

Évaluation et optimisation de réseaux de surveillance infrasons

A. LE PICHON - J. VERGOZ / CEA – DAM Île-de-France

E. MARCHETTI / Dipartimento di Scienze della Terra (UNIFI), Università di Firenze, Italy

Une technique de modélisation numérique basée sur l'application d'une loi d'atténuation d'ondes infrasonores dans une atmosphère réaliste a été développée pour évaluer les performances d'un réseau de surveillance par infrasons. Les éruptions volcaniques sont des sources naturelles de calibration. En particulier, les signaux générés par l'activité quasi permanente de l'Etna en Sicile, enregistrés à plusieurs centaines de kilomètres, sont utilisés pour valider des modèles de propagation des infrasons dans la moyenne atmosphère jusqu'à des altitudes de 50 km. Combinée avec les analyses du modèle météorologique européen et avec des mesures en continu du bruit de fond aux stations de mesure, cette méthode fournit en temps quasi réel un indicateur de confiance des événements détectés et localisés par les réseaux opérationnels de surveillance.

Les ondes infrasonores, ondes acoustiques de fréquence 0,01 à 20 Hz, se propagent sur de grandes distances dans l'atmosphère avec une faible atténuation. Ces ondes peuvent être détectées par des antennes de capteurs de pression très sensibles appelés microbarographes. Dans la bande de fréquence d'intérêt (0,02 à 4 Hz), le système de surveillance international (SSI) de l'Organisation du traité d'interdiction complète des essais nucléaires (OTICE) détecte en permanence des signaux infrasons d'origine naturelle. Les volcans représentent en particulier des sources uniques de calibration des méthodes de surveillance mises en œuvre pour la détection de sources explosives [1]. Les premières cartes estimant les performances du réseau infrason du TICE ont permis de déterminer le nombre optimal et la position des stations pour détecter et localiser des explosions nucléaires avec un seuil de 1 kt. Le calcul de ces cartes reposait sur des lois d'atténuation empiriques et des modèles saisonniers de vents en altitude. Les méthodes numériques actuelles permettent de mieux comprendre le rôle des différents facteurs décrivant la source et l'atmosphère qui contrôlent la propagation. Des lois d'atténuation semi-empiriques, dérivées de simulations numériques explorant des situations réalistes de condition de propagation, sont maintenant proposées [2]. La disponibilité de modèles météorologiques opérationnels de plus haute résolution et la connaissance de leurs incertitudes contribuent à améliorer la précision des simulations.

Simulations et validation expérimentale

Les méthodes de simulation mises en œuvre permettent de quantifier les performances des

réseaux de surveillance du SSI et régionaux quant à leur capacité de détection, en tenant compte de la forte variabilité temporelle du bruit ambiant et des conditions de propagation. La **figure 1** quantifie l'apport de stations supplémentaires en opération dans la région euro-méditerranéenne sur les capacités de détection d'une source explosive du réseau du SSI. L'effet saisonnier, très marqué, s'explique par l'inversion des vents stratosphériques qui favo-

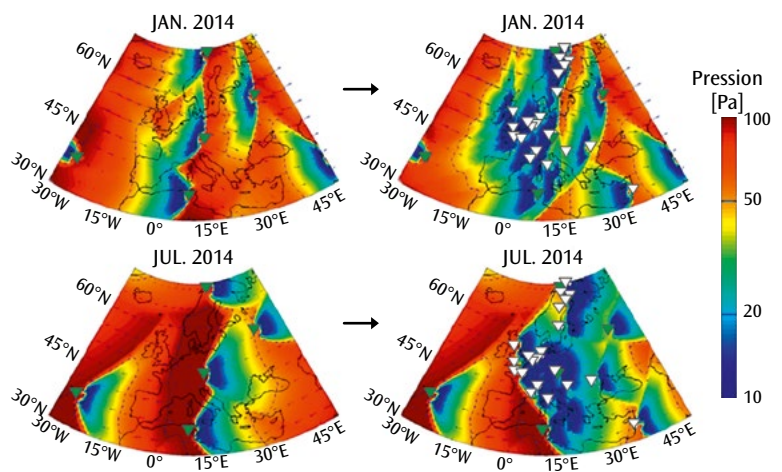


Figure 1. Capacité de détection simulée du réseau du système de surveillance international SSI (à gauche), pour une source explosive dans la région euro-méditerranéenne (carte géographique en arrière-plan), complété par des stations supplémentaires (à droite, les stations supplémentaires sont représentées par des triangles blancs). Les flèches noires indiquent la direction et la force des vents à 50 km d'altitude. La couleur code l'amplitude de pression minimale détectable (en pascal) pour une source explosive à une distance de référence de 1 km, en été et en hiver, pour une fréquence de 1 Hz. Ces simulations montrent un abaissement d'un ordre de grandeur des seuils de détection quand la propagation s'effectue dans la direction des vents. Elles permettent de quantifier l'apport de nouvelles stations sur l'amélioration des performances en détection.

rise la détection de sources à l'ouest et à l'est des stations en hiver et été respectivement. La densification du réseau contribue très nettement à un abaissement des seuils. Intégrés sur une année, les seuils de détection sont diminués d'un facteur deux environ sur plus de la moitié de la zone géographique considérée (figure 2). En Europe, l'Etna est une source naturelle et répétitive pour valider ces résultats [2]. Les signaux produits par les éruptions de l'Etna sont, dans des conditions favorables de propagation, clairement détectés par la station IS48 (Tunisie) appartenant au réseau du SSI. À une distance de 550 km, les observations en champ lointain fournissent des informations sur les conditions atmosphériques le long du trajet de propagation des ondes. La figure 3 compare les atténuations prédites et observées des ondes entre 2008 et 2015. En été, les vents stratosphériques stables orientés vers l'ouest favorisent la propagation avec une atténuation constante d'environ 50 dB. En hiver, les signaux, fortement atténués en raison de l'inversion des vents, ne sont plus détectés – avec une atténuation de l'ordre de 100 dB, l'amplitude des signaux devient inférieure au niveau du bruit de fond – sauf lors de réchauffements stratosphériques soudains qui autorisent des détections durant des périodes de plusieurs jours. Tout au long de l'année, un bon accord est noté entre les capacités de détection prédite et observée de la station IS48.

Discussion et conclusions

Ces travaux sont importants pour améliorer les méthodes mises en œuvre dans le cadre du TICE grâce à une meilleure connaissance des sources détectées, de la dynamique atmosphérique et de ses

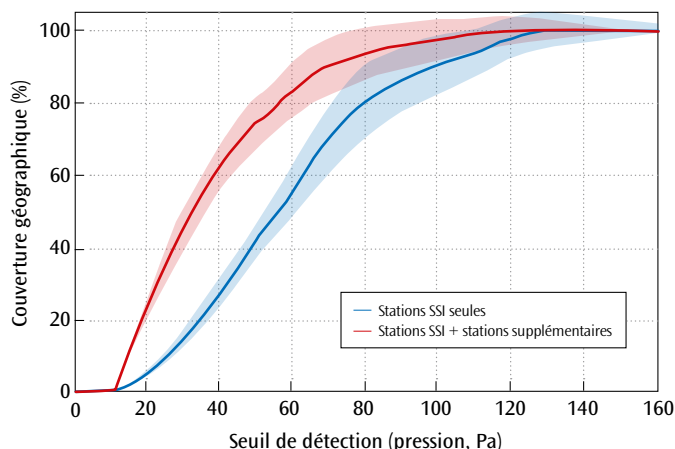


Figure 2. Histogramme cumulé du seuil de détection du réseau du SSI (courbe bleue) complété par des stations supplémentaires (courbe rouge) dans la région euro-méditerranéenne à une fréquence de 1 Hz. Les régions colorées représentent la distribution des seuils de détection avec un intervalle de confiance à 95 %. L'apport des stations supplémentaires permet d'abaisser les seuils de détection d'un facteur deux.

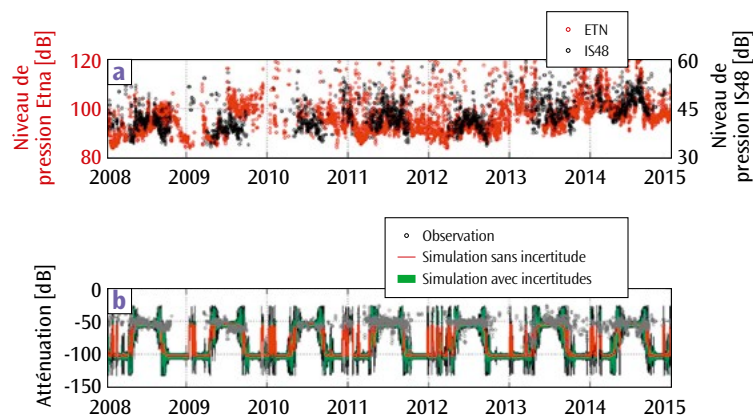


Figure 3. Capacité de détection prédite et observée des signaux de l'Etna à la station IS48. (a) Comparaison entre le niveau de pression sonore (Sound Pressure Level, SPL) mesuré à 1 km de la source par la station supplémentaire ETN (points rouges) et à IS48 (points noirs). (b) Comparaison entre l'atténuation simulée des ondes (courbe rouge) et celle mesurée déduite des mesures en champs proche et lointain (points gris). Les simulations sont effectuées à la fréquence dominante des signaux enregistrés (1 Hz). Les zones vertes délimitent l'intervalle de confiance à 95 % de l'atténuation prédite en incluant des perturbations aléatoires de la vitesse du vent de 10 m/s qui fixe une limite inférieure des incertitudes des modèles actuels d'atmosphère à 50 km d'altitude [3]. Un très bon accord est obtenu entre observations et simulations.

incertitudes. En tenant compte des effets conjugués du bruit de fond aux stations et de propagation des ondes, ces outils de simulation sont intégrés dans la chaîne opérationnelle de traitement et d'analyse du CEA. Ils peuvent aussi être exploités pour rechercher des configurations optimales de réseau (nombre de stations, implantation géographique). Dans le cadre du projet européen ARISE coordonné par le CEA [1], cette infrastructure démontre aussi son efficacité pour surveiller à distance des phénomènes météorologiques extrêmes ou certains risques naturels, comme des volcans dangereux peu instrumentés qui peuvent rejeter des quantités importantes de cendres dans l'atmosphère et perturber fortement le trafic aérien [4].

Références

- [1] E. BLANC, A. LE PICHON, J. ASSINK *et al.*, «Projet ARISE: de la dynamique de l'atmosphère à la surveillance des événements extrêmes», *chocs*, **45**, p. 67-73 (2014).
- [2] D. TAILPIED, A. LE PICHON, E. MARCHETTI *et al.*, «Assessing and optimizing the performance and infrasound monitoring network», *Geophys. J. Int.*, **208**, p. 437-448 (2017).
- [3] A. LE PICHON, J. ASSINK, P. HEINRICH *et al.*, «Comparison of co-located independent ground-based middle atmospheric wind and temperature measurements with numerical weather prediction models», *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, p. 8318-8331 (2015).
- [4] R. MATOZA, A. LE PICHON, «Surveillance à grande distance des éruptions volcaniques», *chocs avancées 2010*, p. 30-31 (2011).