

A. Trilla
CEA – DAM
Île-de-France

J. Letort
Institut des sciences de la Terre,
Université de Grenoble

S. Ford, S. Myers
Lawrence Livermore National Laboratory,
États-Unis

INVERSION JOINTE DE DONNÉES RÉGIONALES ET TÉLÉSISMIQUES POUR CONTRAINDRE LA SOURCE SISMIQUE

L'étude des séismes de magnitude modérée, soit entre 4 et 6, est une mission essentielle du Centre national de données, hébergé au CEA – DAM Île-de-France. La détermination des caractéristiques principales d'un événement, notamment celles visant à estimer et à contraindre son origine, naturelle ou anthropique, et son énergie, se fait grâce à l'inversion des formes d'ondes sismiques enregistrées. On parle alors d'inversion de la source sismique. La réduction des incertitudes dans l'estimation des paramètres de la source concentre ainsi les efforts et pousse à l'utilisation de méthodes optimisées d'inversion prenant en compte l'ensemble des jeux de données disponibles. Le séisme de magnitude 5,3 en Corée du Sud du 12 septembre 2016 a servi de cas d'étude dans le développement d'une nouvelle approche d'inversion de la source qui apporte des résultats satisfaisants même dans des régions peu instrumentées.

La compréhension d'un événement sismique se base sur plusieurs paramètres importants tels que sa localisation (latitude, longitude et profondeur), sa magnitude et son mécanisme à la source. L'inversion des formes d'ondes sismiques permet de définir une partie ou l'ensemble de ces paramètres essentiels. Celle-ci utilise habituellement soit des données à distance régionale (< 2 000 km), soit des données à distance télé-sismique (> 3 000 km) impliquant des types d'ondes, des fréquences et des modes de propagation très différents. Les données télé-sismiques sont particulièrement utilisées pour des séismes de forte magnitude. Pour les séismes de magnitude modérée, entre 4 et 6, les données régionales offrent la possibilité d'étudier la source de ces événements en détail. Néanmoins, le nombre de stations sismiques à l'échelle régionale, et/ou l'accès aux données, peut être insuffisant pour permettre une bonne caractérisation des paramètres de la source, d'où l'intérêt de combiner les deux jeux de données. Cela conduit à proposer une optimisation de l'inversion exploitant l'ensemble des données régionales et télé-sismiques : on parle alors d'inversion jointe.

Compte tenu du grand nombre de stations sismiques disponibles et de leur distribution spatiale hétérogène (figure 1), il

est nécessaire de proposer des méthodes automatiques pour sélectionner et inverser celles de meilleure qualité. Plusieurs critères de sélection sont définis en se basant sur des analyses du rapport signal à bruit, sur des méthodes de traitement du signal dites aveugles et sur des comparaisons avec des signaux modélisés à l'aide de modèles de Terre. Ils permettent de ne conserver qu'un ensemble restreint de données de qualité et, ainsi, d'assurer la fiabilité des inversions.

L'inversion jointe est ensuite menée en deux temps. Une recherche en grille des paramètres de la source (magnitude, profondeur et orientation des plans de la faille) est d'abord effectuée, et les données régionales et télé-sismiques sont inversées séparément. Les ondes télé-sismiques sont très sensibles à la profondeur des événements, mais contraignent difficilement le mécanisme de la faille. À l'inverse, les données régionales, principalement composées des ondes de surface de longues périodes, ne permettent pas de caractériser la profondeur aussi finement, mais déterminent des mécanismes très stables, quelle que soit la profondeur testée. Deux fonctions d'optimisation sont déterminées à partir de la comparaison des accords entre les données sismiques observées et celles modélisées à l'aide de modèles

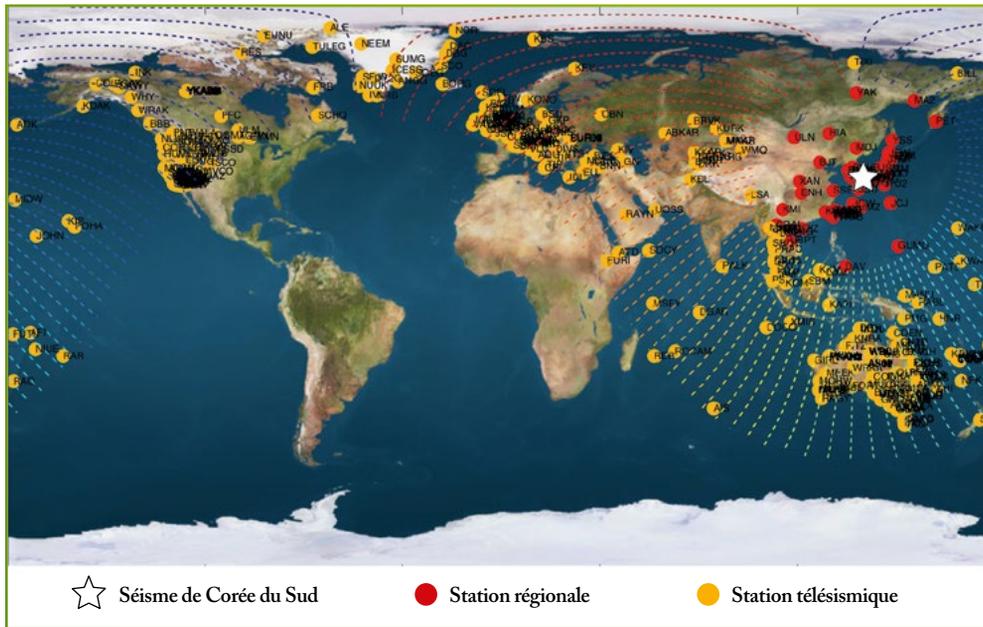


Figure 1
 Carte des stations sismiques régionales (en rouge) et téléseismiques (en jaune) qui ont enregistré le séisme du 12 septembre 2016 en Corée du Sud (étoile blanche). Les stations sont distribuées de façon très hétérogène sur la planète.

de Terre. Plus la fonction d'optimisation est forte, plus les signaux enregistrés aux stations sont correctement représentés par les signaux modélisés. La réunion de ces deux fonctions d'optimisation dessine le front de Pareto **1** qui permet de mettre en évidence les solutions satisfaisant les deux types de données (**figure 2**). La courbure de ce front identifie un ensemble de résultats cohérents à la fois dans l'estimation de la profondeur et dans celle du mécanisme du séisme. La combinaison de ces solutions fournit la solution dite optimale de l'inversion jointe (**figure 2**). Cette approche apporte des informations sur la stabilité des inversions et sur l'incertitude des paramètres des sources. Le séisme de

Corée du Sud a ainsi été identifié comme un événement tectonique de magnitude 5,3 sur une faille décrochante **2**. Ce résultat est en accord avec les résultats publiés par des instituts étrangers. Il est également cohérent avec l'orientation du système de failles dans cette région.

L'approche de l'inversion jointe utilisant le front de Pareto est prometteuse, car elle permet de diminuer les incertitudes épistémiques liées aux deux types de données tout en apportant une meilleure contrainte de la source sismique. Des tests supplémentaires sur un événement précurseur et une réplique du séisme de Corée du Sud, de magnitudes inférieures, respectivement 4,8 et 4,3, ont montré que cette nouvelle

méthode fournit de très bonnes estimations des sources **2**. Une application annexe a été réalisée sur des tremblements de terre au Botswana **3**, un pays où l'origine de la sismicité est toujours débattue. Cette application a démontré l'intérêt de l'analyse jointe des données disponibles dans des régions où le nombre de stations à distance régionale est très faible et où il existe un besoin de mieux caractériser les mouvements tectoniques en jeu.

RÉFÉRENCES

- 1** D. NEWBERY, J. E. STIGLITZ, "Pareto inferior trade", *Rev. Econ. Stud.*, **51**, p. 1-12 (1984).
- 2** J. LETORT, A. GUILHEM TRILLA, S. FORD, S. MYERS, "Multiobjective optimization of regional and teleseismic data to constrain the source of the 12 September 2016 Mw 5.4 earthquake in South Korea", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **108**, p. 175-187 (2017).
- 3** J. LETORT, A. GUILHEM TRILLA, S. FORD, O. SÈBE, M. CAUSSE, F. COTTON, M. CAMPILLO, G. LETORT, "Teleseismic and regional data analysis for estimating depth, mechanism and rupture process of the 3 April 2017 Mw 6.5 Botswana earthquake and its aftershock (5 April 2017, Mw 4.5)", Abstract S44B-08 presented at 2017 Fall Meeting, American Geophysical Union, New Orleans, LA, 11-15 December 2017.

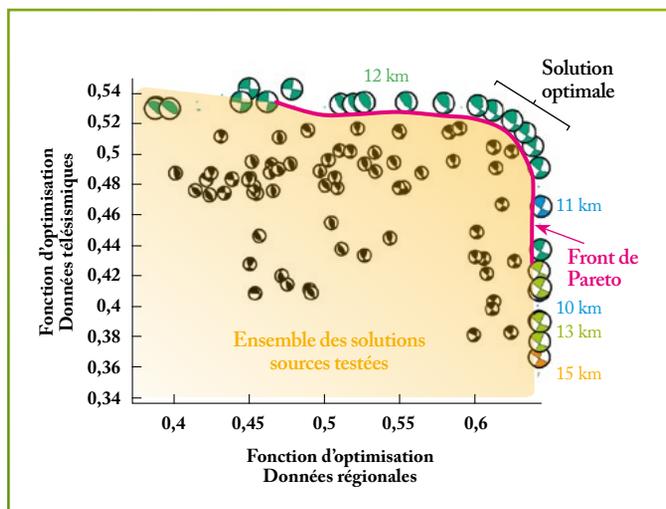


Figure 2
 Résultat de l'inversion jointe obtenue grâce à la combinaison des fonctions d'optimisation des données téléseismiques et régionales. Le front de Pareto (ligne rose) marque les meilleures solutions (en couleur) en fonction de la qualité des résultats sur les données téléseismiques et régionales. Les meilleures solutions se situent à la courbure du front et forment la solution optimale. Certaines sources testées de moindre qualité, sous le front de Pareto, sont représentées dans la zone en jaune qui montre l'étendue des solutions sources testées.