

GRAND:

un réseau radio autonome pour la physique des astroparticules

Auteur principal:

Olivier Martineau-Huynh
LPNHE
omartino@in2p3.fr
01.44.27.23.24

Co-auteurs:

Julien Bolmont, Olivier Dadoun, Jean-Philippe Lenain, David Martin, Eduardo Sepulveda, Vincent Voisin, LPNHE
Valentin Niess, LPC Clermont-Ferrand

1 Introduction

GRAND (*the Giant Radio Array for Neutrino Detection*) est un projet de réseau d'antennes radio géant —200 000 antennes réparties en une dizaine de sous-réseaux de 20 000 km² chacun— visant à la détection de particules cosmiques d'ultra haute énergie ($E > 10^{16.5}$ eV). Les objectifs scientifiques de GRAND sont évoqués dans les contributions aux groupes de travail 4 [1] et 6 [2] et détaillés dans [3]. Nous abordons ici les aspects expérimentaux, en présentant rapidement le principe de la radio-détection des gerbes atmosphériques (section 2), puis les défis expérimentaux auxquels GRAND sera confronté (section 3), et enfin la manière dont nous envisageons de les aborder (section 4) dans les années qui viennent, en vue d'un déploiement d'un premier réseau de 10 000 antennes dès 2025, et du détecteur complet de 200 000 antennes au début de la décennie 2030.

2 Radio-détection de gerbes atmosphériques: principes et status expérimental

Une particule de haute énergie, lorsqu'elle interagit avec les molécules composant l'atmosphère terrestre, engendre une cascade de particules secondaires

(principalement électrons, positrons et muons) qui peut se développer sur plusieurs dizaines de kilomètres. Sous l'effet du champ magnétique terrestre, électrons et positrons de cette cascade subissent une déviation suivant des directions opposées. Cette dérive des charges de signes contraires peut être représentée par un courant électrique variant dans le temps, qui induit donc une émission électromagnétique. Compte tenu des dimensions caractéristiques de la gerbe —qu'on peut approximativement se représenter à un instant donné comme une galette d'une épaisseur de l'ordre du mètre—, l'émission des paires électron-positron présentes dans la cascade est cohérente dans la gamme de la dizaine à la centaine de MHz. Cet *effet géomagnétique* est la cause principale de l'émission électromagnétique des gerbes atmosphériques [4, 5].

Dans la gamme 50-200 MHz choisie pour GRAND, les impulsions induites par ces gerbes durent quelques dizaines de nanosecondes typiquement, avec des amplitudes maximales de l'ordre de quelques dizaines de $\mu\text{V}/\text{m}$ pour une énergie de gerbe de l'ordre de $10^{16.5}$ eV. Sous cette valeur seuil, le signal radio des gerbes est noyé dans le bruit de fond stationnaire, dominé par la radiation de ciel [6].

Grâce au développement des télécommunications dans cette gamme de fréquence depuis plus d'un siècle, il existe un important savoir-faire dans la détection de ces signaux radio. Cela a contribué à réaliser les premières radio-détections de cascades atmosphériques dès 1965 [7], mais cette technique ne s'est établie qu'au début du XXI^e siècle, avec l'essor de l'électronique numérique rapide et les expériences pionnières LOPES [8] et CODALEMA [9]. Les réseaux radio se sont ensuite implantés sur les détecteurs de rayons cosmiques, comme sur l'Observatoire Pierre Auger, où 150 cuves du réseau de surface (SD) ont été équipées d'antennes radio, formant ainsi le détecteur AERA [10]. Dans cette expérience, un *trigger* provenant des cuves Cherenkov peut déclencher, sur une durée de quelques millisecondes et à la cadence de 180 MS/s, l'acquisition des signaux des antennes, filtrés dans la gamme 30-80 MHz. L'analyse *offline* des signaux radio a permis de reconstruire les informations de la particule primaire —direction d'origine, énergie ou position du maximum de développement de la gerbe, directement reliée à la nature du primaire— avec une précision comparable à celles du réseau de surface de Auger [11]. Des performances équivalentes ont été atteintes sur les réseaux radio LOFAR [12] ou Tunka-Rex [13].

3 L'expérience GRAND

3.1 Motivations

GRAND vise en priorité à détecter des neutrinos d'origine cosmique ayant une énergie supérieure à $10^{16.5}$ eV. La très faible section efficace de ces particules rend improbable l'interaction d'un neutrino dans l'atmosphère. La Terre, beaucoup plus dense, est par contre opaque pour ces particules. Un neutrino tau peut notamment produire un lepton tau lorsqu'il interagit sous Terre, qui, s'il émerge dans l'atmosphère, est susceptible de se désintégrer et induire une cascade de particules qui pourra être détectée [14], notamment par son émission radio.

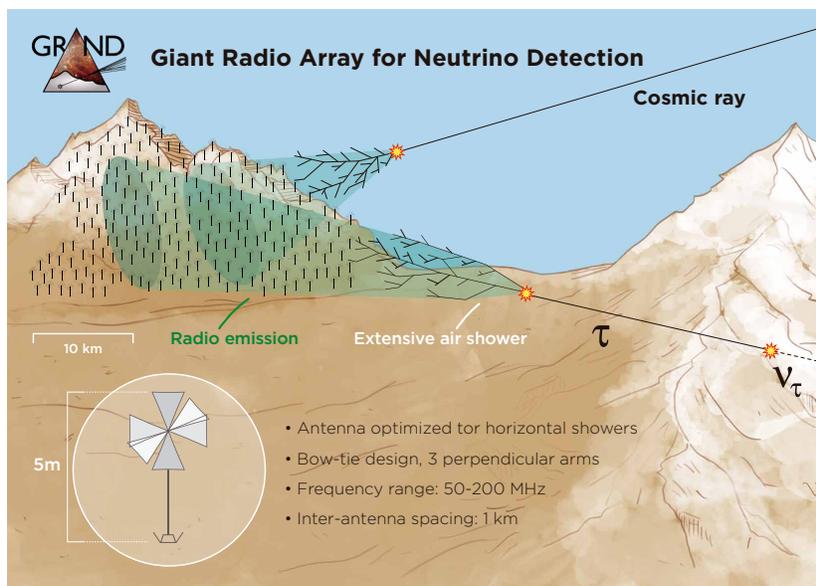


Figure 1: Principe de détection de particules cosmiques par GRAND: neutrino pour la trajectoire ascendante, rayon cosmique pour la trajectoire descendante. Figure tirée de [3].

La détection de neutrinos suivant ce mécanisme, illustré dans la figure 1, correspond à un double défi. D'une part seule une très faible proportion de neutrinos est susceptible d'induire une gerbe atmosphérique détectable. Le flux de neutrinos attendu étant déjà faible aux énergies considérées, il faut au final instrumenter des surfaces gigantesques pour espérer détecter quelques événements par an seulement. De plus, ce scénario n'est en fait réalisable que pour des trajets souterrains de moins de 1000 km : pour des valeurs plus élevées, le neutrino interagit trop loin de la surface terrestre et le lepton tau se désintègre avant d'émerger. Ces trajectoires rasantes induisent donc des gerbes atmosphériques quasi-horizontales (ou très légèrement ascendantes), ce qui complique leur détection.

La technique radio permet de répondre à ce double défi: les antennes radio sont, dans cette gamme de fréquence, des détecteurs de dimension raisonnable (typiquement le mètre), de prix modeste (quelques dizaines d'euros pour le détecteur lui-même) et qui ne demandent *a priori* pas de maintenance. Il est donc possible de déployer des milliers d'unités sur des surfaces de plusieurs dizaines de milliers de km^2 , comme l'envisage par exemple le projet SKA. Il a par ailleurs été montré qu'un réseau radio est très bien adapté à la détection de gerbes horizontales, notamment s'il est déployé dans une zone montagneuse [15]. Ces deux éléments, ainsi que les progrès réalisés par la radio-détection de gerbes atmosphériques au cours des dernières années (cf section 2), constituent les

principaux moteurs de la proposition GRAND. Le détecteur sera constitué de $\mathcal{O}(10)$ sous-réseaux, chacun composé de $\mathcal{O}(20\,000)$ antennes espacées de 1 km, et déployés dans des zones montagneuses et reculées à travers le monde [3].

3.2 Défis expérimentaux

Contrairement à la plupart des réseaux actuels de radio-détection de gerbes atmosphériques (cf section 2), le projet GRAND est basé sur le déclenchement autonome de l’acquisition des antennes composant le détecteur. C’est un défi de taille, car de nombreuses sources (avions, réseaux électriques, orages, etc) sont susceptibles de générer des signaux transitoires. L’expérience TREND, précurseur de GRAND, a par exemple montré [16] que même dans des zones reculées, les taux de déclenchement attendus pour ces sources de bruit de fond sont supérieurs de plusieurs ordres de grandeur à ceux attendus pour les neutrinos, ou même pour les rayons cosmiques.

Le système d’acquisition de données de GRAND devra donc permettre de traiter les signaux transitoires de chaque antenne avec un temps mort < 1 ms typiquement, et d’envoyer au centre d’acquisition (qui peut être distant de plusieurs dizaine de kilomètres) l’ensemble des données qui permettront tout d’abord de sélectionner les signaux associés à des gerbes atmosphériques, puis de reconstruire avec précision les informations de la particule primaire (direction d’origine, énergie, position du maximum de développement). Avec 20 000 antennes par réseau, les unités de détections devront par ailleurs fonctionner en autonomie totale et avec un très faible risque de panne.

L’émission synchrotron de notre Galaxie constitue une contribution dominante de la radiation mesurée sur Terre dans la gamme de fréquence 50-200 MHz [6]. Des sources terrestres (transitoires ou continues, monochromatiques ou de bande larges) sont par ailleurs susceptibles de s’ajouter à cette contribution irréductible. Ce niveau de bruit de fond va directement influencer sur le seuil de détection des gerbes. Or, le flux de particules cosmiques décroît rapidement avec l’énergie: $\frac{dN}{dE} \propto E^{-3}$ pour les rayons cosmiques et $\frac{dN}{dE} \propto E^{-2}$ pour la plupart des modèles de neutrinos. Une augmentation — même faible — du seuil de détection se traduira donc par une dégradation marquée des performances du détecteur, et inversement, un gain induira une augmentation significative de la statistique détectée, un élément crucial pour les neutrinos notamment. L’optimisation et le contrôle du seuil de détection du réseau sera donc un point critique de l’expérience GRAND.

Enfin, une reconstruction fiable de la direction d’origine des gerbes sera une condition *sine qua non* de l’astronomie neutrino que GRAND espère réaliser [2]. Elle nécessitera une mesure précise des instants de déclenchements des antennes. Une dispersion $\sigma_t < 5$ ns à l’échelle d’une centaine de km² — la taille caractéristique de l’empreinte au sol d’une gerbe — est l’objectif visé pour atteindre la précision de reconstruction de l’ordre de 0,1° espérée pour GRAND.

4 Axes de travail

Si le taux d'événements de bruit de fond dans GRAND sera très probablement largement supérieur à celui des gerbes, leurs signaux radio respectifs possèdent des signatures bien distinctes : le front d'onde des gerbes est plan en première approximation, et l'émission focalisée autour de l'axe, tandis qu'une grosse majorité des signaux de bruit de fond se concentrent dans le temps et/ou dans l'espace. En se basant sur ces caractéristiques, l'expérience de radio-détection autonome de rayons cosmiques TREND a pu atteindre des taux de rejet de bruit de fond de l'ordre de 10^{-7} [16]. L'information de polarisation du signal radio, inaccessible pour TREND, fournit une signature indépendante forte pour les gerbes [17], et doit permettre d'améliorer encore ce taux.

On peut en conclure que l'identification des gerbes n'est pas un problème de physique, mais un problème — purement technique — de collecte fiable des informations pertinentes (temps, amplitude et polarisation) de chacune des antennes détectant le signal radio. Sur ce point là, il est à peine exagéré de dire que les expériences actuelles de radio-détection des gerbes atmosphériques sont à l'âge de pierre numérique. En effet, dans la plupart des cas, les triggers autonomes se résument essentiellement à une simple condition "*Signal over threshold*", et l'ensemble des traces temporelles sont envoyées au centre d'acquisition de données. Comme le bruit de fond peut être déterminé à chaque instant par la mesure, et le signal de gerbe estimé par simulation avec une très bonne fiabilité, on peut très certainement envisager des solutions d'identification du signal plus élaborées et plus efficaces, comme par exemple le filtrage optimal, le *template matching* [18], la décomposition de matrices [19] ou des solutions utilisant des algorithmes d'apprentissage profond [20, 21]. Il est possible que des traitements de ce type, réalisés *online* au pied de l'antenne — sur FPGA ou CPU embarqué — permettent à la fois de rejeter une bonne partie des signaux de bruit de fond et d'optimiser le seuil de détection.

Le format des données transmises constitue un autre axe de travail important : enregistrer l'ensemble de la trace temporelle est probablement superflu, et le volume de données — égal à $3 \text{ kBy} = 3 \mu\text{s} \times 500 \text{ MS/s} \times 2 \text{ octets} \times 3 \text{ voies x,y,z}$ pour un trigger dans l'expérience GRANDProto300 évoquée plus bas — pourrait probablement être considérablement réduit si une pré-analyse du signal au pied de l'antenne permettait d'en extraire les informations nécessaires pour l'analyse *offline*. Des méthodes de compression de données [22] sont aussi susceptibles d'être applicables.

En ce qui concerne le transfert des données, les progrès récents des techniques de communication laissent entrevoir des solutions robustes, fiables, économes en énergie, et applicables à l'échelle d'un réseau de $20\,000 \text{ km}^2$. Des pistes telles que les réseaux 4G, mais aussi WiMax, *SmartMesh* [23] ou l'internet des objets [24] seront explorées.

Un système GNSS (GPS, Beidou, Glonass et Galileo) donne une résolution nominale $\sigma_t < 7 \text{ ns}$ [25], et une post-calibration via des émetteurs à fréquence et phase connues a même permis d'atteindre des précisions de l'ordre de 2 ns sur le réseau Pierre Auger [26]. Cela semble donc être la piste la plus naturelle à

explorer pour la mesure du *timing* des impulsions détectées.

Enfin un effort d'optimisation des antennes elles-même et des amplificateurs bas bruits associés —domaines dans lesquelles l'IN2P3 a montré son expertise [27, 28]— contribuerait assurément à l'amélioration des performances du détecteur GRAND.

5 Conclusion

La mise en oeuvre du projet GRAND constituera un défi expérimental de taille, mais les solutions technologiques évoquées plus haut laissent entrevoir la possibilité de mener à bien ce projet. Cela nécessitera néanmoins un important travail de prospective et de test en amont, qui devra être initié tout prochainement afin qu'un premier réseau de 10 000 antennes puisse être déployé dès 2025.

Le détecteur GRANDProto300 [29], un réseau de 300 antennes du type de celles envisagées pour GRAND, sera déployé au cours de l'année 2020 dans la province du QingHai en Chine. Il offrira un banc de test idéal pour valider les différentes options étudiées et aboutir au design final du détecteur GRAND.

Compte tenu de son expertise, l'IN2P3 peut prendre une part déterminante au développement du détecteur GRAND, auquel participent déjà le NAO (Pékin), l'Université Radboud (Nijmegen, Pays-Pas), l'Université XiDian (Xi'An, Chine), Penn State University (États-Unis) ou le Karlsruhe Institute of Technology (Allemagne). Si elle est sélectionnée, la demande conjointe du KIT, du LPNHE et de l'IAP au programme DFG-ANR, centrée sur l'optimisation des méthodes de rejet de bruit de fond dans GRAND, pourrait avantageusement être combinée à un travail de prospective sur l'implémentation *online* de ces méthodes de sélection de données.

6 References

References

- [1] O. Martineau-Huynh, J. Bolmont, J. Lenain, V. Niess, V. Van Elewyck, Neutrino physics with grand.
URL <https://indico.in2p3.fr/event/19776/contributions/75427/attachments/55185/72624/GT06-GRAND.pdf>
- [2] O. Martineau-Huynh, D. Allard, E. Parizot, V. Van Elewyck, J. Bolmont, J. Lenain, K. Kotera, V. Niess, Observing the uhe universe with grand.
URL <https://indico.in2p3.fr/event/19952/attachments/55568/73284/GT04-GRAND.pdf>
- [3] J. Álvarez Muñiz, et al., The Giant Radio Array for Neutrino Detection (GRAND): Science and Design, *Sci. China Phys. Mech. Astron.* 63 (1) (2020) 219501 (2020). arXiv:1810.09994, doi:10.1007/s11433-018-9385-7.

- [4] F. Kahn, I. Lerche, Radiation from cosmic ray air showers, Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 289 (1417) (1966) 206–213 (1966). arXiv:<http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/289/1417/206.full.pdf>, doi:10.1098/rspa.1966.0007.
URL <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/289/1417/206>
- [5] O. Scholten, K. Werner, F. Rusydi, A Macroscopic Description of Coherent Geo-Magnetic Radiation from Cosmic Ray Air Showers, *Astropart. Phys.* 29 (2008) 94–103 (2008). arXiv:0709.2872, doi:10.1016/j.astropartphys.2007.11.012.
- [6] International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R P.372-12 (2015/07), <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.372-12-201507-S/en> (2015).
URL <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.372-12-201507-S/en>
- [7] J. V. Jelley, J. H. Fruin, N. A. Porter, T. C. Weekes, F. G. Smith, R. A. Porter, Radio Pulses from Extensive Cosmic-Ray Air Showers, 205 (4969) (1965) 327–328 (Jan 1965). doi:10.1038/205327a0.
- [8] H. Falcke, et al., Detection and imaging of atmospheric radio flashes from cosmic ray air showers, *Nature* 435 (2005) 313–316 (2005). arXiv:astro-ph/0505383, doi:10.1038/nature03614.
- [9] D. Ardouin, et al., Radioelectric Field Features of Extensive Air Showers Observed with CODALEMA, *Astropart. Phys.* 26 (2006) 341–350 (2006). arXiv:astro-ph/0608550, doi:10.1016/j.astropartphys.2006.07.002.
- [10] P. Abreu, et al., The Pierre Auger Observatory V: Enhancements, in: Proceedings, 32nd International Cosmic Ray Conference (ICRC 2011): Beijing, China, August 11-18, 2011, 2011 (2011). arXiv:1107.4807.
URL <http://lss.fnal.gov/archive/2011/conf/fermilab-conf-11-924-ad-ae-cd-td.pdf>
- [11] A. Aab, et al., Energy Estimation of Cosmic Rays with the Engineering Radio Array of the Pierre Auger Observatory, *Phys. Rev. D* 93 (12) (2016) 122005 (2016). arXiv:1508.04267, doi:10.1103/PhysRevD.93.122005.
- [12] S. Buitink, et al., A large light-mass component of cosmic rays at $10^{17} - 10^{17.5} \text{ eV}$ from radio observations, *Nature* 531(2016)70(2016). arXiv : 1603.01594, doi : 10.1038/nature16976.
- [13] P. A. Bezyazeev, et al., Reconstruction of cosmic ray air showers with Tunka-Rex data using template fitting of radio pulses, *Phys. Rev. D* 97 (12) (2018) 122004 (2018). arXiv:1803.06862, doi:10.1103/PhysRevD.97.122004.

- [14] D. Fargion, A. Aiello, R. Conversano, Horizontal tau air showers from mountains in deep valley: Traces of uhecr neutrino tau, in: Proceedings, 26th International Cosmic Ray Conference, August 17-25, 1999, Salt Lake City: Invited, Rapporteur, and Highlight Papers, 1999, p. 396, [2,396(1999)] (1999). arXiv:astro-ph/9906450.
- [15] V. Decoene, N. Renault-Tinacci, O. Martineau-Huynh, D. Charrier, K. Kotera, S. Le Coz, V. Niess, M. Tueros, A. Zilles, Radio-detection of neutrino-induced air showers: influence of topography (2019). arXiv:1903.10466.
- [16] D. Charrier, et al., Autonomous radio detection of air showers with the TREND50 antenna array, *Astropart. Phys.* 110 (2019) 15–29 (2019). arXiv:1810.03070, doi:10.1016/j.astropartphys.2019.03.002.
- [17] D. García-Fernández, The CODALEMA/EXTASIS experiment: Contributions to the 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2017), *PoS ICRC2017* (2018) 416 (2018). arXiv:1710.02487.
- [18] S. W. Barwick, et al., Radio detection of air showers with the ARIANNA experiment on the Ross Ice Shelf, *Astroparticle Physics* 90 (2017) 50–68 (Apr. 2017). arXiv:1612.04473, doi:10.1016/j.astropartphys.2017.02.003.
- [19] S. Prohira, Weak signal extraction using matrix decomposition, with application to ultra high energy neutrino detection, 2019 (2019). arXiv:1910.11314.
- [20] M. Erdmann, F. Schlüter, R. Smida, Classification and Recovery of Radio Signals from Cosmic Ray Induced Air Showers with Deep Learning, *JINST* 14 (04) (2019) P04005 (2019). arXiv:1901.04079, doi:10.1088/1748-0221/14/04/P04005.
- [21] F. Führer, T. Charnock, A. Zilles, M. Tueros, Towards online triggering for the radio detection of air showers using deep neural networks, *EPJ Web Conf.* 216 (2019) 03004 (2019). arXiv:1809.01934, doi:10.1051/epjconf/201921603004.
- [22] W. Meiniel, Development and implementation of Compressed Sensing-based denoising and acquisition strategies for fluorescence microscopy and optical coherence tomography (thèse Télécom Paris-Tech).
URL "<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00586625/document>"
- [23] Smartmesh technologies, analog devices.
URL <https://www.analog.com/en/applications/technology/smartmesh-pavilion-home/smartmesh-technology.html#>
- [24] D. Saramia, Internet of things — a key topic for in2p3? (contribution au groupe de travail 9 des prospectives in2p3 2019).
URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00586625/document>

- [25] u-blox, gps-based timing considerations with u-blox 6 gps receivers: Application note.
URL <http://www.u-blox.com>
- [26] A. Aab, et al., Nanosecond-level time synchronization of autonomous radio detector stations for extensive air showers, *JINST* 11 (01) (2016) P01018 (2016). arXiv:1512.02216, doi:10.1088/1748-0221/11/01/P01018.
- [27] P. Abreu, et al., Antennas for the detection of radio emission pulses from cosmic-ray induced air showers at the Pierre Auger Observatory, *Journal of Instrumentation* 7 (10) (2012) P10011 (Oct 2012). arXiv:1209.3840, doi:10.1088/1748-0221/7/10/P10011.
- [28] Q. Gou, et al., The GRANDproto35 experiment, *PoS ICRC2017* (2018) 388 (2018). doi:10.22323/1.301.0388.
- [29] V. Decoene, The GRANDProto300 experiment: a pathfinder with rich astroparticle and radio-astronomy science case, in: *36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019)*, Vol. 36 of *International Cosmic Ray Conference*, 2019, p. 233 (Jul 2019). arXiv:1909.04893.