Acteur de la lutte contre la prolifération nucléaire, au plan national et international, le CEA est responsable, pour la France, de l'application du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires. Il participe activement à l'élaboration du Système de surveillance international, qui s'appuie sur un réseau de détection des ondes sismiques, hydroacoustiques ou infrasonores et des radionucléides, significatifs d'une explosion nucléaire. 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.

Les **mesures d'infrasons** pour décrypter la **dynamique atmosphérique**

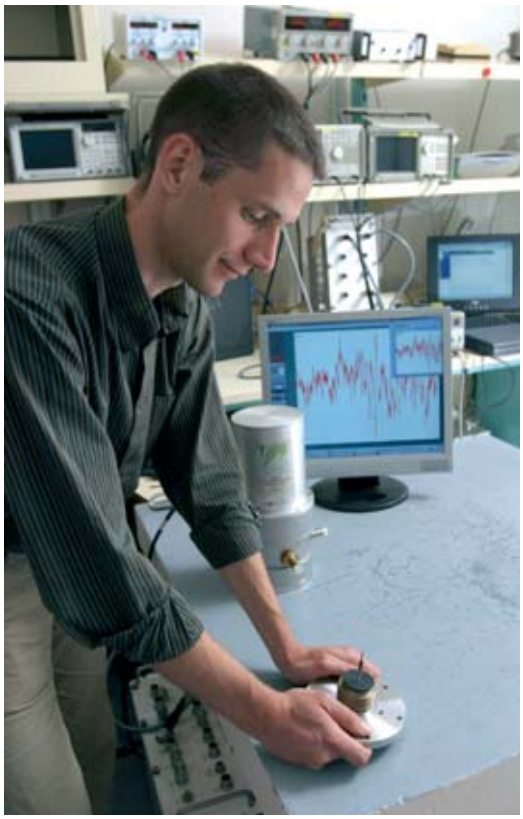
CEA

Dans le cadre de la surveillance des essais nucléaires dans le monde, le réseau de surveillance international mis en place comprendra 321 stations de détection réparties sur l'ensemble du globe, dont 60 stations infrasons, et 16 laboratoires d'analyse de radionucléides. Le CEA est responsable de l'installation de 25 stations, avec tous les moyens d'analyse associés. Parmi elles, la station infrasons I33MG située à Madagascar.

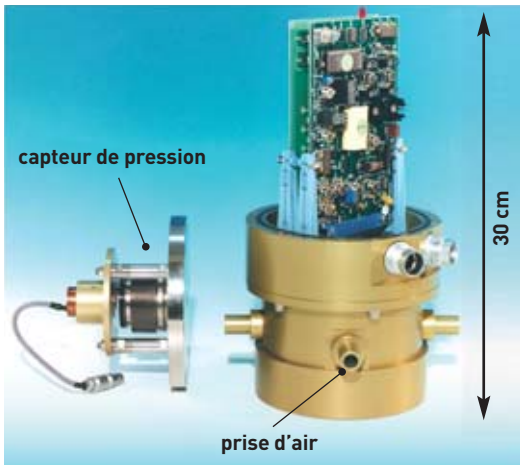
Les explosions aériennes, qu'elles soient nucléaires, chimiques ou naturelles, produisent des ondes acoustiques inaudibles dénommées ondes infrasonores ou **infrasons**, de **période** comprise entre quelques dixièmes de seconde et plusieurs minutes. La propagation de ces ondes s'effectue sur de grandes 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 réseau de 60 stations fondé sur la détection des infrasons est en cours d'intégration au Système de surveillance international (SSI).

Diverses sources d'infrasons

L'expertise acquise par le Département analyse, surveillance, environnement (Dase) de la Direction des applications militaires 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 d'origine naturelle. En s'appuyant sur ce savoir-faire, le Dase a participé activement à l'élaboration du Système de surveillance international pour le contrôle du Tice. Dans le cadre de sa mission de détection des explosions nucléaires, il a aussi



C. Dupont/CEA



CEA

Microbaromètre équipant chaque élément d'une station infrasons. Des spécifications techniques imposent entre autres un bruit de mesure inférieur au dix-milliardième de la pression atmosphérique, soit une variation de pression correspondant à une élévation d'altitude d'un dixième de millimètre.

contribué aux spécifications et à la réalisation des capteurs, à l'installation de stations de surveillance, et au développement de méthodes originales et opérationnelles de détection actuellement utilisées par l'organisation internationale. 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. Plus de la moitié des stations du réseau international sont aujourd'hui installées et transmettent leurs données en continu et en temps réel au Centre international de données (CID) de l'**Otice** (Organisation du traité d'interdiction complète des essais nucléaires) à Vienne en Autriche.

Les enregistrements de pression de chaque station sont traités en continu pour la recherche de trains d'ondes (1) **cohérents** dans le bruit de fond acoustique. En tirant profit de la structure **incohérente** propre à la nature du bruit de fond acoustique, la détection de signaux cohérents de faible amplitude est rendue possible. 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 ces signaux. Les efforts portent sur une meilleure connaissance des **modèles** atmosphériques **empiriques** 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 le guide d'onde atmosphérique, constitué par les différentes couches de l'atmosphère, 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. 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 min), qui contribuent à la circulation atmosphérique globale de l'atmosphère terrestre, ouvrant des perspectives sur des études futures liées au climat.

Parmi les principales sources d'infrasons, il faut distinguer :

- les *sources ponctuelles permanentes* ou *répétitives référencées* (sources anthropiques, volcans en activité, éclairs…) 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), 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.

Exploité dans un mode de fonctionnement continu, ce réseau rend possible l'élaboration d'un système passif et performant pour la surveillance de l'environnement. Il trouve aussi de nouvelles applications par l'étude des lois de circulation atmosphérique à l'échelle planétaire (figure 1). Cet article montre, à travers quelques exemples, comment l'identification et la mesure en continu à l'échelle de la vie humaine des indicateurs climatiques aux altitudes météorologiques (troposphère) et à plus haute altitude (**stratosphère**-

(1) Train d'ondes : onde dont l'étendue spatiale et temporelle est finie.

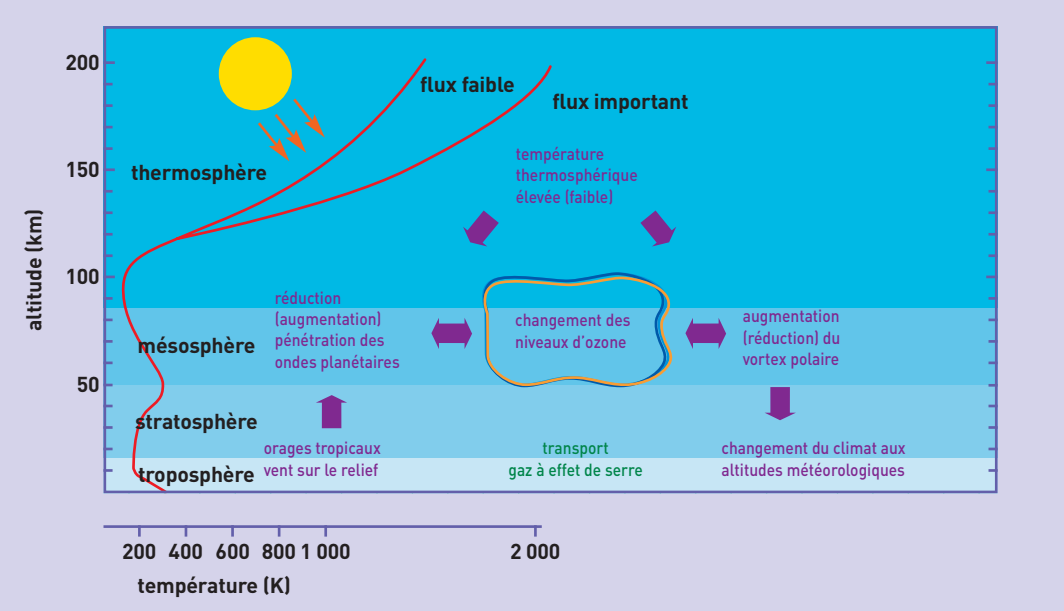


Figure 1. Effet de la dynamique stratosphérique sur l'évolution du climat. La stratosphère est un milieu froid et stable couplé aux altitudes météorologiques par les ondes de gravité (orages tropicaux et vent sur le relief) qui s'y propagent. La pénétration de ces ondes dans la stratosphère crée des changements de longue durée dans la circulation générale, qui sont ensuite retransmis aux altitudes météorologiques et affectent le climat (d'après N. F. Arnold, 2000).

mésosphère-thermosphère) ainsi que le suivi de leur évolution peuvent aider à améliorer notre compréhension de la physique des phénomènes atmosphériques liés au climat.

Imagerie par infrasons de phénomènes naturels

Les séismes de **magnitude** en général supérieure à 6, 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. 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'azimut (2) détecté donne la direction de la source et les vitesses de propagation des ondes sismiques et des infrasons permettent de contraindre la distance. Cependant, considérant la directivité de la source, fournie par l'orientation des chaînes de montagnes vis-à-vis de la station, et la variabilité des conditions de propagation, les zones reconstruites diffèrent généralement d'une station à l'autre. 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.
Prenons l'exemple du séisme superficiel de magnitude 7,9 qui s'est produit le 3 novembre 2002 en Alaska (nord-ouest de l'Amérique septentrionale). Ce séisme était particulièrement spectaculaire, puisqu'il a rompu une des plus grandes failles décrochantes (3) du monde sur plus de 300 km. À environ 3 400 km de l'épicentre, des infrasons en provenance des montagnes

(2) 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.

(3) Faille décrochante : faille presque verticale le long de laquelle un compartiment rocheux coulisse horizontalement par rapport au compartiment opposé.

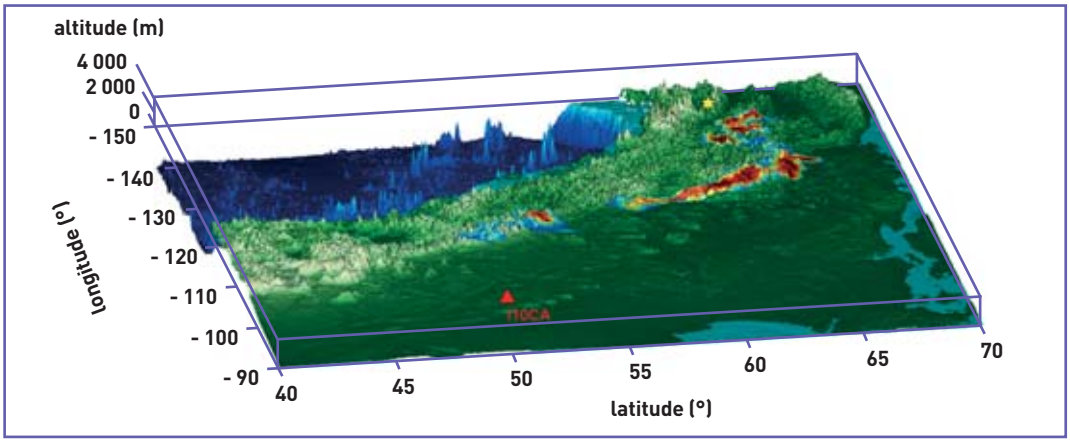


Figure 2. Localisation des zones de couplage entre les déplacements verticaux du sol et l'atmosphère, lors du séisme qui a eu lieu en Alaska en novembre 2002, à partir de la station infrasons du Canada. L'étoile jaune correspond à l'épicentre et le triangle rouge à la station. Les densités de localisation sont représentées sur une échelle de couleurs normalisée allant du bleu au rouge.

CEA

CEA

CEA

CEA

À gauche, carte montrant le positionnement de la station infrasons I22FR (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 les très faibles variations de pression autour de la pression atmosphérique dans la bande infrasonore.

Rocheuses ont été détectés durant près de deux heures par la station I10CA du Canada. L'inversion des mesures a permis de retrouver la distribution spatiale des zones de couplage sur une étendue dépassant 2 000 km (figure 2). 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 des 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 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 ce d'autant plus que la région surveillée est peu instrumentée.

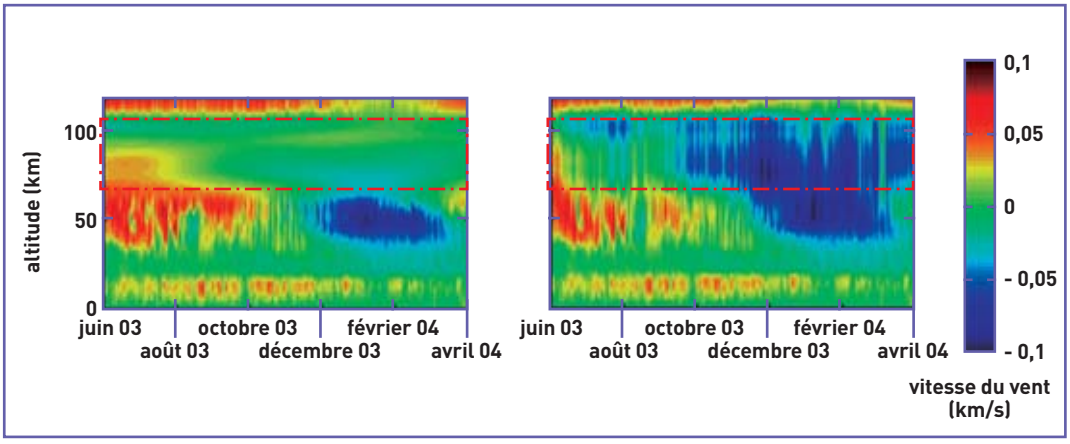
Imagerie locale de l'atmosphère

Les sources connues ponctuelles et répétitives d'infrasons, d'origine artificielle ou naturelle comme certains volcans en activité, peuvent être utilisées pour évaluer les variations temporelles des champs de vents dominants dans les hautes couches de l'atmosphère (stratosphère-mésosphère). En effet, 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.

Les volcans représentent des sources uniques pour l'évaluation des capacités de détection et de localisation du SSI, et offrent aussi des opportunités d'études de la dynamique de la haute atmosphère. Le développement d'outils d'inversion des mesures permet en effet de sonder continûment les vents dans des régions inaccessibles aux moyens actuels d'observation. 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 I22FR installée en Nouvelle-Calédonie. 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 atmosphère [4]. En effet, un ajustement itératif de la

(4) 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.



CEA

Figure 3.
Tomographie des vents zonaux dans la mésosphère et basse thermosphère à partir des enregistrements continus des signaux générés par les volcans actifs du Vanuatu. À gauche, modèle de vent original NRL-G2S ; à droite, modèle de vent corrigé. 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 empirique HWM-93. La vitesse des vents est positive vers l'est.

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 3). Ces mesures se révèlent importantes pour décrire la dynamique des jets (5) 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.

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. 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 réseau international.

À titre d'exemple, la station I34MN installée en Mongolie enregistre entre les mois de décembre et février la houle de l'Atlantique Nord, à plus de 10 000 km. 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 méridiens (6) dans la région source présumée (entre 1 500 et 5 500 m d'altitude) ont clairement été mises en évidence.

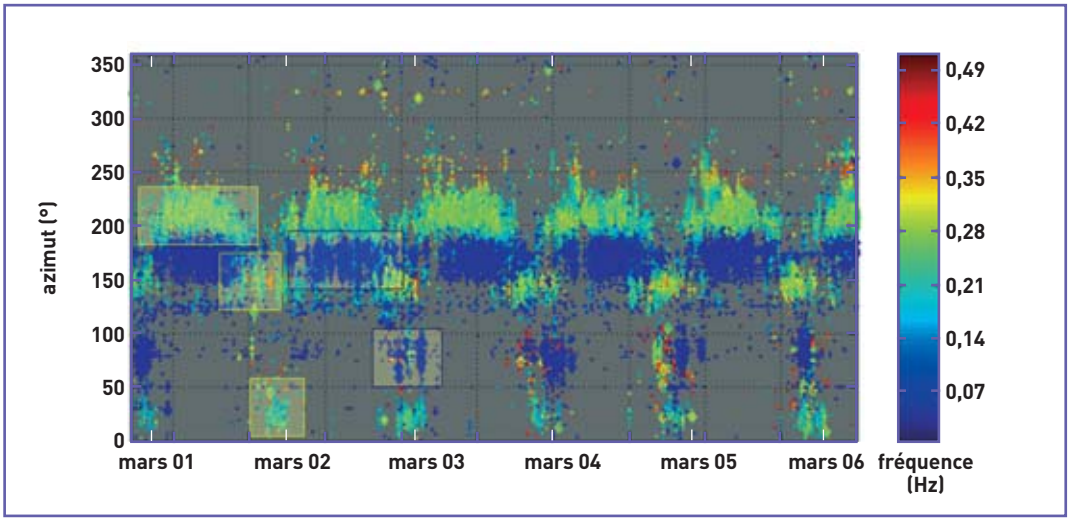
La figure 4 montre les directions principales de la houle et des ondes de montagnes détectées en Bolivie sur une période de cinq années. Les détections sont quasi continues avec des variations cycliques annuelles marquées. Dans l'hémisphère Sud, de fortes dépressions circulent d'ouest en est le long d'une ceinture péri-antarctique tout au long de l'année. Dans l'Atlantique Nord, elles ont généralement pour origine 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 attribuée à des effets de propagation et non à la source. Les simulations expliquent ces alternances par l'apparition et la disparition des guides d'ondes stratosphériques avec les inversions saisonnières des vents zonaux. De janvier à mars, l'inversion des vents à 40 km d'altitude est suffisamment importante pour piéger l'énergie de la houle de l'Atlantique

(5) Jet : type d'écoulement cisaillé.

(6) Vents 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.

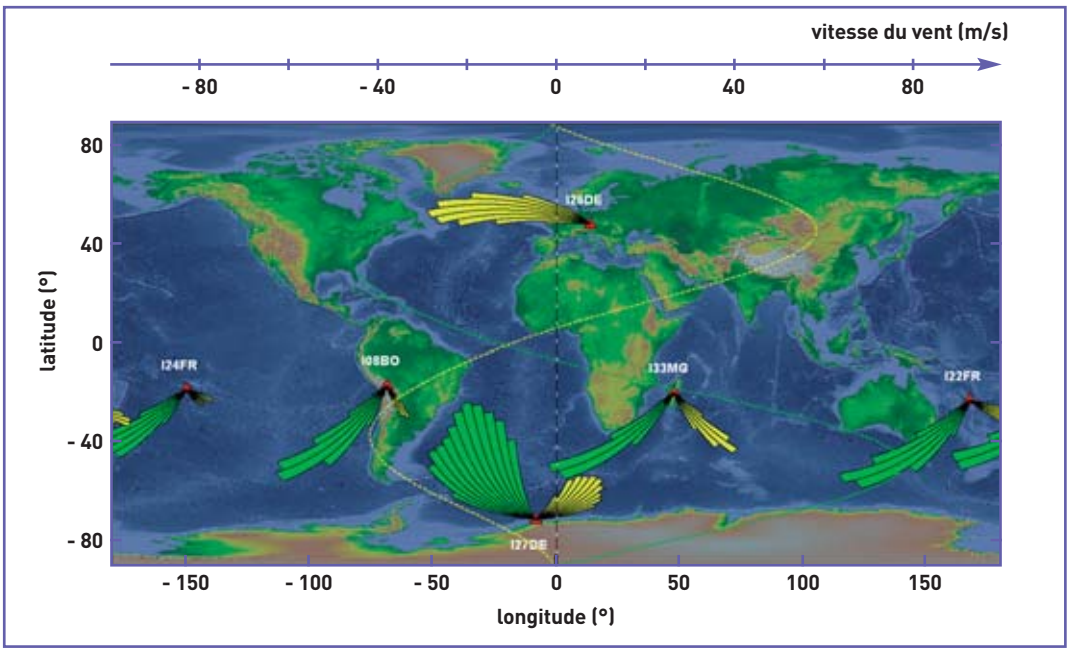
CEA

Élément central de la station infrasons I34MN 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.



CEA

Figure 4. Détection de la houle océanique et des ondes de montagnes sur la station I08BO de Bolivie. Selon la période de l'année, les détections de houle (rectangles jaunes) sont privilégiées dans certaines directions : en provenance du Pacifique Sud (200-230 °) pendant l'hiver austral, de l'Atlantique Sud (130-170°) et Nord (10-30°) pendant l'été austral. À des périodes plus importantes (environ 20 s), les ondes de montagnes (rectangles bleus) générées sur la cordillère des Andes suivent les mêmes alternances saisonnières.



CEA

Figure 5.
Détection globale de la houle océanique et distribution saisonnière des azimuts. Les détections sont corrélées durant l'hiver (barres jaunes) et l'été austral (barres vertes) à la vitesse des vents zonaux, caractérisée par le modèle empirique HWM-93, dans la stratosphère (courbes en traits pointillés). L'inversion des vents d'un hémisphère à l'autre est observée sur les détections. (D. Drob du *Hulburt Center for Space Research, Naval Research Laboratory*, Washington D.C. [États-Unis] et L. Cerenna du *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe* : Institut fédéral pour les sciences de la Terre et les matières premières, Hanovre [Allemagne] ont participé à ce travail).

Nord vers la station de Bolivie dans un guide stratosphérique. 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. Des études récentes mettant en œuvre des simulations des tracés de rayons tridimensionnels, prenant en compte un milieu variable en temps et espace, ont permis d'établir des lois empiriques reliant l'amplitude des signaux enregistrés à la vitesse du vent à 40-50 km d'altitude.

Ces corrélations sont aussi confirmées à l'échelle du globe (figure 5). Lorsque le régime des vents est bien défini, il est par ailleurs observé que les variations d'amplitude suivent celles de la vitesse des vents à 40-60 km d'altitude. Les lois empiriques obtenues sont peu différentes de celles établies à partir de campagnes d'essais atmosphériques nucléaires et chimiques. L'intérêt d'utiliser les signaux émis par la houle océanique, qui est de mieux en mieux décrite et modélisée, par exemple par le *National Oceanic and Atmospheric Administration* (**NOAA**), pour renseigner en permanence et en tout point du globe sur la dynamique des grands courants stratosphériques, apparaît clairement.

Interaction entre les ondes de grande échelle et le climat

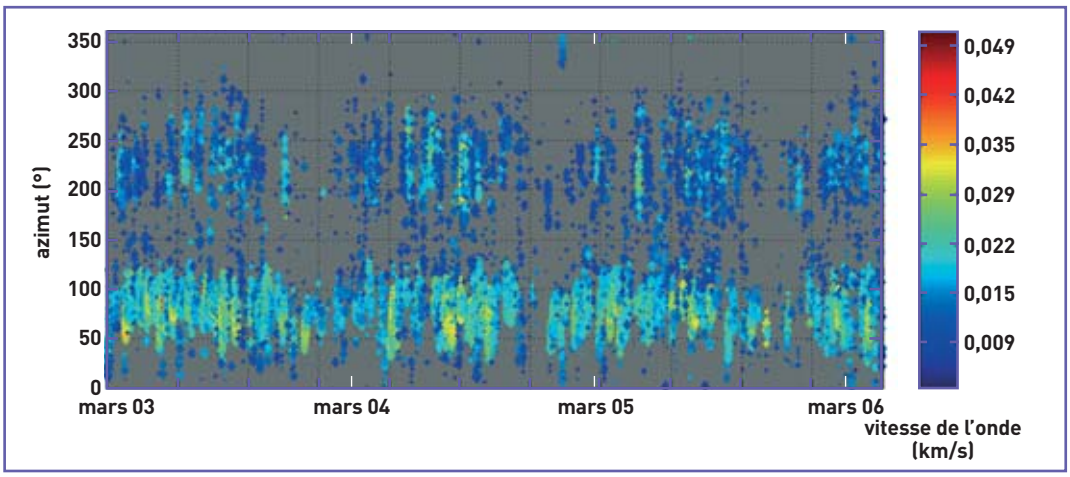
Les orages atmosphériques constituent une autre source importante d'infrasons (environ 2 000 orages sont comptés en permanence sur Terre). Les stations situées à moyenne et basse latitudes enregistrent en continu de telles perturbations. Plusieurs mécanismes de sources sont identifiés. Le tonnerre est 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. Les fronts des perturbations météorologiques et les systèmes convectifs sont également à l'origine d'ondes de gravité de plus grande échelle. 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 ainsi que les ondes de montagnes, générées principalement dans la troposphère aux altitudes météorologiques dans les régions de basse et moyenne latitudes, pénètrent dans la stratosphère qui est une région très stable. Un mouvement de circulation globale s'établit, dans lequel l'air s'élève sous les tropiques jusqu'à la stratosphère, se déplace vers les pôles dans la stratosphère, puis s'enfonce lentement sur ceux-ci, en influençant en retour la troposphère à haute latitude.

Les ondes planétaires perturbent ainsi les vortex (7) polaires, qui sont des systèmes 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. Ces vents isolent la stratosphère polaire, empêchant l'air et

(7) Vortex : tourbillon creux qui prend naissance, sous certaines conditions, dans un fluide en écoulement.

Signature des ondes de gravité sur les nuages noctilucents (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**.

BrianWhittaker.com



CEA

Figure 6. Détection des ondes de gravité à la station I27DE (Antarctique) sur une période de trois années. La couleur code la vitesse de passage des ondes mesurée à travers la station. (Cette station est gérée par l'équipe de M. Henger du *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe* : Institut fédéral pour les sciences de la Terre et les matières premières, Hanovre, Allemagne).

l'**ozone** des régions à plus basse latitude d'y pénétrer en provoquant un affaiblissement des concentrations d'ozone au-dessus des pôles. Ce vortex se brise sous l'effet des ondes planétaires, plus particulièrement dans l'hémisphère Nord, où la présence de nombreux continents favorise la formation des ondes de montagnes et des orages atmosphériques. 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 (figure 1), en suscitant un renforcement des vortex et un appauvrissement de l'ozone au-dessus des pôles.

Certaines stations du SSI situées en Antarctique enregistrent en permanence des ondes de gravité, dont les caractéristiques présentent des fluctuations saisonnières cycliques mais aussi sur des plus courtes échelles de temps (figure 6). Deux systèmes d'onde, différenciés par leur azimut, ont été identifiés. Le premier est un système plus rapide (25 - 40 m/s) quasi permanent provenant de la direction est (~ 80 °). Il s'agit d'un système d'ondes itinérantes d'origine topographique, qui circule à basse altitude, et qui a déjà été observé lors des campagnes de mesures de pression précédemment effectuées durant plusieurs mois en Antarctique par des équipes de l'université de Sheffield (Royaume-Uni).

(8) 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.

Le second est un système plus lent (10 - 15 m/s) arrivant de la direction ouest (~ 230 - 280 °), actif pendant l'hiver (juin-septembre). Ce système d'onde est contrôlé par le vortex polaire qui s'étend de la surface à la stratosphère. Ce vortex est plus intense pendant l'hiver lorsque les températures sont les plus faibles. Les mises en évidence de ces deux systèmes d'onde valident l'efficacité des systèmes d'observation et de traitement de données du réseau du Tice.

Élargir les potentialités du réseau de surveillance international

Avec le déploiement du système de surveillance international, plusieurs sources naturelles et permanentes d'infrasons sont identifiées à des échelles continentale et globale. Associé à la mise au point d'outils performants d'analyse et de modélisation, ce réseau ouvre 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 les études de leur interaction avec la stratosphère et de leur influence sur les mouvements convectifs globaux présentent également un grand intérêt, surtout dans la perspective d'un objectif à plus long terme, qui est l'utilisation des mesures infrasons pour décrire d'une façon plus réaliste la dynamique atmosphérique globale en vue d'étudier ses effets sur l'évolution du climat.

Les études liées au climat pourront alors bénéficier d'un apport conséquent, par exemple en aidant à vérifier les lois générales de circulation atmosphérique et en mettant en évidence des anomalies de propagation liées aux réchauffements stratosphériques. L'exploitation de la synergie avec les autres technologies de l'Otice (mesures des **radionucléides**) et des systèmes de mesure complémentaires (ballon, satellite, stations de mesure radar et lidar [8]…) élargira encore les potentialités de ce réseau.

> **Alexis Le Pichon** et **Élisabeth Blanc**
Direction des applications militaires
CEA Centre DAM Ile-de-France

POUR EN SAVOIR PLUS

N. F. Arnold, "Solar variability, coupling between atmospheric layers and climate change", *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 360(A), N° 1801, p. 2787-2804, 2002.

M. P. Baldwin, D. W. J. Thompson, E. F. Shuckburgh, W. A. Norton and N. P. Gillet, "Weather from the stratosphere?", *Science*, 301, p. 317-319, 18 July 2003.

E. Blanc, S. Perez, J.-P. Issartel et J.-C. Millies-Lacroix, "Détection des explosions nucléaires atmosphériques", *Chocs*, 17, 1997.

Y. Cansi et R. Crusem, "Méthodes avancées de traitement automatique de données sismiques et infrasoniques", *Chocs*, 17, 1997.

J. M. Ress, J. C. Denholm-Price, J. C. King and P. S. Anderson, "A climatological study of internal gravity waves in the atmospheric boundary layer overlying the Brunt ice shelf, Antarctica", *Am. Meteo. Soc.*, p. 511-526, 2000.

A. Le Pichon, E. Blanc et B. Alcoverro, "Infrasons dans l'atmosphère", *Chocs*, 26, 2002.

A. Le Pichon, E. Blanc and D. Drob, "How can infrasound listen to high-altitude winds? ", *J. Geophys. Res.*, 110, D20104, DOI:10.1029/2005JD006020, 2005.