

À l'écoute des infrasons

Les infrasons sillonnent le globe

Alexis Le Pichon, Élisabeth Blanc
CEA
Centre DAM Ile-de-France
91297 Arpajon
E-mail : alepichon@gmail.com

Résumé

Les explosions aériennes, qu'elles soient nucléaires, chimiques ou naturelles, produisent des ondes acoustiques inaudibles dénommées ondes infrasonores ou infrasons, de période comprise entre quelques dixièmes de seconde et plusieurs minutes. La propagation de ces ondes s'effectue sur de grandes distances en raison de leur très faible atténuation, et du fait que les différentes couches de l'atmosphère créent des conditions de guides d'ondes particulièrement efficaces. Dans le cadre du développement des outils de vérification du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (TICE), un Système de surveillance internationale (SSI) composé de 60 stations infrasons est en cours de déploiement. Acteur de la lutte contre la prolifération nucléaire, aux plans national et international, le CEA est responsable, pour la France, de l'application du TICE. Les compétences du CEA en matière de détection sont mises à profit à des fins de surveillance de l'environnement et pour l'étude des perturbations de l'atmosphère. À plus long terme, les mesures des ondes atmosphériques de grande échelle pourront contribuer à décrire la dynamique atmosphérique globale et ses effets sur l'évolution du climat.

Diverses sources d'infrasons

L'expertise acquise par le Département Analyse, Surveillance, Environnement (DASE) de la Direction des applications militaires (DAM) du CEA dans le domaine des infrasons est le résultat de plus de 40 ans de mesures systématiques et d'expériences particulières effectuées pour détecter des explosions nucléaires atmosphériques et les identifier parmi les perturbations de l'environnement atmosphérique. En s'appuyant sur ce savoir-faire, le DASE a participé activement à l'élaboration du SSI (Système de surveillance internationale) pour le contrôle du TICE (Traité d'interdiction complète des essais nucléaires). Le DASE héberge le Centre national de données, qui gère et exploite les stations du réseau national et de différents pays avec lesquels il collabore. À ce jour, plus de 70% des stations du SSI sont installées et transmettent leurs données en continu et en temps réel au Centre International de Vienne en Autriche (Figure 1).

Dans la bande de fréquence d'intérêt pour la surveillance des explosions (de 0,02 à 4 Hz), les infrasons sont détectés par des antennes de capteurs de pression très sensibles appelés microbaromètres (Voir article suivant page 17). Chaque station est composée de plusieurs microbaromètres (au minimum 4) espacés de 100 m à 1 km. Les enregistrements de chaque station sont traités en continu. La détection de signaux cohérents de faible amplitude est rendue possible en tirant profit de la structure incohérente propre à la nature du bruit de fond acoustique [1].



Fig. 1 : À gauche, carte montrant le Système de surveillance internationale (SSI) par infrason qui comprendra à terme 60 stations réparties sur l'ensemble du globe. À ce jour, plus de 70% de ce réseau est opérationnel (triangles rouges). Parmi elles, à droite, la station IS33 située à Madagascar

La mesure des différences de temps d'arrivée de l'onde d'un capteur à l'autre permet de déterminer sa direction de propagation et sa vitesse de passage, ainsi que la mesure de ses principales caractéristiques. Des études systématiques et détaillées des infrasons détectés sont menées dans des objectifs de validation des méthodes de détection et d'identification de la source. Parmi les principales sources d'infrasons, il faut distinguer :

- les sources ponctuelles permanentes ou répétitives référencées (sources anthropiques, volcans en activité,

éclairés...) qui, considérées comme des sources de calibration, permettent de valider le fonctionnement du système et de déterminer certains paramètres atmosphériques, comme les profils de vents en altitude ;

- les sources limitées spatialement et temporellement (séismes, aurores, avalanches...) dont les infrasons mesurés donnent les moyens de reconstruire avec précision l'étendue de la source et de mieux comprendre les mécanismes de couplage avec l'atmosphère ;
- les sources étendues permanentes (houle océanique, ondes de montagnes), dont le suivi traduit les effets des dynamiques de l'atmosphère sur la propagation ;
- les ondes de gravité de grande échelle issues de la troposphère (orages, instabilités dynamiques, interaction d'ondes) qui interagissent avec les grands courants de circulation atmosphérique.

La propagation des infrasons est guidée par la composition des profils de température et de vent (Figure 2). Les ondes générées par une source au sol se réfractent vers les couches supérieures de l'atmosphère à cause de la diminution de température. Si la source est suffisamment énergétique, les rayons retournent vers le sol lorsqu'ils rencontrent une augmentation de température importante dans la thermosphère. Si la propagation s'effectue dans la direction des vents dominants, les ondes retournent au sol dans la stratosphère. Une même source peut donc générer plusieurs signaux, chacun d'eux correspondant à un chemin différent dans l'atmosphère. Ils sont différenciés par des vitesses de propagation horizontales et des temps de propagation différents. Dans la bande de fréquence 0,1- 4 Hz, les ondes peuvent se propager sur plusieurs milliers de kilomètres dans le canal stratosphérique avec une faible atténuation. Les performances en termes de détection du réseau de surveillance sont étroitement liées aux fortes variabilités spatiales et temporelles des profils des vents qui modifient les modes de propagation [2].

Les efforts actuels portent sur une meilleure connaissance des modèles atmosphériques existants, utilisés pour simuler la propagation de ces ondes et améliorer les précisions de localisation. À l'inverse, parce que les caractéristiques des infrasons qui se propagent dans les différents guides d'onde dépendent des conditions atmosphériques, les mesures sont aussi exploitées pour valider et améliorer des modèles empiriques de vent en altitude. En effet, la précision des simulations repose en partie sur une modélisation réaliste des variabilités diurnes et saisonnières de ces modèles. Ceux-ci peuvent notamment être enrichis par des mesures ponctuelles complémentaires de l'atmosphère, directes ou indirectes. De plus, les études récentes de la composante basse fréquence (inférieure à 0,05 Hz) des ondes atmosphériques ont également montré que le réseau est également sensible aux ondes de gravité (période supérieure à 5 mn), qui contribuent à la circulation atmosphérique globale de l'atmosphère terrestre, ouvrant des perspectives sur des études futures liées au climat [3].

Cet article montre à travers quelques exemples comment ce réseau, exploité dans un mode de fonctionnement continu, rend possible l'élaboration d'un système passif et performant pour la surveillance de l'environnement. Ce réseau trouve aussi de nouvelles applications par la mesure d'indicateurs climatiques aux altitudes météorologiques (troposphère) et à plus haute altitude (stratosphère-mésosphère-thermosphère) à l'échelle de la vie humaine.

Une surveillance permanente et globale des volcans

Les éruptions volcaniques génèrent des ondes infrasonores qui se propagent sur de grandes distances avec une faible atténuation. La couverture du SSI est déjà suffisante pour fournir des informations utiles sur les activités volcaniques à une échelle globale [4].

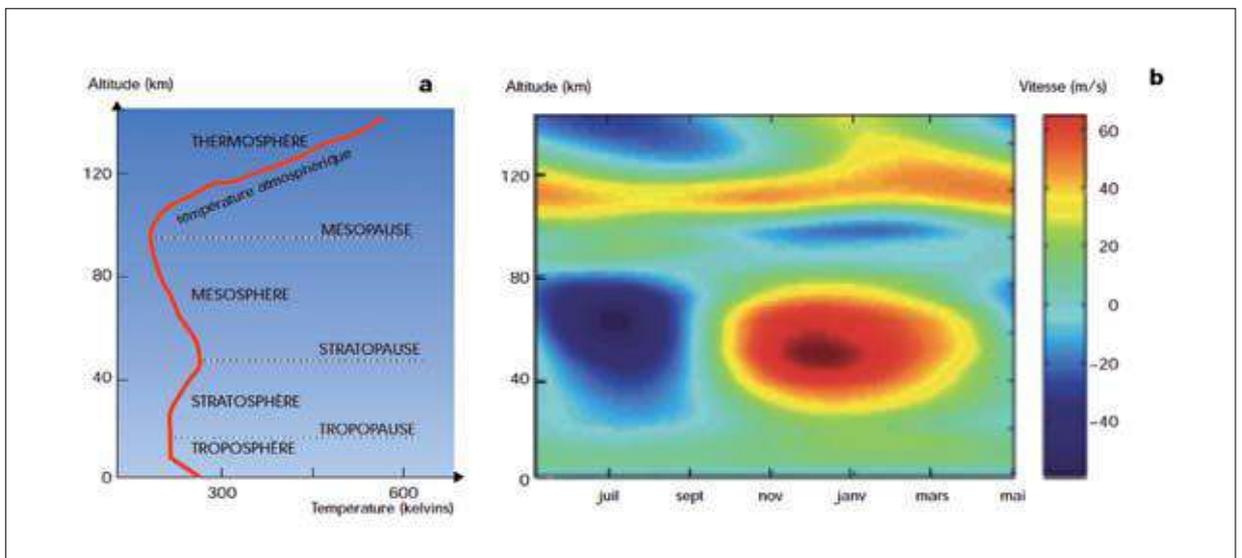


Fig. 2 : Structure de l'atmosphère. À gauche, profil de température et délimitation des différentes couches atmosphériques. À droite, profils des vents zonaux (qui soufflent d'Ouest en Est) en fonction de l'altitude et de la période de l'année en France. La vitesse du vent est exprimée en m/s selon l'échelle des couleurs (valeurs positives vers l'Est). Les variations saisonnières des vents méridiens (Sud-Nord) sont moins importantes. Ces profils, issus du modèle climatologique HWM (Horizontal Wind Model) décrivent correctement une dynamique saisonnière qui contrôle au premier ordre la propagation des infrasons.

A titre d'exemple, le volcan Sarychev, situé à Ostrov Matua, dans les îles Kouriles, est rentré dans une phase éruptive majeure en juin 2009. Les îles Kouriles sont situées dans un couloir aérien très fréquenté reliant l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Asie septentrionale. Cette éruption a engendré des panaches de cendres, annulant 65 vols et dérivant plus de 20 trajectoires. Une surveillance efficace du volcanisme dans cette région est donc essentielle pour la sécurité aérienne. Aucune station sismique n'a pu enregistrer des signaux, alors que des ondes infrasonores ont été détectées à plus de 6 400 km de distance (Figure 3). À cette période de l'année, les vents stratosphériques (entre 40 et 50 km d'altitude) soufflent d'Est en Ouest favorisant la propagation des ondes à l'Ouest de la source. Les détections observées sont compatibles avec une propagation d'ondes dans un guide stratosphérique (entre 0-45 km d'altitude environ). L'analyse de ces signaux a été utile pour déduire la chronologie des explosions, mieux comprendre le processus des phases d'injection de cendres dans l'atmosphère et améliorer la prévision de transport et la dispersion de ces cendres [5].

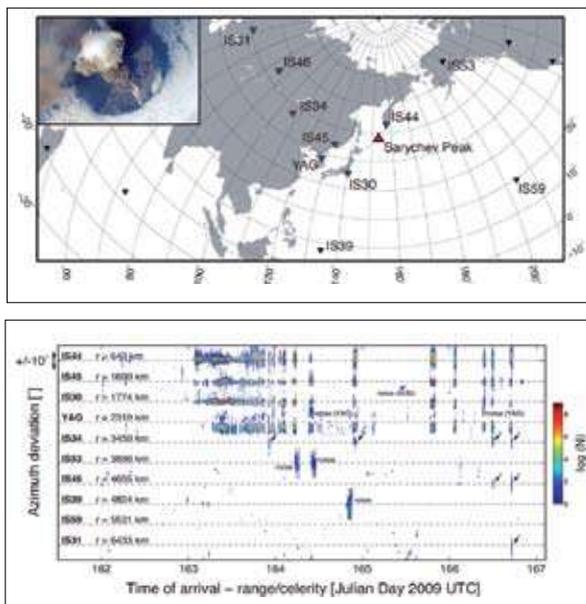


Fig. 3 : En haut, localisation du volcan (triangle rouge) et des stations ayant enregistré des signaux (triangles bleus). En bas, azimuts des signaux détectés sur 10 stations $\pm 15^\circ$ autour de la direction de propagation attendue. Les détections sont alignées sur une même base de temps pour en faciliter l'association. Le décalage temporel appliqué correspond à la distance horizontale entre la source et chaque station divisée par une vitesse moyenne de propagation fixée à 0,33 km/s

La propagation des ondes sismiques depuis l'épicentre à travers des régions montagneuses contribue aussi de façon efficace à la génération d'infrasons lorsqu'elles sont mises en vibration. Une fois émises, les ondes produites sont guidées dans les différentes couches de l'atmosphère et peuvent être détectées à plusieurs milliers de kilomètres de l'épicentre, quand les conditions de propagation sont favorables. Les caractéristiques de ces ondes peuvent être utilisées pour reconstruire l'étendue spatiale des zones de couplage entre les déplacements verticaux du sol et l'atmosphère. Connaissant l'heure origine et les coordonnées de l'épicentre, la mesure des temps d'arrivée et de la direction de propagation des ondes sur une unique station conduit à cette localisation. L'azimut¹ détecté donne la direction de la source et les vitesses de propagation des ondes sismiques et des infrasons permettent de contraindre la distance. Compte tenu des incertitudes liées aux mesures et aux modèles atmosphériques employés, la précision de localisation est de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres.

Le séisme de magnitude 9 qui s'est produit le 3 novembre 2011 a généré des infrasons qui ont été enregistrés à plus de 5 000 km de l'épicentre (Figure 4). L'inversion des mesures a permis de retrouver la distribution spatiale des zones de couplage sur une étendue dépassant 1 000 km. Des études complémentaires portant sur une dizaine de séismes récents de magnitude supérieure à 7, parfois enregistrés par plusieurs stations, mettent en évidence une relation claire entre l'amplitude de signaux mesurés et la magnitude sismique, et de façon systématique, un étalement de la durée des signaux infrasons associé à l'environnement topographique local et régional autour de l'épicentre. De tels événements permettent d'améliorer notre compréhension des mécanismes de couplage sismo-acoustique, en fournissant l'occasion de valider des modèles de vitesse de propagation dans l'atmosphère par juxtaposition des localisations avec les zones de couplage attendues. La synergie entre les réseaux sismiques et les infrasons du SSI trouve ici un intérêt, puisqu'elle peut conduire à une cartographie étendue des régions où les mouvements sismiques sont les plus importants, et ceci d'autant plus que la région surveillée est peu instrumentée.

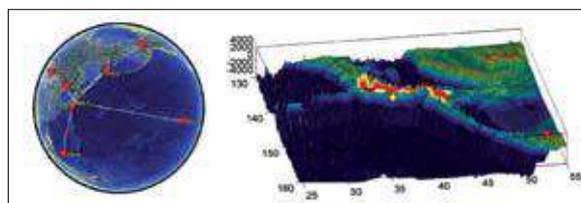


Fig. 4 : À gauche, localisation des stations du SSI ayant détecté des signaux infrasons générés par le séisme de Tohoku-oki au Japon (M9, 3 novembre 2011). À droite, localisation des zones de couplage entre les déplacements verticaux du sol et l'atmosphère à partir des enregistrements de la station IS44 (triangle rouge) située à plus de 2 000 km de l'épicentre (étoile jaune). Les densités de localisation sont représentées sur une échelle de couleurs normalisée allant du bleu au rouge.

Imagerie par infrasons de phénomènes naturels

Les séismes de magnitude en général supérieure à 6 sur l'échelle de Richter, survenant dans des régions montagneuses, sont des sources d'infrasons, dont les périodes peuvent atteindre la dizaine de secondes. Un des mécanismes de formation d'ondes est le couplage avec l'atmosphère des ondes sismiques lors de leur propagation. Les valeurs des vitesses de passage des signaux (plusieurs km/s) sont alors compatibles avec les caractéristiques des différentes phases sismiques mesurées qui parviennent à la station.

1-Azimut : angle horizontal entre la direction d'un objet et la direction du Nord géographique. Il est mesuré depuis le Nord en degrés dans le sens des aiguilles d'une montre.



Fig. 5 : À gauche, carte montrant le positionnement de la station IS22 (au milieu) installée en Nouvelle-Calédonie par rapport aux volcans actifs du Vanuatu détectés en permanence. À droite, le volcan Yasur. Un microbaromètre est placé sur la bouche du cratère pour mesurer le terme source

Imagerie locale de l'atmosphère

Les sources connues ponctuelles et répétitives d'infrasons, d'origine artificielle ou naturelle comme certains volcans, peuvent être utilisées pour l'évaluation des capacités de détection et de localisation du SSI et pour étudier la dynamique de la haute atmosphère. Les volcans offrent en particulier une opportunité unique pour évaluer les variations temporelles des champs de vents dans les hautes couches de l'atmosphère. Le développement d'outils d'inversion des mesures permet en effet de sonder continuellement les vents dans des régions inaccessibles aux moyens actuels d'observation (stratosphère-mésosphère). La connaissance de la localisation exacte de ces sources associée à leur régularité permet d'étudier plus précisément la variabilité du milieu dans lequel les ondes se propagent, et ainsi de valider, voire d'améliorer, les modèles atmosphériques empiriques. Toutefois, compte tenu des distances de propagation relativement limitées de ces ondes (en général moins de 1 000 km), ces études ne peuvent être menées qu'à partir d'un nombre réduit de stations et ne concernent, par conséquent, qu'une région limitée du globe.

Des études récentes ont été conduites sur les volcans actifs du Vanuatu (anciennement Nouvelles-Hébrides), dont les principales phases effusives et éruptives sont détectées en permanence à plus de 600 km par la station IS22 installée en Nouvelle-Calédonie (Figure 5). Ces enregistrements indiquent que les infrasons subissent, au cours de l'année, des déviations importantes d'azimut. Les variations sont de type quasi sinusoïdal, de période une année, avec des écarts d'azimut par rapport à l'axe initial de propagation atteignant jusqu'à 10°.

La simulation de la propagation a révélé que les modèles atmosphériques les plus précis restituent les variations saisonnières cycliques de l'azimut mais sous-estiment leur amplitude de plusieurs degrés. La mise au point de procédures d'inversion offre la possibilité de franchir un pas vers la tomographie de la haute atmosphère².

En effet, un ajustement itératif de la structure verticale des champs de vents, guidé par la minimisation d'erreurs entre les observations et les résultats des simulations, permet d'évaluer les erreurs des modèles atmosphériques.

Les résultats des inversions montrent que dans la mésosphère, la vitesse des vents transverses à la propagation qui contrôle la déviation d'azimut est sous-estimée de 20 m/s en moyenne, et que pour expliquer les observations, il est nécessaire d'introduire une variabilité stochastique des vents à partir de 60 km d'altitude (Figure 6).

Ces mesures se révèlent importantes pour décrire la dynamique des jets³ et les ondes de gravité qui se superposent dans la haute stratosphère et la mésosphère, sur des périodes de temps de quelques heures à plusieurs jours.

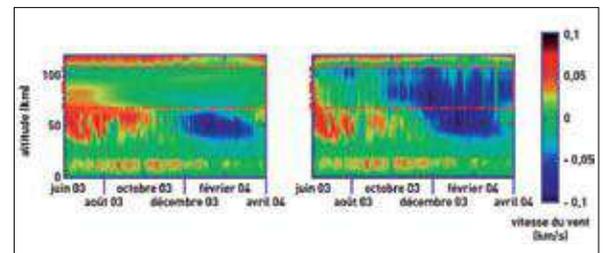


Fig. 6 : Tomographie des vents zonaux dans la mésosphère et basse thermosphère à partir des enregistrements continus des signaux générés par les volcans actifs du Vanuatu [6]. La vitesse des vents est positive vers l'Est. À gauche, modèle de vent original (G2S, Naval Research Laboratory); à droite, modèle de vent corrigé après inversion. Le rectangle rouge délimite la région étudiée où les vents sont méconnus. Bornée entre 60 et 100 km d'altitude, cette région est à l'origine caractérisée par le modèle HWM.

Études des grands courants de circulation atmosphérique

La houle océanique et les ondes de montagnes sont également des sources intéressantes, car les infrasons générés sont détectés en permanence en tout point du globe par un grand nombre de stations. Leur suivi en continu est donc particulièrement adapté à l'étude des perturbations des grands courants atmosphériques sur lesquels elles se superposent.

2- Tomographie de la haute atmosphère : cette technique d'imagerie permet, à partir de l'enregistrement et du traitement des infrasons, de remonter à certains paramètres du milieu atmosphérique. 3-Jet : type d'écoulement cisailé qui domine dans la stratosphère pouvant atteindre des vitesses de 100-150 m/s.

De période comprise entre 5 et 8 s, les signaux de houle ont un maximum d'énergie proche de celui des explosions de 1 kilotonne, mais se limitent toutefois à une partie restreinte de leur spectre. Souvent localisées au centre des dépressions, les houles océaniques résultent du couplage avec l'atmosphère des ondes entretenues à la surface de l'océan. Une description théorique de ce mécanisme de production relie l'amplitude du signal de pression à la hauteur et à la fréquence d'oscillation des vagues. Dans des conditions de propagation favorables, les fortes houles sont détectées sur toutes les stations du SSI.

À titre d'exemple, la station IS34 installée en Mongolie enregistre entre les mois de décembre et février la houle de l'Atlantique Nord (Figure 7). À cette période de l'année, dans l'hémisphère Nord, les vents dominants dirigés vers l'Est favorisent la propagation de ces signaux dans des guides stratosphériques. Superposées à la houle, des ondes de période comprise entre 20 et 50 s sont aussi fréquemment observées. Ces ondes ont pour origine l'écoulement de vents forts (vitesse supérieure à 20-30 m/s) selon un axe perpendiculaire à l'axe des chaînes montagneuses. Ces vents produisent des ondes stationnaires à l'origine de turbulences vers 20-25 km d'altitude et des ondes de montagnes à plus haute altitude. Faiblement atténuées, ces ondes se propagent sur de grandes distances, et comme les signaux de houle, leur propagation est régie par la dynamique des vents dans la stratosphère. Des corrélations entre les variations saisonnières de l'amplitude de ces ondes et celles des vents zonaux et méridiens⁴ dans la région source présumée (entre 1 500 et 5 500 m d'altitude) ont clairement été mises en évidence.



Fig. 7 : Élément central de la station infrasons IS34 installée en Mongolie. Le capteur est placé dans une buse, au centre d'un système de filtrage acoustique atténuant le bruit lié aux turbulences atmosphériques locales. Cette station enregistre la houle de l'Atlantique Nord à plus de 10 000 km de distance

La figure 8 montre les directions principales de la houle détectée à l'échelle du globe sur une période de cinq années. Les détections sont quasi continues avec des variations cycliques annuelles marquées. Dans l'hémisphère Sud, de fortes dépressions circulent d'Ouest en Est le long d'une ceinture péri-Antarctique tout au long de l'année. Dans l'Atlantique Nord, elles ont généralement pour origine de la côte Est des États-Unis (Caraïbes, parfois au Sud du Groenland) et, suivant le Gulf Stream, traversent l'Océan Atlantique avant de disparaître en Mer du Nord. La périodicité annuelle des détections est principalement attribuée à des effets de propagation. Les simulations expliquent ces alternances par l'apparition et la disparition des guides d'ondes stratosphériques avec les inversions saisonnières des vents zonaux.

Compte tenu des distances considérables parcourues par ces ondes, les outils de simulation utilisés doivent être capables d'intégrer des variabilités importantes des champs de vents tout au long de la trajectoire. L'intérêt d'utiliser les signaux émis par la houle océanique, qui est de mieux en mieux décrite et modélisée, par exemple par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), pour renseigner en permanence et en tout point du globe sur la dynamique des grands courants stratosphériques, apparaît alors clairement pour décrire la dynamique de la haute atmosphère à l'échelle du globe.

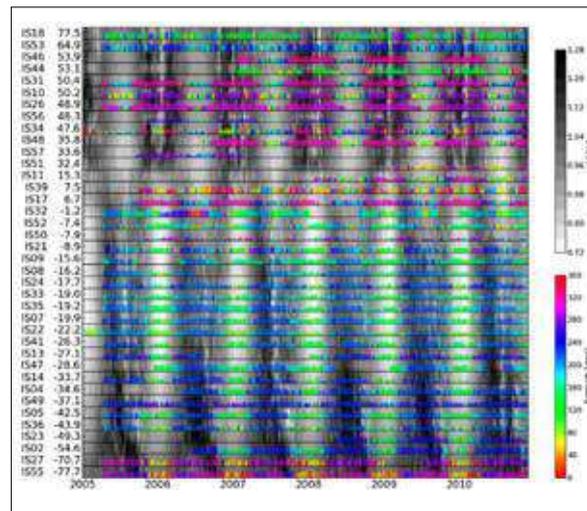


Fig. 8 : Détection globale de la houle océanique et distribution des azimuts pour 41 stations du SSI. Les stations sont triées par latitudes croissantes. La couleur indique pour chaque station l'azimut moyenné sur des périodes d'une semaine. L'échelle grisée code le rapport de la vitesse du vent ajoutée à la vitesse du son à 50 km d'altitude à la vitesse du son au sol. Au-dessus de 1, un guide d'onde stratosphérique apparaît favorisant la propagation vers l'Est. Au-dessous de 1, les vents soufflent dans la direction opposée favorisant la propagation vers l'Ouest. Les détections reflètent au premier ordre les inversions saisonnières des jets qui sont en opposition entre les hémisphères Nord et Sud.

Interaction entre les ondes de grande échelle et le climat

Les orages atmosphériques constituent une autre source importante d'infrasons (environ 2 000 orages sont comptés en permanence sur Terre). Les stations situées à moyenne et basse latitudes enregistrent en continu de telles perturbations. Plusieurs mécanismes de sources sont identifiés. Le tonnerre est produit par un chauffage et par les forces électrostatiques de l'orage. Les fréquences des infrasons sont élevées et atteignent la gamme des fréquences audibles. Ces signaux se propagent rarement au-delà de 200 km de distance.

D'autres ondes de période de l'ordre de la dizaine à plusieurs dizaines de secondes sont générées par les mouvements convectifs des masses d'air.

⁴Vents zonaux et vents méridiens : les premiers suivent un parallèle tandis que les seconds suivent un méridien, qui correspond au lieu des points ayant la même longitude.

Les fronts des perturbations météorologiques et les systèmes convectifs sont également à l'origine d'ondes de gravité de plus grande échelle (Figure 9).

Un suivi des ondes de gravité, de période égale à plusieurs minutes, à l'échelle globale sur une grande durée présente un intérêt pour l'étude de l'évolution du climat. Ces ondes de grande échelle (appelées aussi ondes planétaires), générées principalement sous les tropiques dans la troposphère aux altitudes météorologiques, pénètrent dans la stratosphère. Un mouvement de circulation globale s'établit alors vers les pôles perturbant les vortex⁵ polaires.

Le réchauffement climatique actuel à proximité de la surface sous l'effet de l'augmentation de concentration des gaz à effet de serre pourrait affaiblir le mouvement des ondes planétaires, en suscitant un renforcement des vortex et un appauvrissement de l'ozone au-dessus des pôles.

Certaines stations du SSI situées dans les régions polaires enregistrent en permanence ces ondes, dont les caractéristiques présentent des fluctuations saisonnières cycliques mais aussi sur des plus courtes échelles de temps. À plus long terme, la mesure permanente et globale de ces systèmes d'onde permettra de mieux comprendre la dynamique des grands courants de circulation atmosphériques et leurs perturbations en relation avec le climat.



Fig. 9 : Signature des ondes de gravité sur les nuages noctilucentés (brillant la nuit) observés par avion à des altitudes de l'ordre de 90 km. Ces ondes affectent l'atmosphère dans son ensemble, du sol où elles sont enregistrées avec les stations infrasons du réseau SSI, jusqu'à des altitudes d'environ 200 à 300 km où elles sont détectées par radar ionosphérique.

Élargir les potentialités du SSI

Plus de 10 ans d'enregistrements continus du SSI sont maintenant disponibles. Ces données sont uniques grâce à leur qualité et leur continuité. De nombreuses études démontrent le potentiel de ce réseau pour détecter, localiser et caractériser des sources d'origine naturelles à des échelles continentale et globale. En particulier, les volcans constituent des sources explosives d'intérêt car elles peuvent rejeter des quantités importantes de cendres dans l'atmosphère perturbant le trafic aérien. La couverture du réseau sismique ne permettant pas une surveillance des volcans dans certaines régions, en complément de

l'imagerie satellite, les stations infrasons représentent un moyen d'observation efficace pour en améliorer la surveillance. Les études en cours permettent de quantifier les performances de ce réseau en termes de capacité de détection en fonction du bruit ambiant et des conditions de propagation. De tels travaux aideront à la définition d'un réseau infrason optimal pour surveiller à grande distance une région volcanique donnée.

Associé à la mise au point d'outils performants d'analyse et de modélisation, ce réseau ouvre aussi de nouveaux horizons pour la surveillance de l'environnement mais aussi pour l'étude de l'atmosphère. Parce que les ondes mesurées traversent les couches hautes de l'atmosphère et se propagent sur de grandes distances, leur suivi en continu offre des perspectives prometteuses pour la mesure des caractéristiques des vents en altitude qui, jusqu'à présent, n'étaient connues qu'à travers des mesures ponctuelles locales. La description des conditions de génération des ondes de gravité et leur interaction avec les mouvements convectifs globaux présentent également un grand intérêt, surtout dans un objectif à plus long terme d'utilisation de ces mesures pour mieux décrire la dynamique atmosphérique globale et ses effets sur l'évolution du climat. Les études liées au climat pourront alors bénéficier d'un apport conséquent, par exemple en mettant en évidence des anomalies de propagation liées aux réchauffements stratosphériques. L'exploitation de la synergie avec les autres technologies du TICE et des systèmes de mesure complémentaires (ballon, satellite, stations de mesure radar et lidar⁶...) élargira encore les potentialités de ce réseau.

Références bibliographiques

- [1] Cansi, Y., An automatic seismic event processing for detection and location - the PMCC method. *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1021-1024, 1995.
- [2] Le Pichon, A., E. Blanc, and A. Hauchecorne (Eds.), *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*, Springer ISBN 978-1-4020-9507-8, 1st Edition., 2010, 735 p.
- [3] Arnold, N. F., Solar variability, coupling between atmospheric layers and climate change, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 360(A), N° 1801, p. 2787-2804, 2002.
- [4] Dabrowsa, A. L., D. Green, A. Rust, and J. C. Phillips, A global study of volcanic infrasound characteristics and the potential for long-range monitoring, *Earth and Planetary Science Letters*, DOI: 10.1016/j.epsl.2011.08.027, 2001.
- [5] Matoza R.S., A. Le Pichon, J. Vergoz, P. Herry, J. Lalande, H. Lee, I. Che, and A. Rybin, Infrasonic observations of the June 2009 Sarychev Peak eruption, Kuril Islands: Implications for infrasonic monitoring of remote explosive volcanism, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 200, 35-48, doi:10.1016/j.jvolgeores.2010.11.022, 2011,
- [6] Le Pichon, A., and E. Blanc, How can infrasound listen to high-altitude winds?, *J. Geophys. Res.*, 110, D20104, DOI:10.1029/2005JD006020, 2005.

5- Vortex : système de vents stratosphériques circulant autour des pôles pendant l'hiver, lorsque la mise en place de la nuit polaire accentue les différences de température entre l'air stratosphérique des latitudes moyennes et celui des hautes latitudes.
6- Radar et lidar : basés sur un principe de fonctionnement identique, ils travaillent dans des domaines spectraux différents : les ondes radio (2,7 mm- 100 m) pour le radar et le visible, l'ultraviolet et l'infrarouge pour le lidar.