

PROSPECTIVES IN2P3-IRFU

GR 17 : INTERFACE AVEC LES SCIENCES DE LA TERRE ET L'ENVIRONNEMENT

Groupe de travail : Remy Barbier (IPNL), Vincent Breton (LPC CIFer), C. Cârloganu (LPC CIFer), O. Corpace (SIS), Jean Duprat (CSNSM), Cécile Engrand (CSNSM), Stéphanie Escoffier (CPPM), I. Giomataris (SPP), Imad Laktineh (IPNL), C. Landesman (Subatec), Thierry Lasserre (SPP), Jacques Marteau (IPNL), Francois Montanet (LPSC), Fabrice Piquemal (Modane), Pierre Salin (Villefranche), Thierry Stolarczyk (SPP), Alessandra Tonazzo (APC), Claude Vallée (CPPM), George Vasileiadis (LUPMontpellier)

1 INTRODUCTION

Les sciences de la Terre et de l'environnement sont par essence confrontées à des défis croissants face aux questions toujours plus exigeantes et quantitatives posées par la communauté scientifique et la société en général. A titre d'exemple, la compréhension des changements climatiques, l'estimation des effets potentiellement de plus en plus dévastateurs des tremblements de terre ou des éruptions volcaniques liés au peuplement croissant des régions à risque demandent des études approfondies, inter-disciplinaires et sur des périodes de plus en plus longues.

La réponse apportée à ces besoins par l'INSU (<http://www.insu.cnrs.fr/>), l'institut du CNRS qui a pour vocation principale de promouvoir et d'animer la recherche fondamentale en Sciences de la Terre, de l'océan et de l'atmosphère a conduit à plusieurs développements notables:

- ⤴ La création des Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU), dont la mission première de surveillance et de prévision des phénomènes naturels en Géophysique, est complétée par la mise en place de programmes en vue de l'exploitation et la protection du milieu océanique dans une perspective pluridisciplinaire en Océanographie. Ces observatoires ont également la vocation de pérenniser l'acquisition de données d'observation et de la combiner avec le développement et l'exploitation de moyens appropriés.
- ⤴ La mise en place des programmes nationaux, subventionnant de projets ambitieux qui ont nécessité des approches multi-disciplinaires, multi-organismes, souvent organisées à un niveau international, couplant observation, expérimentation et modélisation à toutes les échelles de temps et d'espace.

Dans le cadre de la prospective INSU (2008-2013) pour les Sciences de la Terre, une **approche globale** est préconisée pour la compréhension et la prévision du fonctionnement et de l'évolution du système Terre dans son environnement, ainsi que pour la prévision et prévention des risques naturels et environnementaux à court, moyen et long termes. **Le besoin de mesures physiques et environnementales sur de longues échelles de temps est souligné, ainsi que la nécessité de développer des outils de traitement et d'analyse de gros volumes d'observations**, de plus en plus complexes, mais permettant à priori d'extraire des informations nouvelles. Il est également suggéré d'investir dans des modèles et des outils numériques pour la simulation quantitative et prédictive des systèmes géologiques sur les échelles de temps et d'espace impliquées.

Des conclusions tout à fait équivalentes ressortent des Journées de prospective pour la physique de l'atmosphère et de l'océan au printemps 2011, où des percées significatives sur les incertitudes de la modélisation de la Terre ont été reliées à des mesures multi-sondes à très longue durée, comme

dans le cas de l'interféromètre satellitaire IASI, mais également à l'amélioration de la connaissance des processus et des mécanismes qui interviennent, l'amélioration des modèles, le couplage des modèles avec les observations (incluant l'assimilation et l'optimisation des paramétrisations des modèles) et les comparaisons entre modèles et données.

La modélisation et la simulation numérique des systèmes géologiques en particulier restent insuffisantes. Les processus physiques et leurs interactions, sont parfois incomplètement compris. La connaissance des milieux géologiques reste incomplète à certaines échelles. Le besoin est clairement identifié de définir une stratégie au niveau national pour le déploiement et l'évolution de ressources en matière de calcul intensif et de traitement de données pour :

- ✧ renforcer leur mutualisation et leur intégration dans la pyramide de ressources au niveau national et européen,
- ✧ favoriser l'utilisation de ces ressources par les équipes de recherche et les services d'observation en sciences de la Terre,
- ✧ mieux structurer la communauté et permettre les développements méthodologiques de certaines applications frontières en vue de l'utilisation des très grandes ressources de calcul intensif au niveau national et européen.

Cette politique se doit d'être associée aux besoins des observatoires et devrait également prendre en compte l'émergence des technologies de type « GRILLE », au niveau national et européen, avec la création récente de l'Institut des Grilles par le CNRS.

Dans cette mouvance INSU vers des approches globales, avec des mesures de longue durée in situ, accompagnées par des simulations numériques lourdes des systèmes étudiés, les points d'approches IN2P3/IRFU-INSU sont multiples. Le savoir-faire des équipes de l'IN2P3 et de l'IRFU en matière de détection, d'analyse et de simulations numériques est particulièrement visible sur ces recherches transverses, dont la dynamique profite des développements permanents menés dans le cadre des expériences auprès des accélérateurs ou hors accélérateurs :

- ✧ Les transferts de technologie et de savoir-faire, tant sur la partie instrumentale que sur plan méthodologique sont tout fait naturels, conduisant à la mise en place de nouvelles techniques de mesures. C'est notamment le cas de la tomographie des structures géologiques avec des muons atmosphériques ou des mesures de faible radioactivité pour l'IN2P3, ainsi que les projets ICOS et FORFIRE pour l'IRFU. Il s'agit de projets en cours ou bien engagés qui continueront naturellement.
- ✧ Les observatoires astro-particules pérennes in situ deviennent ou peuvent devenir, avec des investissements minimaux et une approche interdisciplinaire bien coordonnée pour la gestion des moyens, également des observatoires des sciences de la Terre. MEUST est un exemple réussi d'une telle coordination dans le cas des Sciences de la Mer. Le LSM est également devenu au cours du temps une plate-forme multidisciplinaire qui accueille des expériences de l'INSU et l'INEE sur l'environnement, de micro-électronique et de biologie qui nécessitent des conditions de très basse radioactivité. Dans le cas d'Auger, cette synergie n'a pas été exploitée initialement, mais des groupes de travail communs INSU-IN2P3 se mettent en place et devraient conduire rapidement à des valorisations intéressantes de l'infrastructure de l'observatoire pour la physique de l'atmosphère. Des groupes de travail mixtes dédiés aux études atmosphériques sont déjà en place pour des futures expériences comme CTA, même si la composante INSU pourrait être renforcée. Il serait opportun que les futurs observatoires puissent structurer leurs activités pluri-disciplinaires en s'inspirant de l'expérience acquise par AUGER & HESS et de leurs contacts à l'INSU. Ceci pourrait passer par des revues de projets dédiées auxquelles seraient invitées des experts des aspects pluri-disciplinaires par exemple. Des développements communs sur les moyens informatiques liés à la gestion des grands volumes de données et à leur traitement sont également possibles. Ce dernier axe est développé plus en détail dans un autre groupe de travail.

A l'heure actuelle plusieurs activités se développent ou abordent une phase de "consolidation" autour de thématiques communes IN2P3/IRFU-INSU et permettent de mettre en évidence la complémentarité mentionnée ci-dessus. Il n'existe pas à l'heure actuelle de projets de collaboration bien formalisés avec l'autre institut du CNRS, l'INEE (<http://www.cnrs.fr/inee/>), qui a pour vocation principale de promouvoir et d'animer la recherche en écologie globale, même si des synergies existent.

Les chapitres suivants mettent en relief les caractéristiques des projets actuels, leurs développements futurs ainsi qu'une prospective globale pour l'interaction IN2P3/Irfu-Sciences de la Terre.

2 LES DIFFERENTES THEMATIQUES - SITUATION ACTUELLE ET PERSPECTIVES

2.1 SCIENCES DE LA TERRE

2.1.1 GEOSCIENCES, VOLCANOLOGIE

Contributeurs : C. Cârloganu, J. Marteau, S.Gaffet

Les Sciences de la Terre et de l'Environnement sont par essence confrontées à des défis croissants face aux questions toujours plus exigeantes et quantitatives posées par la communauté scientifique et la société en général. Le volcanisme et la prévention des aléas volcaniques permettent d'appréhender l'étendue de ces défis car ils ont, au delà de l'intérêt scientifique, un impact direct sur les activités économiques et sociétales. Les éruptions volcaniques affectent l'environnement, le trafic aérien global, les infrastructures terrestres locales et mettent en danger des populations. Environ 500 millions de personnes vivent dans des régions affectées par des risques volcaniques et nous n'avons pas à ce jour des moyens efficaces pour minimiser les effets des éruptions, malgré des systèmes de surveillance de plus en plus sophistiqués. En particulier les territoires français sont soumis à un important risque sismique et volcanologique en métropole (dans une moindre mesure), et dans les territoires et départements d'Outre-mer qui abritent 3 volcans actifs : Piton de la fournaise (Iles de la réunion), Montagne Pelée (Martinique), Soufrière (Guadeloupe). La Montagne Pelée a ainsi causé la mort de 30.000 personnes en 1902-1905 (première cause de mortalité par catastrophe naturelle en France) et la Soufrière a connu des épisodes éruptifs récents (1976-1977).

Les volcans actifs sont des systèmes très complexes, hautement non-linéaires, faisant apparaître de nombreux régimes de fonctionnement. Ils peuvent se réveiller rapidement ou changer de régime éruptif avec des conséquences potentiellement catastrophiques. La dynamique d'une éruption est gouvernée par des processus agissant dans la région d'origine (type de magmas, débits de magmas), par le réservoir de magmas, la géométrie des conduits, etc. Cette complexité nécessite la mise au point d'instruments et/ou de techniques d'exploration, d'analyse de données ou d'imagerie visant à améliorer la compréhension du fonctionnement des volcans et de contraindre les modèles actuels, pour élargir le panel des paramètres à disposition des observatoires et favoriser l'observation et la prédiction. La tomographie avec des muons atmosphériques est une de ces méthodes novatrices.

Le principe de la méthode est le suivant : un détecteur de muons est placé sur un versant du volcan et enregistre en continu et en temps réel le flux de muons qui traverse l'édifice en fonction de l'angle d'incidence du muon avec la verticale locale (zénith) et dans le plan horizontal (azimut). Ce flux mesuré dépend du flux des muons atmosphériques, connu par ailleurs, et de l'atténuation des muons pendant leur propagation dans la roche. Cette atténuation est déterminée par le parcours géométrique des muons dans la roche, calculable avec une bonne précision si un modèle précis de la forme extérieure de l'édifice existe, et de la distribution de densité au long de ce parcours. Par conséquent, la mesure de l'atténuation du flux de muons en fonction de leur zénith et azimut permet la réalisation d'une cartographie densitométrique précise de l'édifice.

Pour la volcanologie, l'intérêt de cette nouvelle méthode est multiple. En effet la problématique des éruptions volcaniques et des risques associés fait appel à de nombreuses spécialités des sciences de la Terre : tectonique, sismologie, géodésie, physique des roches, géochimie, hydrologie, mécanique des fluides ..., avec des approches complémentaires et des instruments variés. Les méthodes existantes à l'heure actuelle présentent des limitations intrinsèques à la méthode (par exemple l'analyse des champs de potentiel, gravimétrie, souffre par essence de non unicité) ou aux paramètres physiques des roches étudiées (comme la résistivité électrique par exemple qu'il est en outre difficile de mettre en œuvre). La tomographie offre, outre une amélioration de la résolution spatiale, une mise en œuvre relativement aisée et une relative simplicité du problème inverse. Elle répond à la demande de méthodes d'imagerie toujours plus performantes, tridimensionnelles, pour ausculter l'intérieur de la Terre et en caractériser les structures et leurs changements. La R&D en tomographie par muons atmosphériques doit permettre d'installer dans le paysage de la volcanologie une approche

complémentaire et pérenne permettant autant de mieux contraindre des modèles de structure et d'évolution des volcans par d'études ciblées d'édifice, que d'intégrer des détecteurs performants dans des réseaux de surveillance des volcans actifs. IN2P3 participe à deux projets visant au développement de systèmes d'imagerie tomographique des volcans : DIAPHANE et TOMUVOL.

Les applications de la tomographie muonique ne se limitent pas à la volcanologie. En fournissant des cartes de densité de structures étendues, elle a un impact fort sur un spectre large d'études environnementales. Elle permet notamment de quantifier des risques en géologie, principalement la stabilité des massifs rocheux et l'évolution de leurs propriétés mécaniques (ex. stabilité des tunnels, des glissements de terrain, endommagement, instabilité des falaises et cônes volcaniques). L'altération de l'intégrité mécanique d'un massif produit l'ouverture de vides par fracturation ou leur comblement par infiltration d'eau ou par compactification du massif. La présence des nappes phréatiques peut être identifié également. Un troisième projet IN2P3, T2DM2, se concentre essentiellement sur ces études environnementales.

DIAPHANE : tomographie en site souterrain et aux petites Antilles

Le projet DIAPHANE de tomographie par muons cosmiques a démarré en 2008 par une collaboration tri-partite IPG Paris-IPN Lyon-Géosciences Rennes, sur un choix de technologie de détection et une approche globale du problème incluant la gestion des conditions de terrain extrêmes régnant sur les pentes des volcans tropicaux. Les cibles visées dans le projet sont naturellement des volcans mais aussi des réservoirs karstiques, des tunnels, des falaises ou la couverture géologique de sites de stockage souterrains de déchets nucléaires ou de CO₂.

La première phase du projet, cofinancée par un BQR IPGP, un volet de dossier ANR (volet WT 1.3 du projet DOMOSCAN) et le programme Astroparticules P&U de l'IN2P3, a permis :

- la validation du concept de capteurs autonomes sur réseau mis en oeuvre dans les télescopes
- la validation de la technique de détection (scintillateurs plastiques à lattes lus par fibres à décalage de longueur d'onde et fibres claires)
- le choix des photo-détecteurs (photo-multiplicateurs segmentés 64 canaux et R&D pour une évolution vers les MPPC)
- le choix de l'électronique de lecture (chaîne d'acquisition du trajectographe d'OPERA)
- la réalisation des bâtis mécaniques articulés pour orienter les détecteurs
- la mise au point de l'environnement des détecteurs (panneaux solaires, wifi, géodésie etc)

Cette étape de validation s'est concrétisée par la réalisation de 3 télescopes actifs de trois plans chacun pour pouvoir effectuer un filtrage actif du niveau de bruit ambiant important et réduire les coïncidences fortuites à un niveau compatible avec la détection d'événements rares (les taux de muons traversant plusieurs centaines de mètres de roche étant plusieurs ordres de grandeur en dessous des taux à ciel ouvert). Ces télescopes ont été exposés sur quatre sites différents :

- le laboratoire souterrain du Mont-Terri pour le commissioning in-situ d'un télescope par l'étude de couches géologiques bien contraintes (décembre 2009-maintenant)
- l'Etna (juin-septembre 2010)
- la Soufrière de Guadeloupe, site dit de la Ravine Sud (juillet 2010-mars 2011) puis site dit de la Roche Fendue (mars 2011-maintenant)

La qualité des images obtenues révèlent le potentiel important de la technique. Une itération est en cours pour la compréhension plus fine du détecteur et de ses systématiques et une optimisation de l'inversion du problème (obtention des cartes de densité).

Cette première phase exploratoire (2008-2011) s'est conclue par la soutenance de la première thèse sur le sujet (IPGP, décembre 2011) et doit se poursuivre dans le cadre de campagnes de mesures systématiques en plusieurs points différents, de surveillance de sites potentiellement dangereux et de campagnes exploratoires sur des volcans actifs en éruption (soufrière de Montserrat). En termes techniques, l'extension du programme s'appuie sur une jouvence de l'électronique digitale et une

amélioration de ses performances, développement commun avec les programmes HEP OPERA et T2K. Le but de cette phase de consolidation est la possibilité d'intégrer les télescopes à muons dans le cadre des observatoires Sciences de la Terre par un transfert total de compétences et de technologie.

La collaboration repose sur les trois entités initiales : IPGP, IPNL, Université de Rennes avec une extension progressive vers l'APC (thématique géoparticules).

T2DM2 : Tomographie Temporelle de la Densité par la Mesure des Muons

Les objectifs scientifiques du projet T2DM2 concernent l'environnement (ex. stockage de gaz) et les risques en géologie, principalement la stabilité des massifs rocheux et l'évolution de leurs propriétés mécaniques. Ces effets se traduisant par des variations temporelles de densité spatialement hétérogènes motivant l'intérêt pour la tomographie utilisant la mesure des flux de muons pour une détermination directe de la densité des roches. Le principe de détection est une Chambre à Projection Temporelle (TPC) lue par des détecteurs Micromegas-Bulk.

Le projet T2DM2 a commencé avec les financements du CNRS (appels à projet de P&U- de l'IN2P3-INSU) en 2008 et 2009, du laboratoire GEOAZUR, de l'Université de Nice - Sophia-Antipolis, de l'Observatoire de la Côte d'Azur et du LSBB. Ces fonds nous ont permis d'intégrer la collaboration RD51 du CERN pour le « développement technologique des détecteurs gazeux à Micro-Pattern ». Cette collaboration a permis à T2DM2 de définir et construire un télescope prototype afin de tester et de définir les processus et protocoles expérimentaux, garantissant notamment la pérennité du mélange de gaz utilisé dans les télescopes équipés de TPC Micromegas^(EGU 2011) et démontrant la faisabilité d'observation à long terme pluri annuelle.

Au-delà de T2DM2, l'objectif est de créer un réseau de télescopes qui sera installé et utilisé au dans une première phase en tant que démonstrateur méthodologique au Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB, <http://www.lsbb.eu>) avant son exploitation future dans d'autres ouvrages et espaces souterrains et pour la surveillance de falaises instables et de mouvements gravitaires. Dans ce contexte, nous présentons une demande de financement à EPIC-OSEO avec le soutien du pôle compétitivité TRIMATEC (<http://www.pole-trimatec.fr>), demande en cours de montage en 2011.

Pour réaliser ce projet, la collaboration allie les expertises de plusieurs partenaires :

- GEOAZUR (UNS/CNRS/OCA) Responsable scientifique et chef de projet - Détecteurs de particules, modélisation et imagerie géophysique,
- CPPM (Univ. Aix-Marseille II) Modélisation des interactions muons-matière, caractérisation du flux de muons en surface,
- Irfu (CEA) Inventeur des Micromegas, certification des procédés industriels de production des Micromegas dans RD51,
- RD51 (CERN) Collaboration internationale pour le développement technologique des détecteurs gazeux à micro-structure,
- GM (Univ. Montpellier II) Caractérisation gravimétrique et modélisation des masses fluides,
- EMMAH (Univ. Avignon) Caractérisation hydrogéologique des transferts de masses fluides.

TOMUVOL : Tomographie avec des Muons Atmosphériques des Volcans

TOMUVOL est une collaboration LPC/IPNL avec le Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) de Clermont Ferrand, qui développe un système d'imagerie tomographique des volcans, en valorisant une technologie de détecteur mise au point dans le cadre de la collaboration CALICE/ILC (chambres GRPC) et les méthodes de détermination des flux de particules cosmiques utilisées dans l'expérience ANTARES.

Le succès de la méthode de tomographie des volcans avec des muons dépend de la disponibilité d'un détecteur de muons de grande surface, avec une très bonne précision angulaire, robuste, facile à déployer et à opérer. La précision et la portée de la méthode sont également tributaires de la mise en place d'une analyse automatique des résultats, qui prend en compte toute la modélisation du flux incident de muons atmosphériques, de la propagation de ces particules dans des kilomètres de roche, ainsi que la reconstruction volumique de l'édifice à partir des images en coupe. La complexité de la mesure impose une validation préalable sur une cible connue, à l'aide des techniques ayant fait leurs preuves.

Cette analyse a conduit la collaboration TOMUVOL à proposer un projet en deux étapes :

1. la validation de la méthode par la réalisation des mesures sur un site de référence, le puy de Dôme ;

Des mesures radiographiques ont été réalisées courant 2011 et sont vérifiées avec des mesures complémentaires des résistivités électriques et des tomographies gravimétriques. Un soin particulier a été pris pour limiter les effets systématiques affectant la méthode, en réalisant par exemple au printemps 2011 des mesures par LiDAR aéroporté pour obtenir un Modèle Numérique de Terrain très précis de l'édifice. Les mesures continueront en 2012 et 2013 à partir des points de mesure différents autour de l'édifice, ce qui devrait permettre d'obtenir une image tomographique début 2014.

L'opération non-stop in situ du détecteur pendant sept mois et les premières images radiographiques obtenues ont prouvé l'adéquation du télescope TOMUVOL pour les mesures envisagées, autant en terme de robustesse, stabilité et autonomie, que de résolution angulaire et efficacité. Il est constitué de trois chambres GRPC de 1m^2 chacune, avec une segmentation de 1cm^2 , lues par une électronique numérique développée en collaboration à IPNL, LAPP, LLR et OMEGA pour le calorimètre semi-numérique SDHCAL.

Le financement de cette première étape devrait être assuré par un "Contrat d'Objectifs Partagés" CNRS - Université Blaise Pascal (UBP) – Région Auvergne, en cours de montage actuellement, auquel se sont ajoutés des contributions IN2P3/INSU (appel d'offre PIPU 2010), UBP et des fonds régionaux.

2. l'inclusion de ce télescope dans des réseaux de surveillance des volcans actifs ;

Le passage de l'étape de validation du prototype à son inclusion dans un réseau de surveillance du territoire sera faite dans le cadre du projet Labex « ClerVolc » (2011-2021), projet qui a pour but de réaliser une étude pluridisciplinaire et synergique du système "volcan", de la source jusqu'à l'atmosphère et des processus physiques jusqu'aux impacts environnementaux et humains. A ce but, il élargira et développera le système de surveillance multi-paramétrique actuel des volcans actifs auquel l'Observatoire de Physique du Globe et de l'Atmosphère de Clermont Ferrand participe, en rajoutant des nouvelles techniques d'observation et en améliorant les techniques d'inversion de données et d'extraction de paramètres physico-chimiques en temps quasi-réel. La tomographie muonique des édifices volcaniques est la principale livrable du deuxième axe de recherche "Structure interne et déformation des édifices volcaniques" du projet.

2.1.2 GEOPHYSIQUE AVEC LES NEUTRINOS

Contributeur : A.Tonazzo

Une partie importante de la chaleur terrestre est due aux désintégrations des éléments radioactifs, principalement des chaînes de ^{238}U , ^{232}Th et ^{40}K . Les neutrinos ainsi émis (géo-neutrinos) sont des messagers uniques sur la distribution de ces radio-éléments dans les différentes couches de la Terre, surtout dans le manteau, qui n'est que peu accessible par des mesures géochimiques.

La détection des géo-neutrinos, qui sont des $\bar{\nu}_e$, est faite typiquement par leur interaction beta-inverse sur des protons, avec un seuil cinématique à 1.8 MeV : tous les neutrinos du ^{40}K sont en dessous de ce seuil, ainsi qu'une large partie de ceux de ^{232}Th et ^{238}U . Le bruit de fond principal est dû aux anti-neutrinos provenant des réacteurs nucléaires.

L'existence des géo-neutrinos a été mise en évidence en 2005 par l'expérience KamLAND au Japon, et une mesure plus précise de leur flux total (au-dessus du seuil de détection) a été fournie en 2010 par l'expérience Borexino aux Laboratoires Nationaux du Gran Sasso en Italie, ainsi que par KamLAND. La prochaine étape sera la mesure du rapport moyen U/Th, dépendant du site de l'expérience pour ce qui concerne la contribution de la croûte terrestre.

Les futurs détecteurs pour les géo-neutrinos devront être de très grande taille, pour collecter une statistique plus élevée et accéder à des analyses spectrales. LENA (Low Energy Neutrino Astrophysics) sera un détecteur de 50 kt de scintillateur liquide, proposé pour être installé à Pyhäsalmi en Finlande ou au Fréjus. Il pourra mesurer le flux total de géo-neutrinos au % et le rapport U/Th dans la croûte à 5-35% (selon le lieu et la durée de la prise de données).

Toutes ces expériences pourront accéder principalement aux géo-neutrinos produits dans la croûte terrestre. Une mesure directe du rapport U/Th dans le manteau demande la construction d'un nouveau détecteur à un endroit où la contribution de la croûte terrestre est moins importante (comme dans le cas du projet Hano-Hano dans les profondeurs océaniques au large d'Hawaii), ou bien la mesure de la direction des neutrinos.

La détection des géo-neutrinos du ^{40}K sera possible uniquement avec des nouvelles techniques expérimentales qui demandent une R&D dédiée.

2.2 PHYSIQUE DE L'ATMOSPHERE

Contributeurs : François Montanet (LPSC Grenoble), Karim Louedec (LPSC, Grenoble), George Vasileiadis (LUPM)

Intervenants extérieurs : Rémi Losno (LISA, Créteil), Aurélie Colomb (LAMP, Clermont Ferrand), Karine Sellegri (LaMP/OPGC, Clermont Ferrand)

2.2.1 AUGER

L'Observatoire Pierre Auger, situé dans la province de Mendoza en Argentine est le plus grand détecteur de rayons cosmiques jamais construit et réalise actuellement de grandes avancées dans la connaissance de la nature et de l'origine des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie. Cet observatoire est aussi le premier à développer une technique de détection hybride, basée sur des détecteurs de surface et des télescopes de fluorescence, ce qui lui permet d'atteindre une précision et des performances sans précédent. Durant les nuits claires sans Lune (un peu plus de 10% du temps), quatre stations optiques regardent l'atmosphère au-dessus du réseau Auger. Chaque station contient six télescopes, conçus pour récolter la lumière produite par les gerbes atmosphériques. Les cuves au sol détectent les particules (principalement muons, électron, positrons et photons) atteignant le sol, alors que les télescopes récoltent la lumière de fluorescence émise lors de la désexcitation du diazote. En effet, lorsqu'une gerbe de particules se développe dans l'atmosphère, les électrons qui y sont produits excitent les molécules de diazote qui émettent ensuite une lumière de fluorescence de manière isotrope dans l'intervalle en longueur d'onde 300 -- 430 nm.

L'un des principaux défis pour la technique de détection par fluorescence est la compréhension de l'atmosphère, utilisée comme un calorimètre géant. Afin de réduire autant que possible les incertitudes systématiques sur les mesures par fluorescence, la Collaboration Auger a développé un important programme de suivi de l'atmosphère. Ainsi, répartis autour et au centre du réseau de 3000 km² du détecteur Auger, on trouve pour le suivi de la composition en aérosols dans l'atmosphère : 2 lasers centraux UV qui permettent de déduire les concentrations en aérosol à différentes altitudes, 4 lidars (à deux longueurs d'onde et à orientation réglable : balayage ou la capacité de tirer dans la direction

dans laquelle une gerbe vient d'être détectée), deux aerosol phase function monitors, ou APF (faisceau horizontal tiré devant les détecteurs de fluorescence et permettant de déterminer la fonction de phase de diffusion des aérosols), deux télescopes optiques HAM et FRAM. Un lidar Raman, actuellement en test au Colorado, sera prochainement installé sur site. Les nuages sont également suivis à l'observatoire : alors que les lidars servent à sonder la hauteur des nuages, quatre caméra infra-rouge installées sur chacun des sites de fluorescence quantifient la couverture nuageuse.

Les données des détecteurs de fluorescence, bien sûr, mais aussi des détecteurs de surface (détecteurs de particules) qui sont insensibles aux propriétés optiques de l'atmosphère, nécessitent également une bonne modélisation des propriétés physiques (pression température) et de leur profil en altitude. Ceci a été l'objet de lâchers de ballon sonde fréquents et systématiques d'août 2002 à décembre 2010, et a permis de construire une base de données de 331 profils atmosphériques. A partir de ces mesures, des profils atmosphériques pour chaque mois de l'année ont été produits.

La collaboration Pierre Auger a accumulé une importante base de données atmosphériques. Cet effort a réduit de manière significative les incertitudes systématiques sur la reconstruction des gerbes atmosphériques. La richesse des informations collectées, leur combinaison dans un système de base de données performant et ouvert et leur mise en relation avec la physique de l'atmosphère des régions andines sont apparemment d'un grand intérêt pour les physiciens de l'atmosphère.

Parmi les résultats majeurs en sciences de l'atmosphère à l'Observatoire Pierre Auger, nous pouvons citer :

- Une nouvelle méthode de mesure de la concentration en aérosols en fonction de l'altitude a été développée par la collaboration Auger. Utilisant des tirs lasers produits par l'un des deux lasers centraux, la lumière diffusée et récoltée par les télescopes de fluorescence donne une indication sur l'atténuation due aux aérosols.
- Il a été mentionné que la collaboration Auger a accumulé une importante base de donnée pour décrire les variables d'état de l'atmosphère, i.e. pression, température et humidité. Une étude originale, et publiée par la collaboration en janvier 2012, a mis en évidence l'accord de ces mesures avec un modèle atmosphérique à grande échelle développé par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Ce modèle, appelé GDAS (Global Data Assimilation System), fournit toutes les trois heures une estimation des principales quantités atmosphériques. Il a été démontré que l'utilisation de ce modèle, en remplacement des modèles atmosphériques mensuels utilisés auparavant, permettait d'augmenter la résolution sur la mesure de l'énergie et du maximum de développement des gerbes atmosphériques.
- Les aérosols peuvent rester dans l'atmosphère plusieurs jours, voire plusieurs semaines. Ils ont la particularité d'être très mobiles. Une analyse originale et développée par la partie française de la collaboration a montré l'effet des régions avoisinantes sur l'observatoire. Utilisant un outil de rétro-trajectographie (également fourni par la NOAA), il a été démontré que les nuits claires (i.e. avec très peu de poussières dans l'atmosphère) mesurées sur site étaient directement liées à l'origine des masses d'air survolant l'observatoire. Cette étude, en cours de relecture au sein de la collaboration, fera l'objet très prochainement de la première soumission d'un article dans un journal de sciences de l'atmosphère de la part de la collaboration Pierre Auger.

Des ateliers et rencontres auxquels ont participé des physiciens de la collaboration Auger attestent du potentiel de cette synergie entre les astroparticules et les sciences de l'atmosphère. Nous citerons entre autres :

- IS@AO – Interdisciplinary Sciences at the Auger Observatory (<http://www.auger.org/ISatAO>). Cette conférence publique, organisée par la collaboration Auger en avril 2011, avait pour but de promouvoir l'interdisciplinarité et l'ouverture à d'autres communautés que les astroparticules. Durant deux jours, plusieurs domaines tels que la sismologie ou la volcanologie ont été présentés par des scientifiques de ces domaines cherchant à collaborer avec la collaboration Pierre Auger.
- From the Geosphere to the Cosmos. Ce workshop, organisée par l'agence de financements ASPERA en décembre 2010 au Palais de la Découverte, a vu la participation de plusieurs expériences d'Astroparticules. Le but ici était de faire un catalogue de tous les projets interdisciplinaires en cours au sein des expériences d'astroparticules. Références complètes sur : (<http://indico.cern.ch/conferenceTimeTable.py?confId=109104#20101201>).

- ISSAOS (<http://cetemps.aquila.infn.it/issaos/>). C'est une école d'été s'étant déroulée à l'Aquila en septembre 2011, avec une forte participation de collaborateurs d'Auger.

En termes de "ressources", la tâche de monitoring de l'atmosphère dans Auger est une tâche très importante qui occupe beaucoup de collaborateurs. La collaboration Pierre Auger fait également beaucoup d'efforts (le projet Auger Access financé par l'ECR) pour proposer de faire du site d'Auger un véritable laboratoire ouvert aux autres domaines scientifiques, notamment à la physique de l'atmosphère et des géosciences en général (aérosols, transport radiatif, phénomènes électriques et lumineux, sismologie...), et à la physique du soleil (vent et événements solaires). En France et à l'IN2P3, l'implication autour de ces sujets a été assez faible jusqu'à présent (la participation française à la construction d'Auger a concerné surtout le détecteur de surface). Cependant, le groupe du LAL a ouvert la voie et une thèse vient d'être soutenue en septembre 2011 sur ce sujet. La démarche qui consiste à établir une collaboration avec des chercheurs de l'atmosphère mérite d'être soutenue.

C'est exactement avec cette idée qu'un important travail de recherche de partenariats avec la communauté des atmosphéristes a débuté dès février 2011 en France. Sous l'impulsion du groupe Auger du LAL, une présentation a eu lieu devant le groupe "aérosols" au Laboratoire Inter-universitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA) à Créteil. Un mini-atelier a également eu lieu en janvier 2012 à l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand (LaMP/OPGC) qui opère un observatoire permanent de l'atmosphère sur le puy de Dôme. L'idée d'une collaboration avec les atmosphéristes en France est passé à l'état de réalité : un membre du groupe "aérosols" du LISA a, par exemple, déjà participé à la conférence IS@AO. A présent, c'est une lettre d'intention qui est soumise en mars 2012 à la collaboration Auger afin d'obtenir l'accord de réaliser des expériences sur site à l'Observatoire Pierre Auger et accéder librement aux données atmosphériques de la collaboration. Cette lettre d'intention est signée, pour le moment, par trois laboratoires français : le LPSC (UMR 5821/IN2P3), le LISA (UMR 7583/INSU) et le LaMP/OPGC (UMR 6016/INSU). Plusieurs axes de recherche et développement sont envisagés et présentés dans ce document :

- **le développement d'un modèle d'évolution de l'aérosol pour le continent Sud Américain (LISA).** En effet, selon certains modèles, ce continent pourrait jouer un rôle clef dans l'évolution du climat (notamment des périodes glaciaires). Les aérosols présents au-dessus du continent américain pourraient également influencer le développement des bactéries dans l'océan Atlantique.
- **l'étude du lien entre les aérosols et précurseurs ioniques, qui pourraient être liés aux rayons cosmiques en altitude (LaMP/OPGC).** Si l'influence des rayons cosmiques sur la formation de nanoparticules (donc in fine sur le climat) est étudiée actuellement en chambre de simulation dans l'expérience CLOUD au CERN, les études en atmosphère réelle n'ont pas encore été menées de manière concluante. Il faut en effet à la fois un observatoire de haute altitude, et l'instrumentation adéquate sur ces observatoires (nanoparticules, ions...). De par l'existence d'une bonne partie de l'instrumentation nécessaire pour des études atmosphériques sur le détecteur de rayons cosmiques le plus complet et performant à ce jour, l'observatoire Pierre Auger serait donc un environnement idéal pour l'étude de ces corrélations.

Une étude complémentaire pourrait par ailleurs être faite à Modane pour s'affranchir du rayonnement cosmique : y a-t-il nucléation même sans rayonnement cosmique ?

- **renforcer et valoriser les mesures atmosphériques à l'observatoire Auger dans le cadre de "GAW" (Global Atmosphere Watch) de la WMO (LaMP/OPGC).** L'Observatoire Pierre Auger est situé tout proche de Malargüe (Province de Mendoza), typiquement (35° S, 69° W), à 1452m au-dessus de la mer. Son environnement est dit "desert like", même si la végétation stoppe normalement les levées de sable dues au vent. Selon l'origine des masses d'air sur le site, l'air est soit chargé de pollution anthropique liée à Santiago du Chili ou Mendoza soit peu influencé par les émissions humaines. Il s'agit d'un site très intéressant, et de plus peu de stations permanentes existent en Amérique du Sud. Aussi avec des mesures in-situ d'aérosols, et de gaz, des mesures par télédétection, et des paramètres météorologiques de qualité, la station pourra postuler à l'avenir pour devenir une station « GAW » (Global Atmosphere Watch), de la WMO.

2.2.2 HESS ET CTA

L'expérience HESS est située en NAMIBIE, sur le plateau du Gamburgs (latitude 23° 16' sud, longitude 16° 30' est) à une altitude de 1800 m. Elle est constituée de quatre télescopes de 12 mètres de diamètre, répartis aux coins d'un carré de 120 mètres de côté. Chaque foyer est équipé d'une caméra électronique de grande taille composée de 960 tubes photomultiplicateurs, dispositifs sensibles à la lumière bleue et dont le temps de réponse est extrêmement rapide, de l'ordre de la nanoseconde. La sensibilité de cet instrument (capacité à détecter des sources faibles) est 10 fois supérieure aux expériences précédentes (WHIPPLE, HEGRA, CAT) pour un seuil en énergie de 100 GeV.

Les rayons gamma qui pénètrent dans l'atmosphère génèrent une cascade de particules. Ces particules émettent un flash de lumière bleue peu intense, appelée lumière Cerenkov et ne dure que quelques milliardièmes de seconde. Cette lumière est réfléchiée par les miroirs de 107 m² puis enregistrée par des caméras ultra-sensibles. Chaque image donne la position dans le ciel d'un photon gamma, et son énergie. Les objets célestes émettant un rayonnement gamma sont cartographiés avec H.E.S.S. à partir des directions d'arrivée dans le ciel de chaque photon gamma.

Notre équipe contribue au projet d'étude des effets atmosphériques sur les résultats des mesures des flux et de l'énergie au moyen d'un LIDAR type élastique. L'atmosphère fait partie du détecteur et la connaissance de la transmission, respectivement la détection des changements de la transmission de l'atmosphère, devient cruciale pour améliorer des données d'astronomie gamma terrestre.

Il y a deux composants principaux dans l'atmosphère: les molécules et les aérosols. Les composants de molécules dépendent du profil de densité de l'atmosphère et du processus bien connu de dispersion, dit dispersion de Rayleigh. Cependant la dispersion Mie, par la composante d'aérosol, est compliquée.

La méthode de LIDAR (Light Detection and Rangions) est une méthode utile pour le monitoring atmosphérique, qui a été développée dans le domaine de la recherche environnementale. L'intensité des gerbes produites par des photons Cerenkov pénétrant l'atmosphère peut être réduite à cause de l'absorption et de dispersion (ou extinction). Ainsi la connaissance de ces paramètres est importante pour la reconstruction d'énergie des gerbes.

Les buts de ce projet sont plus spécifiques:

- Démontrer qu'un système de détection de LIDAR peut être employé pour ces mesures.
- Prouver que la détection de couche mince de nuages est possible.
- Prouver que les coefficients d'extinction de l'atmosphère peuvent être mesurés.
- Evaluer l'impact de ces paramètres sur le calcul d'énergie reconstruit de gerbes gamma atmosphériques.
- Etudier les effets atmosphériques sur les résultats des mesures des flux et de l'énergie avec des sources galactiques.

Au cours des 2 dernières années, nous analysons les données acquises avec notre Lidar type élastique installé à proximité des télescopes HESS. Ce lidar de deux longueurs d'onde nous permet de calculer le coefficient d'absorption de l'atmosphère et son contenu en aérosol. L'erreur systématique sur ces mesures est de l'ordre de 15% en raison de limitations théoriques. Dans le même temps nos données ont un intérêt particulier pour la communauté internationale dans l'atmosphère, car elles serviront à caractériser l'effet combustion de la biomasse, un phénomène qui se produit pendant la période de fin d'été traverse le continent africain. Pour le futur et pour améliorer cette erreur expérimentale pour le futur projet du CTA nous envisageons de mettre en œuvre un LIDAR type Raman. En utilisant le principe de la détection de lignes d'absorption RAMAN, les incertitudes systématiques totales seront de l'ordre de 5-6%. Ce projet est une collaboration internationale avec des équipes d'Espagne (IFEA/UAB) et des experts du Laboratoire CEILAP d'Argentine. Il sera installé sur le site choisi de CTA-sud et il contribuera d'une

part à nos propres intérêts expérimentaux, et d'autre part au reste de la communauté scientifique en fournissant des données capables de caractériser plus en détail le type et le contenu des couches d'aérosols présents dans l'atmosphère.

2.3 ETUDES ENVIRONNEMENTALES

2.3.1 MESURES DES FAIBLES RADIOACTIVITES

Contributeurs : F. Piquemal, Jérôme Wassermann (Université de Cergy Pontoise, mesure des radioactivités)

Le LSM est une unité mixte de recherche CNRS et CEA existant depuis 1981. Situé au milieu du tunnel du Fréjus sous 1800 m de roche, il est le second laboratoire le plus profond au monde. A cette profondeur équivalente à 4800 mètre équivalent eau, le rayonnement cosmique est réduit d'un facteur 2 millions par rapport à la surface. Ce laboratoire créé à l'origine pour la physique des particules est devenu aujourd'hui une plate-forme multidisciplinaire pour les sciences nécessitant un environnement très basse radioactivité et les techniques expérimentales associées.

L'amélioration des détecteurs pour la physique du neutrino et la recherche de la matière noire passe par le développement de détecteurs de mesure d'ultra-faible radioactivité pour la sélection des matériaux, notamment les détecteurs de spectroscopie gamma. Après 20 ans de développement, ces détecteurs peuvent atteindre des sensibilités de l'ordre de 50 $\mu\text{Bq/kg}$ pour des grandes masses (plusieurs kilogrammes) en 1 mois de mesure sur le site du LSM. Cette méthode est non-destructive. La spectroscopie gamma est la méthode la plus sensible pour les éléments à durée de vie courte (période inférieure à quelques dizaines d'années). Les mesures de spectroscopie gamma sont abondamment utilisées dans les sciences de l'environnement. En effet, les radio-isotopes sont utilisés comme traceurs dans l'environnement ou comme chronomètres pour la datation des couches glaciaires ou sédimentaires. Les domaines étudiés au LSM sont les suivants :

- Comprendre les effets anthropiques sur l'environnement dans les 150 dernières années par pas d'une année ou moins en utilisant les sédiments, la neige ou la glace
- L'étude des sédiments lacustres des lacs alpins permet de reconstituer l'environnement sur plusieurs milliers d'années et de comprendre comment l'homme a modelé le paysage même dans les vallées les plus reculées.
- Comprendre à partir des échantillons de la cryosphère du système climatique et des processus impliqués dans la variabilité de la composition atmosphérique présente et passée
- Etude des cycles biogéochimiques de l'atmosphère en corrélation avec des changements climatiques pour une meilleure compréhension des rétroactions entre la composition atmosphérique et le changement climatique
- Géochimie marine et continentale (caractérisation des masses d'eau océaniques, leur origine et leur âge en utilisant les 4 isotopes du radium)
- La surveillance de l'environnement (mesure de l'eau de pluie par l'IRSN, caractérisation des solides en suspension et des polluants associés dans les rivières, suivi des retombées de Fukushima,...)

Dans le cadre de son projet d'extension, le LSM en collaboration avec l'EDYTEM, le LSCE et le LGGE prévoit de créer une plate-forme de mesures de très faible radioactivité qui permettra de développer de nouvelles méthodes analytiques (utilisation du ^{22}Na pour dater les carottes glaciaires de surface par exemple, réduction du fond en ^{210}Pb pour améliorer la sensibilité,...). L'ambition est de pouvoir

dater de quelques jours jusqu'à quelques millénaires les échantillons ce qui est essentiel pour étudier finement la variabilité du climat.

La spectroscopie gamma est également utilisée pour la mesure d'objets archéologiques.

Elle permet également des expertises comme par exemple la datation des millésimes de Bordeaux ou la certification de l'origine des sels marins mises au point par le CEN Bordeaux-Gradignan. Le LSM est également ouvert aux laboratoires académiques et industriels pour mesurer l'effet de la radioactivité très faible sur les circuits microélectroniques. Il semble évident que dans le futur il y aura une demande plus forte de la communauté micro/nano pour tester de nouveaux matériaux utilisés dans la fabrication (procédés technologiques) ou l'encapsulation (packaging) des circuits intégrés, ce dernier devenant de plus en plus sensibles aux impuretés résiduelles radioactives (en particulier émetteurs alpha), même à des concentrations bien en dessous du ppb.

La LSM accueille également des expériences de biologie pour étudier le développement de bactéries E. Coli dans un environnement non radioactif afin de mieux comprendre l'impact des radiations sur phénomènes de mutations.

Les géosciences semblent également intéressées pour équiper de capteurs le LSM pour mesurer en continu et à long terme l'évolution des propriétés des roches dans les environs de la cavité.

2.3.1 RADIOCHIMIE

Contributeurs: C. Landesman

L'interface Radiochimie/Sciences de la Terre du groupe Radiochimie de Subatech est jusqu'à présent essentiellement liée à la thématique de recherche sur le stockage des déchets nucléaires en couche géologique profonde et en surface. Les études menées portent principalement sur :

1. la compréhension et la description mécanistique du transfert des radionucléides (RN) et des métaux lourds au sein de l'argilite du Callovo-Oxfordien (formation d'accueil d'un potentiel site de stockage en profondeur),
2. la compréhension de l'effet des colloïdes (notamment de la matière organique) et des bactéries (sulfato-réductrices) sur le transfert des RN (stockages profond et de surface),
3. les études de cycle biogéochimique d'éléments d'intérêt pour le stockage tels que le sélénium ou le chlore (radioécologie).

L'objectif de ces études est la description quantitative de ces transferts via l'utilisation de codes de calcul géochimiques.

Notre méthodologie d'étude s'appuie sur une approche expérimentale (description au niveau macroscopique et moléculaire) qui doit être aujourd'hui complétée par une approche de modélisation moléculaire (en cours).

Les compétences expérimentales mises en œuvre portent d'une part, sur le développement de dispositifs expérimentaux permettant l'acquisition de données représentatives (atmosphère contrôlée, travail sur échantillons intacts de très faible perméabilité,...) et d'autre part, sur le développement de méthodes pour l'analyse complète (quantité, spéciation) des RN dans l'environnement. Ces techniques sont essentiellement des techniques de radiochimie. Néanmoins, dans le futur proche nous souhaitons étendre ces recherches à l'interface géosphère/biosphère/environnement à l'étude des RN présents dans les sols et issus de l'activité humaine (rejets contrôlés ou accidentels). L'acquisition récente d'un ICP-MS Haute Résolution s'inscrit dans cette volonté. L'objectif affiché est également de renforcer les interactions avec le service SMART de Subatech (Service de Mesure et d'Analyse de la Radioactivité et des éléments Trace dans l'environnement) déjà engagé dans des programmes de radioécologie (mesures). Ce projet est réalisé notamment dans le cadre de l'Observatoire des Sciences de l'Univers Nantes Angers (OSUNA) en étroite collaboration avec le

laboratoire de Planétologie et de Géodynamisme de Nantes (LPGN/INSU). Un soutien financier au niveau de la région Pays de la Loire est en cours d'évaluation.

2.3.2 ENVIRONNEMENT RADIATIF ET VIVANT

Contributeurs: V. Breton

Les organismes vivants sont en permanence exposés aux radiations, pour le meilleur et pour le pire. Pour le meilleur parce que les mutations dans le matériel génétique causées par les radiations font partie des principaux moteurs de l'évolution et que les radiations qui tuent les cellules sont utilisées avec toujours plus de précision pour le traitement des cancers. Pour le pire pour les victimes de l'exposition aux rayonnements à la suite de l'explosion de bombes atomiques ou des catastrophes nucléaires de Fukushima et Tchernobyl.

Les conséquences de l'exposition chronique des populations à des radioéléments font aujourd'hui l'objet de controverses et beaucoup de questions demeurent encore sur l'effet des faibles doses sur les organismes vivants.

Un exemple tout récent est la découverte au Gabon par une équipe de l'université de Poitiers de fossiles d'organismes multicellulaires datés de deux milliards d'années environ tout près du site des seuls réacteurs nucléaires naturels connus. Cette découverte, publiée dans Nature en 2010 (El-Albani et al) pose la question de l'existence ou non d'un lien direct ou indirect entre l'émergence de la diversité biologique et les effets de la radioactivité.

L'IN2P3 et l'Irfu disposent d'atouts importants dans ces recherches :

- De nombreuses équipes possèdent des compétences en radioprotection et dosimétrie et disposent des instruments nécessaires à la datation et à la caractérisation radiative des milieux
- pour l'étude expérimentale de l'évolution, discipline en plein essor en biologie, les physiciens sont en mesure de faire varier le taux de mutation d'un organisme en jouant sur le rayonnement auquel il est exposé. Il est possible d'accroître ce taux de mutation, en irradiant des organismes ou au contraire de le réduire en plaçant ces organismes dans un environnement à très basse radioactivité. Un programme expérimental dans ce but démarre au Laboratoire Souterrain de Modane
- la biologie des systèmes fait aussi partie des disciplines en plein essor. La modélisation des systèmes biologiques exposés à un stress radiatif peut s'appuyer sur les développements majeurs dans le domaine de la simulation Monte-Carlo de l'interaction du rayonnement avec le vivant en cours dans les collaborations GATE et Geant4-ADN
- les compétences des services techniques ouvrent la voie à la capture de nouvelles observables physiques pour caractériser les échanges intercellulaires et la réponse à des stress contrôlés ;
- la grille informatique fournit les ressources et les services nécessaires à l'analyse des données de biologie moléculaire produites par les séquenceurs de nouvelle génération. Ces données sont nécessaires à la caractérisation biologique des effets observés.

Le CENBG, le LPC Clermont-Ferrand et Subatech Nantes sont actifs sur ces thématiques.

Les prochaines années doivent voir se développer des programmes nouveaux d'expérimentation contrôlée sur des lignes nanofaisceaux (AIFIRA) ou au LSM (faible radioactivité) et une participation accrue à l'analyse des données épidémiologiques et environnementales collectées sur les sites de Tchernobyl et Fukushima.

2.3.3 SOURCES ET PUIXS DE GAZ A EFFET DE SERRE

Contributeur : O. Corpace

ICOS, pour Integrated Carbon Observation System, est un observatoire européen des flux de gaz à effet de serre. L'augmentation de ces gaz étant une des causes du changement climatique, l'intérêt stratégique d'ICOS est de permettre, à terme, une surveillance de leurs sources et puits.

L'observatoire ICOS est un futur réseau de stations de mesures (une soixantaine environ). Ces stations sont réparties en trois catégories : atmosphérique, écosystème et océanique.

Le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement, UMR CEA-CNRS-UVSQ) possède la responsabilité de la station de démonstration de type atmosphérique. Cette station devra démontrer sur une année la faisabilité des mesures et la pertinence des résultats obtenus. Elle fonctionnera ensuite pendant plus de 10 ans.

C'est dans ce cadre-là que le LSCE a fait appel aux compétences de l'Irfu en termes d'intégration d'instruments et de supervision à distance d'une expérience. L'Irfu a donc ici un rôle d'intégrateur et le projet repose exclusivement sur ses équipes techniques. Ainsi, il n'y a pas de responsable scientifique du projet à l'Irfu. Dans ce projet, le LSCE trouve un partenaire technique pour le déploiement de la station de démonstration et l'Irfu exporte et valorise ses outils et méthodes tout en acquérant quelques nouvelles compétences.

Le LSCE finance la totalité du matériel nécessaire au projet et participe au financement de la main d'œuvre Irfu avec l'objectif d'atteindre 50% de celle-ci.

2.3.4 SURVEILLANCE DES FEUX DE FORETS

Contributeur : I. Giomataris

Les feux de forêt constituent un danger permanent, notamment dans les pays arides. Ils sont un frein au développement économique et une menace pour l'environnement, tant par la forte libération de gaz à effet de serre que par la destruction d'écosystèmes.

Le projet FORFIRE a été approuvé par l'Europe, dans le cadre du programme FP7 et le CEA-Irfu y est un partenaire majeur (Project FP7–SME–2008–1). Outre le CEA de Saclay, qui y joue un rôle de premier plan, le projet FORFIRE réunit les instituts, entreprises et universités de plusieurs pays européens : HERON Technologies, l'université d'Athènes, l'Institut des Forêts de Pologne, Irish.

L'objectif ambitieux de ce projet est de développer un système de détection de feux de forêt en utilisant un photo-détecteur UV de type Micromegas. Le détecteur FORFIRE ainsi que son électronique a été développé et construit par une équipe du SEDI en employant des techniques industrielles.

Les avancées du projet sont:

- Optimisation du principe du détecteur et de son gaz au laboratoire et en particulier son efficacité de détecter les photoélectrons uniques.
- Construction et mesures au laboratoire.
- Mesures de feux à grand distance.
- Mesure d'imagerie avec le détecteur pixélisé.
- Développement et optimisation de son électronique.

Le projet finit à la fin de cette année ainsi que son financement.

Reste à faire :

- Optimisation du dépôt de CsI pour obtenir une meilleure efficacité quantique.
- Maximiser le signal sur bruit du détecteur dans les conditions réelles de son fonctionnement.

Par sa sensibilité dans la gamme UV, un tel dispositif peut détecter la lumière émise par effet Cerenkov. Il peut aussi observer la lumière de scintillation, en particulier pour les liquides et gaz nobles.

2.4 OCEANOGRAPHIE, MICROBIOLOGIE ET BIOLOGIE MARINE

Contributeurs : S Escoffier, C. Vallée

2.4.1 ANTARES

Le télescope ANTARES a pour but de détecter les neutrinos cosmiques de très haute énergie produits lors de phénomènes violents dans l'Univers. Son principe repose sur la détection du rayonnement Cherenkov émis par les muons issus de l'interaction des neutrinos avec l'environnement du détecteur. Immergé à 2500 mètres de profondeur en mer Méditerranée, à environ 40 km du large de Toulon (Var), ANTARES est constitué de près de 900 photomultiplicateurs répartis sur 12 lignes de 450 m de hauteur. Chaque ligne est connectée à une boîte de jonction, elle-même reliée à terre par un câble électro-optique de 40 km de long. Certaines lignes ANTARES sont aussi équipées de nombreux capteurs (sonde de température et conductivité, courantomètre,...) afin de mieux contrôler les conditions environnementales de ce milieu hostile.

L'arrivée des infrastructures câblées comme ANTARES a ouvert un champ nouveau d'investigation aux sciences environnementales, en donnant la possibilité de "monitorer" les grands fonds en temps réel sur de longues durées, alors que jusqu'à présent les mesures étaient faites essentiellement lors de campagnes dédiées, avec des capteurs autonomes. L'accès aux données en temps réel paraît indispensable pour certains projets scientifiques tel que la mise en place d'un réseau d'alerte de tsunamis. Mais il est aussi bénéfique à une plus large communauté menant des projets ambitieux par l'observation à long terme, en permettant de changer ou d'ajuster les conditions de mesure en fonction des observations, voire de déclencher des campagnes d'observation opportunes lors d'un événement particulier exceptionnel.

Les thématiques concernées par la plateforme multidisciplinaire d'ANTARES sont multiples, impliquant principalement les domaines couverts par l'INSU et dans une moindre mesure ceux de l'INEE. De nombreuses collaborations sont nées de la volonté de confronter les expériences et de mutualiser les acquis entre disciplines. Il est toutefois possible de discerner différents niveaux d'implication :

- **Mise à disposition de l'infrastructure câblée :**

Dans le domaine de la géophysique, l'infrastructure ANTARES accueille par exemple des sismographes large bande pour compléter les réseaux d'observation terrestres et à terme alimenter les réseaux d'alerte de tsunamis. Les sismomètres ont été développés et financés indépendamment de la collaboration ANTARES, en l'occurrence par le laboratoire GeoSciences Azur de Villefranche-sur-mer.

- **Mise à disposition des instruments installés :**

Les données des nombreux capteurs océanographiques installés sur les lignes ANTARES sont aussi exploitées dans le cadre de la compréhension des circulations de masses d'eau profondes en zone méditerranéenne, en particulier dans le contexte des changements environnementaux. Dans le domaine de la biologie marine, les hydrophones AMADEUS développés pour la détection acoustique des neutrinos de ultra haute énergie sont également utilisés à des fins de détection acoustique des mammifères marins. Enfin les photomultiplicateurs d'ANTARES, très sensibles à la lumière, se sont révélés très précieux pour l'étude de la bioluminescence marine en milieu profond. Ces projets ont donné naissance à des collaborations scientifiques entre laboratoires de différents horizons, mais impliquant davantage les laboratoires issus des sciences de la mer pour l'exploitation des données et l'interprétation des résultats.

- **Transfert de technologie pour le développement de nouveaux capteurs :**

Enfin un dernier volet concerne les collaborations interdisciplinaires à vocation plus technologique. Ceci inclut par exemple le développement de nouveaux capteurs innovants dédiés aux sciences de la mer, à l'aide de techniques issues de la physique des hautes énergies. Un exemple concerne le développement d'une Biocaméra EBCMOS pour l'observation des grands fonds (collaboration CPPM-IPNL-DT-INSU) en corrélation avec l'intensité lumineuse reçue par les photomultiplicateurs d'ANTARES. Un deuxième exemple est la conception d'un instrument novateur baptisé IODA, consistant à fournir une mesure de la consommation d'oxygène et contraindre les paramètres biogéochimiques et biologiques (collaboration CPPM-COM, financement ANR et fonds d'intervention de l'Université de la Méditerranée).

Dans un contexte européen et international, il est essentiel de considérer chaque plateforme multidisciplinaire comme un nœud appartenant à un réseau beaucoup plus général, dans lequel les problématiques locales cèdent la place à une compréhension globale des phénomènes mis en jeu, par exemple dans le contexte des changements climatiques mondiaux. Cela nécessite également une standardisation de la connexion et de l'exploitation des instruments, comme recommandé par le réseau d'excellence ESONET ou le réseau d'observatoires EuroSITES.

2.5 PLANETOLOGIE

Contributeurs : J.Duprat

Il y a 4,6 milliards d'années, l'effondrement d'un nuage de gaz et de poussières formait le système solaire. En quelques millions d'années le disque de gaz et de poussières qui entourait la proto-étoile se dissipait pour donner naissance au cortège de planètes que nous connaissons aujourd'hui. Deux réservoirs de petits corps ont survécu à la formation planétaire, la ceinture d'astéroïdes et le réservoir cométaire. Une large partie des contraintes dont nous disposons pour **comprendre la formation planétaire** provient des analyses minéralogiques, chimiques et isotopiques de matériau extraterrestre primitif provenant de ces réservoirs. Parmi ces échantillons, les **micrométéorites** occupent une place particulière. Ce sont des grains de poussières interplanétaires de tailles comprises entre 25 et 500 μm , constitués d'un assemblage déséquilibré de minéraux réfractaires (olivine, pyroxène, ...) et de matériaux hydratés et carbonés. Les micrométéorites ne s'apparentent qu'à une fraction rare (moins de 5% des chutes) de météorites primitives : les **Chondrites Carbonées**. Contrairement aux corps de grandes tailles tels que les planètes ou les astéroïdes massifs, ces poussières n'ont pas subi de processus de différenciation et leurs phases minérales nous apportent un témoignage unique sur les réservoirs de gaz et de solides à partir desquels la Terre (et les autres planètes) se sont formés.

Pendant de nombreuses années, les principales collections de micrométéorites antarctiques ont été réalisées dans des zones (principalement côtières) où ces poussières subissent des processus d'accumulation soit de type éolien, soit à la surface des champs de glace bleue stagnante. Ainsi, grâce au travail pionnier effectué par le Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse d'Orsay (CSNSM) la France dispose de l'une des plus vastes collections de micrométéorites polaires au monde. Pourtant, si ces processus d'accumulation offrent la possibilité de collecter un grand nombre de micrométéorites (plusieurs dizaines de milliers), ils présentent en revanche certaines limitations majeures : impossibilité de dater et localiser la chute, altération des micrométéorites. Les régions centrales Antarctique, comme le site de Dôme C, permettent de s'affranchir d'une large partie de ces biais. Depuis plus de dix ans, grâce au soutien logistique et financier de l'IPEV (Institut Polaire Français Paul-Emile Victor), le CSNSM s'est engagé dans un programme pluriannuel de collecte de micrométéorites dans la neige de Dôme C. Ce travail a permis de réunir une collection unique d'environ 2000 particules extraterrestres : la Collection CONCORDIA, dont l'état exceptionnel a permis de mettre en évidence, entre autres, des particules associant une matière organique abondante (> 50 vol%) et extrêmement riche en deutérium (des rapports D/H plus de 10 supérieurs à celui des océans terrestres). Les analyses isotopiques et minéralogiques des UCAMMs montrent qu'il s'agit très probablement de grains cométaires géants.

L'essentiel des problématiques scientifiques liées à l'étude des micrométéorites concerne le contexte astrophysique de naissance du système solaire (voir contribution au GT Astrophysique Nucléaire). **Pourtant, certains axes de recherche reliés au flux de micrométéorites sur Terre concernent plus spécifiquement les sciences de la Terre.** Les micrométéorites représentent, de loin, le principal **apport de matière extraterrestre** accrété actuellement par notre planète. Pourtant la valeur exacte de leur flux fait l'objet de vives controverses. Une analyse préliminaire de la collection CONCORDIA a permis d'obtenir une valeur minimale du flux contemporain de micrométéorites sur Terre de $6\,000 \pm 3\,000$ tonnes/an. Dans les années à venir, un programme de mesures est prévu pour mieux contraindre cette valeur. La connaissance du flux de matière extraterrestre ainsi que la composition de celui-ci il y a 4.6 Milliards d'années (tels qu'enregistré sous forme de micro-clasts dans des météorites) est une donnée cruciale pour **comprendre l'apport tardif d'éléments rares à la surface terrestre** (Ir, Os, Pt...) ainsi que pour comprendre **l'origine de l'hydrosphère terrestre**.

La question de la contribution des poussières se pose également dans le contexte de l'apport de l'eau sur les planètes telluriques, l'une des questions les plus controversée de la planétologie moderne. Pendant longtemps, l'approche communément admise était celle d'une accréation humide où Venus, la Terre et Mars auraient débuté avec des proto-atmosphères riches en eau issues du dégazage de leurs constituants. Dans ce scénario, l'absence d'eau dans les atmosphères vénusienne et martienne modernes peut être expliquée par un échappement massif par photodissociation de la molécule d'eau dans la haute atmosphère de ces planètes. Pourtant, l'hypothèse d'une accréation à partir d'un matériau humide paraît en désaccord avec les faibles rapports volatiles/réfractaires de la Terre, la Lune et Mars comparés à celui des chondrites carbonées. De même, les compositions isotopiques de différents éléments volatiles (K, Zn) ne montrent pas l'enrichissement en isotopes lourds attendu dans le cas d'un échappement. S'il n'existe pas à l'heure actuelle de consensus sur la teneur initiale en eau des planètes telluriques, en revanche une large partie de la littérature considère que l'eau « moderne » actuellement observée a été apportée tardivement, alors que les planètes avaient déjà acquis une grande partie de leur masse. C'est l'hypothèse dite du *verniss tardif*. Les simulations numériques montrent que l'évolution de l'orbite des planètes géantes a perturbé les orbites des petits corps situés au-delà de la ligne des glaces et, qu'une partie d'entre eux ont ainsi pu être propulsés vers le système solaire interne et délivrer leur eau aux planètes telluriques, sous la forme de planétésimaux ou de poussières. En outre, l'apport d'eau aux minéraux du manteau a eu pour conséquence d'en diminuer la viscosité et a très probablement déclenché la dynamique planétaire qui a abouti au régime de tectonique des plaques que nous connaissons aujourd'hui.

3 EQUIPEMENTS/INSTRUMENTS STRUCTURANTS POUR LES RECHERCHES A MOYEN TERME

3.1 ANTARES – MEUST – KM3

Les apports notables de l'Irfu et de l'IN2P3 aux sciences de la mer concernent la capacité à concevoir, à construire et à opérer ces grands équipements que sont les observatoires câblés sous-marins. Mais ils concernent également le transfert de technologie de pointe pour la conception de capteurs ultrasensibles innovants.

- **ANTARES**

ANTARES est une infrastructure câblée des grands fonds, pionnière au niveau mondial. Ses aspects multidisciplinaires concernent :

- Ligne instrumentée environnementale connectée depuis 2005 (MILOM de 2005 à 2007 et IL07 de 2007 à 2010).
- Hydrophones et IODA sur ligne L12 depuis 2007.

- Boîte de jonction secondaire déployée fin 2010, exploitée en convention avec l'IFREMER, équipée d'un sismographe, d'un module instrumenté avec prototype biocamera, d'un prototype d'extension fibre optique DeepSeaNet pour les géosciences.
- Exemples d'instruments développés en collaboration entre l'IN2P3 et l'INSU (transferts de technologie de l'IN2P3 vers l'INSU) :
 - IODA (consommation oxygène sur la colonne d'eau) : CPPM-COM
 - BioCamera EBCMOS: IPNL – DT-INSU

La boîte de jonction secondaire est ouverte aux utilisateurs pour la durée de vie d'ANTARES et sert au prototypage des futurs composants de MEUST/EMSO.

- **MEUST/KM3NeT-EMSO**

MEUST (Mediterranean Eurocentre for Underwater Sciences and Technologies) est une infrastructure sous-marine de 2^{ème} génération développée dans le cadre de KM3NeT (KM3NeT-Toulon dans une configuration multi-sites de KM3NeT) et EMSO (intégré au nœud Ligure du futur réseau européen d'observatoires sous-marins).

- C'est actuellement un projet IN2P3-INSU, qui a vocation à intégrer les partenaires de KM3NeT et EMSO.
- Capacité décuplée en taux de données par rapport à ANTARES, 10% prévu pour sciences environnementales.
- Couplé à des outils complémentaires (gliders, radars) permettant des campagnes d'observation ciblées en cas de détection d'un événement brutal.
- Construction commencée avec un budget CNRS-FEDER, time scale 2013-14 pour premières boîtes de connexion sous-marines opérationnelles.

3.2 DETECTEUR MEGATONNE

Un détecteur de neutrinos de très grande taille sera un outil unique pour adresser des questions de sciences de l'Univers et de la Terre, ainsi que pour des études sur les propriétés des neutrinos. Le potentiel de physique d'un tel détecteur est actuellement à l'étude dans le contexte du projet européen FP7 LAGUNA-LBNO (2011-2014), auquel participent l'IN2P3 et l'Irfu.

Trois options de détecteur de type « mégatonne » sont considérées : MEMPHYS, Cherenkov à eau avec une masse de 500 kt, LENA, environ 50 kt de scintillateur liquide, et GLACIER, 100 kt d'Argon liquide. Les techniques et les performances de ces trois détecteurs se complètent sous plusieurs aspects. Deux sites souterrains sont considérés pour leur installation : la mine de Pyhäsalmi en Finlande et une extension du LSM dans le tunnel du Fréjus.

Un aspect très complémentaire de LENA (Low Energy Neutrino Astrophysics) par rapport aux autres options est la possibilité de détecter des neutrinos de basse énergie : il serait donc un observatoire idéal pour les géo-neutrinos. Avec un millier d'événements par an, il pourrait mesurer le flux total à 1% et effectuer des analyses spectrales pour déterminer le rapport U/Th avec une précision (en 5 ans) de 35% au Fréjus et 17% en Finlande, où le bruit de fond du aux réacteurs est moins important.

3.3 AUTRES GRANDS EQUIPEMENTS

Comme il a été mentionné dans les sections précédentes, les grands équipements astroparticules et/ou physique des particules ont des prolongements d'activités naturels dans les domaines variés des Sciences de la Terre.

Parmi ceux-ci, le **laboratoire souterrain de Modane** est probablement appelé à jouer un rôle important, comme structure d'accueil pérenne pour des expérimentations dédiées, effectuées par des équipes de nos instituts ou des équipes extérieures, et naturellement comme laboratoire hôte de nombreux projets en physique des hautes énergies. Sa possible extension dans le cadre des projets "Mégatonne" permet de compléter cette approche pluridisciplinaire puisqu'elle permettrait l'émergence d'un observatoire permanent (par exemple des géo-neutrinos, du rayonnement cosmique etc) doublé d'une structure d'accueil complémentaire.

Les observatoires **AUGER**, et les expériences **HESS** et **CTA** ont déjà intégré cette dimension Sciences de la Terre et leurs avancées récentes ont permis de mettre en relief l'intérêt de la communauté pour leur potentiel unique en matière d'investigation. Les détails ont été développés dans les sections précédentes.

4 MOYENS EXISTANTS ET BESOINS FUTURS

Cette section donne un état des lieux moyens/personnels de la plupart des projets discutés dans les sections précédentes. Les nombres entre parenthèses correspondent à des contributions autres que IN2P3 /lrfu.

NOM	<i>DIAPHANE</i>					
Date de début/fin	2008 / 2020					
Contact	J.Marteau (UCBL/CNRS-IN2P3), D.Gibert (INSU)					
Nature	Expérience en cours et R&D					
Ressources						
	Thésard	PostDoc, CDD	Chercheurs	Personnel technique	Budget (k€/an)	hors RH
Actuels	0(1)	0	1.2 (2.0)	1.2 (1.5)		
Besoins	0	1	1.5 (2.0)	1.2 (1.5)		

NOM	<i>T2DM2</i>					
Date de début/fin						
Contact	S.Gaffet, P.Salin					
Nature	R&D					
Ressources						
	Thésard	PostDoc, CDD	Chercheurs	Personnel technique	Budget (k€/an)	hors RH
Actuels						

Besoins					
---------	--	--	--	--	--

NOM	TOMUVOL				
Date de début/fin	Janv. 2010 / janv 2021				
Contact	C Cârloganu				
Nature	Expérience en cours et R&D				
Ressources					
	Thésard	PostDoc, CDD	Chercheurs	Personnel technique	Budget hors RH (k€/intégré)
Actuels	0	1(0)	2 (0.8)	3.5 (1.3)	17 (15)
Besoins	1(1)	1(1)	2 (2)	3 (2)	

NOM	Transfert de Radio-nucléides à l'interface géosphère/bio-sphère/environnement				
Date de début/fin	1/7/2011 -> 1/1/2021				
Contact	Catherine Landesman, catherine.landesman@subatech.in2p3.fr				
Nature	R&D				
Ressources					
	Thésard	PostDoc, CDD	Chercheurs	Personnel technique	Budget hors RH (k€/an)
Actuels	0	1 IE	1(1)	0	7(20)
Besoins	1	1		1	30(25)

NOM	ICOS				
Date de début/fin	1/3/08 - 1/1/2021				
Contact	Olivier Corpance olivier.corpace@cea.fr				
Nature	Expérience en cours				
Ressources					
	Thésard	PostDoc, CDD	Chercheurs	Personnel technique	Budget hors RH (k€/an)
Actuels	0	0		8	2(62)
Besoins	0	0		2	0.5(2)

NOM	LSM interdisciplinaire				
Date de début/fin	1/1/90 - ...				
Contact	Fabrice Piquemal, fabrice.piquemal@lsm.in2p3.fr				
Nature	Infrastructure , Expériences en cours et R&D				
Ressources					
	Thésard	PostDoc, CDD	Chercheurs	Personnel technique	Budget hors RH (k€/an)
Actuels		2	1	1	100(110)
Besoins		1		1	20(250)

NOM	L'Observatoire Pierre Auger				
Date de début/fin					
Contact	François Montanet (LPSC), montanet@in2p3.fr				
Nature	Expérience en cours				
Ressources					
	Thésard	PostDoc, CDD	Chercheurs	Personnel technique	Budget hors RH (k€/an)
Actuels	1->0	1->0.1	1->0.1	0	
Besoins	3	1	1	1	RL + 130ke

Planétologie

Les ressources en moyens et personnels impliquées dans la partie « Planétologie » figurent dans la section « Astrophysique Nucléaire » de ce même document.

A court terme, la réalisation d'une infrastructure Salle Blanche au CSNSM est indispensable à la conservation de la collection de Micrométéorites et la préparation d'échantillons pour la spectrométrie de masse. Le coût total du projet est de 330 k€ et fait partie des priorités du CSNSM. Un tiers du budget est acquis et le reste a fait l'objet de demandes à différents appels d'offres. Un soutien financier de l'in2p3 de 50 k€ aiderait considérablement à finaliser le financement de cette infrastructure. Cette infrastructure présente un caractère structurant entre les équipes de 3 laboratoires d'Orsay : le CSNSM, l'IPNO et l'IAS.

A moyen terme, la poursuite et le développement de l'activité Micrométéorites menée par le groupe d'Astrophysique du Solide du CSNSM nécessitent un soutien technique (niveau Assistant Ingénieur) ainsi le recrutement d'un jeune chercheur (CR-CNRS ou MdC)

5 RECOMMANDATIONS ET ANALYSE DES RISQUES

L'intérêt sociétal de la valorisation des techniques et méthodologies innovantes issues de la physique des hautes énergies et de la physique nucléaire par l'interdisciplinaire est évident autant pour nos disciplines que pour l'implantation de nos laboratoires dans le territoire. Il est opportun que les projets menés dans le cadre de l'interdisciplinarité soient reconnus comme enjeux transverses prioritaires de l'IN2P3 et de l'INSU et que leur développement soit incité. Il en va de même pour l'effort interdisciplinaire de retour scientifique et de valorisation des grandes infrastructures de l'astroparticule pour l'environnement et le développement durable (géosciences, écologie marine, climatologie,..) qui doit être encouragé.

Le soutien financier de ces activités n'a pas vocation à reposer uniquement sur IN2P3/IRFU, mais il est essentiel de définir des **appels d'offres ciblés et pérennes** pour les amorcer et leur permettre d'arriver à une maturation suffisante pour chercher le financement nécessaire à leur mise en place auprès d'autres agences de moyens. L'IN2P3 et l'IRFU se doivent de les accompagner en structurant les réponses aux appels d'offre des réseaux européens, en facilitant le dialogue institutionnel avec des acteurs locaux (Universités, Régions) ou scientifique avec des chercheurs extérieurs aux instituts.

Une partie importante des synergies IN2P3/INSU repose sur la valorisation des transferts de technologie et de savoir-faire, tant sur la partie instrumentale que sur plan méthodologique. Dans sa grande majorité **l'implication de l'IN2P3/IRFU est nécessaire autant au niveau physicien** que des services techniques ; l'investissement dans l'interdisciplinaire est loin d'être gratuit pour nos laboratoires, même si IN2P3/IRFU ne supportent pas financièrement ces activités.

A des rares exceptions (voir Section Planétologie), la valorisation scientifique de ces projets est portée plutôt par des chercheurs en dehors de nos instituts. Dans le cas où des chercheurs IN2P3/IRFU participent il est important de veiller à ce que leurs travaux soient reconnus scientifiquement, même si le processus d'évaluation n'est pas facile avec des instances d'évaluation très segmentées comme c'est le cas actuellement. Dans le cadre d'une valorisation technologique, quand des scientifiques sollicitent uniquement nos compétences techniques, il faut veiller à ce que cette collaboration ne dévie pas vers une relation type prestation de service ou sous-traitance. Cela passe par une **étude amont approfondie des bénéfices mutuels** que peuvent en tirer les collaborateurs et par un cadrage précis des modalités de collaboration (taux de financement de la main d'œuvre par exemple).

Globalement, au niveau IN2P3/IRFU il faut veiller à la **structuration de ces activités** ainsi qu'au **pilotage technique** des projets pour assurer une optimisation des ressources techniques et humaines investies. IN2P3 devrait également pouvoir utiliser les activités interdisciplinaires pour augmenter sa visibilité envers les acteurs scientifiques et politiques régionaux et pour cela les spécificités locales doivent bien être prises en compte dans la définition de la politique scientifique.

5.1.1 SCIENCES DE LA TERRE

Parmi les thématiques communes IN2P3/IRFU-INSU, la **tomographie par muons atmosphériques des structures géologiques** (Section 2.1.1) est un développement récent qui s'inscrit dans le besoin affiché d'élargissement des techniques de mesure, devant conduire à une meilleure compréhension de ces structures. Plusieurs projets, issus de contacts directs entre membres des deux communautés, ont émergé : **DIAPHANE** (collaboration IPNL-IPGP-Géosciences Rennes), **TOMUVOL** (collaboration LPC-IPNL-LMV-OPGC), **T2MD2** (collaboration Géosciences Azur-LSBB) sont dans des phases diverses de développement/prise de données. Les objectifs géophysiques sont l'imagerie des réservoirs karstiques, des tunnels, des volcans, des réseaux hydro-thermaux en temps réel ou non.

Ces projets tendent vers un transfert maximal de compétences pour assurer une autonomie de fonctionnement dans le cadre des OSU. La technique nécessite encore des développements autant techniques que méthodologiques avant d'arriver à une maturation suffisante pour réaliser ce transfert, et requiert l'implication de l'IN2P3 autant au niveau physicien que des services techniques.

Recommandations : au niveau IN2P3/IRFU il faut veiller à la structuration de ces activités ainsi qu'au pilotage technique des projets pour assurer une optimisation des ressources techniques et humaines investies. Il est nécessaire d'assurer une taille minimale des groupes IN2P3 pour que leur apport puisse être pleinement valorisé.

Risques : sans une implication suffisamment forte de l'IN2P3, le transfert méthodologique IN2P3/INSU ne se fera pas.

5.1.2 LES GEONEUTRINOS

Recommandations : Poursuivre l'investigation du potentiel d'un nouvel observatoire pour l'étude des geo-neutrinos et de l'information qu'ils pourraient apporter sur la composition et la dynamique du manteau terrestre.

Participer au projet et à la réalisation des futures expériences de type "megatonne" dans un contexte de coordination au niveau Européen et mondial, afin de maximiser le potentiel global de physique et d'exploiter au mieux la complémentarité des différentes techniques.

Risques : comme le budget pour la réalisation de ce projet est très important, un manque de coordination au niveau mondial risque d'en empêcher la réalisation.

5.1.3 SCIENCES DE L'ATMOSPHERE

Les études en **physique de l'atmosphère et en particulier du contenu en aérosols** sont une conséquence de l'essor des mesures des gerbes atmosphériques avec des télescopes par fluorescence dans le cas d'**Auger** ou avec des télescopes gamma dans le cas de **HESS** et **CTA**. Un programme similaire devrait voir le jour également sur **LSST**.

La mesure du contenu en aérosols de l'atmosphère sur HESS, portées par le LAMPT, pourrait servir à caractériser l'effet de la combustion de la biomasse, un phénomène qui se produit cycliquement en fin d'été en Afrique. Pour le futur, dans le cadre du projet CTA, la mise en œuvre d'un LIDAR type Raman est envisagée en collaboration avec des équipes espagnoles (IFEA/UAB) et des experts du Laboratoire CEILAP (Argentine). Il sera installé sur le site de CTA-sud et il fournira des données capables de caractériser plus en détail le type et le contenu des couches d'aérosols présents dans l'atmosphère, en plus de caractériser les propriétés optiques de celles-ci pour CTA.

Recommandations : Les activités actuelles (AUGER, HESS) et futures (CTA, LSST) bénéficieraient de la mise en place au niveau de l'IN2P3/IRFU d'une structure légère de pilotage qui faciliterait autant les contacts avec INSU, que les échanges entre les différents groupes impliqués.

L'observatoire Pierre Auger. Depuis quelques années, une partie de la collaboration française a pris part à l'étude des effets atmosphériques pour l'Observatoire Pierre Auger, et plus particulièrement sur la compréhension des aérosols, ces fines particules de poussière présentes dans l'atmosphère. En l'espace de quelques années, elle a réussi à s'imposer au sein de cette tâche. Pour illustration, un travail réalisé par l'équipe française du LAL/LPSC est en cours de relecture au sein de la collaboration Auger pour une publication dans un journal des sciences de l'atmosphère. Des partenariats avec des spécialistes de l'atmosphère ont été créés en France depuis février 2011. A présent, ce projet français s'est cristallisé avec une lettre d'intention soumise en mars 2012 à la collaboration Auger et regroupant trois laboratoires français : le LPSC (UMR 5821/IN2P3), le LISA (UMR 7583/INSU) et le LaMP/OPGC (UMR 6016/INSU).

Après l'accord de la part de la collaboration Auger, le but sera de trouver en France des financements afin de rendre possible ce projet interdisciplinaire. La particularité de celui-ci réside dans l'implication de laboratoires IN2P3 et INSU. Néanmoins, cette originalité ne doit pas être un handicap. Les enjeux pour la compréhension des rayons cosmiques et de l'atmosphère sont importants. Ce projet, s'il est financé et mis en application, permettrait d'intégrer l'Observatoire Pierre Auger dans les différents réseaux internationaux de stations météo. Aussi, une meilleure compréhension entre rayons cosmiques et taux de nucléation serait obtenue, en complément de ce qui se fait déjà en laboratoire avec l'expérience CLOUD. Du côté des physiciens des astroparticules, ces différentes mesures complémentaires sur les aérosols permettraient de réduire encore les incertitudes systématiques sur l'énergie des rayons cosmiques et du maximum de développement de leur gerbe associée.

Risques :

- 1) Après les premiers contacts, une lettre d'intention émanant des équipes des laboratoires INSU et IN2P3 concernés sera soumise au Collaboration Board de la collaboration Pierre Auger. Il est plus que probable que le projet sera accepté mais à l'heure où nous préparons ce texte, ce n'est pas encore fait. L'importance de la demande en termes de charge de travail pour le staff de l'observatoire et en ressources techniques sur place sera certainement examinée très attentivement par la collaboration et peut-être limitée.
- 2) L'expérience d'autres projets a montré qu'il est particulièrement important de soigner le rôle d'interface entre les deux communautés de chercheurs impliquées. On doit donc s'assurer de la pérennité de ce rôle d'interface qui est assuré par l'IN2P3 entre physiciens de l'atmosphère et la collaboration Pierre Auger : ce rôle a été initié par l'équipe du LAL à la suite de la thèse de K.Louédec mais il n'est pour le moment assumé que par 1 chercheur et 1 postdoc du LPSC pour une fraction marginale de leur temps. Ce rôle serait donc précarisé si les équipes IN2P3 d'Auger et en particulier celles du LPSC ne sont pas renforcées par un postdoc et/ou un chercheur.
- 3) Il n'est pas encore tout à fait établi que les moyens de monitoring de l'atmosphère de l'Observatoire Pierre Auger soient en adéquation parfaite avec les besoins des atmosphériciens. Par exemple, les lidars actuels sont inadaptés à la mesure des très basses couches. Une étude de faisabilité doit déterminer rapidement si des compléments de mesure ou des modifications sont nécessaires et quel en sera l'impact.

5.1.4 SOURCES ET Puits A EFFET DE SERRE

Risques : L'organisation des climatologues européens paraît être limitée par rapport à la taille grandissante et à l'ambition des réseaux de mesure qu'ils souhaitent déployer. Le rôle des instituts rompus à ces collaborations inter-instituts et internationales pourrait être un rôle d'accompagnement dans les méthodes et les outils associés.

5.1.5 RADIATIONS ET ENVIRONNEMENT

MESURES DES FAIBLES RADIOACTIVITÉS

Les techniques de mesures de très faibles radioactivités sont indispensables pour les expériences de physique du neutrino et de recherche de la matière noire. Le développement de spectromètres gamma de plus en plus sensibles permet certaines recherches environnementales qui les utilisent les isotopes naturels ou artificiels pour la datation ou comme traceurs. Dans le futur de nouvelles méthodes analytiques pourraient être développées utilisant de nouveaux isotopes. Le LSM est en discussion avec les autres laboratoires ayant des détecteurs à Modane pour la mise en place d'une plate-forme de mesure de très basse radioactivité. Cette plate-forme permettra de mettre en commun les savoir-faire complémentaires de ces laboratoires (mesures, développement de détecteurs, radiochimie, carottages, analyses, interprétation...) pour développer les recherches environnementales, offrir de nouveaux services à des équipes de recherche d'autres domaines, développer le parc de détecteurs disponibles, optimiser le temps de mesure sur les détecteurs, mettre en commun certaines ressources, développer des applications et augmenter les ressources propres pour subvenir au fonctionnement de la plate-forme.

Recommandations : Poursuivre et renforcer les contacts avec les autres disciplines et notamment avoir une stratégie globale avec les autres instituts du CNRS (INEE et INSU) pour la mise en place

d'une plate-forme de mesure de très basse radioactivité. Continuer le développement des techniques de mesures de très basse radioactivité.

Risques : La mise en place administrative de la plate-forme de mesure de très basse radioactivité pourrait être compliquée et retarder le projet. Il y a une très forte demande de mesures de faible radioactivité pour la physique fondamentale et le parc de détecteur étant limité, il pourrait être difficile de faire face à la demande de mesure pour l'environnement à moyen terme s'il n'y a pas d'investissements sur les détecteurs.

ENVIRONNEMENT RADIATIF ET VIVANT

Recommandations : L'effet des rayonnements sur le vivant, leur rôle dans l'évolution, l'impact sur l'environnement des accidents de Fukushima et de Tchernobyl, sont des questions largement ouvertes. Il existe aujourd'hui de nombreuses collaborations pluridisciplinaires sur ces thématiques dans lesquelles l'IN2P3 et l'IRFU n'ont pas encore apporté tout leur potentiel tant sur le plan de l'instrumentation que sur le plan des méthodes. Le Laboratoire Souterrain de Modane est un lieu tout à fait privilégié pour étudier l'effet d'une absence totale de radiation sur les êtres vivants : un tel programme doit être soutenu. L'étude d'écosystèmes exposés de façon chronique à un stress radiatif (anciens sites de mines, zones polluées autour de Tchernobyl) est un axe de collaboration qui doit être exploré activement avec l'INEE mais aussi avec l'IRSN et les acteurs institutionnels (DREAL) et privés (AREVA). En termes d'instrumentation, les technologies développées notamment dans le cadre du projet MEUST peuvent ouvrir des voies nouvelles pour surveiller l'évolution de la radioactivité de systèmes aquatiques (digues de retenues de stériles, milieu océanique au large de Fukushima). Par ailleurs, une participation au programme pluridisciplinaire d'étude des macroorganismes datés de deux milliards d'années découverts au Gabon apportera des éléments essentiels sur l'environnement radiatif dans lequel ils se sont développés et son impact éventuel sur leur évolution.

Sur le modèle du GDR MI2B focalisé sur le cancer, nous recommandons la création d'un GDR « Radiation, vivant et environnement » sur ces thématiques.

Risques : Le risque principal identifié est celui d'un amalgame entre une démarche d'analyse de l'effet des radiations sur et dans l'environnement et une prise de position sur la question du nucléaire.

Il est essentiel que le CNRS dans sa mission d'établissement de recherche indépendant puisse travailler et collaborer avec tous les partenaires, quelque soit leur perspective sur la question.

Cela requiert un dialogue avec l'ensemble des parties prenantes et une définition claire des objectifs scientifiques et des moyens.