

Couplages Terre-Ionosphère, Orages magnétiques, Précurseurs et TLE : bilan et perspectives des observations du système [SQUID]² au Laboratoire Souterrain Bas Bruit de Rustrel-Pays d'Apt

Earth-Ionosphere Couplings, Magnetic Storms, Precursors and TLE : Results and Prospects of the [SQUID]² System in the Low-Noise Underground Laboratory of Rustrel-Pays d'Apt

*G.Waysand¹; J.Marfaing³; J.J.Bois¹; E.Pozzo di Borgo²; R.Blancon²; S.Gaffet^{1,4}; M.Pyéé⁶; M.Yedlin⁷, P.Barroy⁵
M.Auguste¹; D.Boyer¹; A.Cavaillou¹*

1. LSBB Rustrel, UMR Galilée, Obs.de la Côte d'Azur, Univ.Nice Sophia Antipolis, Rustrel. waysand@orange.fr
 2. Univ.d'Avignon, Avignon, France. elisabeth.pozzo-di-borgo@univ-avignon.fr, remi.blancon@univ-avignon.fr
 3. IM2NP faculté de Saint Jérôme, Universités d'Aix-Marseille, Marseille., jannie.marfaing@im2np.fr
 4. GeoSciences Azur, Université de Nice Sophia Antipolis, Nice., gaffet@geoazur.unice.fr
 5. Physique de la Mat. Cond., Université de Picardie-Jules Verne, Amiens., pierre.barroy@u-picardie.fr
 6. LPCE CNRS Orléans et Univ. Denis Diderot Paris 7. mailto:mpyee@cnrs-orleans.fr
 - 7.University of British Columbia, Dept. of Elect. and Comp.Engin., Vancouver, Canada. matty@ece.ubc.ca
-

Résumé :

Les couplages Terre-Ionosphère sont magnétiquement observables par le magnétomètre [SQUID]² (Superconducting QUantum Interference Device with Shielding QUALified for Ionosphere Detection) installé sous 518m de karst, grâce à sa sensibilité et son environnement très bas bruit. Sont ainsi mis en évidence:

- un mode de résonance de la mésopause excitable par les ondes P ou par champ électrique comme ce fut le cas pendant l'heure précédant le séisme de Sichuan en mai 2008.
- les modes S et T de respiration du globe pendant des périodes de calme magnétique et sans séisme majeur.
- les orages magnétiques comme si on était au pôle bien qu'installé à moyenne latitude.
- des signaux associés aux sylphes.

Cet ensemble de résultats permet d'envisager un réseau mondial de quelques stations même avec des niveaux de bruit moins bons mais en coïncidence temporelle avec [SQUID]².

Mots Clés : Couplages Terre-Ionosphère, sprites (sylphes), orages magnétiques, SQUID.

Abstract :

Thanks to the combination of high sensitivity with ultra low noise environment) [SQUID]² (Superconducting QUantum Interference Device with Shielding QUALified for Ionosphere Detection) magnetometer operating below 518m of karst allows the magnetic observation of Earth-Ionosphere couplings. Main results are:

- identification of a mesopause resonance mode which can be excited by P waves or by electric field as it was the case during the hour before the Sichuan quake (may 2008).
- S and T breathing modes of the Earth during quiet magnetic periods with no major quake/
- magnetic storms as if the instrument is at the extreme North although it is set at medium latitude
- signals in time correlation with transient luminous effects.

These results ask for a world wide network of few stations, even with less favorable noise level, but in time correlation with [SQUID]².

Keywords: Earth-Ionosphere couplings, Sprites , Magnetic storms, SQUID.

Introduction

La conversion de l'ancien poste de tir N°1 du système d'armes du Plateau d'Albion en Laboratoire Souterrain Bas Bruit de Rustrel-Pays d'Apt a offert la possibilité de mettre en place un nouvel instrument pour l'étude du

géomagnétisme terrestre. Cette communication fait le bilan des observations et des perspectives ainsi ouvertes dans différents domaines, renvoyant pour la discussion détaillée des résultats aux publications correspondantes.

Le système [SQUID]² est un magnétomètre 3 axes à SQUID à basse température critique installé sur le plancher antivibratoire de la capsule blindée où se trouvaient les officiers de veille. La caractérisation de l'efficacité exceptionnelle de ce blindage a mis en évidence qu'il était capable de détecter par leur réponse hydro-magnétique les ondes P de séismes lointains arrivant dans le karst du plateau de Vaucluse (§1). L'onde P émergeant dans l'atmosphère se propage verticalement. 300 secondes plus tard elle atteint la mésopause et excite un mode de résonance de celle-ci dont la période est de plusieurs dizaines de secondes. Les longueurs d'ondes considérables correspondant à ces résonances font qu'aussi distant qu'on soit géographiquement sur Terre on est toujours au voisinage de la source (§2). Ce mode de résonance de la mésopause peut aussi être excité par un champ électrique comme [SQUID]² l'a détecté dans l'heure précédant le séisme de Sichuan-Wenchuan en mai 2008 (§3). Pour des signaux acoustique de fréquence beaucoup plus faible que la fréquence de résonance de la mésopause, il n'y a plus d'excitation de celle-ci mais déplacement en masse de l'ionosphère puisqu'on est alors en régime quasi-statique. Tel est le cas pour les modes de respiration de la Terre. Effectivement dans des périodes de calme magnétique ces modes sont observables par [SQUID]², même en l'absence de fort séisme (§4).

La détection des orages magnétiques par un magnétomètre n'a rien d'exceptionnel, toutefois la possibilité d'exploiter toute la sensibilité du magnétomètre SQUID grâce à son blindage fournit des signaux qui correspondent à l'activité magnétique mondiale et sont, en première approximation, aussi riches que ceux enregistrés par des magnétomètres classiques aux latitudes polaires (§5). Enfin, le système est également sensible à l'activité orageuse terrestre. Une des manifestations les plus remarquables a été la détection individuelle des éclairs correspondant à l'observation d'une série de sylphes (sprites) dans le Golfe du Lion (§6). Les perspectives... et les limitations rencontrées dans l'interprétation des signaux d'une installation encore unique en son genre militent en faveur d'un petit réseau mondial de systèmes de même nature (§7).

1. Description et caractérisation du système [SQUID]²

2.1 Description

Pour ce qui concerne le géomagnétisme, il suffit de savoir que le calme du Laboratoire Souterrain Bas Bruit est caractérisé par un spectre de bruit sismique voisin du minimum théorique mondial (figures 1 et 2). Ce qui signifie

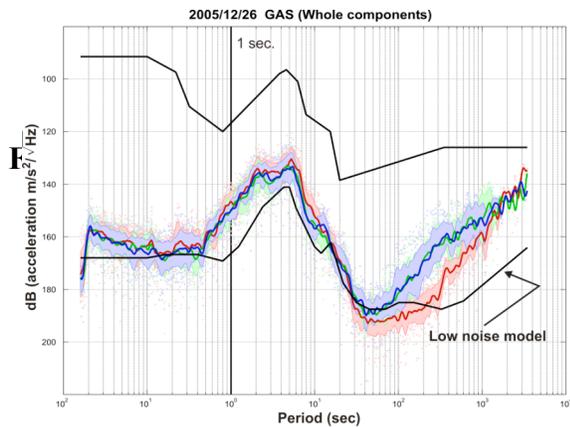


Figure 1: Spectre sismique enregistré par un des sismomètres du LSBB, la courbe noire inférieure correspond au modèle du minimum mondial.

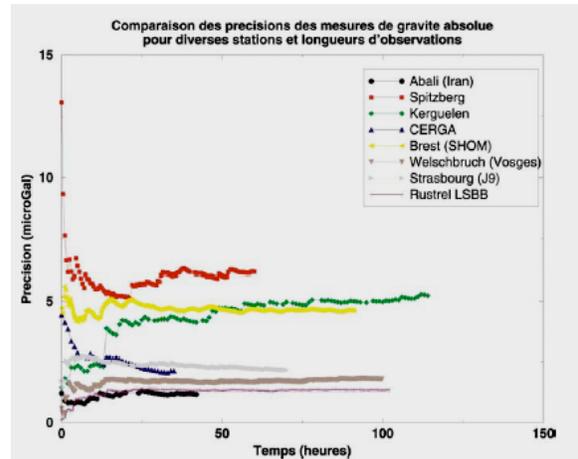


Figure 2: Comparaisons des mesures de gravité absolue pour diverses stations : le LSBB est le site où la dispersion des mesures, donc des fluctuations, est la plus faible avec le site d'Abali en Iran.

que les observations magnétiques ne sont pas affectées par la mise en branle de masses magnétiques qui seraient provoquées par des parasites d'origine mécanique, ce qui est important car le blindage de l'installation n'est pas amagnétique.

En effet, le blindage électromagnétique est constitué par la combinaison des écrans que constitue depuis la surface les 518m de karst, puis 2m de béton armé et enfin deux centimètres d'acier mi-doux [1] qui constituent les parois de la capsule blindée (figure 3). C'est un blindage sans μ métal qui n'a donc rien à voir avec des chambres zéro gauss.

Le capsule est un cylindre horizontal orienté grossièrement Nord-Sud à l'intérieur duquel se trouve une cabine de 100m² suspendue par un ensemble de vérins et de ressorts amortisseurs, elle est donc désolidarisée de la roche.

1.2 Validation

C'est sur le plancher de cette cabine qu'avec un magnétomètre 3 axes à SQUID basse T_c a été mesuré le spectre de bruit du système dont la ligne de base est de 2fT/√Hz (figure 4). C'est en fait le niveau de bruit intrinsèque du SQUID. Le blindage se comporte donc comme un filtre passe bas et offre au-dessus de 40Hz le même niveau de bruit que les meilleures chambre zéro gauss [2].

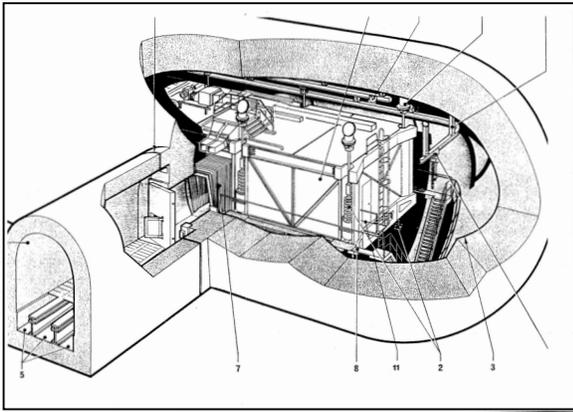


Figure 3 : Schéma de la capsule blindée et de sa coque de béton armé. Longueur 28m, diamètre 8m . Au centre, la cabine suspendue par vérins et ressorts. L'ensemble n'est pas amagnétique et ne comprend pas de μ métal.

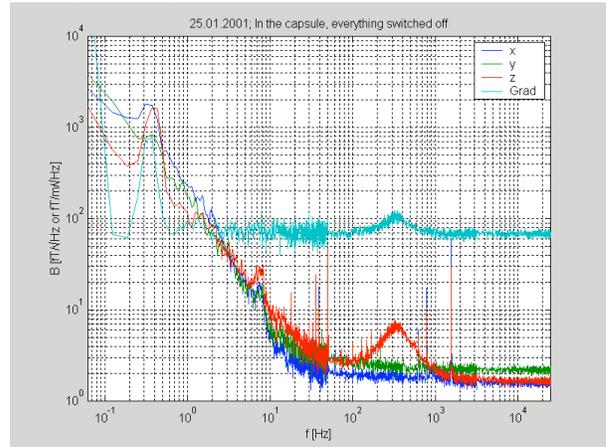


Figure 4 ; Spectre de bruit magnétique dans la cabine La résonance à 350Hz est intrinsèque à la canne de mesure, vers 8Hz on a le premier mode de Schumann, vers 0,6 Hz la houle marine.

La validation des possibilités offertes par cet ensemble non conventionnel est apparue au cours de ces mesures quand, simultanément à l'arrivée à Rustrel de l'onde P en provenance d'un séisme de magnitude 7.6 (Bhuj, Indes) une signature synchrone de l'ordre de la dizaine de picoteslas a été détectée: la réponse magnéto-hydro-sismique du système karstique du plateau de Vaucluse [3].

Une installation permanente d'un magnétomètre à SQUID basse T_c 3 axes à l'intérieur de la capsule blindée a donc été mise en place. Les magnétogrammes obtenus au LSBB sont bien en accord avec une interpolation linéaire de ceux fournis par trois observatoires magnétiques formant un triangle autour du LSBB : Chambon la Forêt en France, Ebro en Espagne et Fürstentfeldbruck en Allemagne qui ont une précision limitée à 0,1nT [4].

2. Excitation de la mésopause par les ondes P

Le LSBB dispose d'une antenne sismique 3D, les signaux magnétiques peuvent ainsi en permanence être comparés aux signaux sismiques. Les magnétogrammes de [SQUID]² plus résolus que ceux des observatoires géomagnétiques révèlent fréquemment des paquets d'ondes amorties, en dehors de toute arrivée d'ondes sismiques au LSBB. Comme le montre l'exemple de la figure 5, si on prend en compte tous les séismes de magnitude >3, ces paquets d'onde sont décalés de 300 secondes par rapport à l'émergence de l'onde P. Ces 300 secondes correspondent au temps de propagation de l'onde P jusqu'à la mésopause. La période de ces oscillations amorties est entre 60 et 90 secondes, la réponse aux ondes P n'est donc pas linéaire, et l'onde P peut-être assimilée à une impulsion excitant la résonance. La longue période de cette résonance explique qu'on soit sensible à des séismes lointains puisque du point de vue électromagnétique on est toujours proche de la source. Si Rustrel n'est pas dans le cône d'ombre du séisme, le même phénomène est observé 300 secondes après l'émergence dans l'atmosphère de l'onde P [5].

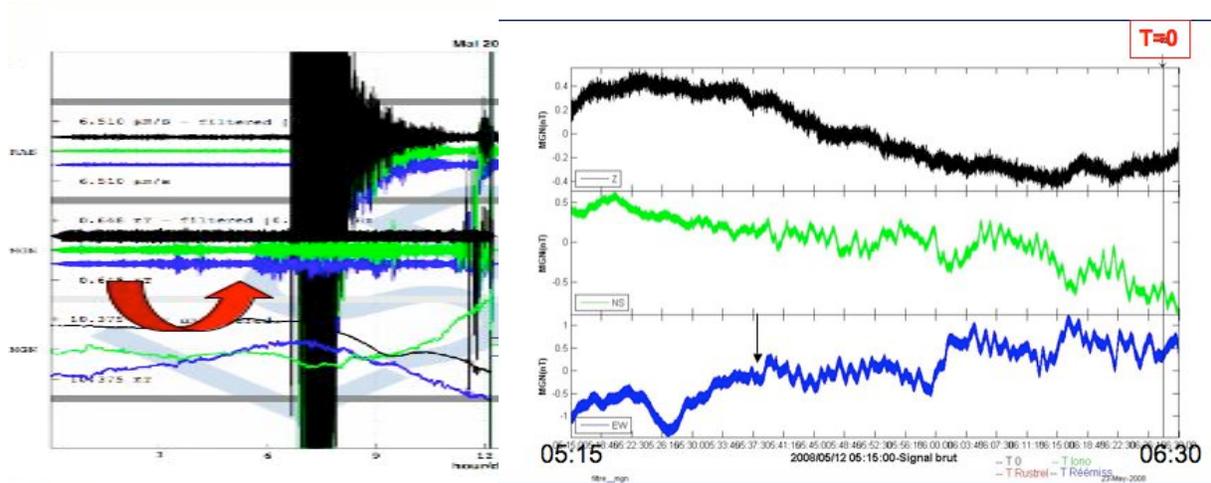


Figure 6 : Graphe de gauche : enregistrement standard de la matinée du 12 mai 2008 à Rustrel : traces supérieures, sismomètre de référence, traces médianes signaux de $[SQUID]^2$ filtrés de 0,01 à 10 Hz, traces inférieures signaux bruts de $[SQUID]^2$.

Graphe de droite : détail des signaux bruts entre 05 :15 et 06 :30 TU, $T=0$ marque l'heure du séisme (06 :27 TU), la petite flèche verticale orientée vers le bas sur la composante EW indique le début du régime d'oscillations marqué par un premier saut de la valeur continue du champ magnétique. Deux autres sauts plus importants peuvent être notés sur EW 30 et 10 minutes avant le séisme.

Toutes ces remarques n'auraient pas été faites s'il n'y avait pas eu, quelques jours après le séisme, publication de séquences vidéo prises par des amateurs à chaque fois à quelques centaines de kilomètres de l'épicentre qui montraient des bandes horizontales de nuages dans lesquels la lumière se décomposait faisant apparaître toutes les couleurs de l'arc en ciel.

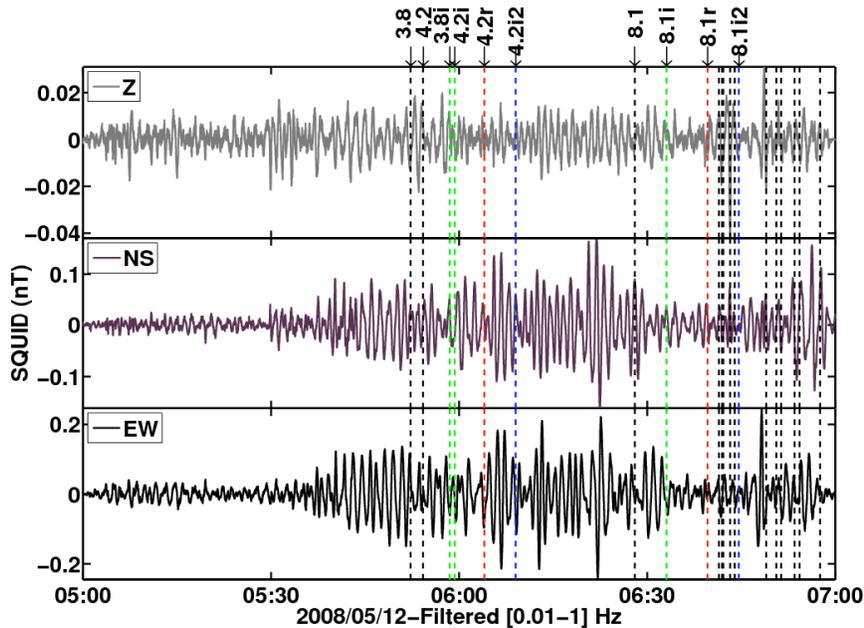


Figure 7 : signaux $[SQUID]^2$ dans l'heure précédant le séisme filtrés $[0,01-10]$ Hz avec les seuls deux séismes $M>3$ "i" marque l'arrivée de l'onde P correspondante à la mésopause, "r" l'arrivée à Rustrel, "i2" l'arrivée à la mésopause à la verticale de Rustrel. Ces deux séries de signaux ne marquent ni le début ni la fin du régime de fortes oscillations.

Ces séquences vidéo coïncident avec les sauts magnétiques. Sur la première et la troisième des structures rayonnées

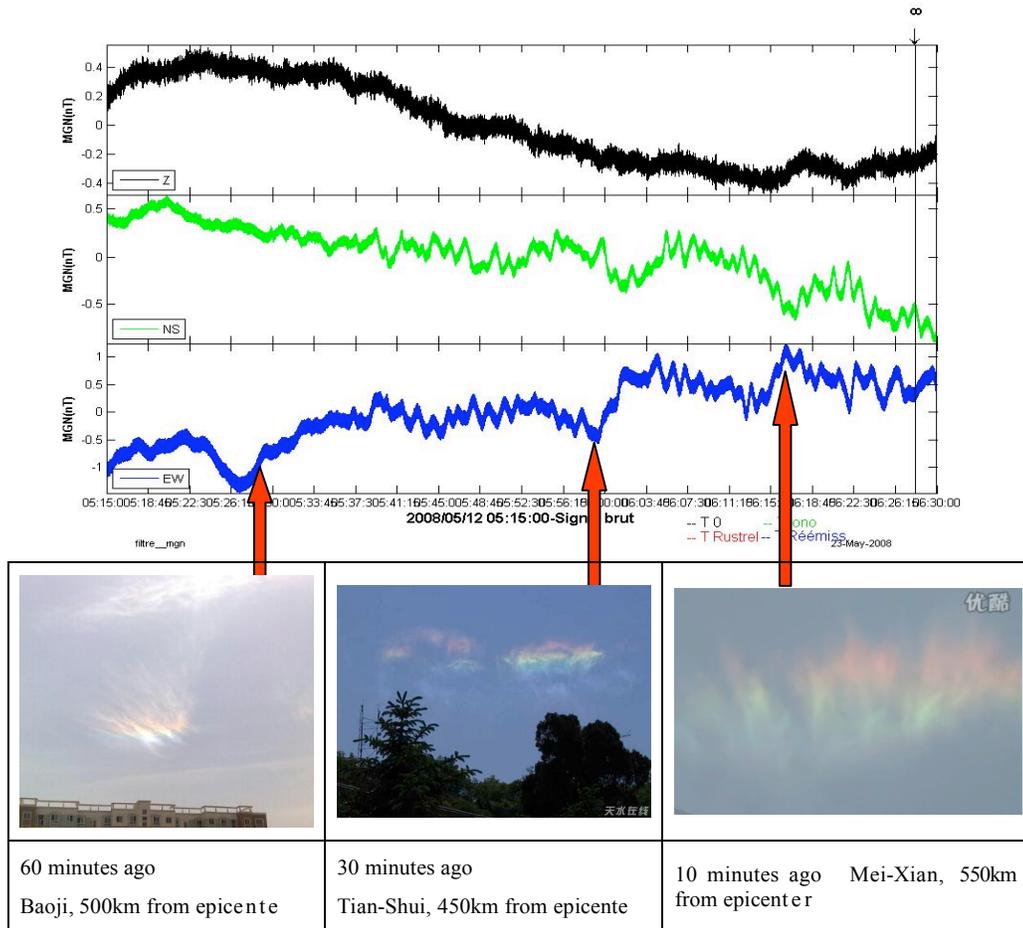


Figure 8 : les séquences vidéo de « nuages colorés comme des arcs en ciel » apparus à plusieurs centaines de kilomètres de l'épicentre, 60, 30 et 10 minutes avant le séisme coïncident avec les sauts magnétiques bien nets sur la composante EW. Leur structure rayonnée traduit la présence d'un champ électrique.

sont bien apparentes traduisant la présence d'un champ électrique [6].

Le régime d'amplification des oscillations de la mésopause s'éteint quand l'onde P du séisme atteint l'ionosphère (verticale marquée "8i" sur la figure 9). Le fait que l'ensemble du phénomène sismique a créé dans l'atmosphère des champs électriques est conforté par le fait que l'onde P de la première réplique arrivant à la mésopause (verticale marquée "6i") a créé un pulse magnétique.

Le graphe de la figure 7 contient en principe une information d'azimut. Toutefois, les amplitudes des composantes NS et EW n'étant pas constantes l'obtention de cette information reste assez arbitraire. En prenant le parti -discutable- de ne prendre que des enveloppes linéaires pour les paquets d'oscillations d'amplitude à peu près constante pendant quelques minutes ou des maxima et en faisant le rapport des ordonnées de points sur ces droites au même instant on a ainsi obtenu une série de points fournissant des azimuts entre 35 et 45°. Puisqu'on est en proximité électromagnétique de la source, cet azimut n'indique pas une direction de propagation mais une polarisation à l'origine. L'intérêt de ce dépouillement naïf et pas rigoureux est qu'il a été fait à l'aveugle sans aucune information sur les mouvements du sol lors du séisme. On sait depuis (AGU Fall Meeting 2008) que le séisme s'est manifesté par une faille de plusieurs centaines de kilomètres de long...orientée 35° Est (figure 10). Vu la méthode peu rigoureuse de dépouillement ce n'est pas cet accord numérique qu'il faut souligner mais la vérification qualitative que les signaux obtenus fournissent une indication de polarisation du signal source

Les oscillations ne sont pas rigoureusement périodiques, leur période varie entre de 70 et 90 secondes. C'est à peu de chose près la même gamme que pour une excitation de la mésopause par les ondes P. Dans ce dernier cas, l'excitation de la résonance résulte de ce que les fréquences acoustiques sont bien plus élevées que la fréquence de résonance de la mésopause. Le front d'onde P peut-être assimilé à une impulsion. Puisque c'est le même mode de résonance de la mésopause qui constitue le signal magnétique précurseur de Sichuan il faut admettre que l'établissement (ou les apparitions successives) du champ électrique excitateur sont elles aussi bien plus brèves que la période du mode excité.

Dans le cas des modes propres d'oscillation du globe on est dans la situation inverse : les fréquences d'excitation de l'atmosphère sont bien plus basses que la fréquence de la résonance de la mésopause, comme le montre le paragraphe suivant le couplage Terre-Ionosphère est alors différent.

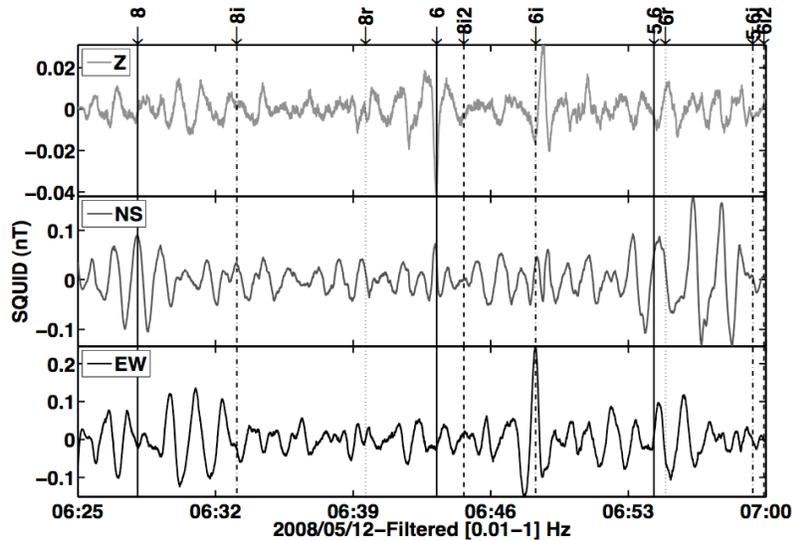


Figure 9 : Extinction du régime d'amplification des oscillations lors de l'arrivée de l'onde P à la mésopause (verticale "8i"). Présence de champ électrique révélée par le pulse lors de l'arrivée de la première réplique à la mésopause "6i". un œil averti peut voir qu'il y a aussi un pulse sur NS et Z dès le temps zéro de la première réplique.

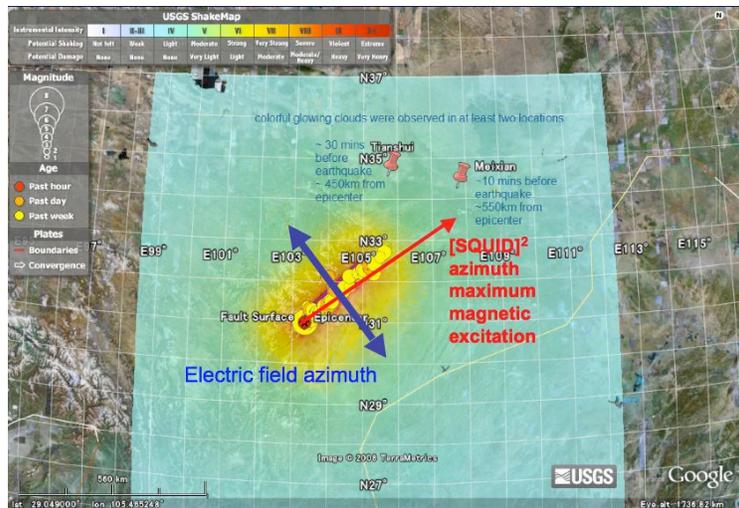


Figure 10 : Faille du séisme de Wenchuan-Sichuan et azimuth obtenu par un dépouillement assez subjectif des signaux du régime précurseur d'amplification par $[SQUID]^2$. Les fiches rouges indiquent deux des trois sites où ont été observées les « nuages colorés comme des arc en ciel ». Vu la longueur de la faille on comprend que les lignes de champ électrique aient pu créer de tels effets à plusieurs centaines de kilomètres.

4. Réponse ionosphérique aux Modes Normaux de la Terre

Les réseaux sismométriques ne permettent l'observation des oscillations propres de la Terre que pour de violents séismes $M > 8$. Plus sensibles, les gravimètres supraconducteurs ont étendu l'observation fiable des premiers modes sphériques (modes S) et toroïdaux (modes T) à des périodes de 72 heures sismiquement calmes ($M < 5,7$), [7]. Par analogie avec la démarche adoptée par la sismologie, espérer l'observation par leur réponse ionosphérique de modes pour la plupart entre 1 et 3 mHz revient donc à se poser la question du spectre de bruit magnétique terrestre minimum dans cette gamme de fréquence. Des périodes de calme magnétique de plus de 72 heures c'est-à-dire sans séisme majeur ($M < 5,5$) et une météo spatiale calme. (figure 11) et le spectre de Fourier correspondant (figure 12)

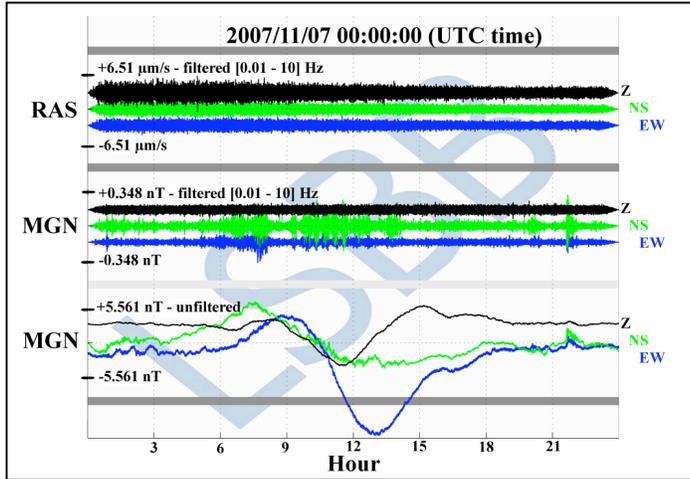


Figure 11 : Magnétogramme (traces MGN) de jour sismiquement calme

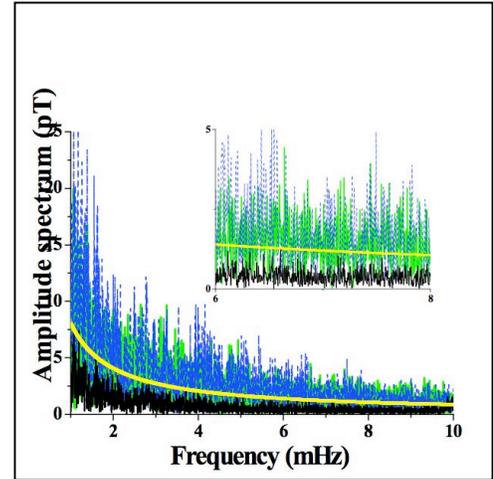


Figure 12: spectre de Fourier correspondant Sur les trois composantes le signal excède clairement la courbe en $1/f$.

qui montre que sur les trois composantes il y a excès de signal par rapport à la courbe de bruit en $1/f$. La composante Z est celle qui est la plus faible ce qui vérifie que les sources de signal sont des déplacements essentiellement verticaux de charges électriques. Cette constatation s'accompagne d'une autre : cet excès de signal présente une multitude de raies qui lui donne tout autant l'allure d'un spectre de bruit. Pour s'assurer que ce résultat n'est pas dû à des artefacts dans le traitement des signaux, plusieurs fréquences d'échantillonnage ont été utilisées ainsi qu'un lissage par glissement de la moyenne pour cinq points consécutifs. La figure 13 montre que l'excès de signal est bien stable par rapport aux techniques d'échantillonnage.

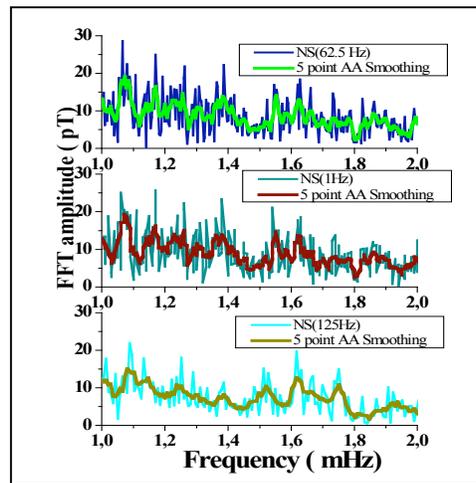


Figure 13: le spectre des données est stable par rapport à différentes techniques d'échantillonnage avec ou sans lissage sur 5 points consécutifs.

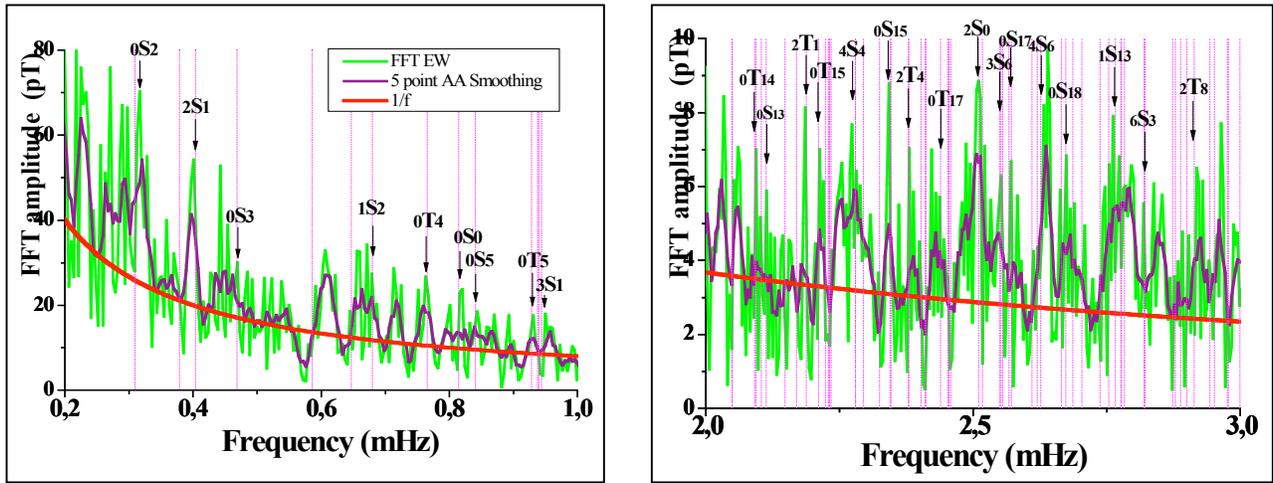


Figure 14: Spectre des réponses ionosphériques aux modes propres de respiration de la Terre. Les pics indexés suivent le modèle PREM, ils sont tous à moins de 1% des valeurs de ce modèle.

Les deux encarts de la figure 14 ci-dessus montrent une faible partie des résultats obtenus [8]. Tous les pics indexés correspondent à des modes propres du modèle PREM [9]. Les valeurs obtenues sont toujours à moins de 1% de celles du modèle. Dans ce cas d'interaction Terre-Ionosphère il y a donc conservation des fréquences d'excitation, à ces fréquences quasi statiques c'est donc un déplacement en bloc au-dessus des régions concernées qui se produit, pas l'excitation d'un mode de résonance. [SQUID]² détecte donc les modes propres d'excitation de la Terre par temps magnétiquement calme et même en l'absence de forts séismes. D'autres pics que les modes propres sont obtenus, leur interprétation est l'objet d'une publication ultérieure.

6-Orages magnétiques et sprites

6.1 Orages magnétiques

Évidemment ce magnétomètre à bas bruit détecte aussi les orages magnétiques. Le très faible niveau de bruit environnemental permet l'exploitation de toute sa sensibilité et donc fournit des signaux qui représentent la réponse globale du champ terrestre à l'orage magnétique. Notamment ce qui se passe au pôle puisque c'est là que les fluctuations sont les plus élevées, bien que Rustrel soit une latitude moyenne. C'est ce que montre la figure 15 qui

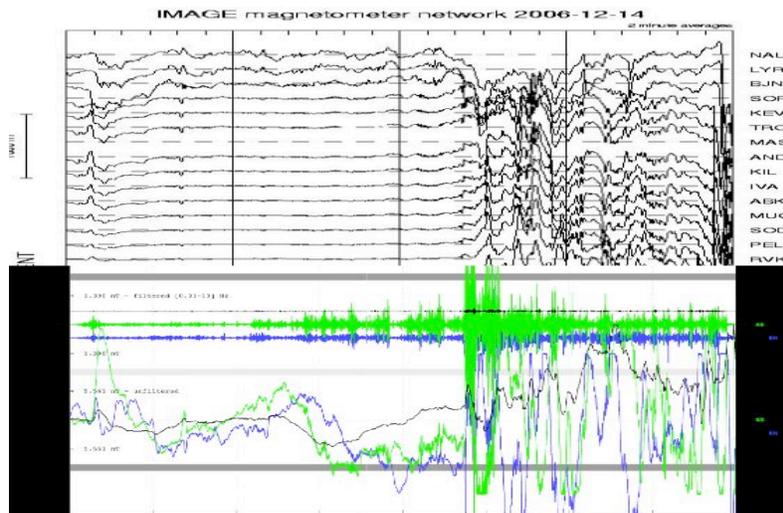


Figure 15: Comparaison des signaux fournis par les observatoires magnétiques du réseau scandinave IMAGE rangées par ordre de latitude décroissante et des signaux simultanés [SQUID]² pour l'orage magnétique du 14 décembre 2006. (Merci à Michel Parrot du LPCE Orléans).

superpose les données du réseau scandinave d'observatoires magnétiques avec celles obtenues simultanément à Rustrel. Le s signaux [SQUID]² présentent un signal très analogue à la celui de la station la plus polaire. l

6.2 Sprites

Le 2 Septembte 2009 une forte activité orageuse sur le Golfe du Lion a été enregistrée accompagnée de nombreux

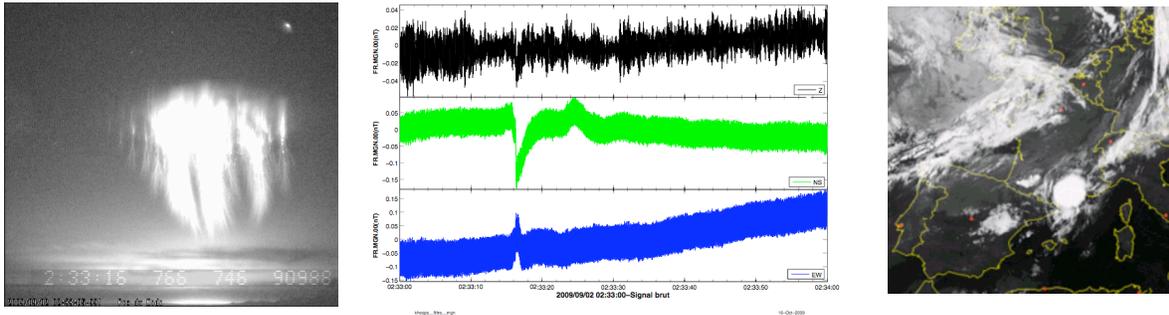


Figure 16 : Observation d'un phénomène transitoire lumineux le 2 septembre 2009 à 02 :33 :16 TU par une caméra ultra-sensible à l'Observatoire du Pic du Midi 300km W WN détecté par [SQUID]² à 150km E EN, cliché Météosat du système orageux (avec Serge Soula Laboratoire d'Aérodologie, Université Paul Sabatier, Toulouse)

éclair dont une dizaine ont qui ont donné naissance à des sylphes (sprites). Ces phénomènes transitoires lumineux ont été enregistrés par une caméra ultra-sensible installée à l'Observatoire du Pic du Midi à 300 km environ dans la direction W-WN . A 150 km E.EN de là, [SQUID]² pour chacun d'entre eux a enregistré des pulses caractéristiques (qui sont en fait la queue basse fréquence des éclairs responsables des sylphes) (figure 16). La série complète est représentée figure 17. Avec Serge Soula (Laboratoire d'Aérodologie, Université Paul Sabatier, Toulouse) un dépouillement préliminaire a permis de vérifier les coïncidences temporelles de toute la série. On notera qu'ils sont unipolaires ce qui a permis leur identification immédiate.

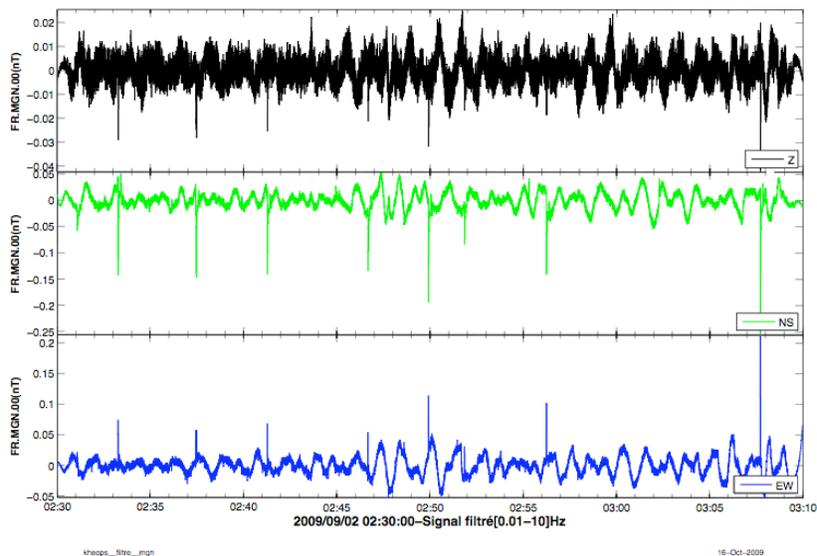


Figure 17 : série des impulsions détectées à Rustrel correspondant aux Sylphes observés au Pic du Midi

7. Conclusion

Cet ensemble de résultats montre qu'un système magnétométrique de grande sensibilité et en environnement bas bruit est un nouveau moyen d'observation pour l'étude des interactions Terre-Ionosphère. Le fait qu'il n'y ait pour l'instant qu'un seul système répondant à ces critères devient de plus en plus un obstacle à l'exploitation systématique de cette nouvelle possibilité instrumentale. C'est pourquoi il convient d'envisager un réseau mondial de quelques stations même avec des niveaux de bruit moins bons mais en coïncidence temporelle avec [SQUID]². Des efforts préliminaires sont engagés vers cet objectif [10].

Références Bibliographiques

- [1] Waysand G., D. Bloyet, J.P. Bongiraud, J.I. Collar, C. Dolabdjian, Ph. Le Thiec First Characterization of the Ultra-Shielded Chamber in the Low-noise Underground Laboratory (LSBB) of Rustrel Pays d'Apt *Nucl. Instrum. Meth. A* **444**, 336-339 (2000). [doi:10.1016/S0168-9002\(99\)01377-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)01377-7)
- [2] Schultze V., R. Stolz, V. Zakosarenko, A. Chwala, L. Fritzsche, R.I.J. Sselsteijn, N. Oukhanski, M. Schulz, and H.-G. Meyer Magnetic field measurements using very sensitive SQUIDS - XXVIIth General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI), 17-24 août 2002, Maastricht, Hollande, session Advances in Superconductor Components and applications, extended abstract (2002) 4 pp.
- [3] Gaffet S., Y. Guglielmi, J. Virieux, G. Waysand, A. Chwala, R. Stolz, C. Emblanch, M. Auguste, D. Boyer, and A. Cavaillou Simultaneous seismic and magnetic measurements in the Low Noise Underground Laboratory (LSBB) of Rustrel, France, during the 2001, 26th January Indian earthquake - *Geophys. J. Int.* **155**, 981-990 (2003).
- [4] Henry, S., Kraus, H., Malek, M., Mikhailik, V.B. and Waysand, G. SQUID magnetometry for the cryoEDM experiment - Tests at LSBB -, *J. inst.* **3**, 11003.(2008) [doi : 10.1088/1748-0221/3/11/P11003](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/11/P11003)
- [5] Waysand G., P. Barroy, R. Blancon, S. Gaffet, C. Guilpin, J. Marfaing, E. Pozzo di Borgo, M. Pyée, M. Auguste, D. Boyer, A. Cavaillou Seismo-Ionosphere Detection by Underground SQUID in Low-Noise Environment in LSBB - Rustrel, France - *European Physics Journal of Applied Physics* **47-1**, (2009) DOI: 10.1051/epjap:2008186
- [6] Waysand G., Barroy P., Blancon R., Bois J.J., Gaffet S., Marfaing J., Pozzo di Borgo E., Pyée M. Auguste M. Boyer D., Cavaillou A. AGU Fall Meeting 2009 : Poster session S53B-1838 : ULF Magnetic Ionosphere Precursor of Sichuan Earthquake Detected by [SQUID]² System in LSBB-Rustrel.
- [7] Nawa K. et al., *Phys. Earth Planet. Inter.*, **120** (2000) 289.
- [8] J. Marfaing, J.-J. Bois, R. Blancon, E. Pozzo di Borgo, G. Waysand, S. Gaffet, M. Yedlin, P. Barroy, M. Auguste, D. Boyer and A. Cavaillou About the world-wide magnetic-background noise in the millihertz frequency range *EuroPhysics Letters*, **88** (2009) 19002 www.epljournal.org doi: 10.1209/0295-5075/88/19002
- [9] Dziewonski A. M. and Anderson D. L., *Phys. Earth Planet. Int.*, **25** (1981) 297.
- [10] Wang J.S. et Waysand G. session NH 31-C AGU fall meeting 2009 ainsi que Seismic Correlation and Coupling from the Underground, Surface to the Ionosphere, poster NH31C-1132 AGU Fall Meeting 2009.