

Rapport de prospective 2002-2010

du Groupement de Recherche

“Phénomènes Cosmiques de Haute Énergie”

18 octobre 2002

Ont participé à la rédaction des pages qui suivent : Vincent Bertin¹, Murat Boratav¹, Fabien Cavalier¹, Suzy Collin², Bernard Degrange¹, Jean-Marie Hameury², Luciano Moscoso⁴, Jacques Paul⁴, Guy Pelletier², Patrick Peter³ et David Smith¹. Les auteurs remercient également Didier Barret², Luc Blanchet³, Étienne Parizot¹, Pierre Salati³ et Gilbert Vedrenne² pour leur aide dans ce travail.

1 CNRS/IN2P3

2 CNRS/INSU

3 CNRS/SPM

4 CEA/DAPNIA

1 Introduction

L'Univers est parcouru par des particules de haute énergie dont le spectre, manifestement non thermique, s'étend jusqu'à des énergies de l'ordre de 10 Joules. Les processus d'accélération ou de production de ces rayons cosmiques et les objets astrophysiques qui sont le siège de ces phénomènes de haute énergie représentent des thèmes importants de recherche à l'interface de l'astrophysique et de la physique des particules. La difficulté principale de ces études vient de ce que les rayons cosmiques chargés, déviés par les champs magnétiques irréguliers de la Galaxie, ne nous fournissent aucune information sur leur direction d'origine, sauf peut-être aux plus hautes énergies où les flux sont malheureusement extrêmement faibles. Cependant, ces particules peuvent signer leur présence, tant à leur source qu'au cours de leur propagation, par émission de photons non thermiques sur une large gamme de longueurs d'onde, des ondes radio jusqu'aux rayons γ de très haute énergie. Les processus d'émission peuvent être électromagnétiques (rayonnement synchrotron, effet Compton inverse) ou hadroniques (production de mésons π^0 par interactions nucléaires). En produisant également des mésons chargés, ces dernières interactions sont indirectement sources de neutrinos, autres «messagers» neutres et stables pouvant traverser facilement des régions opaques aux photons et apportant ainsi des informations complémentaires. Souvent façonnés par les champs de gravitation les plus intenses, bien des sites de phénomènes cosmiques de haute énergie devraient enfin se manifester comme sources d'ondes gravitationnelles.

D'une manière générale, ces sites constituent des laboratoires «de l'extrême» intéressant la physique fondamentale car ils fournissent des conditions irréalisables sur Terre : gravité au voisinage de trous noirs, champs magnétiques des pulsars et magnétars, densité des étoiles à neutrons etc. L'Univers primordial peut aussi être indirectement à l'origine de particules de haute énergie observées aujourd'hui ; diverses théories de physique des particules au-delà du modèle standard font de telles prédictions. Ainsi, dans l'hypothèse où la matière noire est constituée de particules supersymétriques stables, les neutralinos (qui sont leurs propres antiparticules), ces derniers peuvent s'annihiler dans des régions où ils se sont concentrés par gravité, produisant ainsi des photons γ , des neutrinos et des paires particule-antiparticule. De même, d'éventuels défauts topologiques (monopôles magnétiques, cordes cosmiques etc.) produits dans l'Univers primordial peuvent être à l'origine de particules d'énergie ultra-haute ($> 10^{19}$ eV). L'étude des phénomènes cosmiques de haute énergie peut donc apporter des contributions substantielles à la cosmologie et à la physique des particules.

La décennie 1990-2000 a vu à la fois une accumulation de découvertes importantes dans le domaine qui nous intéresse et la naissance de projets de nouvelles astronomies. Les résultats sont surtout venus des missions spatiales dans le domaine des rayons X (satellites ROSAT, ASCA, Beppo-SAX, Rossi-XTE et récemment Chandra et XMM-Newton) et dans celui des rayons gamma de 100 keV à 20 GeV (satellites GRANAT/SIGMA et Compton-GRO), tandis que se développaient les techniques d'observation des rayons gamma d'énergie supérieure à 50 GeV à partir du sol, mettant en évidence des sources émettant jusqu'à 20 TeV au moins (figure 1). Ces observations ont particulièrement amélioré notre compréhension des processus d'accrétion au voisinage d'objets compacts et notamment de trous noirs, phénomènes souvent associés à l'éjection de jets de plasma à des vitesses relativistes ; ceux-ci se manifestent tant pour des objets de masse stellaire

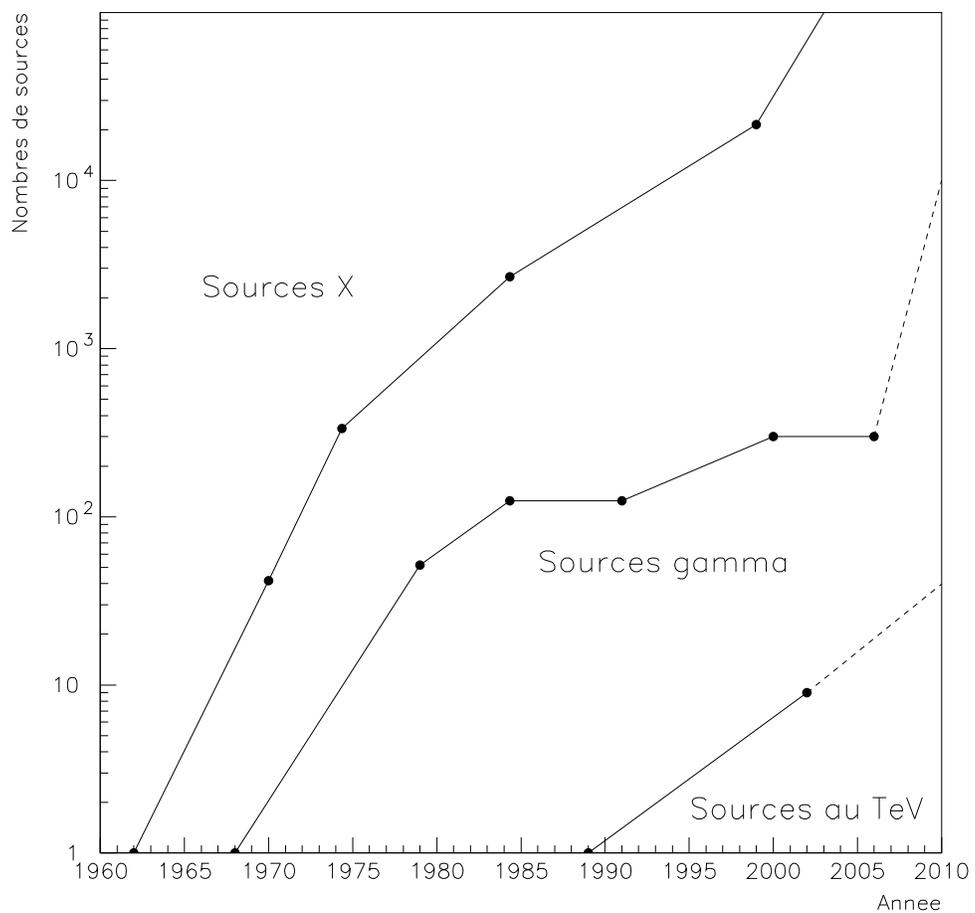


FIG. 1 – *Évolution récente des astronomies X et gamma.*

(microquasars galactiques) que pour des noyaux actifs de galaxie où le trou noir central peut représenter quelques $10^8 M_{\odot}$. L'astronomie gamma s'est en particulier ouverte au domaine extra-galactique avec la découverte de près de 60 noyaux actifs de galaxie dont les jets sont relativement proches de la ligne de visée, les «blazars»; certains de ces blazars émettent des γ dans le domaine des très hautes énergies ($> \text{TeV}$). Parallèlement, d'importants progrès ont été réalisés dans la connaissance des sursauts gamma; en localisant certains d'entre eux à la minute d'arc près, le satellite Beppo-SAX a permis aux grands télescopes au sol d'en trouver des contreparties optiques et d'identifier dans certains cas la galaxie-hôte, signant clairement l'origine extragalactique de ces phénomènes. Les observations simultanées dans plusieurs régions du spectre (campagnes «multi-longueurs d'onde») se sont avérées essentielles pour comprendre des objets rapidement variables comme les microquasars, les blazars ou les sursauts gamma. De nouvelles questions sont apparues comme la nature de près de 170 sources du catalogue d'EGRET (l'instrument à haute énergie à bord du satellite Compton-GRO) qui n'ont pu être identifiées à aucun objet connu dans d'autres longueurs d'onde. La dernière décennie a été aussi riche en projets de nouvelles astronomies, actuellement en cours de développement ou sur le point d'aboutir: c'est le cas des détecteurs de neutrinos cosmiques de très haute énergie (AMANDA, ANTARES, NESTOR), du projet d'observatoire «Pierre Auger» sur les rayons cosmiques d'énergies extrêmes ($\geq 10^{19}$ eV) et enfin des interféromètres LIGO et Virgo pour la détection d'ondes gravitationnelles.

Pendant la décennie 1990-2000, l'investissement des équipes françaises dans ce domaine s'est significativement accru :

- Dans le domaine spatial, après le succès du satellite SIGMA (γ de basse énergie), les groupes français ont concentré leurs efforts sur deux missions de l'Agence Spatiale Européenne (ASE): le satellite XMM-Newton (rayons X de 0,1 à 15 keV) lancé en Décembre 1999 et le satellite INTEGRAL (rayons gamma de 15 keV à 10 MeV) qui vient d'être lancé en Octobre 2002. Le domaine gamma de haute énergie (100 MeV-100 GeV) avec le projet de satellite GLAST de la NASA, est aussi l'objet d'un engagement fort des équipes françaises.
- Dans le domaine émergent de l'astronomie gamma au sol, le télescope à effet Tcherenkov atmosphérique CAT, utilisant la technique d'imagerie et installé sur le site de la centrale solaire «Thémis» dans les Pyrénées, a détecté la nébuleuse du Crabe et 4 blazars et mesuré leurs spectres de 300 GeV à 20 TeV. Sur le même site, le détecteur CELESTE a le premier abordé la gamme d'énergie de 50 GeV à 200 GeV restée inexplorée jusqu'à ces dernières années. Profitant de l'expérience acquise avec ces deux détecteurs construits et exploités par leurs seuls instituts, les équipes françaises dans ce domaine se sont investies dans le projet essentiellement franco-allemand HESS comportant 4 grands télescopes à effet Tcherenkov atmosphérique en Namibie en vue de l'étude du ciel gamma austral avec une sensibilité accrue.
- Le projet ANTARES de détecteur de neutrinos de très haute énergie en Méditerranée au large de Toulon, autre initiative française, a pris une dimension européenne après sa phase de développement et est actuellement en construction. La surface efficace de détection, de l'ordre de $0,1 \text{ km}^2$, sera comparable à celle de l'expérience AMANDA au Pôle Sud, observant l'hémisphère opposé.

- Dans l'étude des rayons cosmiques chargés, la France participe à deux projets internationaux : l'un spatial, l'expérience AMS sur la station spatiale internationale (ISS) dans le domaine du GeV au TeV, l'accent étant mis sur l'identification des particules et particulièrement des antiprotons et des antinoyaux ; l'autre au sol, l'observatoire «Pierre Auger» en Argentine, destiné à accroître considérablement la statistique de rayons cosmiques d'énergies extrêmes en déployant les détecteurs sur une zone d'environ 3000 km² et en associant deux techniques complémentaires.
- Enfin, c'est une collaboration franco-italienne qui achève actuellement la construction de l'interféromètre Virgo à Cascina (Italie) pour la détection d'ondes gravitationnelles.

Le développement rapide de ces activités expérimentales a été accompagné par d'importants efforts sur le plan théorique tant pour la préparation des projets que pour l'analyse des nouvelles données, en particulier celles des observations multi-longueurs d'onde. Le domaine a pris très vite une extension dépassant les frontières culturelles et administratives des communautés impliquées. C'est pourquoi il est apparu indispensable de mettre sur pied au début de l'année 2000 un groupement de recherche sur les phénomènes cosmiques de haute énergie (PCHE) regroupant des physiciens et des astrophysiciens de trois départements du CNRS (IN2P3, INSU, SPM) et de deux services du DAPNIA du CEA (SPP et SAp). Au moment où paraît ce document, de nombreux projets sont engagés ou sur le point d'aboutir avec des perspectives de découvertes significatives à relativement court terme. Dans ce contexte, nous commencerons par expliciter les principales questions ouvertes en astrophysique des hautes énergies et leurs éventuelles implications dans d'autres domaines (cosmologie, physique des particules etc.). Puis, nous analyserons les potentialités des projets en cours de réalisation et tenterons de tracer l'évolution à plus long terme des moyens mis en œuvre pour mieux comprendre les sources cosmiques de particules de haute énergie. On fera enfin le point sur la situation actuelle des groupes français dans ce domaine en terminant par les recommandations du conseil scientifique du GdR. Le lecteur trouvera en appendice la liste des expériences, projets et instruments cités dans ce rapport.

2 Les défis scientifiques de la prochaine décennie

Malgré les progrès dont il a été fait mention ci-dessus, la compréhension des objets et mécanismes produisant des particules de haute énergie dans l'Univers reste fragmentaire. Cette section passe en revue les principales questions auxquelles les nouveaux projets tenteront d'apporter des réponses.

2.1 Rayons cosmiques et mécanismes d'accélération

Le spectre en énergie des rayons cosmiques à leur arrivée sur Terre, assez bien représenté par des lois de puissance ($E^{-\gamma}$) dans de larges domaines, présente deux modifications de l'indice spectral γ , l'une vers 3×10^{15} eV (le «genou»), l'autre vers 4×10^{19} eV (la «cheville»), dont les origines restent controversées (figure 2). La composition de ce

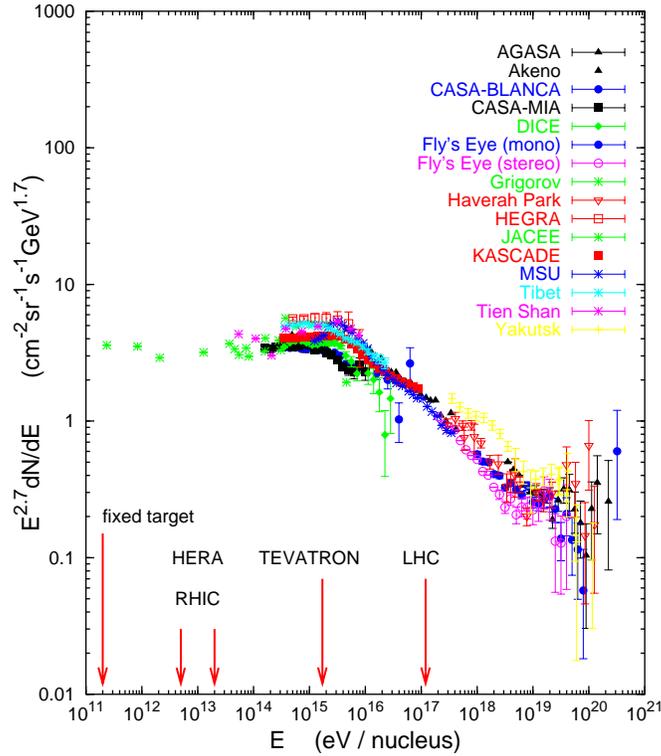


FIG. 2 – Intensité des rayons cosmiques primaires multipliée par $E^{2.7}$ en fonction de l'énergie E .

rayonnement en type de noyaux ou de particules au-dessus de 100 TeV n'est connue qu'en moyenne et très indirectement.

1. Où et comment sont accélérés les rayons cosmiques galactiques? Rôle des pulsars, des restes de supernovæ? Nature des sources γ non identifiées? Jusqu'à quelles énergies les rayons cosmiques galactiques sont-ils dominants?

Le processus d'accélération de Fermi dans les chocs s'est imposé comme mécanisme de production des rayons cosmiques, sauf peut-être aux énergies les plus élevées. Le bilan énergétique des supernovæ et leur taux d'occurrence permettent tout à fait de rendre compte du flux de rayons cosmiques mesuré, pourvu qu'une proportion de 10% de l'énergie résiduelle d'une supernova soit convertie sous forme de rayons cosmiques. Le champ magnétique galactique peut assurer la diffusion de la quantité de mouvement des rayons cosmiques, indispensable au fonctionnement des processus de Fermi, jusqu'à 10^{17} eV. Cependant, c'est au début de la phase d'expansion de Sedov que l'accélération des rayons cosmiques est le plus efficace et cette limitation temporelle et spatiale induit une coupure sur le spectre de protons à 10^{14} eV, donc en-dessous du genou du spectre. Les superbulles, qui associent un grand nombre de supernovæ et s'étendent sur toute l'épaisseur de la Galaxie, offrent une solution intéressante, en cours d'étude, pour monter plus haut en énergie.

Depuis longtemps, l'espoir de mettre en évidence l'accélération des protons dans les restes de supernovæ repose sur l'émission gamma résultant de la désintégration des mésons π^0 produits par les collisions proton-proton. Les détecteurs de gamma de très haute énergie (télescopes à effet Tcherenkov atmosphérique) n'ont toujours pas décelé cette si-

gnature. Sans doute, l'espoir de cette détection reposait sur des estimations optimistes de l'efficacité de l'accélération de Fermi et le spectre gamma de la plupart des restes de supernovæ étudiés semble dominé par l'effet Compton inverse des électrons ; cependant, les instruments de nouvelle génération, tant dans l'espace (satellite GLAST, voir 3.2.1) qu'au sol (télescopes Tcherenkov HESS, VERITAS, CANGAROO III, voir 3.1.1) devraient avoir la sensibilité nécessaire pour déceler la contribution des π^0 dans certains restes de supernovæ.

La physique particulière des pulsars et de leur nébuleuse laisse espérer des surprises dans le domaine de la production de particules de haute énergie. Elle donne lieu à une riche astronomie gamma, qui permet en particulier de tester les modèles de choc relativiste. La physique du vent ultra-relativiste de paires électron-positon, éventuellement chargé de baryons, demeure notablement ouverte, depuis sa formation dans la magnétosphère du pulsar jusqu'à sa dissipation dans la nébuleuse.

Quant aux sources gamma non identifiées de notre Galaxie, elles demeurent des sources possibles de rayons cosmiques et de neutrinos.

2. Quelle est la contribution aux rayons cosmiques des sources extragalactiques (noyaux actifs de galaxie (ou NAG), sursauts γ) ? Quelle est l'origine des rayons cosmiques d'énergies extrêmes ?

L'expérience KASCADE a récemment montré les coupures successives des spectres de protons, puis de noyaux d'hélium, enfin de noyaux de fer, dans la région du genou du spectre de rayons cosmiques. Ces coupures, décalées du facteur Z, signent la fin du confinement de ces particules par le champ magnétique de la Voie Lactée. De ce fait, les rayons cosmiques au-delà de 10^{18} eV ne proviennent probablement ni des supernovæ, ni des superbulles (associations de supernovæ en grand nombre) de notre Galaxie. Le spectre de rayons cosmiques plus dur au-delà de la cheville, mesuré par l'expérience japonaise AGASA suggère une nouvelle population.

Il est raisonnable de penser que, dans ce domaine, le spectre est dominé par une contribution extragalactique que peuvent fournir les noyaux actifs de galaxie (NAG) et les sursauts gamma. Ces rayons cosmiques d'ultra-haute énergie (UHE) se propagent librement dans le milieu extragalactique tant que leur énergie ne dépasse pas le seuil au-delà duquel les protons produisent des pions par photo-production sur le fond de rayonnement cosmologique. Au-delà de ce seuil de 3×10^{19} eV, les protons ne peuvent provenir que de distances de plus en plus courtes à mesure que l'énergie est plus élevée, au mieux 100 Mpc et seulement une dizaine de mégaparsecs à 10 fois l'énergie de seuil. Si la répartition des sources est uniforme dans l'Univers, on devrait donc observer une coupure à ces énergies, appelée coupure de Greisen-Zatsepin-Kuzmin ou «GZK». Actuellement, la présence d'événements de plus de 10^{20} eV (événements «super-GZK») a été revendiquée par l'expérience AGASA (figure 3), mais la situation reste controversée, l'expérience américaine «Hi-Res Fly's Eye» ayant révisé à la baisse ses mesures d'énergie. Par ailleurs, le champ magnétique galactique ne dévient que très peu des particules aussi énergétiques, il est important d'étudier la distribution de leurs directions d'arrivée. La statistique actuelle est trop faible pour conclure : quelques événements d'AGASA forment des doublets ou triplets de directions compatibles, mais aucune source possible n'a été identifiée dans leur direction d'arrivée.

Il ne serait pas facile de rendre compte d'éventuels événements «super-GZK» à partir

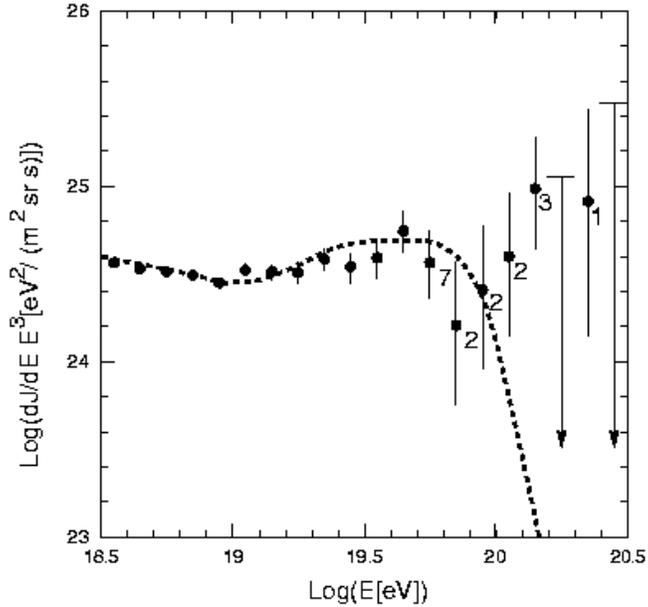


FIG. 3 – *Spectre des rayons cosmiques au-dessus de 10^{18} eV mesuré dans l'expérience AGASA (Japon). Le spectre différentiel est ici multiplié par le cube de l'énergie ; la rupture de pente à 10^{19} eV est la «cheville». La courbe en pointillés donne le spectre attendu de sources réparties uniformément dans l'Univers, compte-tenu des erreurs sur la mesure de l'énergie ; cette hypothèse implique la coupure GZK.*

de sources extragalactiques. Les sursauts gamma, grâce au facteur de Lorentz important de leur vent relativiste (estimé entre 100 et 1000), peuvent fournir de tels rayons cosmiques sans qu'il soit nécessaire de forcer les paramètres, mais il restera à vérifier que le taux d'occurrence des sursauts gamma dans notre univers local permet de rendre compte du nombre observé des événements «super-GZK». D'autres explications pour la présence d'événements «super-GZK» remettent en cause la physique standard ; on a pu ainsi envisager la violation de l'invariance de Lorentz comme explication ; cette proposition s'appuie sur des théories de gravité quantique qui introduisent des effets de dispersion de la vitesse de la lumière. Les effets de scintillation associés à cette dispersion ont d'ailleurs été recherchés dans l'émission gamma des blazars. Dans cette hypothèse, il a été avancé que les blazars pouvaient alors être les sources de ces rayons cosmiques UHE. L'idée selon laquelle la radiogalaxie la plus proche, Centaurus A, serait à l'origine de ces événements a été explorée, sans réponse encore convaincante.

NAG et sursauts gamma sont capables de produire des rayons cosmiques UHE à deux conditions : d'une part, s'ils sont le siège de chocs ou perturbations magnétiques assurant une accélération de Fermi en régime relativiste ; d'autre part, si le champ magnétique présente un fort niveau de désorganisation pour permettre une diffusion rapide des rayons cosmiques indispensable à l'efficacité des processus de Fermi. On notera que l'étude des processus de Fermi en régime relativiste a considérablement progressé ces dernières années ; elle nécessite encore d'importants travaux, notamment pour dépasser l'approche «particule-test» négligeant la rétroaction des particules de haute énergie sur le milieu. De même, le transport en champ magnétique fortement turbulent a fait récemment l'objet d'une analyse complète.

2.2 Accrétion et éjection autour des objets compacts

1. Des objets à différentes échelles: similitudes et différences

Les noyaux actifs de galaxies, les binaires X de faible masse, et les variables cataclysmiques sont des systèmes qui ont en commun de contenir un objet effondré, trou noir, étoile à neutrons ou naine blanche qui aspire la matière environnante par l'intermédiaire d'un disque d'accrétion, et qui, dans de nombreux cas, est le siège d'éjection de masse sous forme d'un jet plus ou moins collimaté ou d'un vent, à un taux qui peut se comparer au taux d'accrétion. Ces classes d'objets sont donc sièges des mêmes phénomènes physiques, mais présentent dans leurs échelles spatiales et temporelles et leurs environnements de grandes différences qui se répercutent sur nos capacités observationnelles.

L'étude des binaires galactiques est particulièrement instructive parce que ces objets sont proches, facilement observables, et que les échelles de temps pour les phénomènes d'accrétion sont comprises entre une milliseconde (temps dynamique près de l'objet compact) et quelques années (temps visqueux dans le disque d'accrétion). Les binaires X sont visibles dans toute la Galaxie, y compris dans des états quiescents accessibles depuis peu, mais sont peu nombreuses; les variables cataclysmiques sont moins brillantes, leur rayonnement visible, UV ou X mou est plus facilement absorbé, mais elles sont beaucoup plus nombreuses, ce qui permet d'explorer une vaste famille de paramètres physiques.

Il est essentiel de réaliser qu'un phénomène physique invoqué dans une classe d'objets doit avoir son homologue dans une autre classe, éventuellement sous une forme modifiée. Ainsi, l'instabilité thermo-visqueuse du disque d'accrétion, qui se traduit par les éruptions de novæ naines dans les variables cataclysmiques, est l'explication la plus vraisemblable de la nature transitoire des novæ X, et se manifeste peut-être bien dans les NAG, mais sur des échelles de plusieurs milliers d'années. De la même façon, les jets observés dans les microquasars et les NAG sont sans doute dus à un mécanisme commun mais le lien avec la nature de l'objet central n'est pas toujours clair : ainsi, des jets ultra-relativistes ont été détectés dans des binaires X contenant une étoile à neutrons comme un trou noir, mais les variables cataclysmiques (où l'objet central est une naine blanche) semblent perdre de la masse par un vent collimaté.

Des différences notables existent cependant dans ces systèmes. Les accréteurs peuvent avoir ou non une surface solide, susceptible d'être responsable de la formation d'une couche limite au bord interne du disque d'accrétion, d'émettre un rayonnement mou important qui irradie le disque d'accrétion et une éventuelle couronne chaude; ils peuvent être magnétisés. La taille du disque est déterminée dans les binaires par le lobe de Roche; le mécanisme d'alimentation du disque est aussi bien compris. Il n'en va pas de même dans les NAG. L'un des problèmes spécifiques aux NAG est l'influence de l'auto-gravité verticale du disque, qui devient prépondérante à quelques centaines de rayons gravitationnels du trou noir, et rend le disque instable localement. Dans cette région, on ignore encore complètement le mode d'accrétion, qui se produit peut-être par l'intermédiaire d'un tore froid, contribuant à cacher à notre vue la majeure partie des NAG et des quasars. Plus loin du trou noir, le relais peut être pris par les instabilités gravitationnelles à grande échelle.

Notons aussi la découverte récente d'objets «intermédiaires» entre les NAG et les étoiles binaires X, dont les trous noirs auraient des masses de l'ordre de 100 à 1000 M_{\odot} et

qui rayonnent à des taux voisins de la limite d'Eddington. Leur nature est en discussion à l'heure actuelle.

2. Quel est le mode d'accrétion autour d'un objet effondré, trou noir ou étoile à neutrons ?

Si le disque standard géométriquement mince décrit assez bien l'écoulement dans les parties les plus lointaines, la nature de l'écoulement au voisinage d'un trou noir ou d'une étoile à neutrons reste encore largement incomprise. Certains modèles prédisent que, pour des taux de transfert faibles, le disque mince laisse place à un écoulement de gaz très chaud, rayonnant de façon inefficace; si l'objet compact est un trou noir, la quasi-totalité de l'énergie d'accrétion serait alors avalée par le trou noir. Bien que séduisant, car permettant de comprendre pourquoi les binaires X contenant un trou noir sont si faibles en quiescence, ce modèle comporte encore de nombreuses zones d'ombre. Parmi les tests possibles, il faut citer l'observation et la spectroscopie X des transitoires X en quiescence, l'observation des oscillations quasi-périodiques de ces systèmes, qui tracent la matière au voisinage immédiat de l'objet compact, ou encore l'étude de la raie du fer qui semble provenir des régions les plus internes du disque et permettrait de mettre en évidence la rotation du trou noir. Du côté théorique, il reste à inclure dans ces modèles le lancement d'un jet, dont la présence, révélée par une émission radio, semble liée à celle de régions internes très chaudes émettant un rayonnement X dur.

Une particularité des NAG est l'existence de taux d'accrétion très élevés, probablement supérieurs à la limite d'Eddington dans une fraction non négligeable d'objets. Ces taux correspondraient à une accrétion via un disque géométriquement et optiquement épais. On s'attend à une signature X de ce type d'accrétion.

Des progrès très significatifs ont été faits récemment dans notre compréhension de la viscosité responsable, dans les disques, de l'accrétion de matière; les simulations de magnéto-hydrodynamique (MHD) montrent que l'instabilité magnéto-rotationnelle est sans doute le mécanisme capable de produire la viscosité, jusqu'ici paramétrisée de façon arbitraire, et qui est nécessaire pour rendre compte des évolutions rapides des disques. De nombreux efforts restent encore à faire pour améliorer les simulations MHD et les rendre plus réalistes, mais aussi pour étudier d'autres mécanismes susceptibles de jouer un rôle important (voir ci-dessous).

3. Quels facteurs déterminent la présence d'un jet relativiste? Quel est le lien entre l'accrétion et l'éjection?

Les modèles de formation de jets ne donnant pas au champ magnétique un rôle majeur ont tous échoué. Les modèles encore discutés supposent qu'une configuration magnétique comportant des lignes ouvertes traverse, soit un trou noir en rotation rapide pour en extraire l'énergie de rotation et la convertir en flux de Poynting dirigé le long de l'axe, soit un disque d'accrétion pour convertir une fraction appréciable de la puissance d'accrétion (libération d'énergie mécanique, gravitation + rotation) directement en puissance cinétique de jet. La puissance, la force électromotrice, le courant ainsi engendré dépendent du flux magnétique qui traverse ces conducteurs en rotation. Un trou noir, dépourvu de champ magnétique propre, dépend de son disque d'accrétion pour produire des jets. Lorsque le champ magnétique est proche de sa valeur d'équipartition dans le disque, un trou noir de Kerr peut, en principe, produire un jet relativiste dont la puissance peut atteindre 10% de la puissance d'accrétion. Un disque d'accrétion peut également produire un jet relati-

viste, mais généralement il est plutôt sub-relativiste ; il peut cependant être plus puissant que le jet produit par un trou noir. La mise en mouvement d'un écoulement relativiste atteignant un facteur de Lorentz de l'ordre de 10 rencontre une importante difficulté dans les NAG et les micro-quasars, en raison de la présence d'un champ de rayonnement intense qui exerce un freinage Compton efficace. Les calculs analytiques tenant compte du rayonnement semblent impossibles et la simulation numérique, difficile, est néanmoins indispensable pour répondre à cette question de façon précise. Un gros effort coordonné est nécessaire pour avancer sur ce problème.

Le lien entre l'accrétion et l'éjection apparaît clairement dans la phénoménologie des micro-quasars, où l'on observe l'alternance de deux phases : une phase d'accrétion avec rayonnement intense d'un disque opaque ; et une phase où le disque est faiblement radiatif, sans doute transparent, avec la manifestation d'un rayonnement X dur et des jets. Ces basculements de régime et l'instabilité qui les provoque font l'objet d'investigations importantes ; cette physique est certainement à l'œuvre dans les NAG présentant des jets, mais à une échelle de temps considérablement plus longue.

4. Quels sont les mécanismes d'accélération et les processus radiatifs dans les jets (leptoniques ou hadroniques?)

Il est possible de rendre compte du rayonnement non thermique des jets dans son ensemble en supposant qu'il résulte d'une population d'électrons ultra-relativistes subissant le processus d'accélération de Fermi dans les chocs et autres perturbations magnétiques répartis tout le long du jet. Cependant l'injection des électrons dans les processus de Fermi, qui ne fonctionnent qu'au-dessus d'un seuil en énergie élevé, n'est toujours pas maîtrisée, surtout pour les chocs relativistes pour lesquels une préaccélération considérable est nécessaire. Les théories d'accélération par choc, relativistes ou non, proposent des spectres proches de ceux observés en radio, en X et en γ . Un niveau de perturbation magnétique raisonnable est suffisant pour rendre compte de toute l'étendue du spectre jusqu'à la dizaine de TeV et permettre au processus d'accélération de compenser les pertes synchrotron. Les spectres en double bosse des blazars s'interprètent alors sans problème majeur dans un cadre purement «leptonique» et électrodynamique ; la partie à basse énergie jusqu'aux rayons X résulte d'une émission synchrotron, la partie à haute énergie dans le domaine gamma résulte de l'effet Compton sur les photons synchrotron et/ou les photons UV émis par le disque d'accrétion. Ce modèle de base est complété en tenant compte de la possible création de paires électrons-positons à la source, du régime de Klein-Nishina dans l'effet Compton inverse et de l'effet d'absorption sur le fond de rayonnement infrarouge intergalactique. On notera au passage que ce dernier effet peut servir, en comparant les spectres de blazars de différents redshifts, à évaluer ce fond infrarouge dans une région spectrale (longueurs d'onde de quelques μm) où il est difficilement accessible par des mesures directes.

Il est néanmoins raisonnable de penser que des protons sont également accélérés jusqu'à de très hautes énergies par les processus de Fermi dans les jets. Ils peuvent alors produire un rayonnement γ par deux processus, à savoir l'émission synchrotron et la photoproduction de pions, les photons γ résultant alors de la désintégration des π^0 . L'interprétation des spectres γ des blazars par ces processus hadroniques a été avancée, sans vraiment s'imposer vis-à-vis de l'interprétation «leptonique». Le problème majeur auquel se heurtent les modèles hadroniques est le rythme particulièrement rapide de variabilité des spectres γ des blazars. Cependant, on peut considérer cette importante question comme étant encore

ouverte; si l'on pouvait identifier une partie du spectre γ comme d'origine hadronique, on aurait alors identifié un site de production de rayons cosmiques de très haute énergie.

On signalera enfin un des grands mystères de la physique des NAG : ceux qui présentent des jets et émettent en radio sont situés dans des galaxies elliptiques, alors que les autres (silencieux en radio) se trouvent dans les galaxies spirales. Pourquoi certains NAG sont-ils capables d'accélérer des électrons à des énergies ultra-relativistes et d'émettre du rayonnement synchrotron jusqu'aux X durs et du rayonnement Compton inverse jusqu'au TeV? Ce phénomène est-il lié au spin du trou noir, lui-même lié au mode de formation des galaxies?

5. Jusqu'à quelle énergie les blazars peuvent-ils émettre en γ ?

La famille des blazars semble aujourd'hui former une séquence continue dans laquelle ceux qui émettent aux énergies les plus hautes (rayons X durs dans la partie synchrotron, photons au TeV dans la partie gamma) sont aussi les moins intenses. Quelques blazars extrêmes ont été clairement détectés jusqu'à des énergies de l'ordre de 20 TeV. Ils ne représentent peut-être pas la fin de la séquence; il pourrait exister des blazars émettant à des énergies encore plus hautes mais avec une intensité plus faible, donc accessibles seulement à une nouvelle génération d'instruments (voir 3.1.1).

6. Les NAG émetteurs de neutrinos et les NAG émetteurs de γ sont-ils les mêmes?

L'émission éventuelle de neutrinos par les NAG devrait provenir de la base du jet et/ou du noyau; cependant, le noyau est opaque aux photons γ et l'association d'un flux de neutrinos et d'un flux de photons γ ne peut se réaliser dans ce cas. De même, en début de jet, lorsque celui-ci est devenu transparent, cette association n'est pas garantie si le spectre γ est dominé par les processus électrodynamiques des leptons. Les NAG demeurent toutefois des sources potentiellement intéressantes de neutrinos de haute énergie; leur flux dépend étroitement du spectre de protons de très haute énergie engendré dans l'environnement du trou noir, il est sensible au nombre de protons accélérés et à l'indice spectral de leur spectre.

7. Les micro-quasars émettent-ils des gammas et des neutrinos de haute énergie? Y a-t-il des «micro-blazars»?

Les progrès en sensibilité des instruments gamma devraient permettre de détecter l'émission γ des micro-quasars; elle est attendue comme résultant de l'effet Compton inverse à un niveau appréciable. Cette fenêtre d'étude des micro-quasars est prometteuse, car on attend des informations nouvelles à la fois par le maximum, la coupure et la variabilité du spectre.

Les micro-quasars peuvent accélérer des protons jusqu'à 10^{16} eV; ceux-ci sont en mesure de faire de la photo-production de pions avec le champ de rayonnement X du noyau du micro-quasar. Comme dans le cas des NAG, il est difficile de faire une estimation sérieuse des flux de neutrinos, mais on peut espérer les détecter; ce serait évidemment un événement scientifique important, même s'il concerne des rayons cosmiques d'énergie plus modeste.

8. Quel est le phénomène à l'origine des sursauts gamma?

Notre compréhension des sursauts gamma s'est spectaculairement améliorée ces dernières années avec la découverte de contreparties X, optique, et radio, permettant de les

situer dans des galaxies à des distances cosmologiques, et de comprendre leur émission comme résultant de chocs internes ou terminaux de jets ultra-relativistes produits lors de la coalescence d'objets effondrés ou d'hypernovæ ; le dernier scénario est largement privilégié dans le cas des sursauts durant plus de quelques secondes, qui ont tous pu être localisés dans les régions de formation d'étoiles de ces galaxies à des redshifts de l'ordre de l'unité. Les progrès viendront d'une part de la recherche de contreparties de sursauts courts, de leur localisation dans les galaxies hôtes, et d'autre part d'une meilleure connaissance de l'évolution temporelle de la luminosité dans toute la gamme d'énergie de ces sursauts.

Les sursauts gamma sont les candidats privilégiés pour la production de rayons cosmiques «super-GZK» par un mécanisme d'accélération (scénario «bottom up»). À ce titre, ils devraient être également sources de neutrinos de très haute énergie, grâce à la photoproduction de pions chargés sur les photons du sursaut, suivie de la désintégration de ces pions. La détection de cette émission de neutrinos en coïncidence avec l'émission γ est un objectif important de l'expérience ANTARES (voir 3.1.2) et, dans une certaine mesure, de l'observatoire Pierre Auger (voir 3.1.3). En outre des neutrinos de plus basse énergie (100 GeV-10 TeV) produits par collisions proton-proton suprathermiques, également détectables par ANTARES, sont sans doute produits avec un flux appréciable au cours de la phase primaire d'un sursaut gamma.

9. Les NAG à grand redshift

Plusieurs découvertes fondamentales de ces dernières années concernent l'aspect cosmologique des NAG et leur relation avec l'évolution des structures. D'une part, on a trouvé une corrélation forte entre la masse des trous noirs massifs au centre des galaxies, actives ou inactives, et la masse du bulbe de la galaxie-hôte, qui prouve le lien étroit entre la formation du trou noir et celle de la galaxie. D'autre part, la découverte de sources X à profusion a permis d'identifier certaines d'entre elles à des quasars à grands redshifts, et semble montrer que le nombre de quasars X ne diminue pas à grand redshift comme les quasars optiques. Notons qu'il est maintenant certain que le fond diffus X dur est dominé par les «NAG enfouis» dans un tore de poussière. Enfin la découverte de quasars de très grand redshift ($z \sim 6$) prouve l'existence de trous noirs déjà très massifs ($10^9 M_\odot$) un milliard d'années après le big-bang, et pose de sérieuses contraintes aux modèles cosmologiques, allant jusqu'à la proposition de l'existence de trous noirs massifs primordiaux.

10. Une remarque générale : la nécessité de développer les codes numériques lourds pour modéliser accréation et éjection et les phénomènes très variables de l'émission haute énergie

Les grandes questions concernant l'accréation-éjection ne peuvent, pour la plupart, trouver de réponses précises sans la mise en œuvre de simulations numériques lourdes. Non seulement la modélisation numérique des disques d'accréation et du lancement des jets en régime stationnaire est souhaitable malgré sa difficulté, mais il est nécessaire de rendre compte du régime non stationnaire qui correspond aux observations, et c'est encore plus difficile. Les codes MHD évoluent afin d'aborder certaines de ces questions cruciales et notamment le développement des instabilités permettant les phénomènes de transport par turbulence ou ondes spirales. Une coordination des efforts, en relation avec l'Action Spécifique «Simulation Numérique en Astrophysique» qui vient d'être lancée, est à mettre en place. Le couplage de cette dynamique non stationnaire avec la cinétique des particules suprathermiques et le transfert de rayonnement, qui, en outre, possède ses propres

mécanismes de variabilité avec la création de paires, constitue un enjeu incontournable à long terme pour la modélisation numérique.

2.3 Interactions fondamentales et nouvelle physique

1. La gravité extrême : recherche d'effondrements (ondes gravitationnelles), oscillations quasi-périodiques en X et structure des étoiles compactes

La prochaine mise en service des grands interféromètres comme LIGO et Virgo pour la détection d'ondes gravitationnelles devrait apporter de nouvelles contraintes sur les phénomènes cataclysmiques faisant intervenir des champs gravitationnels intenses. Dans ces instruments, il peut être indispensable de connaître a priori la forme du signal attendu pour filtrer le bruit de manière appropriée, d'où l'importance des travaux théoriques sur la coalescence de systèmes binaires ou l'effondrement d'une étoile. Les prédictions se heurtent encore aux problèmes suivants :

- *Calcul numérique de la phase de coalescence de deux trous noirs.* Ce problème extrêmement difficile est très loin d'être résolu : le «Binary Black Hole Grand Challenge» américain — une collaboration de nombreux instituts avec des moyens informatiques très importants — a été abandonné. Les travaux numériques actuels utilisent des approximations : symétrie helicoidale pour l'espace-temps, conformément plat, conditions initiales *ad hoc*, etc.
- *Détermination d'algorithmes pour la recherche de signaux périodiques.* Le problème est de détecter un signal périodique de fréquence inconnue et de déterminer la direction du signal grâce à la modulation Doppler due au mouvement de la Terre sur elle-même et autour du Soleil. La puissance de calcul requise dans Virgo ou LIGO est énorme : dans une recherche systématique de sources, il n'existe pas d'algorithme utilisable avec la puissance de calcul disponible actuellement qui ne réduise pas de façon significative le rapport signal/bruit par rapport au filtrage optimal.
- *Calcul analytique de la phase orbitale des systèmes binaires.* On utilise des méthodes post-newtoniennes développées à des ordres élevés. Pour la détection et l'analyse du signal des systèmes binaires d'étoiles à neutrons, il faut pousser le développement post-newtonien jusqu'à l'ordre $(v/c)^{7/2}$ (ou approximation 3.5 PN). La solution est connue à l'exception de deux coefficients qui restent à calculer.
- *Forme d'ondes émises par les supernovæ lors d'un effondrement asymétrique.* Très peu de choses sont connues car l'asymétrie initiale du cœur en effondrement est mal prédite et les calculs numériques sont essentiellement newtoniens.

L'accrétion autour d'objets compacts galactiques fournit d'autres tests de la gravité extrême. L'étude de l'émission X avec une haute résolution temporelle (qui nécessite des détecteurs supportant un taux de comptage élevé) permet en effet d'accéder à la dynamique des régions émettrices au voisinage immédiat de l'objet compact sur des échelles de temps inaccessibles à l'analyse spectrale. La découverte avec le satellite Rossi-XTE de signaux quasi-périodiques à environ 1000 Hz et périodiques autour de 300 Hz dans l'émission persistante et les sursauts X de plusieurs systèmes binaires vient d'ouvrir une

nouvelle fenêtre d'exploration de ces objets. Ces signaux sont en effet produits dans le champ gravitationnel extrême de l'astre effondré où seule la relativité générale peut décrire le mouvement de la matière et où la propagation de la lumière est affectée par la courbure de l'espace-temps. Ils permettent donc de tester la validité de la théorie et de contraindre les paramètres fondamentaux des objets compacts : masse, rayon et moment cinétique. De plus, en corrélant ces signaux aux données spectrales, on obtient des contraintes supplémentaires sur le processus d'accrétion et les mécanismes d'émission.

2. Les particules supersymétriques, candidats possibles pour la matière noire : recherche de γ (Centre Galactique, amas globulaires) ou de neutrinos (Centre Galactique, Terre, soleil) issus d'annihilation de neutralinos

Quelle est la nature de la matière noire ? Cette question d'importance majeure en cosmologie, n'a toujours pas de réponse, et seule la physique des hautes énergies peut en apporter une. Le candidat le plus naturel est la particule supersymétrique la plus légère (*Lightest Supersymmetric Particle* ou LSP), éventuellement stable, qui peut être un neutralino. Ces particules, par ailleurs activement recherchées auprès des grands collisionneurs — sans succès jusqu'à présent — auraient été produites dans l'Univers primordial, se seraient découplées du rayonnement bien avant la matière baryonique et ont pu se concentrer dans certaines régions sous l'influence de la gravitation. Les neutralinos étant leurs propres anti-particules, peuvent s'annihiler mutuellement, produisant *in fine* des photons, des neutrinos et des antiparticules, selon :

$$\chi + \chi \rightarrow q\bar{q}, W^+W^-, \dots \rightarrow \gamma, \bar{p}, \bar{D}, e^+ \text{ et } \nu \quad .$$

Ces composants supplémentaires du rayonnement cosmique constituent des signatures indirectes de la matière noire.

La détection de ces produits d'annihilation permettrait de sonder l'espace des paramètres supersymétriques. Le couplage entre les modèles de formation et d'effondrement du trou noir massif situé au centre de la Galaxie et la densité de neutralinos indique que cette forme de matière noire pourrait être une source très importante de γ et neutrinos, accessible aux futurs télescopes. Les amas globulaires sont aussi des sources potentielles intéressantes de photons issus de telles annihilations.

3. Antimatière d'origine exotique : trous noirs primordiaux, produits d'annihilation de neutralinos ou d'autres particules massives d'origine cosmologique, éventuelle antimatière primordiale (anti-noyaux)

Si des neutralinos sont présents dans le halo galactique, alors ils peuvent s'annihiler en paires quarks-antiquarks qui, après fragmentation et hadronisation, conduisent à une quantité importante d'antiprotons. De la même manière, des trous noirs d'origine primordiale peuvent, en s'évaporant, produire des particules de toutes sortes, notamment de l'anti-matière. Les antiprotons ainsi produits devraient avoir des caractéristiques spectrales très proches de celles des antiprotons issus de l'annihilation de la matière noire supersymétrique. En revanche, le signal attendu en antideutons est très différent et l'expérience AMS (voir 3.2.1) devrait permettre de distinguer les deux hypothèses.

4. Défauts topologiques ou particules massives vestiges de l'Univers primordial, sources éventuelles de rayons cosmiques, de γ ou de neutrinos d'énergies extrêmes

Les défauts topologiques et les vestiges massifs de l'Univers primordial constituent des

sources potentielles de rayons cosmiques ou de rayonnement gravitationnel. En effet, ces objets peuvent par annihilation et/ou désintégration produire *in fine* des particules très énergétiques ; c'est le scénario «top-down» invoqué (par opposition au scénario d'accélération «bottom-up») comme source possible de particules «super-GZK». Dans les prochaines années, l'existence des défauts topologiques pourrait aussi être mise en évidence à partir des fluctuations du fond diffus micro-onde. Si leur contribution à ce fond devait être mesurée, il faudrait alors tenir compte de cette nouvelle donnée et en évaluer les conséquences astrophysiques. Pour le moment, la démarche est inverse et consiste à rechercher, dans les phénomènes hautement énergétiques observés en astrophysique, des manifestations de l'existence de défauts.

Deux catégories de défauts ont une part importante dans les préoccupations actuelles : ce sont les monopôles et les cordes cosmiques. Les premiers sont prévus par toutes les théories de grande unification, et représentent une menace pour les idées courantes en cosmologie si leur masse est élevée. C'est pour les diluer que fut inventée l'inflation dans les années 1980. Quant aux cordes, elles sont prévues par de nombreuses théories, et en particulier elles apparaissent naturellement dans les théories de supercordes. L'astrophysique des hautes énergies, au moins autant que la cosmologie, a peut-être les moyens de tester, et éventuellement de détecter les premiers signes de cette nouvelle physique.

Les monopôles, défauts topologiques ponctuels, se manifestent en astrophysique de la même manière que les particules massives vestiges de l'Univers primordial, à ceci près qu'ils sont toujours stables et qu'ils ne peuvent par conséquent s'annihiler que par paires. En tant qu'explication potentielle à l'énigme des rayons cosmiques d'énergie ultra-haute, ces particules (monopôles ou autres vestiges) peuvent contribuer de deux façons différentes : soit ils sont eux-mêmes les primaires, soit ce sont leurs produits de désintégration. La première hypothèse n'est pas favorisée par les données actuellement disponibles, alors que la deuxième pose le problème théorique de la coïncidence entre la durée de vie moyenne des vestiges instables et l'âge de l'Univers, ce qui n'est pas naturel.

Pour connaître la contribution possible des cordes cosmiques dans les rayons cosmiques d'énergies extrêmes, il faut d'abord en connaître la distribution. Les études sur les réseaux de cordes cosmiques et leur évolution dans le contexte cosmologique ne sont pas encore complètes car elles mettent en jeu des domaines dynamiques énormes, et par suite des simulations numériques pour lesquels les moyens informatiques commencent seulement à voir le jour. Ces simulations devraient permettre de normaliser les distributions de particules attendues dans ces modèles. La comparaison directe avec les données de l'observatoire Auger (voir 3.1.3), tant au niveau du spectre que de la composition chimique des primaires, devrait alors apporter des contraintes particulièrement sévères.

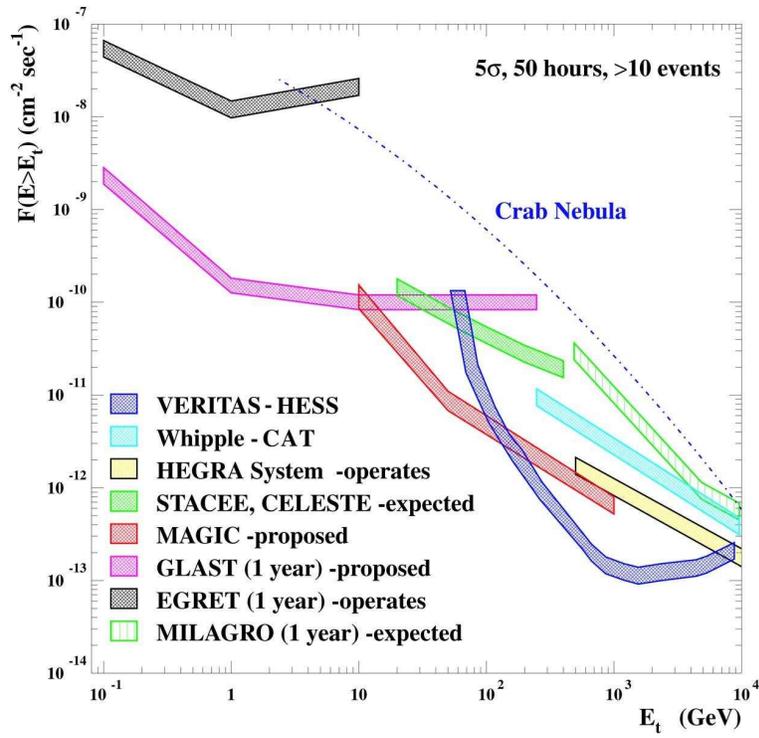


FIG. 4 – Sensibilité des expériences et projets en astronomie gamma de haute et très haute énergie : flux de γ minimal détectable à 5σ en 50 heures d’observation pour les détecteurs au sol en fonction de l’énergie incidente. On a aussi indiqué les sensibilités sur un an de l’expérience spatiale EGRET et du projet spatial GLAST. Le flux de γ de la nébuleuse du Crabe est indiquée pour comparaison.

3 Instruments pour la prochaine décennie

3.1 Expériences au sol

3.1.1 Astronomie gamma de très haute énergie

La décennie 1990-2000 a été marquée par les progrès instrumentaux des techniques utilisant l'effet Tcherenkov dans l'atmosphère¹ pour détecter les gerbes cosmiques et pour identifier celles, très rares, qui sont produites par des rayons γ primaires. La technique d'imagerie, d'abord développée à l'observatoire Whipple aux États-Unis, a vu ses performances s'améliorer avec les expériences CAT (électronique rapide, image à haute définition) et HEGRA (stéréoscopie). Le projet HESS, conçu par des groupes allemands et français, combine les avantages des expériences précédentes : la grande surface collectrice (4 miroirs de 12 m de diamètre) et l'électronique rapide permettent d'abaisser le seuil par télescope un peu en-dessous de 100 GeV ; grâce à la stéréoscopie et à la qualité d'image, le fond dû aux rayons cosmiques chargés est réduit de près de 4 ordres de grandeur, d'où un gain d'un facteur 10 en sensibilité par rapport aux meilleurs détecteurs antérieurs (figure 4). Chaque caméra couvre un champ de 5° de diamètre (permettant l'étude d'objets étendus comme les restes de supernovæ) avec 960 photomultiplicateurs et inclut toute l'électronique de déclenchement et de lecture d'un télescope. Les 4 caméras (pesant chacune 800 kg) sont construites par les groupes français. En Juin 2002, les structures mécaniques des 4 télescopes sont installées sur le site de Göllschau en Namibie et le premier télescope, complètement équipé (miroirs et caméra), a effectué ses premières observations à l'été 2002. L'ensemble des 4 télescopes devrait être entièrement opérationnel au début de 2004. Le site austral a l'avantage de donner accès à la plus grande partie de la Voie Lactée (ce qui est important pour l'étude des pulsars et restes de supernovæ et celle du rayonnement diffus de la Galaxie) et en particulier au Centre Galactique et à la plupart des amas globulaires, sources potentielles de γ issus d'annihilations de neutralinos ; dans le domaine extragalactique, le programme d'observation des blazars est évidemment prioritaire.

Un projet très voisin de 4 télescopes est actuellement en construction en Australie : c'est l'expérience CANGAROO III des groupes japonais et australiens dont un télescope est déjà opérationnel. Dans l'hémisphère nord, le projet américain VERITAS envisage un ensemble semblable de 7 télescopes mais n'a pour le moment reçu l'approbation que pour un prototype. En revanche, l'expérience MAGIC, collaboration de groupes allemands et espagnols, est en cours d'installation à La Palma (Iles Canaries) ; il s'agit d'un télescope unique d'imagerie Tcherenkov de 17 m de diamètre dont l'objectif est d'atteindre un seuil en énergie de l'ordre de 50 GeV et ultérieurement 20 GeV, si les développements dans le domaine des photodétecteurs le permettent.

Pour le long terme, les réflexions se sont portées dans plusieurs directions. D'une part, une poussée vers les basses énergies pour assurer un recouvrement avec les missions spatiales comme GLAST et pour profiter des grandes surfaces efficaces de détection (de

1. Nous n'abordons pas ici les détecteurs de particules chargées au sol destinés à l'astronomie gamma. Bien qu'ils aient l'avantage de fonctionner en permanence et de disposer d'un grand champ de vue, ils n'ont pas fourni de résultat marquant car leurs capacités de rejet des rayons cosmiques usuels restent très limitées et leurs seuils en énergie sont en général élevés.

l'ordre de plusieurs hectares) offertes par les télescopes Tcherenkov, ce qui permettrait d'accumuler des événements beaucoup plus vite que GLAST au-delà de quelques dizaines de GeV ; un site en haute altitude pourrait alors être envisagé pour maximiser la quantité de lumière reçue. D'autre part, l'extension ultérieure des installations en cours de construction est une option intéressante si, comme il est probable, le catalogue de sources au TeV augmente rapidement avec cette nouvelle génération d'expériences, ce qui permettrait, dans ce domaine d'énergie, de réaliser un relevé systématique dans certaines régions du ciel.

3.1.2 Astronomie des neutrinos

En raison de la très faible section efficace des neutrinos (10^{-33} à 10^{-35} cm² pour des énergies entre le TeV et le PeV) et des flux cosmiques attendus (comparables a priori aux flux de γ de très haute énergie), un détecteur idéal de neutrinos extra-terrestres devrait avoir une masse sensible de l'ordre de 10^9 t soit 1 km³ d'eau, d'où la nécessité d'utiliser un milieu naturel, eau de mer ou glace polaire. On détecte en fait la lumière Tcherenkov émise par les muons de haute énergie produits, souvent assez loin de la zone instrumentée, par des neutrinos muoniques ν_μ . Le caractère directionnel de l'effet Tcherenkov permet de se restreindre aux muons ascendants et d'éliminer toute contamination par des muons pénétrants, directement produits par les gerbes cosmiques atmosphériques au-dessus du site de l'expérience. Les neutrinos secondaires de ces gerbes atmosphériques constituent cependant un fond diffus inévitable qui domine surtout à basse énergie.

Après une longue gestation, l'astronomie des neutrinos de haute énergie a débuté par la mise en service dans les années 1990 des détecteurs prototypes NT200 au lac Baïkal et AMANDA-B10 dans la calotte glaciaire au Pôle Sud. La collaboration européenne ANTARES construit actuellement, au large des côtes méditerranéennes françaises, un détecteur de neutrinos constitué de 10 lignes de mouillage sur lesquelles sont fixés 900 «modules optiques» équipés de photomultiplicateurs enregistrant les temps d'arrivée et les amplitudes des signaux de lumière Tcherenkov. Ce télescope², qui devrait être complété en 2004, aura une surface effective d'environ 0,1 km² pour des neutrinos de quelques TeV. Bien que le détecteur AMANDA II qui fonctionne depuis quelques années au Pôle Sud ait une taille similaire, l'expérience ANTARES sera compétitive grâce à sa résolution angulaire près de 10 fois meilleure. Ces deux télescopes à neutrinos, situés dans des hémisphères différents, observeront le ciel de manière complémentaire, ANTARES bénéficiant d'une meilleure couverture du plan galactique. L'expérience ANTARES constitue la première phase d'un programme dont l'objectif à plus long terme est un détecteur d'environ 1 km³ en Méditerranée, le principal compétiteur étant le projet américain «Ice Cube» au Pôle Sud qui devrait prendre le relais d'AMANDA II dans quelques années.

Un détecteur de 0,1 km² possède déjà un potentiel de découverte appréciable (figure 5). Si les sursauts gamma sont bien les accélérateurs des rayons cosmiques d'énergies extrêmes, ils sont très vraisemblablement des sources de neutrinos et, dans le cadre de certains modèles, ANTARES pourrait détecter quelques sursauts intenses en quelques années. Comme ceux-ci sont bien localisés temporellement et angulairement par les satellites HETE-2 ou Swift (voir 3.2.1), le bruit de fond des neutrinos atmosphériques n'est pratiquement plus

2. Un autre projet de télescope neutrino moins avancé, NESTOR, est en cours de test au large de Pylos (Grèce).

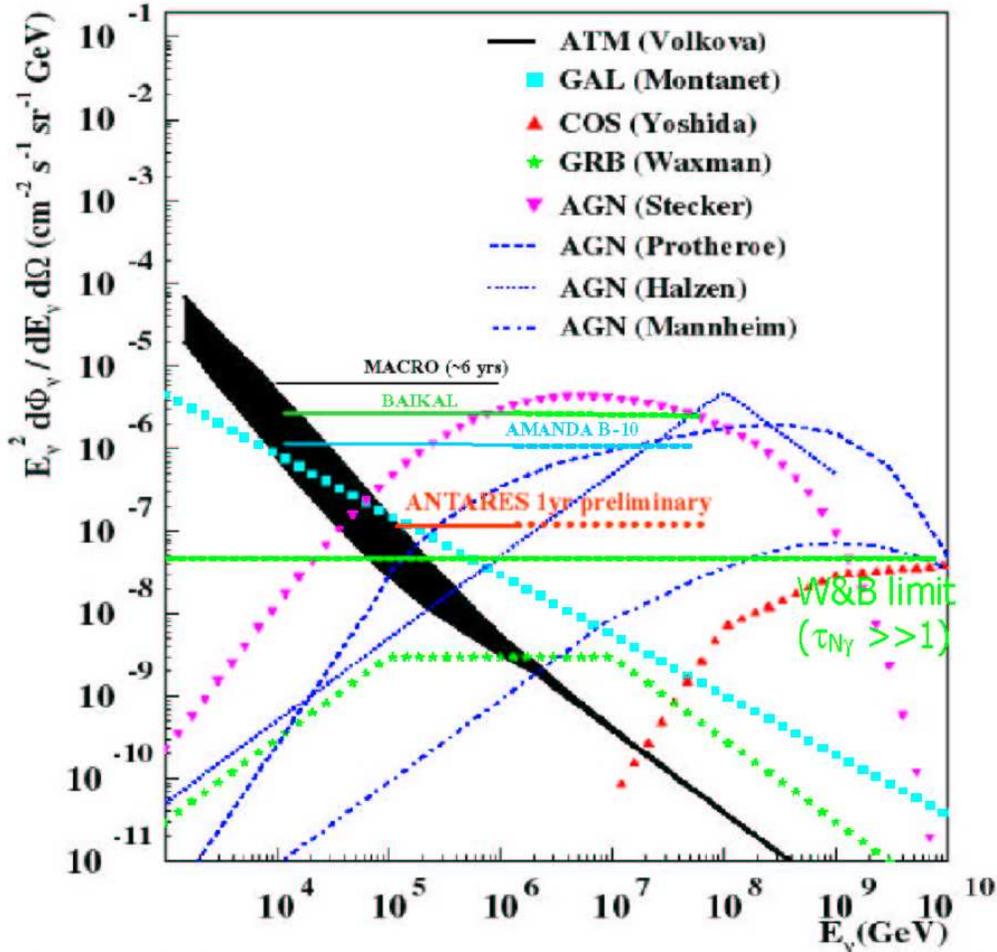


FIG. 5 – Spectres de diverses sources potentielles de neutrinos et sensibilités des expériences. La quantité en ordonnée est la puissance reçue en neutrinos par unité de surface et par intervalle logarithmique d'énergie. Sont représentés de gauche à droite : le spectre des neutrinos atmosphériques et les prédictions de divers modèles pour le flux diffus des noyaux actifs de galaxie (culminant autour de 10^{15} eV) et de neutrinos d'ultra-haute énergie (culminant au-dessus de 10^{19} eV ou plus).

gênant pour cette étude. Un autre objectif important est le flux diffus des neutrinos de tous les noyaux actifs de galaxie ; une telle étude complète les données de l'astronomie γ de deux points de vue : d'abord, elle apporte des informations sur ce qui se passe près de l'objet central, région totalement opaque aux γ en raison de l'intense rayonnement du disque d'accrétion ; ensuite, le signal n'est censé dominer le fond des neutrinos atmosphériques qu'au-dessus de 100 TeV environ, domaine où les γ sont absorbés en créant des paires avec les photons du rayonnement cosmologique en micro-ondes. L'astronomie des neutrinos devrait aussi, à terme, aider à préciser l'origine de l'émission γ des blazars, les neutrinos signant indirectement un processus nucléaire. Enfin, les annihilations de neutralinos, particules supersymétriques stables constituant peut-être l'essentiel de la matière noire de l'Univers, peuvent produire des neutrinos détectables même s'ils sont issus du cœur du Soleil ou de la Terre. Récemment, des études ont été menées en faisant varier les paramètres des modèles « minimaux » de supersymétrie tout en maintenant une densité résiduelle moyenne de neutralinos en accord avec les données cosmologiques. Si les flux de neutrinos issus de la Terre sont clairement hors de portée, certains modèles prédisent des flux en provenance du Soleil qui pourraient être détectables par ANTARES. Comme pour les γ et pour la même raison, le Centre Galactique est aussi une importante source potentielle de neutrinos issus d'annihilations de neutralinos.

3.1.3 Rayons cosmiques d'énergie ultra-haute

L'observatoire « Pierre Auger » est un détecteur de rayons cosmiques destiné à explorer de manière optimale le domaine des ultra-hautes énergies (au-dessus de 10^{19} eV, dans la région de la coupure spectrale GZK), mais son seuil de détection peut descendre jusqu'à 10^{17} eV pour certains types d'événements. C'est actuellement le seul détecteur de rayons cosmiques permettant la détection « hybride » des gerbes atmosphériques, à savoir l'observation simultanée d'un sous-ensemble d'événements par la technique du réseau de capteurs au sol et celle de la fluorescence atmosphérique. Afin de couvrir la totalité du ciel, le détecteur complet sera constitué de deux sites (respectivement dans les hémisphères Nord et Sud), chaque site comportant un réseau de 1600 cuves Tcherenkov balisant une surface de 3000 km^2 et un ensemble de télescopes à fluorescence. Actuellement le détecteur du site Sud est en construction (dans la province de Mendoza, Argentine) et a commencé à prendre des données depuis environ un an. Ce site devrait être complètement équipé à la fin de 2004.

Ce qui fait la spécificité de l'observatoire « Auger », en plus de son pouvoir statistique supérieur à tous les détecteurs existants, est précisément le fait que ce soit le seul détecteur hybride en fonctionnement. Cela a en particulier des conséquences importantes sur la qualité des données physiques. On trouvera ci-dessous un résumé de ses performances (entre crochets celles des observations en mode « hybride »).

- L'observatoire « Auger » a une ouverture de $7600 \text{ km}^2 \text{ sr}$ par site³. Les détecteurs étant sensibles à des gerbes horizontales, ce chiffre peut être considéré comme une limite inférieure de l'acceptance. Le détecteur à fluorescence peut détecter des gerbes d'énergies supérieures à 1 EeV à une distance de 30 km. Les taux attendus sont donc de plus de 5000 événements par an (dont 10% en mode hybride) au dessus de 10 EeV

3. L'ouverture s'entend ici pour des angles zénithaux de moins de 60° .

(avec une efficacité voisine de 100%).

- La résolution en énergie dépend peu de l'énergie (mais s'améliore à haute énergie). Pour les gerbes aux angles zénithaux de moins de 60° , à 10 EeV, elle est de l'ordre de 15% [10%] auxquels il faudrait ajouter des erreurs systématiques qui devraient être faibles grâce au fonctionnement hybride (calibration mutuelle des deux détecteurs).
- La résolution angulaire est inférieure à 2° (limite supérieure pour des gerbes verticales à 10 EeV). En moyenne, elle sera de l'ordre de 1° [0,2°].
- L'identification des rayons cosmiques primaires est fondamentale dans la discrimination entre les divers mécanismes de production, et c'est l'aspect le plus difficile de l'analyse des données. Avec la technologie choisie pour «Auger» (en particulier la très grande surface couverte qui représente en volume sensible l'équivalent d'une cible de 10 km^3 d'eau), l'analyse des gerbes horizontales devrait permettre de détecter avec un très faible bruit de fond une éventuelle composante de neutrinos, d'autant mieux s'il existe une composante de ν_τ dans le flux incident (entre une fraction d'événement par an et plusieurs dizaines par an selon les modèles). Indépendamment de tout modèle, «Auger» peut, en cinq ans de prise de données, exclure un flux de neutrinos supérieur à $2 \text{ km}^{-2} \text{ an}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ pour un spectre en E^{-2} entre 0.3 et 3 EeV. De même, une signature très caractéristique devrait permettre de déceler une contamination des rayons cosmiques incidents en photons de 5 à 10%. Les autres types de primaires (protons, noyaux légers ou lourds) ne peuvent être identifiés que statistiquement.

3.1.4 Détection d'ondes gravitationnelles

La collaboration franco-italienne Virgo a pour but la détection directe des ondes gravitationnelles émises, dans une bande de fréquence allant de quelques Hertz à environ 10 kHz, par des sources astrophysiques cataclysmiques : supernovæ, coalescences de systèmes binaires, naissance de trous noirs.

Virgo est un interféromètre de Michelson recyclé avec des Fabry-Pérot dans les bras de 3 km. La sensibilité attendue est présentée sur la figure 6. Les principales limitations sont les suivantes :

- le bruit sismique oblige à travailler au-dessus de 2 Hz, mais on notera que la sensibilité de Virgo aux basses fréquences est meilleure que celle du projet américain LIGO (voir figure 7) ;
- le bruit thermique (celui du mode pendule puis celui des miroirs) domine entre 2 et 500 Hz ;
- le bruit de comptage des photons domine au-dessus de 500 Hz.

Entre 10 Hz et 10 kHz, Virgo atteint une sensibilité suffisante ($h \sim 10^{-22}/\sqrt{\text{Hz}}$) pour espérer détecter des sources jusqu'à environ 10 Mpc (amas de la Vierge).

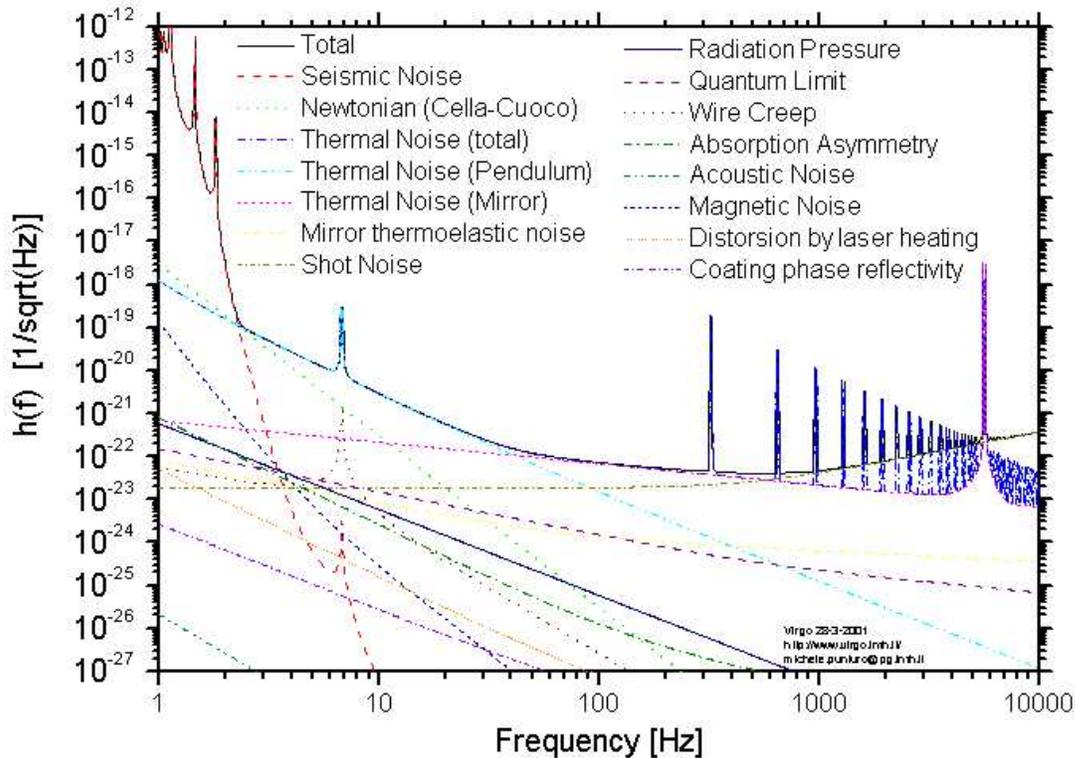


FIG. 6 – Densité spectrale des principaux bruits dans l'expérience Virgo (en $1/\sqrt{\text{Hz}}$) en fonction de la fréquence.

Le calendrier de la construction de Virgo a été dicté par celui des infrastructures. Lors du financement du projet il a été décidé de construire ces infrastructures en deux étapes :

- d'abord, la partie centrale (bâtiment central, bâtiment de contrôle et bâtiment "mode-cleaner"), réalisée entre mai 1996 et septembre 1998 ;
- ensuite, les deux bras, dont la construction, commencée en mai 1999, a été immédiatement suivie de l'installation des tubes à vide.

La fin de la première étape a permis de commencer à installer toute la partie centrale de l'interféromètre (CITF) en 1999. Celle-ci est actuellement en phase de test, l'ensemble de l'expérience devant être opérationnel au début de 2003. Les tests sur le CITF ont permis de valider la majorité des choix techniques de Virgo, en particulier le système de contrôle assurant que les différents miroirs sont à leur position nominale. Durant cette période, le CITF a été contrôlé longitudinalement et angulairement avec la précision requise pour Virgo. Ces contrôles ont été reproduits à de nombreuses reprises et, lors de 4 tests de prise de données de 3 jours chacun, on a atteint une efficacité de l'ordre de 90%.

Le début de l'année 2003 verra l'installation des miroirs définitifs ainsi que celle du laser final. L'année 2003 sera marquée par la mise en route complète de l'interféromètre avec l'espoir d'atteindre la sensibilité nominale, grâce à l'apprentissage effectué sur le CITF. Cinq laboratoires français sont impliqués dans Virgo.

L'expérience américaine LIGO a mis en route trois interféromètres semblables à Virgo dont deux avec des bras de 4 km. Après une mise en route rapide en 2000, LIGO a réussi à

faire marcher un interféromètre dans la configuration optique complète à la fin de l'année 2001, mais l'expérience doit encore gagner quelques ordres de grandeur pour atteindre la sensibilité prévue. En outre, aux basses fréquences, elle devrait être moins performante que Virgo (figure 7). En Europe⁴, une collaboration germano-britannique a construit un interféromètre avec des bras de 600 m, Geo 600, près de Hanovre. À long terme sa taille limitera sa sensibilité; aussi, cet instrument a-t-il vocation à devenir un banc de test pour les améliorations futures des détecteurs actuels. Le détecteur japonais TAMA 300 est actuellement le meilleur interféromètre en fonctionnement, sa sensibilité autour du kilo-Hertz atteignant $10^{-21} \text{ Hz}^{-1/2}$. Cependant, sa faible dimension (300 m) ne lui permet pas d'atteindre la sensibilité nécessaire pour détecter les ondes gravitationnelles. Un projet australien ACIGA avec des bras de 500 m vient d'être approuvé, mais le calendrier de construction est encore inconnu. Enfin, à plus long terme et dans un tout autre domaine de fréquences, l'étude des ondes gravitationnelles sera complétée par le projet spatial LISA (voir 3.2.2).

Si l'on se restreint aux interféromètres au sol (fonctionnant au-dessus du Hertz), le principal facteur limitant des instruments actuels est le bruit thermique des fils et des miroirs. Il peut être réduit en améliorant la qualité des matériaux ou en refroidissant les masses-tests (le gain variant comme la racine carrée de la température). Pour Virgo, l'utilisation de fils de quartz a été largement testée et devrait pouvoir être mise en œuvre lors d'une amélioration partielle (aux environs de 2005?). Plusieurs projets de R&D sur la cryogénie sont en cours ou sur le point d'être financés. L'expérience LIGO a déjà planifié une amélioration de ses performances (LIGO II) pour 2004-2005 et un travail de R&D est déjà en cours pour LIGO III. L'expérience japonaise TAMA qui est actuellement la seule à avoir atteint sa sensibilité nominale prévoit la construction d'un interféromètre cryogénique (LCGT) à l'horizon 2005. La figure 7 présente les différentes sensibilités des expériences en cours et futures.

3.2 Missions spatiales

3.2.1 Missions engagées

Avec deux grands télescopes à rayons X en opération, l'américain Chandra (lancé en Juillet 1999) et l'europpéen XMM-Newton (lancé en Décembre 1999) et avec le petit satellite américain à participation française HETE-2 consacré à l'étude des sursauts gamma (et lancé en Octobre 2000), la décennie en cours fera certainement date en astronomie de haute énergie, compte tenu du florilège de missions spatiales (INTEGRAL, Swift, AGILE et GLAST) devant entrer en service dans les prochaines années.

Le satellite INTEGRAL, prochaine grande mission astronomique de l'Agence Spatiale Européenne (ASE), a pour objectif principal l'exploration approfondie des sites célestes émettant dans la bande spectrale de 15 keV à 10 MeV. Le lancement d'INTEGRAL, qui utilise une plate-forme spatiale du même type que celle de XMM-Newton, a eu lieu avec succès le 17 Octobre 2002. Il a été assuré par une fusée «Proton» fournie par l'Agence Spatiale Russe. La mission est conçue pour durer au moins 5 ans, le financement des opérations en orbite au cours des 2 prochaines années étant déjà acquis. La charge

4. On notera qu'il s'avère difficile de mettre en place une réelle communauté européenne sur le sujet et que le poids de LIGO reste dominant au niveau mondial.

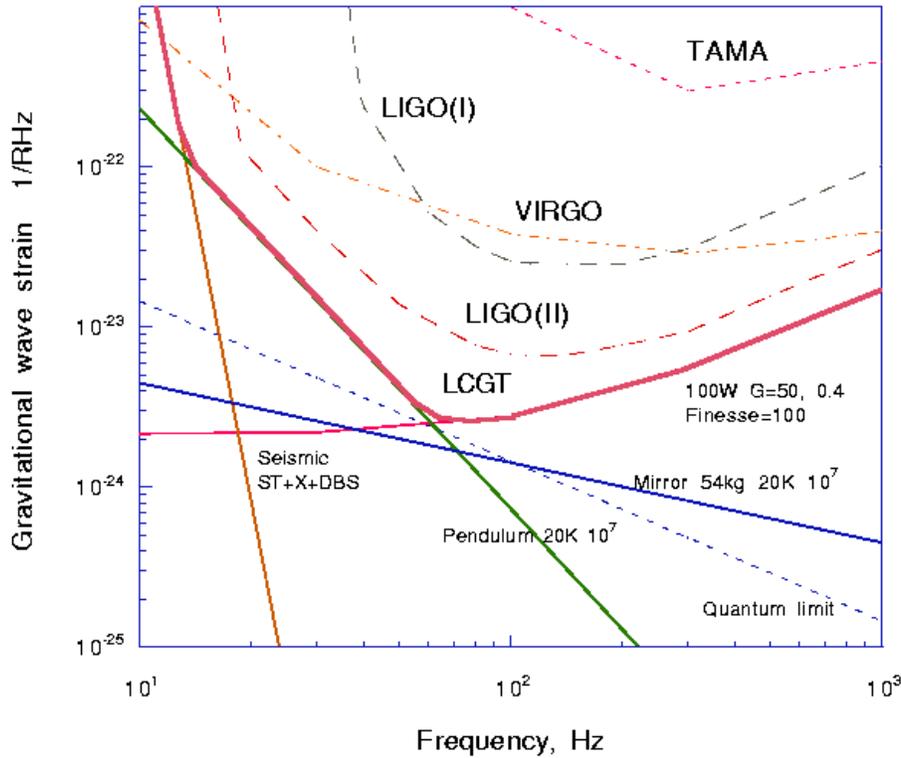


FIG. 7 – Densités spectrales de bruit (en $1/\sqrt{\text{Hz}}$) en fonction de la fréquence, donnant la sensibilité des futurs détecteurs d’ondes gravitationnelles.

utile d’INTEGRAL est constituée de de deux dispositifs à ouverture codée utilisables simultanément : le télescope IBIS fournissant des images à haute résolution angulaire (pouvoir séparateur de $12'$) et le spectromètre SPI chargé de la spectroscopie gamma à très haute résolution (0,2% à 1 MeV). IBIS comprend deux plans détecteurs de grande surface (3000 cm^2), montés à 10 cm l’un de l’autre. Le plan détecteur supérieur, ISGRI, est une caméra gamma de nouvelle génération faite d’une nappe de semi-conducteurs CdTe qui lui confère une très bonne résolution spatiale, décisive pour localiser les sources avec précision ($30''$ à $1'$). Ainsi doté d’une capacité à localiser les sources supérieure à celle du télescope SIGMA à bord de GRANAT, IBIS fera surtout montre d’une sensibilité accrue de plus d’un ordre de grandeur (figure 8) et d’une couverture spectrale beaucoup plus étendue (15 keV à 10 MeV). IBIS bénéficiera également d’un champ de vue plus vaste ($19^\circ \times 19^\circ$ à mi-sensibilité) qui lui permettra de détecter 10 à 20 sursauts gamma par an, dont la position précise (à $1'$ près) sur la voûte céleste sera fournie en moins de quelques minutes aux autres instruments d’observation au sol et dans l’espace. Le plan détecteur de SPI est une matrice hexagonale composée de 19 détecteurs semi-conducteurs de germanium couvrant une surface utile de 500 cm^2 . Les détecteurs germanium sont montés dans un cryostat qui les maintient à la température de 85 K par une combinaison de dispositifs réfrigérants actifs et passifs. Ils confèrent à SPI un pouvoir de résolution spectral 15 fois meilleur que celui du spectromètre OSSE à bord du satellite Compton-GRO. La mission INTEGRAL inclut également deux instruments complémentaires, JEMC-X et OMC, opérant respectivement dans la bande des rayons X et dans le domaine visible.

La France participe à la mission INTEGRAL par le truchement de sa quote-part au programme scientifique de l’ASE ainsi que par une contribution très importante aux deux

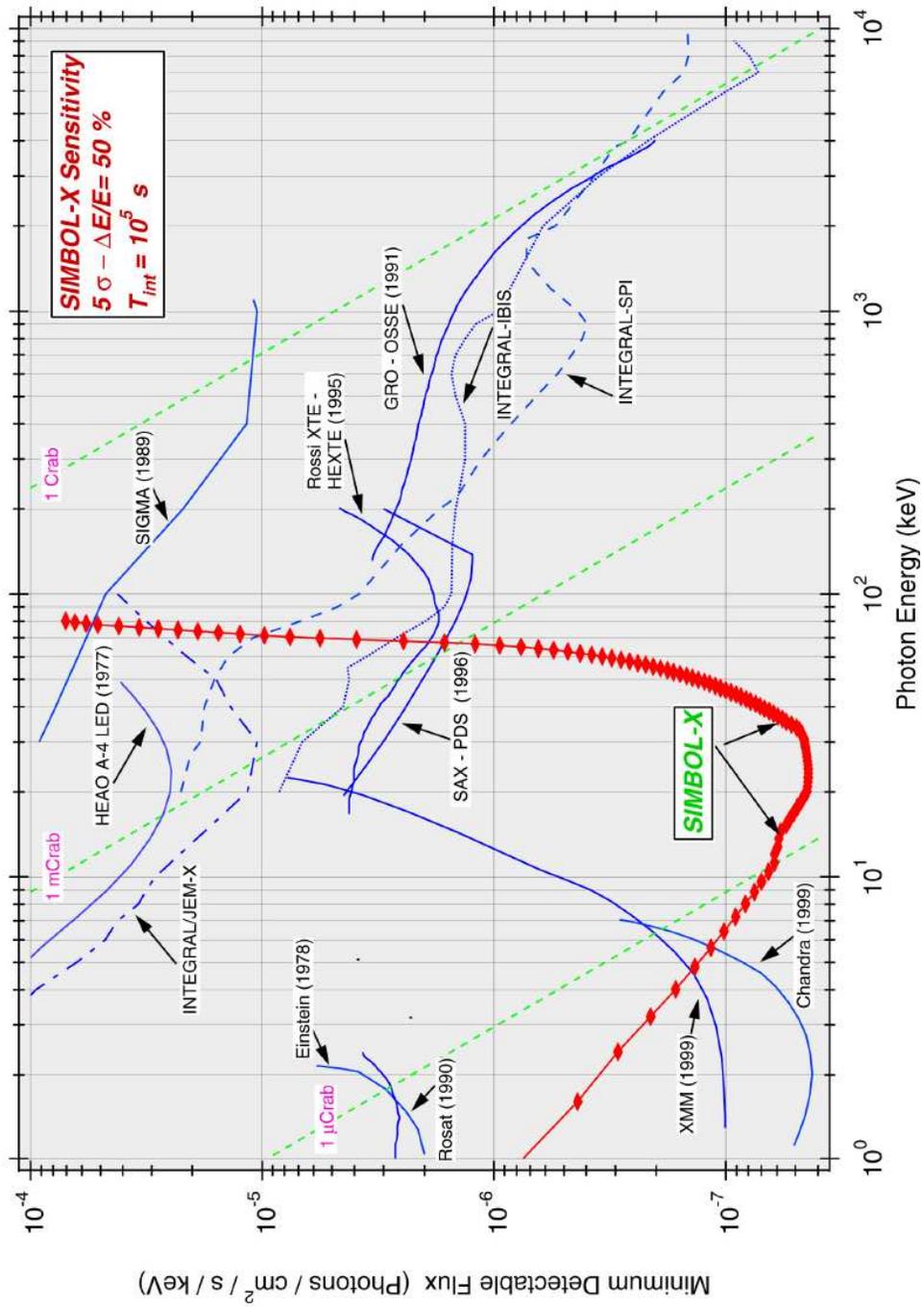


FIG. 8 – Flux minimal détectable pour les expériences et projets des astronomies X et gamma de basse énergie (5σ en 10^5 s.)

instruments principaux de sa charge utile scientifique. Ainsi, le CNES assure la maîtrise d'œuvre du spectromètre SPI dont les sous-systèmes sont réalisés par un vaste consortium de laboratoires dont deux en France jouent les premiers rôles : le CESR à Toulouse et le Service d'Astrophysique du CEA (DAPNIA/SAP) à Saclay. Avec le soutien du CNES, le DAPNIA/SAP réalise également la caméra gamma de nouvelle génération ISGRI, l'élément clé du télescope IBIS, et participe à la mise en œuvre du centre de traitement des données scientifiques (ISDC) qui permettra aux non-spécialistes de mener des observations avec l'observatoire INTEGRAL. Une large fraction du temps d'observation (65% la première année, 70% la deuxième année et 75% les années suivantes) est attribuée par le Comité d'Allocation du Temps sur la base de propositions d'observation envoyées par la communauté scientifique en réponse à un appel d'offres que l'ASE doit émettre chaque année. L'appel d'offres portant sur la première année d'observation, ouvert du 1^{er} Novembre 2000 au 16 Février 2001, a connu un tel succès que le cumul des temps d'observation demandés dépasse d'un facteur 19 le temps disponible. Avec le soutien du GdR PCHE, les groupes français ont participé avec succès à cet appel d'offres puisque plus de 20% du temps disponible a été attribué à des propositions issues de leurs laboratoires. Le reste du temps d'observation sera réservé aux groupes impliqués dans la réalisation de la mission ; il sera pour l'essentiel dévolu à un balayage de la Voie Lactée incluant une observation approfondie des régions centrales de la Galaxie et de la région des Voiles.

L'année 2003 verra la mise en service de Swift, mission moyenne américaine dont l'objectif principal est l'étude des sursauts gamma. La stratégie d'observation mettra en jeu le télescope BAT, dispositif à ouverture codée à grand champ (2 sr) qui comprend un plan détecteur de grande surface (5200 cm²) constitué d'une nappe de semi-conducteurs CdZnTe. Ainsi, BAT est en mesure de détecter les sursauts gamma dans la bande de 10 à 120 keV et de les localiser avec une précision de 4'. Aussitôt le sursaut détecté et localisé, le véhicule spatial s'orientera alors dans la direction de l'événement. Cette manœuvre permettra de pointer de 20 à 70 s plus tard le champ du sursaut gamma avec XRT, un télescope X à miroirs à incidence rasante, à petit champ (23') et à très haute résolution angulaire (15''), opérant dans la bande de 0,2 à 10 keV et avec UVOT, un télescope à miroir plus classique de 30 cm de diamètre, à petit champ (17') et à très haute résolution angulaire (< 1''), opérant dans l'UV et le visible (170 à 650 nm). Prévue pour durer au moins 3 ans, la mission Swift sera en mesure de détecter et de localiser plus de 300 sursauts par an, dont la position sur la voûte céleste sera fournie en moins de quelques minutes aux autres moyens d'observation au sol et dans l'espace. Cette même année 2003, sera également lancé le satellite italien AGILE destiné à la détection de γ dans la bande de 30 MeV à 50 GeV. Le télescope gamma comportera un trajectographe (utilisant la technologie du silicium) pour détecter la conversion du photon en paire e^+e^- et un petit calorimètre. Ce dispositif à grand champ de vue (3 sr) permettra d'observer une large fraction du ciel dans la bande des rayons gamma de haute énergie, localisant les sources avec une bonne précision (5' à 20') et une modeste résolution spectrale (100% à 300 MeV). Prévue pour durer 3 ans, la mission AGILE, précurseur de GLAST, comblera l'absence de couverture de la bande à haute énergie dont pâtit toute l'astronomie gamma depuis la fin de l'expérience EGRET à bord de Compton-GRO. La charge utile du satellite AGILE inclut aussi un instrument complémentaire, Super-AGILE, opérant dans la bande des rayons X durs.

L'autre grande mission devant entrer en service dans la décennie en cours est le satellite

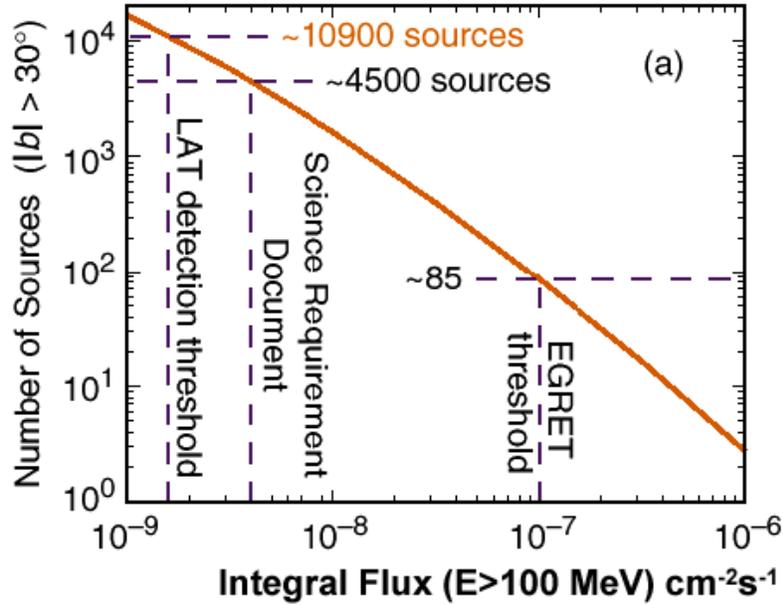


FIG. 9 – Nombre de sources γ extra-galactiques en fonction du flux minimal détectable : comparaison de l'expérience EGRET et du projet GLAST.

américain GLAST dont le lancement doit intervenir en 2006. GLAST se propose d'observer le ciel gamma dans la bande de haute énergie (20 MeV-300 GeV) avec des performances jamais atteintes dans ce domaine spectral. La plate-forme spatiale emportera un réseau de 4×4 télescopes à production de paire comprenant chacun un trajectographe de 18 plans de silicium (40×40 cm²) associé à un calorimètre constitué de 8 couches de 12 barreaux de CsI pour une épaisseur totale de 10 longueurs de radiation. Ce dispositif à grand champ de vue (3 sr) permettra d'observer une large fraction du ciel en γ de haute énergie avec une très haute sensibilité (30 fois meilleure que celle d'EGRET), une bonne précision de localisation des sources (30'' à 1'), alliée à une excellente résolution spectrale (2% à 10 GeV). La charge utile est construite par une vaste collaboration de laboratoires d'astrophysique et de physique des particules aux États-Unis, au Japon et en Europe, avec une importante contribution française au calorimètre. Prévue pour durer au moins 5 ans (une durée de 10 ans est envisagée), la mission GLAST sera en mesure de détecter et de localiser avec précision des milliers de sources gamma, des blazars pour l'essentiel (figure 9). La charge utile de GLAST inclut aussi le moniteur de sursauts gamma GBM qui détectera dans un large champ de vue (~ 4 sr) les sursauts gamma dans la bande de 10 keV à 25 MeV et les localisera à quelques degrés près. Avec cette remarquable série de missions spatiales dans le domaine gamma prévues pour les prochaines années, on peut envisager la découverte de milliers de nouvelles sources (figure 9). Compte tenu des nouvelles expériences au sol dans le domaine gamma des très hautes énergies, HESS, CANGAROO III, MAGIC et VERITAS (voir section 3.1.1 et figure 4), des dizaines de sources pourront alors être étudiées simultanément du keV au TeV.

Ce nouvel âge d'or de l'astrophysique spatiale à haute énergie tirera également profit des mesures sur les rayons cosmiques chargés effectuées par l'expérience AMS qui doit être montée sur la station spatiale internationale (ISS) en 2005. Le dispositif expérimental, comporte un trajectographe opérant dans le champ magnétique intense d'un aimant supraconducteur, un calorimètre et des identificateurs de particules (détecteurs Tcheren-

kov et à rayonnement de transition). L'expérience AMS se propose de mesurer avec une précision jamais atteinte la composition et le spectre des rayons cosmiques chargés entre quelques centaines de MeV et quelques TeV, une attention particulière étant portée aux antiparticules. AMS devrait aussi contribuer à l'astronomie gamma dans le domaine du GeV en détectant les photons de deux façons : soit par conversion en paires dans le trajectographe (avec une faible probabilité), soit par mesure dans le calorimètre (16 longueurs de radiation) grâce à un système de déclenchement approprié. Le détecteur est construit par une vaste collaboration internationale sous maîtrise d'œuvre américaine, avec une contribution française significative.

3.2.2 Missions à l'étude

Plusieurs missions spatiales d'astrophysique à haute énergie sont actuellement à l'étude avec des degrés divers d'engagement.

La plus avancée dans la procédure propre aux missions spatiales est l'expérience EUSO (Extreme Universe Space Laboratory) sur les rayons cosmiques d'énergies extrêmes. Ce domaine où les données expérimentales sont encore fragmentaires en raison de la faiblesse des flux, va être prochainement étudié avec une statistique inégalée par l'observatoire «Pierre Auger» (voir 3.1.3), déployant des détecteurs sur une surface de 3000 km². Le projet EUSO, pour laquelle l'ASE a engagé une étude de phase A dans le cadre de son installation à bord de l'ISS, représente l'étape suivante de ces études avec un gain minimal d'un facteur 6 en statistique par rapport à l'expérience «Auger». Il consiste à détecter la lumière de fluorescence des molécules d'azote de l'atmosphère excitées par le passage des particules des gerbes géantes. Cette technique est déjà utilisée à partir du sol par plusieurs expériences (dont «Auger»). Dans EUSO, elle est mise en œuvre à partir de l'espace en pointant vers le sol un télescope de grande ouverture angulaire monté sur le module européen «Columbus» de l'ISS. Le détecteur focal constitué de photomultiplicateurs multi-anodes enregistre dans chaque pixel l'intensité lumineuse reçue et les temps d'arrivée des photons. La lumière Tcherenkov émise par les particules de la gerbe en direction du sol à faible angle de son axe est partiellement rétro-diffusée par le sol, produisant dans un pixel du détecteur un signal terminal caractéristique qui, avec les informations précédentes, permet de reconstruire la position, la direction et l'énergie de la gerbe. Avec un angle d'ouverture de près de 60° de diamètre, l'expérience surveille une région de 150000 km² au sol, mais ne peut fonctionner que la nuit en l'absence de lune, soit avec un cycle utile de 10%. Son acceptation ou «ouverture» (produit de la surface, du cycle utile et de l'angle solide exploré) est de 50000 km² sr contre 7600 km² sr pour «Auger». Si l'expérience «Auger» confirmait l'existence de gerbes géantes d'énergies supérieures à 10²⁰ eV, au-delà de la coupure GZK, alors EUSO pourrait explorer plus en détail ce domaine d'énergie. La grande masse de cible disponible (10¹² à 10¹³ tonnes) donne aussi à EUSO une potentialité intéressante pour la détection, à ces énergies extrêmes, d'éventuels neutrinos signés par des gerbes horizontales. Le développement de la mission EUSO est entrepris par une vaste collaboration internationale au sein de laquelle la France est en charge d'études concernant la modélisation de l'atmosphère et l'électronique du détecteur focal.

À n'en pas douter, après Chandra, XMM-Newton, INTEGRAL et GLAST, le développement de nouvelles missions spatiales en astronomie des hautes énergies devra emprunter de nouvelles voies. En effet, compte tenu des capacités limitées d'emport des moyens spa-

tiaux en termes de masse et surtout de taille, il semble difficile d'accroître d'une manière significative les performances des télescopes à haute énergie en restant dans la stratégie classique d'un équipement spatial d'un seul tenant. Deux possibilités s'ouvrent alors pour approfondir l'étude des sites des phénomènes cosmiques de haute énergie. L'une consiste à concevoir des missions plus modestes mais très ciblées en profitant des lignes de produit que proposent les agences spatiales nationales, comme les micro-satellites de la filière MYRIADE du CNES. C'est dans ce cadre que se situe la mission ECLAIRs qui a pour objectif principal d'observer simultanément l'émission prompte des sursauts gamma et un éventuel précurseur dans les domaines gamma, X et visible. Aucun autre instrument programmé au cours de la présente décennie ne pourra remplir cette mission. ECLAIRs comprend 3 unités de détection de champs de vue comparables (2 sr) opérant respectivement dans la bande des rayons gamma de basse énergie (12 à 600 keV), dans celle des rayons X (0,5 à 14 keV) et dans le visible. Proposée en réponse à l'appel d'offres du CNES lancé à la fin de 2001, la mission ECLAIRs pourrait entrer en opération vers 2007. Prévue pour durer au moins 3 ans, elle devrait fournir une étude multi-longueurs d'onde de l'émission prompte d'une centaine de sursauts gamma par an, dont la position sur la voûte céleste sera fournie en moins de quelques minutes aux autres moyens d'observation au sol et dans l'espace.

L'autre voie qui s'ouvre est celle des satellites volant en formation, seule solution pour mettre en œuvre des instruments dont les dimensions dépassent les capacités d'emport des moyens spatiaux. Par exemple, en astronomie des hautes énergies, cette nouvelle technique permettrait de concevoir des télescopes à très grande focale qui seuls permettraient de concentrer les rayonnements d'énergie supérieure à une dizaine de keV. Deux missions proposées en réponse à l'appel d'offres du CNES s'inscrivent dans cette perspective. La première, SIMBOL-X, qui s'appuie sur deux satellites volant en formation, se propose d'étendre jusqu'à 70 keV les capacités des miroirs à incidence rasante en terme de sensibilité (figure 8) et de résolution angulaire. SIMBOL-X affiche ainsi une sensibilité et une résolution angulaire améliorée de plus de deux ordres de grandeur par rapport aux meilleurs instruments ayant opéré (ou devant opérer) vers 50 keV, deux atouts maîtres pour approfondir les sites des phénomènes cosmiques de haute énergie. Pour peu que son développement soit entrepris sans tarder, SIMBOL-X pourrait entrer en service à la fin de la décennie. La situation est similaire pour l'autre projet, MAX, une mission qui se propose de mettre en œuvre des concentrateurs à diffraction de Laue, seul dispositif apte à focaliser efficacement le rayonnement gamma bien au-delà de 100 keV. Cette technique impose une bande passante spectrale plutôt réduite; aussi la mission MAX en retient-elle deux, à mettre en œuvre simultanément, chacune large d'environ 100 keV: la première, centrée vers 850 keV, avec pour objectif principal l'étude de l'émission de la raie à 847 keV résultant de la chaîne de décroissance du ^{56}Ni , radio-isotope abondamment produit dans les supernovæ de type Ia par nucléosynthèse explosive; la seconde, centrée vers 500 keV, avec comme objectif principal l'étude de l'émission de la raie à 511 keV résultant de l'annihilation électron-positon.

Outre ces projets issus de la communauté française, des missions de plus grand style, mais à plus long terme, se proposent de mettre en œuvre la technique des vols en formation. Citons ainsi XEUS, le successeur de XMM-Newton à l'ASE. Monté à partir de l'ISS, XEUS pourrait, au cours de la prochaine décennie, offrir aux astronomes un observatoire à rayons X aux possibilités encore jamais atteintes en terme de sensibilité,

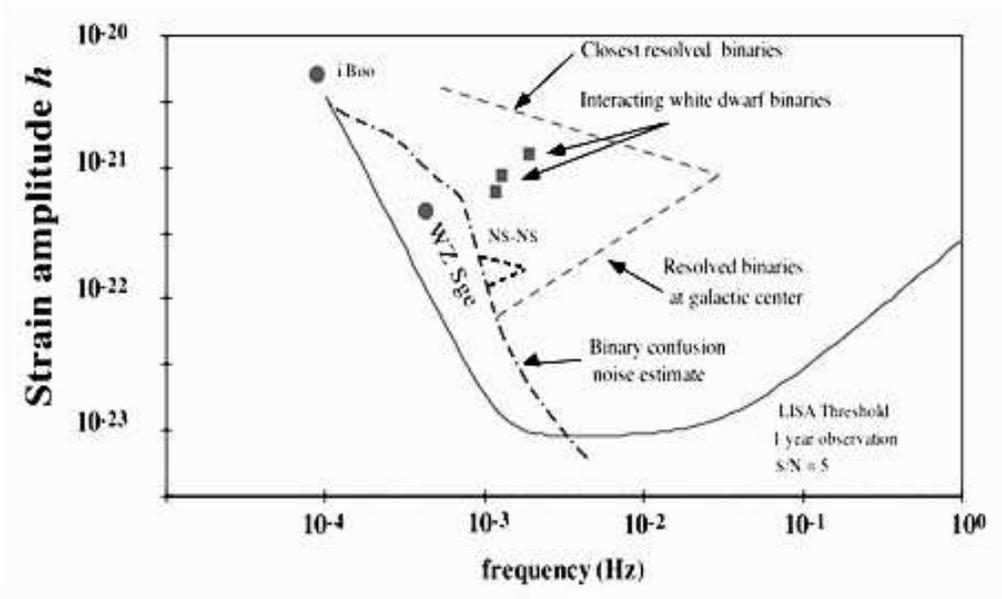


FIG. 10 – *Limites de sensibilité de LISA en fonction de la fréquence.*

résolution angulaire et résolution spectrale. XEUS pourrait aussi disposer d'un détecteur focal approprié aux études à haute résolution temporelle apportant un gain en sensibilité d'au moins un ordre de grandeur par rapport à Rossi-XTE. Citons aussi MAXIM, un ambitieux projet américain qui pousse la résolution angulaire dans la bande X à des niveaux qui sont encore aujourd'hui l'apanage exclusif des interféromètres radio. Les vols en formation offrent également la possibilité de détecter les ondes gravitationnelles à basse fréquence (en-dessous du Hz) inaccessibles depuis le sol en raison du bruit sismique (voir section 3.1.4). C'est le cas de la mission LISA, à l'étude dans un cadre NASA-ASE et qui pourrait voir le jour au début de la prochaine décennie. Le dispositif expérimental met en œuvre un réseau interférométrique constitué de trois satellites volant en formation, distants chacun de 5×10^6 km et évoluant en orbite solaire à 50×10^6 km de la Terre, avec des faisceaux laser entre chaque satellite pour mesurer toute variation de chemin optique à 20 pm près. Sa plage de sensibilité (figure 10) pourrait aller jusqu'à 10^{-3} - 10^{-4} Hz. LISA permettra de détecter des systèmes binaires plus longtemps avant la coalescence finale et aussi d'étudier la coalescence de trous noirs massifs jusqu'à des distances de l'ordre du Gpc. Pour terminer ce panorama de grandes missions à l'étude, il convient de citer la mission américaine Constellation-X, qui, sans utiliser la technique des vols en formation, met en jeu simultanément 4 grands satellites pour accroître d'un facteur 100 la sensibilité de détection dans la bande X. Citons également la mission EXIST qui, elle aussi, se propose de pallier les capacités limitées d'emport des lanceurs en assemblant progressivement à bord de l'ISS un vaste réseau de dispositifs à ouverture codée totalisant une surface de détection de 8 m^2 pour un champ de $75^\circ \times 180^\circ$, offrant ainsi dans la bande de 10 à 100 keV une sensibilité accrue d'un facteur 20 par rapport à celle d'INTEGRAL.

4 Situation actuelle des groupes français

4.1 Les équipes et les méthodes de travail

L'étude des phénomènes cosmiques de haute énergie est une composante importante de cette discipline naissante appelée (faute de mieux) "Astro-particules"⁵ parce qu'elle rassemble des astrophysiciens et des physiciens des particules. En France, ce regroupement s'est essentiellement effectué au cours des dix dernières années. Aujourd'hui, les groupes français sont présents dans *tous* les secteurs de l'astrophysique des hautes énergies. Ce spectaculaire développement oblige cependant à poser les questions suivantes :

- **Ces groupes ont-ils la taille critique pour s'imposer dans la compétition mondiale ?**

Qu'il s'agisse du domaine spatial ou d'expériences au sol, les groupes français ont pris une part importante à la construction, à la mise au point et à l'étalonnage des nouveaux instruments. Le savoir-faire acquis dans ces techniques est un atout important pour l'avenir. C'est cependant la phase d'analyse qui conditionne le retour scientifique de l'expérience. Cette nouvelle phase doit souvent coexister avec les tâches instrumentales (construction par étapes ou mise à niveau progressive du détecteur, suivi et connaissance de l'instrument, réflexion sur les projets ultérieurs). Il est donc important de s'assurer que les équipes ont la taille suffisante pour mener de front ces différentes activités. De plus, dans la phase d'analyse, l'interdisciplinarité⁶ est essentielle : le choix des objectifs prioritaires, la programmation d'observations multi-longueurs d'onde, l'interprétation des données, nécessitent la collaboration étroite des physiciens et astrophysiciens, expérimentateurs et théoriciens. Lors de la réunion annuelle du GdR, le 27 Juin 2002, la discussion générale a mis en évidence dans presque tous les secteurs (satellites XMM et INTEGRAL, astronomie gamma au sol, ANTARES) une réelle inquiétude sur la taille des groupes et la difficulté de mener de front les tâches instrumentales, la prise de données sur des sites éloignés (pour les expériences au sol) et l'analyse. Le manque de physiciens "post-doctoraux" est la cause principale de cette inquiétude. Il est pourtant essentiel de donner à l'analyse un poids suffisant si l'on veut éviter de laisser aux collaborateurs et/ou aux concurrents le bénéfice des principales découvertes.

- **Ces groupes sont-ils bien préparés à un travail interdisciplinaire ?**

L'analyse des données doit se prolonger par un travail d'interprétation qui, à son tour, peut déboucher sur des propositions d'observations coordonnées à d'autres longueurs d'onde ou avec d'autres messagers. Cette méthode de travail, familière aux astrophysiciens, ne se développera que dans les équipes intégrant réellement les deux communautés. Cette intégration, déjà réalisée en astronomie gamma (dans l'espace et au sol) devra se concrétiser dans l'ensemble des expériences du domaine.

Une des entraves à cette intégration tient à la structure des grands projets au sol, conduits, comme les expériences auprès d'accélérateurs, par des collaborations qui restent propriétaires de leurs données. Les astrophysiciens sont plutôt habitués à des

5. Cette discipline inclut en outre une forte composante de cosmologie.

6. Elle peut aussi être importante dans la phase de conception.

instruments ouverts aux demandes d'observations issues de la communauté et sélectionnées par des comités appropriés. Ce fonctionnement "en observatoire" est aussi celui des télescopes spatiaux, en dehors d'une fraction de temps garanti aux laboratoires constructeurs. Compte-tenu des importants développements mis en œuvre dans la réalisation des nouvelles techniques et de la complexité du contrôle de la prise de données et de l'étalonnage, il est légitime que des expériences comme HESS, ANTARES, Auger ou Virgo soient, au moins dans un premier temps, propriétaires de leurs données, les astrophysiciens participant alors en tant que membres de la collaboration. Il faut toutefois encourager les associations entre expériences pour des observations ou des analyses conjointes. De plus, après quelques années de fonctionnement, les expériences à champ de vue restreint comme HESS pourraient probablement s'ouvrir plus largement à la communauté pour définir leur programme d'observations; elles devraient alors fournir des données corrigées des principaux effets instrumentaux. Il est important qu'une réflexion en ce sens soit lancée dès maintenant.

4.2 Les dates-clés de la programmation

Les projets présentés plus haut peuvent se classer en deux catégories, selon le degré d'incertitude sur la sensibilité requise :

- L'astronomie X fournit maintenant des catalogues de plusieurs dizaines de milliers de sources et l'astronomie gamma en satellite atteint le stade de maturité (voir la figure 1); même aux énergies du TeV, on peut sans grande incertitude estimer à plusieurs dizaines le nombre minimal de sources accessibles aux nouveaux instruments. Dans le domaine des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie, si l'existence de la coupure GZK reste encore en débat, il est sûr que l'expérience Auger va apporter un progrès considérable dans la mesure de l'extrémité du spectre et de l'anisotropie.
- En revanche, les prévisions théoriques sur les flux de neutrinos et sur l'intensité des ondes gravitationnelles peuvent différer de plusieurs ordres de grandeur d'un modèle à l'autre. Une heureuse surprise est possible avec les détecteurs de première génération comme ANTARES ou Virgo, mais les équipes engagées dans ces domaines ont déjà en tête les étapes suivantes : détecteur de 1 km^3 pour les neutrinos, interféromètres de génération suivante pour les ondes gravitationnelles. On peut se rappeler à cet égard le long cheminement de l'astronomie gamma au TeV avant la première détection dans ce domaine en 1989.

Dans le premier groupe d'expériences, le retour scientifique est garanti et l'analyse va rapidement prendre une part dominante dans le travail des physiciens. Néanmoins, il faut assurer la permanence d'une réflexion sur des progrès instrumentaux, éventuellement par le biais de réseaux européens (nouveaux photodétecteurs par exemple). Dans le second groupe, la part de développement instrumental restera dominante, même si quelques sources sont détectées car cela constituera un puissant encouragement pour passer à l'étape suivante. Afin de maintenir un équilibre entre les deux types d'expériences, il sera important de faire un premier bilan après deux ans de fonctionnement des détecteurs de première génération dans les nouvelles astronomies, c'est-à-dire aux alentours de 2005

ou 2006. Pour les expériences spatiales non encore programmées, les contraintes budgétaires et les engagements du CNES dans d'autres domaines constituent de graves sources d'inquiétude pour la communauté des hautes énergies.

4.3 L'évolution des moyens des groupes français en astrophysique des hautes énergies

Plusieurs des projets de détecteurs au sol présentés plus haut ont été partiellement financés par le programme "Astro-particules" du CNRS mis en place il y a 3 ans, surtout initialement pour l'observatoire Pierre Auger. Il est évidemment important que ce programme soit reconduit à partir de 2004. Le GdR "Phénomènes Cosmiques de Hautes Énergies" dont le budget représente une petite partie du programme "Astro-particules" pourrait, en devenant programme national, dépasser son actuel rôle d'animation scientifique et attribuer des financements complémentaires de R & D aux projets.

Le développement du secteur "Astro-particules", considéré comme une priorité au CNRS, passe aussi par un renforcement des équipes de chercheurs notamment au niveau post-doctoral. Pour les chercheurs du CNRS, la mise en place d'une commission interdisciplinaire associant des représentants des sections 02, 03 et 14 et ayant compétence pour le recrutement est certainement un bon point de départ, mais il restera à harmoniser les politiques de ces commissions ("Faut-il ou non imposer un séjour post-doctoral à l'étranger pour les candidats?") et à clarifier les modalités du suivi ultérieur des carrières.

Les projets en astrophysique des hautes énergies nécessitent une gestion lourde et un contrôle de qualité rigoureux, qu'il s'agisse de projets spatiaux ou de grosses expériences au sol comparables à celles qui fonctionnent auprès des accélérateurs. Même si une part de travail plus importante que par le passé doit être confiée à l'industrie (ce qui implique des budgets tenant compte du surcoût qui en résulte), les laboratoires constructeurs garderont toute leurs responsabilités dans la conception des détecteurs et le suivi des projets. Il est donc essentiel que leur potentiel d'ingénieurs soit maintenu et qu'ils disposent des compétences administratives pour bien rédiger les cahiers des charges.

Enfin, il est important de prévoir les besoins en calcul et en ingénieurs informaticiens, non seulement des expériences, mais aussi des groupes théoriques. On a signalé plus haut la complexité des simulations numériques propres à la magnéto-hydrodynamique, nécessaires pour comprendre l'évolution (non stationnaire) des disques d'accrétion et des jets. Il en va de même des calculs de signaux d'ondes gravitationnelles émises dans des phénomènes catastrophiques comme la coalescence de trous noirs. Dans le domaine expérimental, la simulation des gerbes hadroniques d'énergie ultra-haute, nécessaire pour l'analyse des expériences Auger et EUSO, nécessite aussi des codes numériques très lourds.

4.4 L'échelle européenne

L'astrophysique des hautes énergies met en œuvre des collaborations internationales et le besoin d'une coordination à l'échelle européenne se fait sentir. C'est dans ce contexte qu'a été créé le comité ApPEC ("Astro-particle Physics European Committee") avec comme objectif de coordonner les actions des groupes européens dans les expériences lourdes (hors projets spatiaux) en astrophysique des hautes énergies et en cosmologie,

de les représenter auprès des instances communautaires et de donner le cas échéant des avis scientifiques sur les projets. Une telle structure est évidemment nécessaire et on espère qu'elle permettra d'obtenir plus facilement des financements européens. Elle a déjà rapproché utilement les équipes de Virgo et de Geo autour d'un réseau commun sur les ondes gravitationnelles. Au départ, les comités ApPEC se sont pour l'essentiel constitués à partir de physiciens des particules dont les instituts sont le plus souvent à l'origine des projets en question. Toutefois, l'expérience acquise avec le GdR PCHE nous a montré que l'évaluation scientifique dans ces domaines doit se faire en liaison avec les astrophysiciens ; en effet, les deux communautés n'ont pas toujours au départ la même perception d'un enjeu (scientifique ou technique) et leur dialogue est vraiment indispensable. Il est donc très souhaitable que l'ApPEC évolue en renforçant sa composante astrophysique.

4.5 Le rôle du GdR PCHE

Le GdR PCHE constitue un point de contact irremplaçable entre diverses communautés (physiciens des particules et astrophysiciens, expérimentateurs ou observateurs et théoriciens) et fournit une vision globale de la problématique des phénomènes cosmiques à haute énergie en associant expériences spatiales et expériences au sol, avec différents messagers et à plusieurs longueurs d'onde. En ce sens, son conseil scientifique contribue à définir une démarche cohérente des groupes français dans ce domaine. Le GdR dont le budget représente une petite partie du programme "Astro-particules" du CNRS pourrait, en devenant programme national, dépasser son rôle actuel d'animation scientifique et attribuer des financements complémentaires aux projets pour des actions de R & D. Le GdR (ou le futur programme national) doit aussi continuer à jouer son rôle d'aide à l'évaluation des projets. Il a évidemment vocation à s'intégrer dans une structure analogue au niveau européen.

5 Recommandations

Afin d'assurer aux diverses expériences et études couvertes par le GdR «Phénomènes Cosmiques de Haute Énergie» le poids critique minimal pour s'imposer dans la compétition mondiale, les recommandations du conseil scientifique du GdR sont les suivantes:

- Pour favoriser la coordination interdisciplinaire entre nos instituts, il faut évidemment renouveler le programme "Astro-particules" du CNRS et le GdR, ce dernier pouvant se transformer en programme national.
- Afin de mieux définir une politique scientifique cohérente, les directions scientifiques doivent donner aux conseils scientifiques (GdR, IN2P3, INSU) un cadrage budgétaire qui leur permette de débattre des priorités. La discussion des projets au coup par coup ne suffit pas : il faut que les instances qui jugent du mérite scientifique des propositions soient étroitement liées avec celles qui font les choix financiers.
- Pour les grands projets, l'ApPEC devrait aider à mettre en place des collaborations européennes. Il est important que ce comité soit élargi à la communauté astrophysique.

- Il serait très souhaitable d'assouplir les conditions d'embauche temporaire de chercheurs post-doctoraux. Tout en tirant profit des échanges tant à l'échelle nationale qu'à l'échelle internationale, on pourrait ainsi mieux répartir les ressources humaines entre les grands projets en fonction de leur stade de développement.
- L'heure des départs massifs à la retraite est l'occasion de revoir le rôle des ingénieurs et des techniciens. Il est nécessaire de préserver dans nos laboratoires la capacité de concevoir et de réaliser rapidement des petites séries d'appareils spécifiques aux expériences. Une partie du personnel ITA doit aussi être spécialisée dans la préparation des dossiers de sous-traitance d'appareils plus importants. Il faut enfin souligner que les économies réalisées par la diminution du corps des ingénieurs seront partiellement compensées par les coûts supplémentaires dus à la sous-traitance industrielle.

6 Appendice : Liste des sigles des expériences, projets et instruments

- **ACIGA** = *Australian Consortium for Interferometric Gravitational wave Astronomy*:
Projet australien de détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles.
- **AGASA** = *Akeno Giant Air Shower Array*:
Grand réseau de détecteurs au sol en fonctionnement à Akeno (Japon) pour l'étude des rayons cosmiques d'énergie ultra-haute.
- **AGILE** = *Astro-rivelatore Gamma a Immagini LEggero*:
Projet de satellite de l'Agence Spatiale Italienne (ASI) pour l'astronomie gamma de haute énergie. Il devrait être lancé quelques années avant GLAST, mais ses performances seront au niveau de celles d'EGRET.
- **AMANDA** = *Antarctic Muon And Neutrino Detector Array*:
Télescope à neutrino installé au Pôle Sud par une collaboration à dominante américaine; la version actuelle AMANDA II a une surface effective d'environ 0,1 km².
- **AMS** = *Alpha Magnetic Spectrometer*:
Projet d'expérience sur l'antimatière cosmique sur la station spatiale internationale. L'expérience, menée par une collaboration mondiale (à participation française) apportera aussi des mesures précises sur les spectres et la composition (électrons, protons et noyaux) du rayonnement cosmique jusqu'à quelques TeV. L'installation est prévue pour 2005-2006.
- **ANTARES** = *Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss Environmental RESearch*:
Télescope à neutrino dans la Méditerranée au large de Toulon en cours d'installation. Sa surface effective sera de l'ordre de 0,1 km². Le détecteur, exploité par une collaboration européenne à forte composante française, devrait être complet en 2004.

- **ASCA** = *Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics*:
Satellite japonais dans le domaine des rayons X ayant fonctionné de 1993 à 2001.
- **Auger** = *Observatoire "Pierre Auger"*:
Projet de grand réseau de détecteurs au sol et de télescopes à fluorescence balisant 3000 km² en Argentine pour l'étude des rayons cosmiques d'énergie ultra-haute. L'installation (dont une partie est en fonctionnement) est exploitée par une collaboration mondiale (à participation française) et devrait être complètement opérationnelle en 2004.
- **BAT** = *Burst Alert Telescope*: voir Swift
- **Beppo-SAX** = *Satellite per l'Astronomia X*:
Satellite italien (à participation néerlandaise) dans le domaine des rayons X jusqu'à 300 keV, comportant 4 instruments à petit champ et 2 instruments à grand champ. La mission, qui a duré de 1996 à Avril 2002, s'est particulièrement illustrée en localisant avec précision plusieurs sursauts gamma, permettant ainsi l'observation de leur émission rémanente par les télescopes au sol.
- **CANGAROO** = *Collaboration of Australia and Nippon for GAMMA-Ray Observatory in the Outback*:
Télescopes à effet Tcherenkov atmosphérique pour l'astronomie gamma installés près de Woomera (Australie) et exploités par une collaboration de groupes japonais et australiens. Le projet CANGAROO III est un ensemble stéréoscopique de 4 télescopes dont un fonctionne. L'ensemble devrait être complet en 2003-2004.
- **CAT** = *Cherenkov Array at Thémis*:
Télescope d'imagerie à effet Tcherenkov atmosphérique installé auprès de l'ancienne centrale solaire "Thémis" près d'Odeillo (Pyénées Orientales). Son seuil est de 250 GeV. Il fonctionne depuis 1996 et devrait être arrêté au plus tard en 2004.
- **CELESTE** = *Cherenkov Low Energy Sampling and Timing Experiment*:
Télescope à effet Tcherenkov atmosphérique par échantillonnage, utilisant les héliostats de l'ancienne centrale solaire "Thémis" sur le même site que CAT. Son seuil (le plus bas des télescopes Tcherenkov actuels) est de 50 GeV. Il fonctionne depuis 1998 et devrait être arrêté au plus tard en 2004.
- **Chandra** :
Satellite X de la NASA, lancé en Juillet 1999. C'est l'une des deux principales missions X actuelles combinant haute résolution angulaire et haute résolution spectrale, l'autre étant le satellite européen XMM-Newton.
- **Compton-GRO** = *Compton Gamma-Ray Observatory*:
Satellite de la NASA consacré à divers aspects de l'astronomie gamma (1991-2000). Il comportait 4 détecteurs : BATSE (*Burst And Transient Source experiment*) affecté à l'étude des sursauts gamma ; OSSE (= *Oriented Scintillation Spectrometer Experiment*) et COMPTEL (*COMPTon TELEscope*) pour les gamma de basse énergie ; enfin, EGRET (voir cette rubrique) pour les gamma de haute énergie.

- **Constellation X :**
Projet de nouvelle génération de satellites X envisagé par la NASA pour la prochaine décennie.
- **ECLAIRs :**
Projet de micro-satellite consacré aux sursauts gamma et particulièrement à leur émission prompte dans les domaines X et gamma. Le projet est soumis au CNES.
- **EGRET = *Energetic Gamma-Ray Experiment Telescope* :**
Télescope gamma spatial (1991-2000) couvrant la gamme de 100 MeV à quelques dizaines de GeV. Le 3^e catalogue d'EGRET comporte environ 300 sources.
- **EUSO = *Extreme Universe Space Observatory* :**
Projet d'expérience sur les rayons cosmiques d'énergie extrême, à bord de la station spatiale internationale. Il s'agit d'observer l'atmosphère depuis l'espace pour détecter la lumière de fluorescence des gerbes géantes. L'installation est envisagée pour la fin de la présente décennie.
- **Geo 600 :**
Détecteur d'ondes gravitationnelles construit près de Hanovre (Allemagne) par une collaboration germano-britannique. Il s'agit d'un interféromètre dont les bras font 600 m.
- **GLAST = *Gamma-Ray Large Area Space Telescope* :**
La future grande mission spatiale de la NASA dans le domaine des gamma de haute énergie. Des laboratoires européens (notamment français) et japonais participent au projet. Le lancement est prévu pour 2006.
- **GRANAT :**
Satellite russe (1989-1998) comportant des détecteurs de rayons X et de gamma de basse énergie dont le télescope-imageur à masque codé SIGMA, construit par la France.
- **HEGRA = *High Energy Gamma-Ray Astronomy* :**
Ensemble de 5 télescopes d'imagerie à effet Tcherenkov atmosphérique permettant l'observation stéréoscopique des gerbes cosmiques. L'expérience, exploitée par une collaboration germano-espagnole est installée à La Palma (Iles Canaries, Espagne) et fonctionne depuis 1992.
- **HETE-2 = *High Energy Transient Explorer* :**
Satellite de la NASA (à participation française et japonaise) lancé en Octobre 2000 pour l'étude des sursauts gamma.
- **HESS = *High Energy Stereoscopic System* :**
Ensemble de 4 télescopes d'imagerie à effet Tcherenkov atmosphérique permettant l'observation stéréoscopique des gerbes cosmiques. L'installation, située en Namibie, est exploitée par une collaboration essentiellement franco-allemande et a emprunté beaucoup aux expériences CAT et HEGRA. Le premier télescope, dont le seuil est de 90 GeV, a commencé à prendre des données en Juin 2002. L'ensemble devrait être complet au début de 2004.

- **Hi-Res Fly’s Eye :**
 Détecteur à fluorescence (“œil de mouche” à haute résolution) pour l’étude des rayons cosmiques d’énergie ultra-haute, situé dans l’Utah (États-Unis). Succédant au premier “Fly’s Eye” des années 1980, il est composé de deux ensembles de télescopes (les deux “yeux”) : Hi-Res I (depuis 1997) et Hi-Res II (depuis 1999).
- **IBIS = *Imager on Board the Integral Satellite* :** voir INTEGRAL.
- **Ice Cube :**
 Projet (essentiellement américain) de télescope à neutrinos de 1 km³ qui doit s’installer au Pôle Sud et prendre le relais d’AMANDA II.
- **INTEGRAL = *IN*Ternational *Gamma-Ray Astrophysics Laboratory* :**
 La prochaine mission de l’Agence Spatiale Européenne pour l’astronomie gamma de basse énergie. Le lancement a eu lieu le 17 Octobre 2002. Le satellite comporte deux instruments principaux : le spectromètre SPI et l’imageur à masque codé IBIS ; le détecteur de ce dernier est composé de deux couches : ISGRI (CdTe) et PICsIT (CsI). L’ensemble est complété par un moniteur à rayons X (JEM-X) et un moniteur optique (OMC).
- **ISDC = *INTEGRAL Science Data Center* :** voir INTEGRAL.
- **ISGRI :** voir INTEGRAL.
- **ISS = *International Space Station*.**
- **JEMC-X = *Joint European X-ray Monitor* :** voir INTEGRAL.
- **KASCADE = *KARlsruhe Shower Core and Array DEtector* :**
 Réseau de détecteurs au sol installé à Karlsruhe (Allemagne) pour l’étude des gerbes cosmiques dans la région du genou du spectre. Il fonctionne depuis 1996.
- **LCGT = *Large Scale Cryogenic Gravitational wave Telescope* :**
 Projet japonais d’interféromètre cryogénique à l’échelle kilométrique, à l’horizon 2005.
- **LIGO = *Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory* :**
 Observatoire américain d’ondes gravitationnelles constitué de grands interféromètres dont les bras font 4 km : ils sont installés sur deux sites : Hanford (État de Washington) et Livingston (Louisiane). Leur fonctionnement à la sensibilité nominale est prévu pour 2003. Le site de Hanford abrite aussi un interféromètre de 2 km.
- **LISA = *Laser Interferometer Space Antenna* :**
 Projet commun de la NASA et de l’Agence Spatiale Européenne de détecteur spatial d’ondes gravitationnelles pour la prochaine décennie. Le projet utilise la technique de vol en formation.
- **MAGIC = *Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov telescope* :**
 Projet de télescope d’imagerie à effet Tcherenkov atmosphérique de 17 m de diamètre à bas seuil (50 GeV) en cours d’installation à La Palma (Iles Canaries, Espagne). Exploité par une collaboration germano-espagnole, il devrait commencer à prendre des données à la fin de 2002.

- **MAX** :
Projet spatial de “lentille gamma” pour l’astronomie gamma nucléaire, soumis au CNES.
- **MAXIM** = *Micro Arc-second X-ray Imaging Mission*
Projet spatial américain à long terme pour l’astronomie X.
- **NESTOR** = *Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research* :
Projet de télescope à neutrino dans la Méditerranée au large de Pylos (Grèce). Des tests sont en cours sur une “tour” constituant un élément du détecteur (7 tours = 0,15 km²). Le projet est mené par une collaboration européenne (Grèce, Russie, Allemagne, Suisse) et américaine.
- **OMC** = *Optical Monitoring Camera* : voir INTEGRAL.
- **OSSE** = *Oriented Scintillation Spectrometer Experiment* : voir Compton-GRO.
- **PICsIT** : voir INTEGRAL.
- **ROSAT** = *Röntgen SATellite*
Satellite allemand (à participation américaine et britannique) dans le domaine des rayons X, ayant fonctionné de 1990 à 1999.
- **Rossi-XTE** = *X-ray Timing Explorer*
Satellite X de la NASA lancé en 1995 et spécialisé dans l’étude de la variabilité des sources (haute résolution temporelle).
- **SIGMA** : voir GRANAT.
- **SIMBOL-X**
Projet de satellite X de nouvelle génération, soumis au CNES. Le projet utilise la technique de vol en formation.
- **STACEE** = *Solar Tower Atmospheric Cherenkov Effect Experiment*
Télescope à effet Tcherenkov atmosphérique par échantillonnage utilisant les héliostats de la centrale solaire de Sandia (USA, Nouveau Mexique). Son seuil en énergie, actuellement de l’ordre de 100 GeV, devrait prochainement atteindre 70 GeV.
- **Swift**
Prochaine mission spatiale de la NASA consacrée à l’étude des sursauts gamma. Son lancement est prévu pour 2003. Le satellite comportera trois instruments : BAT (*Burst Alert Detector*), le télescope à rayons X (XRT) et le télescope ultra-violet et optique (UVOT).
- **TAMA** :
Prototype japonais de détecteur d’ondes gravitationnelles. Il s’agit d’un interféromètre dont les bras font 300 m. Il a atteint en 2002 la sensibilité de $5 \times 10^{-21} / \sqrt{\text{Hz}}$ (densité spectrale de bruit).
- **UVOT** = *Ultra-Violet and Optical Telescope* : voir Swift.

- **VERITAS** = *Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System* :
Projet américain de 7 télescopes d'imagerie à effet Tcherenkov atmosphérique permettant l'observation stéréoscopique des gerbes cosmiques, proposé par la collaboration travaillant actuellement à l'Observatoire Whipple (Arizona, États-Unis). La construction d'un prototype a été approuvée.
- **Virgo** :
Détecteur franco-italien d'ondes gravitationnelles installé à Cascina (Italie). Il s'agit d'un interféromètre dont les bras font 3 km. La mise en service est prévue pour 2003. Il devrait atteindre une performance comparable à celle de LIGO ($10^{-22}/\sqrt{\text{Hz}}$ en densité spectrale de bruit).
- **Whipple Observatory** :
Le premier télescope d'imagerie à effet Tcherenkov atmosphérique. Il fonctionne depuis la fin des années 1980 à l'Observatoire Whipple (Arizona, États-Unis) et a subi depuis diverses améliorations. Son seuil actuel est d'environ 200 GeV.
- **XEUS** = *X-ray Evolving Universe Spectroscopy Mission* :
Projet de nouvelle génération de satellites X envisagé par l'Agence Spatiale Européenne pour la prochaine décennie. Le projet utilise la technique de vol en formation.
- **XMM-Newton** = *X-ray Multi-mirror Mission* :
Satellite X de l'Agence Spatiale Européenne, lancé en Décembre 1999. C'est l'une des deux principales missions X actuelles combinant haute résolution angulaire et haute résolution spectrale, l'autre étant le satellite américain Chandra.
- **XRT** = *X-Ray Telescope* : voir Swift.