

Corrélation d'images optiques, une nouvelle façon de mesurer les déformations depuis l'espace.

La déformation cumulée que l'on peut observer dans le paysage, fruit de l'action de la tectonique des plaques sur de longues échelles de temps, résulte le plus souvent de l'accumulation de déformations co-sismiques, séismes après séismes. Pour pouvoir comprendre comment se structure cette déformation, il est donc nécessaire de comprendre comment s'organisent les séismes dans le temps et l'espace, sur chaque faille. Une des données essentielles pour arriver à cet objectif est de connaître, à chaque fois qu'un séisme se produit, la distribution du glissement, c'est-à-dire la quantité de glissement en chaque point le long de la section de faille qui a rompu. La plus part du temps cela est loin d'être trivial, soit que terrain est difficile d'accès, soit que la trace de la rupture est compliquée ou que l'on manque de marqueurs adaptés pour pouvoir mesurer la déformation co-sismique. L'interférométrie radar à synthèse d'ouverture (INSAR) permet d'imager la déformation co-sismique à grande échelle et de remonter, par inversion cinématique des données, à une image du glissement final sur le plan de faille. Cette méthode, très efficace, est d'ailleurs devenue standard dans l'étude des ruptures co-sismiques. Elle comporte cependant un certain nombre de limitations ; La déformation n'est mesurée que dans une direction, la direction terre – satellite, et des hypothèses fortes doivent être faites à priori pour pouvoir déterminer le mouvement réel du sol (par exemple choisir à priori le type de mouvement sur la faille), sauf à disposer de données acquises avec des géométries différentes, ce qui n'est pas toujours possible. Par ailleurs, généralement les mesures INSAR saturent quand la déformation devient trop importante, empêchant de fait de faire des mesures de glissement en surface au niveau même de la rupture co-sismique, où le glissement est le plus grand.

Pour palier à ces difficultés, une nouvelles technique, la corrélation d'images optiques, a vu le jour qui permet de mesurer les déplacements dans le plan sub-horizontale du sol, suivant les deux composantes perpendiculaires de l'image (*i.e.* lignes et colonnes). Ces images optiques sont acquises soit par un satellite, soit par un avion. Le principe de la mesure est simple : On utilise deux images de la zone d'intérêt, par exemple la zone de rupture co-sismique. La première image doit avoir été acquise avant le séisme. La deuxième image est acquise après le séisme. Dans la mesure du possible, on cherchera à avoir les conditions d'acquisitions les plus semblables possibles en terme de paramètres de prise de vue (notamment l'angle de visée du capteur) pour les deux images, afin de limiter l'effet stéréoscopique. On cherche d'ailleurs à avoir des angles de visée au plus proche du nadir

puisque l'on mesure les déplacements dans le plan horizontal du sol. Par ailleurs on cherche à éviter des conditions de réflectance trop différentes d'une image à l'autre afin d'assurer une bonne corrélation entre les deux images (le changement de réflectance peut être dû à une différence de saisons ou à un laps de temps long entre les acquisitions successives). Les images sont ensuite orthorectifiées en utilisant un modèle numérique de terrain (MNT) adapté au mieux par rapport à la résolution de l'image (dans la réalité, cela dépend fortement de ce qui est disponible et dans beaucoup de cas, le MNT SRTM est utilisé) afin de pouvoir superposer les images le plus précisément possible. A ce niveau il est aussi important de corriger les images des distorsions introduites par les changements d'attitude du capteur ou par le capteur lui même (roulis, tangage et lacet pour un satellite, correction de lentille dans le cas d'un appareil photographique analogique monté sur dans avion). A la fin de ces pré-traitements, on obtient deux images dites de niveau 3A, qui devraient être parfaitement superposables si il n'y avait pas eu de séisme entre les deux acquisitions, séisme qui a provoqué le déplacement d'une partie de la zone imagée par rapport au référentiel fixe utilisé lors de l'orthorectification. On applique alors la procédure de corrélation proprement dite entre les deux images. Cette corrélation se fait à l'aide de fenêtres glissantes dont on peut adapter la taille en fonction de la résolution souhaitée mais aussi de la qualité des images (images plus ou moins semblables, niveau du signal topographique résiduel...). La corrélation proprement dite se fait dans le domaine de Fourier par calcul de différence de phase entre les deux images dans la fenêtre de corrélation. Ceci permet dans chaque fenêtre d'évaluer le déplacement des pixels représentant le même objet dans les deux images, dans 2 directions perpendiculaires, classiquement la direction des lignes et celle des colonnes. Contrairement aux mesures INSAR, cette mesure ne sature pas même pour des déplacements très grands. Parce que la corrélation se fait dans le domaine de Fourier, sur des fenêtres de plusieurs pixels de coté, cette méthode permet en fait de mesurer des déplacements de dimension inférieure à la taille même des pixels, typiquement de l'ordre de 10% de la taille des pixels (cela est néanmoins très dépendant du niveau de bruit des images). Cette méthode est donc particulièrement intéressante pour mesurer en détail les distributions de glissement le long d'une rupture sismique.

Le séisme de Kokoxili (Chine) sur la faille décrochante du Kunlun est l'exemple même de cette nouvelle méthode de mesure. En 2001, ce séisme de Mw7.8 a rompu la faille du Kunlun sur 430 km, avec un déplacement moyen de 4m et des pics de déplacement de 8m à 10m. C'est l'un des séismes continentaux les plus grand que l'on connaisse. La rupture, sur le plateau tibétain, est à une altitude moyenne de 4000m, sans accès faciles sur la majeure

partie de la rupture, ce qui rend le travail de cartographie de détail très difficile. La partie décrochante proprement dite de la rupture couvre un peu plus de 300km. Nous avons donc acquis 8 paires d'images Spot (résolution 10m) avec des écarts temporels entre les images avant et après le séisme allant de quelque mois à plus d'un an, suivant les paires (figure 1). L'aridité de la région limite la décorrélation temporelle du fait de l'absence totale de végétation et de la très faible anthropisation. La corrélation des différentes images entre elles nous a permis de produire une courbe de glissement avec 1point/km sur 300km, ce qui en fait la courbe de glissement la mieux documentée à ce jour pour un séisme en décrochement et ouvre de nouvelles perspectives d'analyse (figure 2 et 2b). En effet, la densité de points le long de la rupture permet de distinguer des variations latérales du glissement sur quelques kilomètres. Dans le cas du séisme de Kokoxili on peut typiquement mettre en évidence une modulation du glissement à l'échelle de ~15km (figure 3). Cette modulation se traduit sur le terrain par la présence d'aspérités géométriques identifiables, notamment à l'aide d'images optique très haute résolution (pixel ~60cm), qui correspondent aux zones de relais entre les segments successifs qui composent la rupture du séisme de Kokoxili (figure 4).

Cette méthode d'imagerie de la déformation est donc un nouvel outil très efficace pour la cartographie des déplacements co-sismiques, notamment en contexte décrochant. La constitution de bases d'archive pour des images de plus en plus résolues nous permet d'envisager des avancées importantes dans la compréhension des séismes et du glissement qui leur est associé. Par ailleurs, cette méthode est aussi prometteuse pour de multiples applications en sciences de la terre ou il s'agit de mesurer le déplacement horizontal d'un objet (glacier, glissement de terrain ...).

Bibliographie complémentaire :

Klinger Y., Michel R., King G., Evidence for an earthquake barrier model from Mw ~7.8 Kokoxili (Tibet) earthquake slip-distribution. *EPSL*, 242, 354-364, 2006.

Van Puymbroeck N., Michel R., Binet R., Avouac J. P. et Taboury J., Measuring earthquakes from optical satellite images, *Applied Optics*, 39, (20), 3486 – 3494, 2000.

Légende des figures :

Figure 1 : Mosaique de 8 images Spot couvrant l'ensemble de la rupture du séisme de Kokoxili (Chine, Mw7.8, 2001). L'épicentre est indiqué par l'étoile et les ruptures de surface par le trait rouge.

Figure 2 : A) Extrait d'image Spot où est indiquée la rupture au passage d'un petit relais compressif. B) La carte de corrélation correspondante (direction parallèle à la faille) sur laquelle on identifie sans difficulté la rupture et la zone de relais.

Figure 2b : Stack (10 profils de glissement sur 1km de rupture) de profils de glissement déduits de la carte de corrélation. En réalisant systématiquement de tels profils le long de la rupture on peut déterminer la distribution du glissement avec une grande précision.

Figure 3 : La distribution de glissement (A) montre une modulation du glissement de l'ordre de 15km qui semble être associée aux aspérités géométriques identifiables le long de la rupture (B).

Figure 4 : Image optique très haute résolution (pixel 60cm) et carte interprétative montrant un relais compressif réactivé durant le séisme de 2001. Ce type d'aspérité géométrique affecte la distribution du glissement.