

Groupement de Recherches
« Phénomènes Cosmiques de Haute Énergie »

Rapport d'activité 2004-2007

Bernard Degrange
Laboratoire Leprince-Ringuet
École polytechnique et IN2P3/CNRS

Le GdR « Phénomènes Cosmiques de Haute Énergie »
Rapport d'activité 2004-2007

Bernard Degrange
Laboratoire Leprince-Ringuet
École polytechnique et IN2P3/CNRS

1. Objectifs et thèmes scientifiques

Le groupement de recherche « Phénomènes Cosmiques de Haute Énergie » (GdR PCHE ou GdR 2420) a été créé en 2000 dans le cadre du programme interdisciplinaire (PID) « Astro-particules ». Le domaine scientifique couvert par le GdR porte sur les objets et les mécanismes qui produisent les particules énergétiques parcourant l'Univers, sur la propagation de ces dernières dans les différents milieux cosmiques, de même que sur les rayonnements non thermiques, voire non photoniques, émis dans ces phénomènes. Il s'agit donc d'astrophysique, mais les techniques de détection sont souvent celles de la physique nucléaire ou de la physique des particules et l'interprétation théorique fait appel à des disciplines variées : astrophysique, physique nucléaire, physique des particules, magnétohydrodynamique, relativité générale et cosmologie.

Entre 1990 et 2000, à la suite des progrès apportés surtout par l'astronomie spatiale en rayons X et gamma, divers projets expérimentaux à forte participation française voyaient le jour ; ils visaient à détecter différents « messagers » issus de ces phénomènes cosmiques : rayons X durs, rayons gamma dans différents domaines spectraux jusqu'à plusieurs dizaines de TeV, neutrinos de haute énergie, rayons cosmiques chargés dans plusieurs gammes d'énergie jusqu'à plusieurs Joules, ondes gravitationnelles. Il était donc important de mettre en contact les différents spécialistes issus de trois communautés, physique nucléaire et des particules, astrophysique, physique théorique, dans le cadre du GdR PCHE. Ce groupement de recherche est lui-même partie intégrante du programme interdisciplinaire (PID) « Astro-particules » qui couvre un champ plus vaste incluant la cosmologie et qui finance également des actions de R&D ou de communication. La mission spécifique du GdR PCHE est *l'animation scientifique de son domaine propre*. Pour cela, le GdR procède par appels d'offres annuels pour soutenir financièrement, soit des écoles d'été ou des colloques, soit des groupes de travail « transversaux », c'est-à-dire centrés sur un type d'objets ou de phénomènes et réunissant des observateurs spécialistes de différents domaines spectraux et des théoriciens. Le conseil scientifique du GdR sélectionne les demandes à financer et fixe les montants des subventions. L'atelier annuel du GdR est organisé dans le cadre des journées de la Société Française d'Astronomie et d'Astrophysique (SF2A). Enfin, à la demande des directions scientifiques, le GdR peut contribuer à la prospective et à l'expertise de projets de

son ressort. Le rapport d'activité des 4 premières années du GdR peut être téléchargé à partir du site web suivant : <http://polywww.in2p3.fr/gdr/> (cliquer sur « Rapport d'activité à 4 ans »).

Rappelons rapidement ci-dessous les principaux thèmes scientifiques propres au GdR :

- ***L'origine des rayons cosmiques chargés*** : ces particules étant constamment déviées par les champs magnétiques de la Galaxie ne nous donnent sur leur source et sur le milieu interstellaire que des informations indirectes, sauf peut-être aux énergies extrêmes de l'ordre de 10^{20} eV. Les messagers neutres et stables (photons X et gamma, neutrinos) sont donc des outils privilégiés pour ces études. Les astronomies X et gamma ont déjà mis en évidence divers sites d'accélération : vestiges de supernovæ en coquille, nébuleuses de pulsars et vents stellaires dans notre Galaxie, mais aussi des objets extragalactiques, notamment certains noyaux actifs de galaxies, les « blazars ».
- ***Les phénomènes explosifs*** (supernovæ, hypernovæ, coalescence d'étoiles à neutrons ou de trous noirs), parfois à l'origine de sursauts gamma et sources potentielles d'ondes gravitationnelles.
- ***Les objets compacts (étoiles à neutrons et trous noirs) et les phénomènes d'accrétion et d'éjection de matière en leur voisinage***. On observe ces phénomènes à des échelles très différentes : d'une part dans les systèmes binaires émetteurs X où la masse de l'objet compact est de l'ordre d'une masse solaire ; d'autre part dans les noyaux actifs de galaxies qui abritent des trous noirs de quelques millions à quelques centaines de milliards de masses solaires.
- ***Les éventuelles particules de haute énergie issues de vestiges cosmologiques***. Selon certaines théories, la « matière noire » de l'Univers serait constituée de particules lourdes à interaction faible, qui, étant leurs propres antiparticules, s'annihileraient mutuellement dans les régions de forte concentration. Ces annihilations donneraient naissance *in fine* à des photons gamma et à des neutrinos de haute énergie, de même qu'à des antiprotons et des positons qui constitueraient un excès par rapport aux antiparticules issues des interactions des rayons cosmiques dans le milieu interstellaire.

2. L'évolution de la discipline de 2004 à 2007

2.1. Progrès scientifiques et instrumentaux

La période 2004-2007 est marquée par une progression accélérée des résultats en astronomie X et gamma, de même que par de remarquables réalisations en instrumentation touchant les nouveaux « messagers » : rayons cosmiques d'énergies extrêmes, neutrinos et ondes gravitationnelles.

De nouveaux observatoires en rayons X et gamma à forte participation française venaient d'entrer en service : les satellites de l'Agence Spatiale Européenne XMM-Newton (0,1-15 keV, lancé fin 1999) et INTEGRAL (15 keV-10 MeV, lancé fin 2002) et, au sol, l'ensemble de 4 télescopes à effet Tcherenkov atmosphérique H.E.S.S. (« High Energy Stereoscopic System ») en service en Namibie depuis décembre 2003 et couvrant le domaine de 100 GeV à quelques dizaines de TeV. Par ailleurs, les groupes français ont pu bénéficier de temps d'observation sur d'autres satellites : Chandra et Rossi-XTE dans le domaine des rayons X, mais aussi HETE-2 et SWIFT pour l'étude des sursauts gamma. Ces derniers instruments ont permis de localiser des sursauts courts et d'en étudier l'émission rémanente ; celle des sursauts longs est également suivie à partir du sol par des télescopes robotisés, tels que TAROT en France. L'association de sursauts longs avec des supernovæ a pu être établie, et les sursauts gamma ont été observés jusqu'à un « redshift » de 6, ce qui pourrait leur conférer le statut de balises cosmologiques. D'une manière générale, les études des objets nouvellement découverts aux hautes énergies ont aussi motivé des campagnes dans d'autres longueurs d'onde, notamment en radio, en infrarouge (satellite Spitzer) et en optique.

La modification du panorama est particulièrement spectaculaire au-delà de 100 GeV, l'expérience H.E.S.S. ayant décuplé le nombre de sources détectées dans ce domaine spectral (figure 1), ce qui lui a valu en 2007 le prix Descartes de l'Union Européenne. Ces découvertes et les études « multi-longueurs d'onde » associées ont donc fourni de nombreux thèmes aux groupes de travail du GdR PCHE et ont fait l'objet de plusieurs colloques soutenus par le GdR ; réciproquement, l'impact des groupes français dans leurs différentes collaborations a été renforcé par les travaux effectués dans le cadre du GdR. Nous y reviendrons dans la section 4 mais nous pouvons déjà indiquer la liste des objets étudiés : systèmes binaires émetteurs X et gamma, vestiges de supernovæ en coquille, superbulles, pulsars et nébuleuses de pulsars, région centrale de la Galaxie, fond diffus galactique, noyaux actifs de galaxie, sursauts gamma. Ajoutons enfin que le satellite GLAST de la NASA à forte participation française, qui doit être lancé en janvier 2008, devrait prochainement conduire à une nouvelle multiplication du nombre de sources dans le domaine de 100 MeV à 300 GeV.

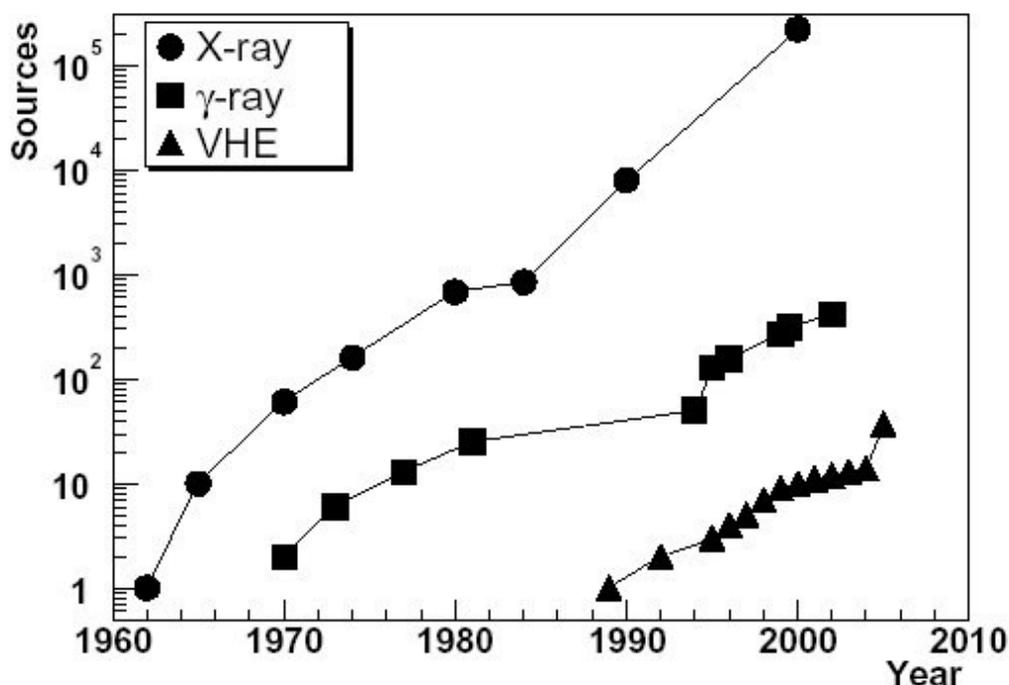


Figure 1 : Évolution en fonction des années du nombre de sources de photons X (cercles) et gamma de haute (carrés) et de très haute énergie (triangles) dans les catalogues.

Parallèlement, les grands projets concernant les « messagers » non photoniques se sont développés :

- L'observatoire Pierre Auger consacré à l'étude des rayons cosmiques d'énergies supérieures à 10^{19} eV est en cours d'achèvement en Argentine. Il combine deux techniques complémentaires de détection des gerbes atmosphériques géantes : un réseau de 1600 détecteurs Tcherenkov à eau déployés sur une zone de 3000 km^2 (opérationnel à 75% en Mai 2007) et 4 ensembles de télescopes détectant la lumière de fluorescence de l'azote produite par les gerbes. Les premiers résultats obtenus avec une partie de l'installation bénéficient déjà d'une sensibilité supérieure à toutes les expériences

antérieures sur les rayons cosmiques ultra-énergétiques ; l'existence de la coupure du spectre prédite par Greisen, Zatsepin et Kuzmin est confirmée.

- L'expérience ANTARES consiste à déployer en Méditerranée au large de Toulon un ensemble de lignes de photomultiplicateurs constituant un prototype de détecteur de neutrinos de haute énergie d'origine cosmique. Un neutrino interagissant dans le plancher océanique produit un muon qui est détecté par la lumière Tcherenkov émise dans l'eau sur son passage. Les nombreuses difficultés techniques liées à l'implantation du détecteur dans le milieu marin sont maintenant surmontées ; la première ligne fonctionne depuis le printemps 2006 et 7 lignes sur 12 sont déployées depuis le printemps 2007. Certes, la sensibilité d'ANTARES, équivalente à celle de l'expérience américaine AMANDA au Pôle Sud, est insuffisante pour détecter les faibles flux de neutrinos cosmiques attendus, mais elle fournit aux groupes français une avance significative dans le projet européen Km3Net de grand détecteur de neutrinos en Méditerranée, dont le volume pourrait être de l'ordre de plusieurs km³.
- L'interféromètre franco-italien Virgo, construit à Cascina près de Pise afin de détecter des ondes gravitationnelles, s'est très significativement rapproché de sa sensibilité nominale ; celle-ci est pratiquement atteinte au-dessus de 100 Hz. Les prises de données sont maintenant consacrées à la physique et des périodes d'observations communes avec les interféromètres américains de LIGO sont prévues.

Dans les expériences précédentes où, dans les années 2004-2007, l'effort principal portait sur l'instrumentation, plusieurs groupes de travail du GdR ont été consacrés à la prospective, tant pour la physique que pour les techniques de détection.

- Complémentarité entre l'observatoire Auger et les projets d'études des gerbes atmosphériques géantes à partir de l'espace (EUSO).
- Possibilités offertes par la détection du signal radio émis par les gerbes géantes.
- Prédiction des flux attendus de neutrinos à partir des flux de photons gamma mesurés aux très haute énergie pour différents types d'objets ; ces calculs sont importants pour la conception du futur projet Km3Net.

2.2. La communauté du GdR PCHE

En l'absence d'un recensement précis¹ qui devrait être disponible à l'automne 2007, l'évaluation approximative suivante repose sur :

- les personnes participant aux groupes de travail du GdR et celles ayant organisé des colloques ou écoles ;
- les membres des grandes expériences ou projets.

Cette évaluation, limitée au personnel permanent, fournit une borne inférieure qui doit être assez proche de la valeur réelle des effectifs. On obtient ainsi une population de 183

¹ La communauté se répartissant sur 31 laboratoires différents, une telle opération est assez lourde.

physiciens permanents (CNRS, Universitaires, CEA, Astronomes), répartis en 3 communautés :

- 89 venant de la physique nucléaire ou de physique des particules (CNRS/IN2P3 et CEA/DAPNIA/SPP) ;
- 83 venant de l'astrophysique (CNRS/INSU et CEA/DAPNIA/SAP)
- 11 venant de la physique théorique (CNRS/MPPU).

En 2003, dans un recensement exhaustif, on avait compté 227 permanents et les chiffres correspondant à chaque communauté étaient respectivement de 118, 95 et 14. La différence d'environ 20% entre les données de 2003 et la borne inférieure précédente peut être considérée comme l'effet de l'imperfection de l'évaluation provisoire. On en déduit que les effectifs du GdR PCHE en chercheurs ou enseignants-chercheurs permanents sont stables depuis 4 ans et que l'équilibre satisfaisant entre les deux communautés les plus nombreuses est maintenu. Il est plus difficile de chiffrer le personnel non permanent (doctorants et postdoctorants) sans recensement exhaustif. Cependant, le développement important du domaine dans les 4 dernières années a conduit à une offre plus importante de thèses et il est à prévoir que la population de doctorants et de postdoctorants (93 en 2003) est en augmentation. On constate donc que le GdR PCHE touche au total environ 300 chercheurs ou enseignants-chercheurs répartis dans 31 laboratoires (tableau 1). Sur le tableau 1, pour les laboratoires de physique nucléaire et de physique des particules, où les groupes sont structurés par grandes expériences, on a fait figurer ces dernières. On notera que certains laboratoires (APC, LPTA) figurent deux fois dans le tableau quand ils regroupent des physiciens de deux communautés.

Il faut également noter le rôle actif du GdR dans le brassage de ces populations. Ainsi, un groupe de travail du GdR avait, avant 2003, mis en contact les physiciens de l'IN2P3 et du CEA impliqués dans les expériences d'astronomie gamma CAT et CELESTE avec des astrophysiciens travaillant sur la modélisation des blazars. Tous se sont naturellement ensuite retrouvés membres de l'expérience H.E.S.S. où les échanges entre expérimentateurs et théoriciens ont été fructueux, les premiers se familiarisant avec la phénoménologie des sources, les seconds avec l'évolution des techniques expérimentales et la stratégie à plus long terme. L'implication des physiciens de H.E.S.S. dans des demandes d'observations conjointes avec des satellites et des radiotélescopes a aussi renforcé le contact entre les communautés d'origine. Le même processus se retrouve dans le cadre de la collaboration GLAST. C'est donc une véritable communauté « PCHE » qui est en train de se constituer, pour le moment surtout dans l'astronomie photonique, mais qui a vocation à s'étendre à plus ou moins long terme aux nouvelles astronomies : rayons cosmiques ultra-énergétiques, neutrinos et ondes gravitationnelles.

3. Le financement

Le GdR PCHE reçoit son financement de deux sources : le programme interdisciplinaire « Astro-particules » du CNRS et le CNES. La dotation du CNRS est restée constante et égale à 40 k€ par an entre 2004 et 2007. La contribution annuelle du CNES, ressource propre du GdR, fixée à 30 k€ depuis 2005, arrive maintenant chaque année avec près d'un an de retard en raison de contraintes administratives ; de plus, depuis 2006 elle est affectée par un prélèvement de TVA qui la réduit à 25086 €. Elle est alors utilisée comme report en début d'année, la contribution du programme « Astro-particules » n'étant généralement pas notifiée avant Mai ou Juin. Le tableau 2 fournit le détail des ressources et des dépenses du GdR de 2004 à 2007. En tenant compte des reports, la figure 2 illustre l'évolution des ressources et la figure 3 celle des dépenses entre 2004 et 2007. Pour 2007, dont l'exercice n'est pas achevé, deux postes de dépenses sont prévisionnels : le premier concerne l'atelier annuel du GdR (remboursement des frais d'inscription et de transport aux participants) et le second les voyages des membres du conseil scientifique du GdR. Ils ne sont pas indiqués dans le tableau 2 mais leurs contributions prévisionnelles apparaissent sur la figure 3.

Physiciens des particules (IN2P3 et CEA/DAPNIA)				Astrophysiciens (INSU et CEA/DAPNIA)	
Laboratoires	Ville	Groupes/expériences	Domaine	Laboratoire	Ville
APC Paris VII	Paris	HESS	Gamma (très hautes énergies)	APC Paris VII	Paris
		Observ. Auger	Rayons cosmiques d'énergies ultra-hautes	CESR	Toulouse
		Antares	Neutrinos (hautes énergies)	GEPI	Meudon
CENBG	Bordeaux-Gradignan	GLAST	Gamma (hautes énergies)	IAP	Paris
CPPM	Marseille	ANTARES	Neutrinos (hautes énergies)	LAOG	Grenoble
CSNSM	Orsay	Astrophysique nucléaire	Théorie	LESIA (*)	Meudon
LPTA	Montpellier	AMS-02	Rayons cosmiques en-dessous du TeV	LUTH	Meudon
		HESS	Gamma (très hautes énergies)	Observ. Aquitain	Bordeaux-Floirac
		GLAST	Gamma (hautes énergies)	OHP	St Michel
GRPHE	Mulhouse	ANTARES	Neutrinos (hautes énergies)	Observ. Strasbourg	Strasbourg
IPHC	Strasbourg	ANTARES	Neutrinos (hautes énergies)	Observ. Midi-Pyrénées	Toulouse
IPNL	Lyon	CODALEMA/Auger	Radio-détection des grandes gerbes	Observ. de Nice (**)	Nice
IPNO	Orsay	Observ. Auger	Rayons cosmiques d'énergies ultra-hautes	CEA/DAPNIA/Sap	Saclay
		Astrophysique nucléaire	Théorie	Théoriciens (MPPU)	
LAL	Orsay	Obs. Auger/CODALEMA Virgo	Rayons cosmiques d'énergies ultra-hautes Ondes gravitationnelles	Laboratoire	Ville
LAPP	Annecy-le-Vieux	AMS-02	Rayons cosmiques en-dessous du TeV	CPT	Marseille
		Virgo	Ondes gravitationnelles	IAP (GreCo)	Paris
		HESS	Gamma (très hautes énergies)	LAPTH	Annecy-le-Vieux
LLR	Palaiseau	HESS	Gamma (très hautes énergies)	LPTA	Montpellier
		GLAST	Gamma (hautes énergies)	(*) = Radio-détection des grandes gerbes (**) = Virgo	
LPNHE Paris VI & VII	Paris	Observ. Auger HESS	Rayons cosmiques d'énergies ultra-hautes Gamma (très hautes énergies)		
LPSC	Grenoble	AMS-02	Rayons cosmiques en-dessous du TeV		
		CREAM	Rayons cosmiques (TeV - 500 TeV)		
		CODALEMA/Auger	Radio-détection des grandes gerbes		

GdR PCHE (2420)

Subatech	Nantes	CODALEMA/Auger	Radio-détection des grandes gerbes
CEA/DAPNIA/SPP	Saclay	Antares HESS	Neutrinos (hautes énergies) Gamma (très hautes énergies)

Tableau 1 : *Groupes participant au GdR PCHE*

GdR PCHE (2420)

	2004		2005		2006		2007	
	SE / Programme Interdisciplinaire Astroparticules	R.P. / CNES	SE / Programme Interdisciplinaire Astroparticules	R.P. / CNES	SE / Programme Interdisciplinaire Astroparticules	R.P. / CNES	SE / Programme Interdisciplinaire Astroparticules	R.P. / CNES
Ressources	43 315,74	28 558,61	43 200,00	30 000,00	40 000,00	40 289,22	40 000,00	21 027,70
Report N-1	3 315,74	558,61	3 200,00	0,00		15 203,22		21 027,70
Dotation N	40 000,00	28 000,00	40 000,00	30 000,00	40 000,00	25 086,00	40 000,00	0,00
Dépenses	40 042,28	25 607,43	43 255,62	14 796,78	39 814,32	19 261,52	37 000,00	12 277,08
Projets scientifiques	32 010,00	24 690,00	40 000,00	7 850,00	38 720,00	16 000,00	37 000,00	11 000,00
<i>Ecoles et Colloques</i>	<i>10 040,00</i>	<i>2 960,00</i>	<i>12 000,00</i>	<i>0,00</i>	<i>14 000,00</i>	<i>12 000,00</i>	<i>12 300,00</i>	<i>5 000,00</i>
<i>Groupes de travail</i>	<i>21 970,00</i>	<i>21 730,00</i>	<i>28 000,00</i>	<i>7 850,00</i>	<i>24 720,00</i>	<i>4 000,00</i>	<i>24 700,00</i>	<i>6 000,00</i>
Réunion annuelle	6 246,00	917,43	2 223,04	6 946,78	596,27	3 261,52	0,00	0,00
<i>Frais de transport</i>	<i>3 096,00</i>	<i>177,43</i>	<i>1 783,04</i>	<i>5 516,78</i>	<i>546,27</i>	<i>1 611,52</i>		
<i>Frais d'inscription</i>	<i>3 150,00</i>	<i>740,00</i>	<i>440,00</i>	<i>1 430,00</i>	<i>50,00</i>	<i>1 650,00</i>		
Missions du Conseil Scientifique	1 786,28	0,00	1 032,58	0,00	498,05	0,00	0,00	1 277,08
Disponible	3 273,46	2 951,18	-55,62	15 203,22	185,68	21 027,70	3 000,00	8 750,62

Tableau 2 : Budget du GdR PCHE (2004-2007)

GdR PCHE (2420)

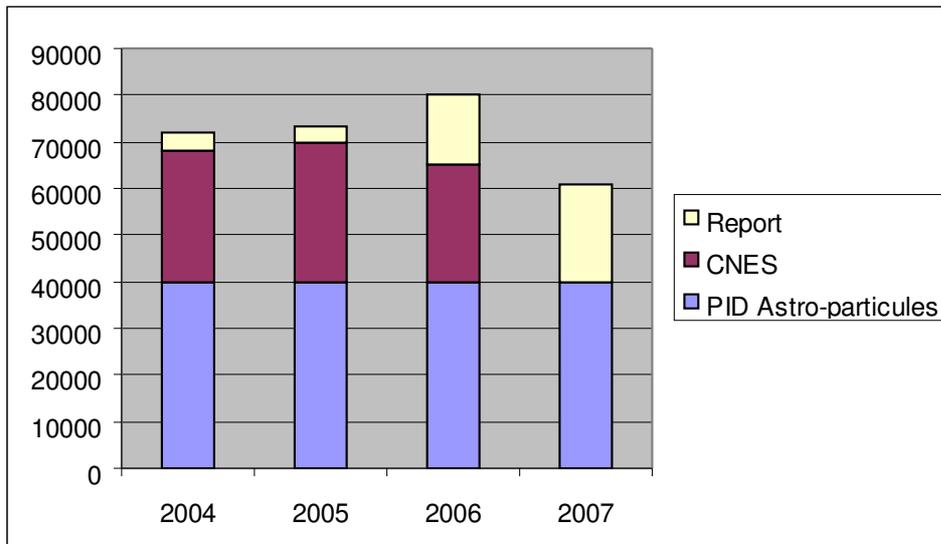


Figure 2 : Ressources du GdR PCHE

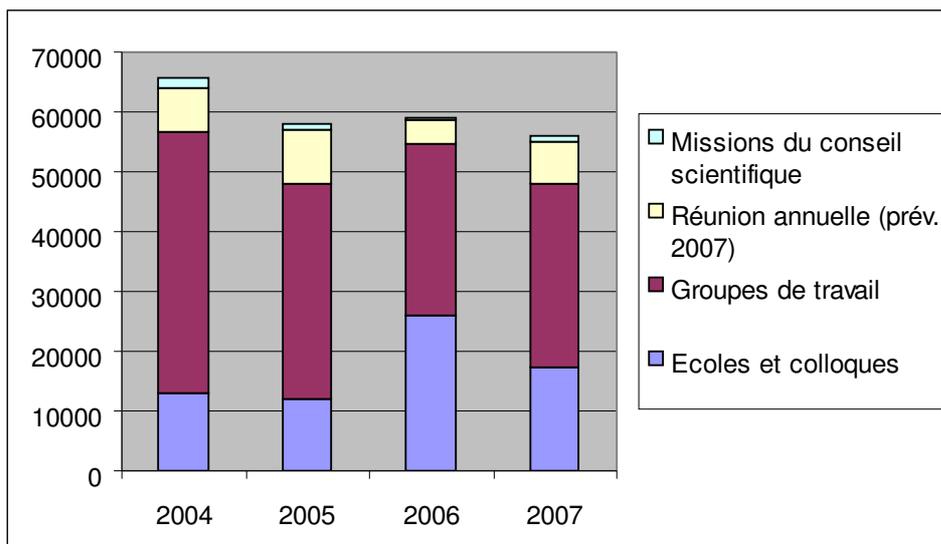


Figure 2 : Dépenses du GdR PCHE

4. Les actions de 2004 à 2007

4.1. Le conseil scientifique du GdR PCHE

Le conseil scientifique du GdR PCHE comprend 15 membres. Il a subi un renouvellement partiel au cours des 4 dernières années. Il se réunit au moins une fois par an pour examiner les réponses à l'appel d'offres. Sauf en 2007, cette séance, restreinte aux membres du conseil scientifique et aux représentants des tutelles, a été précédée par une session ouverte à l'ensemble du GdR, au cours de laquelle plusieurs groupes de travail ont présenté leurs

résultats. Le conseil scientifique met également au point le programme scientifique de l'atelier annuel du GdR. La composition actuelle du conseil scientifique est la suivante :

- Le directeur du GdR : Bernard Degrange (LLR École polytechnique).
- 4 membres nommés par le directeur de l'IN2P3 : Vincent Bertin (CPPM), Fabien Cavalier (LAL), Étienne Parizot (APC), David Smith (CENBG)
- 4 membres nommés par le directeur de l'INSU : Didier Barret (CESR), Christian Motch (Observatoire Astronomique de Strasbourg), Guy Pelletier (LAOG), Hélène Sol (LUTH).
- 4 membres nommés par le directeur du DAPNIA/CEA : Anne Decourchelle, Isabelle Grenier, Jacques Paul, Thierry Stolarczyk.
- Un membre nommé par le directeur du département MPPU pour la physique théorique : Guenter Sigl (IAP).
- Un représentant du CNES : Jean-Louis Council.

Les réponses à l'appel d'offres annuel et les rapports d'activité annuels des différents groupes de travail sont affichés sur le site web du GdR PCHE (dont l'adresse est indiquée dans la section 1) et peuvent y être consultés.

4.2. Colloques et écoles

Le tableau 3 présente les différents colloques et écoles subventionnés par le GdR PCHE de 2004 à 2007 et la somme globale allouée par année à cette fin. On y reconnaîtra les objectifs suivants :

- Écoles à caractère généraliste (ISAPP, École « Astro-particules ») ou plus spécialisé (astronomies X et gamma).
- Ateliers préparatoires à l'exploitation de futures expériences (atelier « pulsars » pour GLAST, atelier sur l'analyse des données d'ondes gravitationnelles pour Virgo, atelier sur la fluorescence pour l'observatoire Auger et le projet EUSO).
- Ateliers préparant de futurs projets d'astronomie gamma à partir du sol (Cherenkov 2005, CTA 2007).
- Conférences spécialisées (variables cataclysmiques, astrophysique nucléaire, conférences de cosmologie incluant des aspects couverts par le GdR).

4.3. Groupes de travail

Le tableau 4 présente les différents groupes de travail financés par le GdR PCHE. On y retrouve les thèmes énoncés dans la section 2, notamment ceux qui sont alimentés par les résultats des astronomies X et gamma. Les groupes évoluent d'une année sur l'autre. Certains, tout en restant dans la même thématique, modifient leur orientation en changeant de responsable. D'autres fusionnent (par exemple le groupe sur les superbulles et celui sur

l'émission diffuse). Comme les activités du GdR ne doivent pas faire double emploi avec celles qui sont propres à une expérience, certains groupes n'ont pas été prorogés quand ils se réduisaient aux membres d'une même collaboration : ce fut le cas pour le groupe « blazars » quand tous les astrophysiciens français spécialistes du sujet se sont retrouvés dans la collaboration H.E.S.S. ; ce groupe a cependant été réactivé en 2007 en prévision de l'analyse des données de GLAST prévues pour 2008. De même, le groupe sur les rayons cosmiques d'énergies extrêmes, qui rassemblait les physiciens de l'observatoire Auger et ceux du projet spatial EUSO, s'est arrêté quand ce dernier s'est trouvé considérablement retardé. Toutefois, est alors apparu un autre groupe sur la radio-détection des gerbes atmosphériques intéressant une communauté un peu plus large que celle de l'expérience Auger.

Année	Somme totale	Intitulé de l'école ou du colloque	Lieu et date	Responsable
2004	13 000 €	Astrophysics of cataclysmic variables Gravitational wave data analysis workshop International workshop on fluorescence measurement Conférence en mémoire de René Pellat	Strasbourg 2004 Annecy 2004 Habère-Poche 2005 Paris 2004	J.-M. Hameury F. Marion P. Nédélec H. Sol
2005	12 000 €	Towards a Network of Atmospheric Cherenkov Detectors VII High Energy Phenomena in the Galactic Centre Theoretical issues in Nuclear Astrophysics	Palaiseau 2005 Paris 2005 Orsay 2005	B. Degrange A. Goldwurm P. Schuck
2006	26 000 €	Inflation + 25 Observer le ciel X et gamma Theoretical issues in Nuclear Astrophysics Atelier pulsars : théorie et observation Journées jeunes chercheurs Avance sur 2007 : Ecole ISAPP	Paris 2006 Cargèse 2006 Orsay 2006 Nançay 2006 La Rochelle 2006 Seillac 2007	P. Peter J. Rodriguez P. Schuck G. Theureau R. Granier de Cassagnac D. Vignaud
2007	17 300 €	Multifrequency behaviour of high energy cosmic sources Cosmology International Conference Colloque "Cherenkov Telescope Array" Theoretical issues in Nuclear Astrophysics Atelier pulsars : théorie et observation International School on Astroparticle Physics Ecole Astroparticules	Vulcano 2007 Marseille 2007 Paris 2007 Orsay 2007 Nançay 2007 Seillac 2007 OHP 2007	D. Barret V. Le Brun M. Punch P. Schuck G. Theureau D. Vignaud R. Triay

Tableau 3 : *Colloques et écoles subventionnés par le GdR PCHE*

Groupes de travail PCHE	2004	2005	2006	2007
Région centrale de la Galaxie	A. Goldwurm			
Binaires X et gamma	Y. Fuchs	Y. Fuchs+J. Rodriguez	P.-O. Petrucci	G. Dubus
Oscillations quasi-périodiques et micro-quasars	M. Tagger			
Pulsars et vestiges de supernovæ	Y. Gallant			
Superbulles	A. Marcowith		R. Terrier et A. Marcowith	
Emission interstellaire diffuse	R. Terrier			
Blazars		A. Djannati-Ataï		A. Djannai-Ataï et C. Boisson
Accrétion/éjection : disques, binaires, NAG	J.-P. Lasota			
Modélisation du spectre X des NAG	M. Mouchet			
Détermination des masses et taux d'accrétion des trous noirs des NAG			S. Collin	
Sursauts gamma	M. Boër	M. Boër + L. Piero	M. Boër	
Recherche de signal indirect de matière noire SUSY	A. Jacholkowska			
Rayons cosmiques d'énergie ultra-haute	E. Parizot			
Radio-détection des grandes gerbes cosmiques : simulations et prédictions			F. Montanet	
Somme globale allouée aux groupes de travail du GdR PCHE	43 700 €	35 850 €	28 720 €	30 700 €

Tableau 4 : *Groupes de travail du GdR PCHE*

Ateliers annuels du GdR PCHE dans le cadre des journées SF2A				
Année	Lieu	Nombre d'inscrits	Temps alloué (1/2 journées)	Nombre de présentations orales
2004	Paris	81	4	36
2005	Strasbourg	59	4	35
2006	Paris	84	4	35
2007	Grenoble	51	3	27

Tableau 5 : *Ateliers annuels du GdR PCHE (participation)*

Thèmes	Paris 2004	Strasbourg 2005	Paris 2006	Grenoble 2007	Total (4ans)
Région centrale de la Galaxie	1	5	3	1	10
Binaires X et gamma, microquasars	6	5	6	5	22
Pulsars et nébuleuses de pulsars	1	1	3	0	5
Vestiges de supernovæ en coquille	2	1	1	2	6
Sources galactiques diverses et émission diffuse	4	0	1	2	7
Noyaux actifs de galaxies	7	7	6	3	23
Sursauts gamma	0	3	2	4	9
Rayons cosmiques ultra-énergétiques	4	5	5	4	18
Expériences/ Projets/ Techniques d'analyse	8	2	4	4	18
Ondes gravitationnelles, Relativité Générale, Explosions de SN	3	5	3	0	11
Signaux cosmologiques (matière noire etc.)	0	1	1	2	4

GdR PCHE (2420)

Total	36	35	35	27	133
--------------	----	----	----	----	-----

Tableau 6 : *Ateliers annuels du GdR PCHE (thèmes des exposés)*

4.4. Les ateliers annuels du GdR PCHE

Depuis 2001, les ateliers annuels du GdR PCHE se tiennent dans le cadre de sessions parallèles des journées de l'astronomie française organisée par la SF2A, à Paris les années paires et en province les années impaires. Cette organisation favorise l'interaction entre la communauté du GdR et les autres spécialités de l'astrophysique. Les sessions parallèles PCHE, qui réunissent de 50 à 80 personnes selon les années (tableau 5), comportent quelques exposés invités, mais sont surtout l'occasion pour les doctorants et postdoctorants du domaine de présenter leurs travaux. Les thèmes des exposés sont recensés dans le tableau 6. De plus, les sessions plénières des journées SF2A, destinées à l'ensemble de la communauté de l'astrophysique, comportent la présentation d'un ou de plusieurs résultats marquants obtenus dans l'année par des groupes du GdR PCHE :

- En 2004 : « Un premier bilan des observations de H.E.S.S. » (M. de Naurois, LPNHE) et « Le point sur les sursauts gamma » (R. Mochkovitch, IAP).
- En 2005 : « INTEGRAL et H.E.S.S., deux fenêtres complémentaires sur le ciel gamma » (R. Terrier, APC).
- En 2006 : « Résultats récents à haute énergie sur les nébuleuses de pulsars et les vestiges de supernovæ » (Y. Gallant, LPTA) et « Jets relativistes des trous noirs » (S. Corbel, DAPNIA/SAp).
- En 2007 : « H.E.S.S. ouvre un nouveau domaine du spectre électromagnétique » (H. Sol, LUTH).

Les comptes-rendus de ces journées ont été publiés (en Anglais pour diffusion internationale) aux éditions EDP-Sciences jusqu'en 2006. À partir de 2007, ils seront accessibles sous forme électronique. Les présentations des sessions PCHE sont, pour la plupart, accessibles à partir du site web du GdR (cliquer sur « Réunions générales »).

5. Perspectives

Le GdR PCHE avait fait en 2002 un travail de prospective dont le rapport est disponible sur le site web du GdR. Les années 2004 à 2007 ont fourni des résultats conformes aux prévisions bien que certains projets spatiaux comme GLAST et AMS-02 aient été quelque peu retardés.

5.1. Les prochaines années (2008-2011)

En astronomie photonique, les prochaines années devraient être marquées par l'aboutissement de nouveaux projets :

- Le satellite GLAST de la NASA (astronomie gamma de 100 MeV à 300 GeV) va être lancé en janvier 2008 ; il devrait porter à plusieurs milliers le nombre de sources détectées dans ce domaine spectral et donc décupler la taille du catalogue établi par EGRET dans les années 1990. De plus, contrairement à EGRET, GLAST pourra détecter pour la première fois l'émission des sursauts gamma au-dessus de 100 MeV.
- L'ensemble stéréoscopique H.E.S.S. sera complété à partir de 2009 par un très grand télescope de 28 m de diamètre, muni d'une caméra de 2048 photomultiplicateurs, et placé au centre des 4 télescopes actuels. Dans cette nouvelle phase de l'expérience (H.E.S.S. II), le seuil en énergie sera abaissé jusque vers 20 GeV (50 GeV si on exige la stéréoscopie), ouvrant ainsi un large domaine d'investigation commun à H.E.S.S. et GLAST dont les performances sont très complémentaires. La nouvelle installation améliorera également la sensibilité et la résolution angulaire du réseau actuel au-delà de 100 GeV.
- L'ancien projet « ECLAIRS » de satellite consacré à l'étude des sursauts gamma a été reconfiguré et fait maintenant l'objet d'une collaboration franco-chinoise pour équiper un mini-satellite « SVOM » qui pourrait être lancé dès 2011. Il comportera 4 instruments scientifiques : un imageur X-gamma entièrement réalisé en France, un spectromètre gamma, un imageur optique à grand champ de vue et un télescope fonctionnant dans le visible et le proche infrarouge. Il sera complété au sol par un réseau de stations de réception garantissant une visibilité permanente du satellite, et deux télescopes robotisés de 1,5 m de diamètre, l'un réalisé par la France et l'autre par la Chine.

Dans le domaine des « messagers » non photoniques, les premiers résultats importants viendront de l'observatoire Pierre Auger qui va rapidement atteindre sa taille définitive. Les enjeux principaux sont la compréhension du spectre cosmique aux énergies extrêmes (région de la coupure de Greisen-Zatsepin-Kuzmin), la nature des particules primaires, et surtout leur distribution angulaire, puisque toute déviation par rapport à l'isotropie apporterait de précieux indices sur la nature des sources. Toujours dans le domaine des rayons cosmiques chargés, mais à plus basse énergie, des groupes français sont impliqués dans deux expériences :

- L'expérience AMS-02, couvrant le domaine en dessous du TeV et consacrée en premier lieu à l'antimatière cosmique, doit être installée sur la station spatiale internationale. Les incertitudes concernant le devenir de cette station ont retardé le lancement du projet pour lequel des solutions de rechange sont envisagées.
- L'expérience CREAM de la NASA, couvrant le domaine entre 1 et 500 TeV, est embarquée à bord de ballons pour des vols de longue durée en Antarctique. Elle va bientôt bénéficier d'un identificateur de particules reposant sur la détection d'anneaux Tcherenkov et construit par des groupes français. Les nouveaux vols devraient donc apporter des informations directes très importantes sur la composition en noyaux des rayons cosmiques dans le domaine spectral situé un peu en dessous du « genou ».

En astronomie des neutrinos, l'expérience ANTARES fournira des informations essentielles à la conception d'un détecteur à l'échelle de quelques km³ et le contact étroit des physiciens

d'ANTARES avec les équipes travaillant sur les sources X et gamma sera également très utile pour bien dimensionner le futur projet. Enfin, dans le domaine des ondes gravitationnelles, les prochaines prises de données communes entre Virgo et LIGO ouvrent un tout nouveau chapitre de l'astronomie.

5.2. Le moyen terme

Les thèmes du GdR PCHE font aussi l'objet de projets à moyen terme. Dans le domaine des astronomies X et gamma, on notera particulièrement les suivants :

- Le projet spatial SIMBOL-X, utilisant deux satellites volant en formation, l'un portant le miroir, l'autre le plan focal, devrait étendre les capacités de focalisation au-delà de 10 keV jusque vers 70 keV, apportant ainsi d'importants gains en résolution angulaire et en sensibilité ; SIMBOL-X, construit par des laboratoires français, italiens et allemands, a été sélectionné par le CNES en 2006 pour passer en phase A ; le vol est envisagé pour 2013.
- Le projet spatial Gamma-Ray Imager (GRI) repose également sur deux satellites volant en formation, avec une lentille Laue en guise d'instrument focalisant, pour couvrir le domaine des rayons X durs et des gamma mous et assurer la mesure des raies gamma nucléaires.
- Le projet de grand réseau de télescopes à effet Tcherenkov atmosphérique CTA (Cherenkov Telescope Array) regroupe les physiciens travaillant actuellement sur H.E.S.S. et sur MAGIC ; l'objectif est de gagner sur les détecteurs actuels un facteur 10 en sensibilité au-dessus de 100 GeV et d'atteindre des flux mille fois plus faibles que celui de la nébuleuse du Crabe.

À moyen terme, les astronomies non photoniques devraient atteindre leur maturité :

- La collaboration exploitant l'observatoire Pierre Auger envisage la construction d'une installation semblable dans l'hémisphère nord aux Etats-Unis.
- Le grand détecteur de neutrinos Km3Net en Méditerranée observant le ciel austral devrait compléter l'expérience américaine « Ice Cube » au Pôle Sud, actuellement en cours d'installation, qui couvrira le ciel boréal.
- Au-delà de la génération des interféromètres terrestres comme LIGO et Virgo, le projet spatial LISA devrait couvrir une gamme de fréquences (10^{-4} à 10^{-2} Hz) inaccessibles depuis la Terre.

5.3. Conclusions

Même si les résultats importants acquis pendant les 4 dernières années ont contribué à souder expérimentateurs, observateurs et théoriciens des astronomies X et gamma, les

perspectives précédentes montrent bien que la mission du GdR PCHE est loin d'être achevée. De nouveaux résultats importants sont garantis pour les prochaines années, de nouvelles astronomies sont en train de naître et les perspectives à moyen terme sont prometteuses. Le renouvellement du GdR PCHE apparaît donc comme indispensable.

Quelles améliorations du fonctionnement du GdR peut-on imaginer pour les prochaines années ? Peut-on envisager d'autres missions ?

- Le dernier exercice de prospective du GdR date d'il y a 5 ans. Il serait utile de le renouveler en 2008 ou 2009 en prenant en compte le nouveau panorama de la discipline.
- Le renouvellement rapide de ce panorama suppose une mise à jour régulière des enseignements universitaires. Une liaison organique avec les masters qui forment les futurs doctorants du domaine serait donc utile. Jusqu'à présent, les contacts sont restés au niveau informel, plusieurs membres du conseil scientifique du GdR enseignant dans ces masters. Il serait souhaitable que le GdR soit associé en tant que tel aux réflexions concernant l'évolution de ces enseignements.
- Pour la même raison, l'évaluation des jeunes chercheurs du domaine suppose une représentation minimale de la communauté du GdR au sein des commissions du CNRS ou des Universités en charge des spécialités émergeant au GdR.
- Le GdR devrait aussi avoir une liaison organique avec les réseaux européens ASPERA et ASTRONET qui définissent les « feuilles de routes » de la politique scientifique de domaines plus vastes mais où les thématiques PCHE jouent un rôle important.
- Enfin, certains aspects administratifs du fonctionnement du GdR pourraient sans doute être améliorés, en particulier le transfert la contribution du CNES.