibilités dans les chapitres précédents).**

Et puisque il est invraisemblable que 6 types de données fondamentales ne soient pas liés à la galaxie qui abrite le GRB, nous pouvons éliminer la première hypothèse. En d'autres termes, notre étude conclut à la prédiction de l'existence de galaxies hôtes, au moins pour notre population (les 115 événements de la population de Swift et les 43 de la seconde). Quant à ce qui nous empêche de les voir, et il faut rappeler que dans de nombreux cas, nous n'avons tout simplement pas assez cherché l'explication la plus probable est sûrement liée à la luminosité de la galaxie ou à la quantité de poussière cette direction, car les galaxies hôtes (naines et irrégulières) sont caractérisées par une très faible luminosité surtout à grand redshift, ce qui rend leur observation difficile.

Une conséquence directe de cette conclusion, est que **la majeure partie des objets extragalactiques nous échappe**, y compris les galaxies hôtes. Dans une recherche récente, publiée dans *Nature*, Hayes et al. (2010) montrent que **90% des galaxies de formatrices d'étoiles (galaxies avec un grand taux de formation d'étoiles) ne sont pas suffisamment**

rayonnantes (en se basant sur la luminosité de $Ly\alpha$) pour être détectées. Cette grande découverte représente une autre consolidation de nos constatations.

Depuis plus de quarante ans, les GRBs sont la cible de plusieurs milliers de cerveaux déterminés, à travers la planète, et un nombre considérable d'instruments « High Tech » dans l'espace (en orbite) et sur terre (observatoires). Malgré les avancées importantes effectuées récemment, les GRBs restent toujours un mystère en attente de chercheurs intelligents et motivés...

Publication durant le magister

Does the Amati relation for GRBs depend on the host galaxies?

Auteur: H. Hamidani¹, N. Guessoum², W. J. Azzam³

¹Physics Department, Mentouri University, Constantine, Algeria

²Physics Department, American University of Sharjah, United Arab Emirates

³Department of Physics, College of Science, University of Bahrain, Kingdom of Bahrain

One important relation that has been proposed for long Gamma Ray Bursts (GRBs) is the correlation between the photon energy $E_{p,i}$, at which the νF_ν spectrum (in the cosmological rest-frame) of the prompt emission peaks, and E_{iso} , the total radiated energy computed by assuming isotropic emission – the Amati relation. In attempting to characterize GRBs and their host galaxies, we have thought it relevant to investigate the extent to which the Amati relation holds for GRBs regardless of their having a (detected) host galaxy and thus independently of the galactic physical medium in which the burst occurs. For this purpose we undertake a comparison between the Amati relation's parameters for GRBs with host galaxies and for those without known host galaxies. We consider two sample populations of GRBs for which values of $E_{p,i}$ and E_{iso} could be obtained (from the literature and/or calculations), data could be plotted, and relation parameters could be inferred. Our results show that differences in the characterizing parameters of the relation are statistically insignificant, allowing us to conclude that the Amati relation is independent of the GRBs' host galaxies and their physical conditions.

Keywords: gamma-ray bursts, host galaxies.

- Présenté sous forme de poster au COSPAR, congrès qui a eu lieu à Brême en Allemagne, entre le 18 et le 25 juillet 2010.

Does the Amati relation for GRBs depend on the host galaxies?

Auteur: H. Hamidani^a and N. Guessoum^b

^a*Physics Department, Mentouri University, Constantine, Algeria*

^b*Physics Department, American University of Sharjah, United Arab Emirates*

One important relation that has been proposed for long Gamma Ray Bursts (GRBs) is the correlation between the photon energy $E_{p,i}$, at which the νF_ν spectrum (in the cosmological rest-frame) of the prompt emission peaks, and E_{iso} , the total radiated energy computed by assuming isotropic emission – the Amati relation [1]. In attempting to characterize GRBs and their host galaxies [2, 3, 4], we have thought it relevant to investigate the extent to which the Amati relation holds for GRBs regardless of their having a (detected) host galaxy and thus independently of the galactic physical medium in which the burst occurs. For this purpose we undertake a comparison between the Amati relation's parameters for GRBs with host galaxies and for those without known host galaxies. We consider two sample populations of GRBs for which values of $E_{p,i}$ and E_{iso} could be obtained (from the literature and/or calculations), data could be plotted, and relation parameters could be inferred. Our results show that differences in the characterizing parameters of the relation are statistically insignificant, allowing us to conclude that the Amati relation is independent of the GRBs' host galaxies and their physical conditions.

Keywords: gamma-ray bursts, host galaxies.

- Publié à l'AIP (American Institute of Physics)

Références

- Abraham, R. G. et al. (2004), *AJ*, 127, 2455
- Amati L., et al., (2009) arXiv:0907.0384v2 [astro-ph.HE], page 3
- Amati L., et al., (2002), *A&A*, 390, 81
- Amati, L., et al., (2008), *MNRAS*, 391, 577
- Amati, L., et al., Spectrum-Energy Correlations and Swift GRBs, (2008b), page 4
- Antonnelly, L. A. et al., (1997), *IAU Circ.* 6792
- Atteia, J-L, et al., (2003), *A&A*, 407, L1
- Barish B., et al., *Neutrinos and Beyond: New Windows in Nature*, National Academic Press, Washington, D.C., (2003), p. 20.
- Barraud C., Etude de l'émission prompt des sursauts gamma : Expérience HETE-2, PhD thesis, University of Paris VII (2004), 12-24
- Barthelmy S. D. et al., (2005), *Nature*, 438, 994
- Berger E. et al., (2005), *Nature*, 438, 988
- Berger, E., in Holt, et al., (2006). *Gamma-Ray Bursts in the Swift Era*. *Am. Inst. Phys.*, page 33.
- Bloom J. S. et al., (2006), *ApJ*, 638, 354
- Bogomazov, A. I. et al., (2008), arXiv:0807.0539v1, 1-4
- Campisi M. A., *Gamma-Ray Bursts and their Host Galaxies from Cosmological Simulation*, PhD thesis, Ludwig Maximilian University of Munich (2009), 41-57
- Conelice, C. J., et al., (2005). *Gamma-Ray Burst-Selected High-Redshift Galaxies: Comparison to Field Galaxy Populations to $z \sim 3$* . *ApJ*, 633:29-40.
- Costa E., et al., 1997, *Nature*, 387, 783
- Erb, D. K., et al., (2006), *ApJ*, 647, 128
- Fruchter, A. S., et al., (2006). *Long Gamma-ray bursts and core-collapse supernovae have different environments*. *Nature*, 441:463-468.

- Fynbo, J. P. U., et al., (1998), ApJ, 542, L89
- Fynbo, J. P. U., et al., (2007), arXivastro-ph0703458v2 1-9
- Fynbo, J. P. U., et al., (2006). No supernovae associated with two long-duration Gamma-ray bursts. Nature, 444:1047-1049.
- Galama, T. J., et al., (1998). An unusual supernova in the error box of the Gamma-ray burst of 25 April 1998. Nature, 395:670-672.
- Gehrels, N., et al., (2005). A short Gamma-ray burst apparently associated with an elliptical galaxy at redshift $z = 0.225$. Nature, 437:851-854.
- Giblin T. W., A Temporal and Spectral Analysis of Gamma-Ray Bursts Observed with BATSE, (2000), PhD thesis, University Alabama in Huntsville, p. 1-41
- Hurley K., A Gamma-Ray Burst Bibliography, 1973-2001, in preprint (astro-ph/0201301) p. 1-2
- Klebesadel R., et al., Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin, ApJ 182 (1973) L85-L88.
- Klose, S. et al. (1997), IAUC Circ. 6756
- Kouveliotou, C., et al. (1993), ApJ, 413, L101
- Kouveliotou, C., et al. (1993b), A&AS, 97, 55
- Kulkarni S., et al., (1998), Nature, 393, 35
- Lapi, A. et al., (2008), arXiv0802.0787v2, 1-11
- Levan et al., (2003), GCN1818, 1-2
- Li, A. et al., 2008, arXiv0808.4115v1, 1-4
- Li, L.-X. et al., (2006). Correlation between the peak spectral energy of gamma-ray bursts and the peak luminosity of the underlying supernovae: implication for the nature of the gamma-ray burst-supernova connection. MNRAS, 372:1357-1365.
- Li, Y. et al., (2007), arXiv0712.2622v1, 1-7
- MacFadyen, A. I. et al., (1999). Collapsars: Gamma-Ray Bursts and Explosions in "Failed Supernovae". ApJ, 524:262-289.
- MacFadyen, A. I., et al., (2001). Supernovae, Jets, and Collapsars. ApJ, 550:410-425.
- Mészáros P., et al., Gamma-Ray Bursts, (2006) IOP (arXiv:astro-ph/0605208 v5)

- Metzger M. R., et al., (1997), *Nature*, 387, 878
- Mirabal N. R., *On Gamma-Ray Burst Progenitors and Environments*, PhD thesis, University of Columbia, (2004)
- Noyes D., *A Search for Short Duration Very High Energy Emission from Gamma-Ray Bursts*, PhD thesis, University of Maryland (2005). 1-21
- Ovaldsen J.-E., et al. (2007), *ApJ*, 662, 294 (arXivastro-ph0703388v1), 1-17
- Paciesas W. S., et al., *ApJ. Supplement Series*, (1999), 122, 2, 465-495
- Paciesas W. S., et al., (1999b), *ApJS*, 122, 465
- Piran T. et al., *The Physics of Gamma-Ray Bursts*, (2005), Vol. 76
- Price, P. A., et al., (2007). *Properties of a Gamma-Ray Burst Host Galaxy at $z \sim 5$* . *ApJL*, 663:L57-L60.
- Prochaska, J. X., et al., (2004). *The Host Galaxy of GRB 031203: Implications of Its Low Metallicity, Low Redshift, and Starburst Nature*. *ApJ*, 611:200-207.
- Prochaska, J. X., et al., (2007), arXivastro-ph0611092v2, 1-2
- Rhoads, J. E., et al., (2008), arXiv0807.2642v1, 1-5
- Sato et al., (2003), *GCN Circ.* 2080
- Savaglio, S. et al., (2006). *GRBs as cosmological probes and cosmic chemical evolution*. *New Journal of Physics*, 8:195-+.
- Savaglio, S., et al., (2003). *Heavy-Element Abundances and Dust Depletions in the Host Galaxies of Three Gamma-Ray Bursts*. *ApJ*, 585:638-646.
- Savaglio, S., et al., *The Galaxy Population Hosting Gamma-Ray Bursts*. *ArXiv e-prints*, 803.
- Schonfelder V., et al., *The Universe in Gamma Rays*, Springer, New York, (2001).
- Shánchez M. M. G., *The High Energy Emission as Observed by EGRET*, PhD thesis, University of WISCONSIN – MADISON, (2005), P 1-28
- Stamatikos M., *Probing for correlated neutrino emission from Gamma-Ray Bursts with Antarctic Cherenkov telescopes: A theoretical modelling and analytical search paradigm in the context of the fireball phenomenology*, PhD thesis, New York State University at Buffalo, (2005), 1-28
- Stanek, K. Z., et al., (2006). *Protecting Life in the Milky Way: Metals Keep the GRBs Away*. *Acta Astronomica*, 56:333-345.
- Starling, R. et al., (2007), arXivastro-ph0701039v, 1-3

-
- Tanvir, N. R. et al., (2007), arXiv0709.0861, 1-8
 - Taylor, G. b. et al., 2003, GCN Circ. 2129
 - Wainwright, C., et al., (2007). A Morphological Study of Gamma-Ray Burst Host Galaxies. *ApJ*, 657:367-377.
 - Wang, X. Y. et al. (2000), *MNRAS*.317..170W
 - Wolf, C. et al., (2007). The metallicity dependence of the long-duration gamma-ray burst rate from host galaxy luminosities. *MNRAS*, 375:1049-1058.
 - Woosley, S. E. et al., (2006). The Progenitor Stars of Gamma-Ray Bursts. *ApJ*, 637:914-921.
 - Yan Y., Scaling in Long Duration Gamma Ray Burst, PhD thesis, University of Mississippi State, (2000), 1-34
 - Zeh, A., et al., (2003), GCN Circ. 2049
 - Zhang B., Gamma Ray Bursts in Swift Era, *Chin. J. Astron. Astrophys.* Vol. 7 (2007), No. 1, 1-50
 - Zhang, B., et al., (2003), *ApJ*, 595, 950