

Etude multidisciplinaire d'un effondrement dans la carrière de ciment de Saint-Martin-le-Vinoux

A. Helmstetter¹, G. Ménard², D. Hantz¹, P. Lacroix¹, F. Thouvenot¹ & J.-R. Grasso¹

1 Institut des Sciences de la Terre, Université Joseph Fourier et CNRS, Grenoble, France

2 Edytem, Université de Savoie, Chambéry, France

ABSTRACT: Le 9 janvier 2011 a eu lieu un effondrement dans la carrière souterraine de ciment Vicat à Saint-Martin-le-Vinoux, à 3 km au nord de Grenoble. Une galerie s'est effondrée sur 80 m de long et a été endommagée sur 200 m. Une fissure est aussi apparue en surface, 300 m plus haut, au sommet d'une des couches exploitées, sur une longueur de plus de 200 m. Une dizaine de maisons du hameau du Mas Caché ont été endommagées ; deux d'entre elles ont été évacuées. Ce hameau est situé à 160 m de distance horizontale et 150 m plus haut que la galerie effondrée. Les ondes sismiques générées par cet événement ont été détectées par des sismomètres jusqu'à plus de 300 km de distance. L'énergie sismique libérée correspond à un séisme de magnitude estimée entre 1,6 (Sismalp) et 2,3 (LDG). Quelques semaines plus tard ce site a été instrumenté avec trois stations sismologiques multicapteurs, un GPS, un réseau de nivellement et des repères extensométriques. L'activité microsismique a globalement diminué depuis fin janvier, mais avec plusieurs périodes d'activité plus intense. Le point GPS montre un déplacement moyen de 0.9 mm/jour entre février et juin. Ce déplacement s'est légèrement atténué avec le temps à part une période de déplacement plus rapide en avril. Les mesures extensométriques et de nivellement indiquent que l'affaissement se poursuit sur une surface importante. Le réseau sismologique permet la détection et localisation des événements qui ont suivi le choc principal. La plupart de ces événements sont localisés entre le hameau du Mas Caché et le sommet des couches exploitées, là où sont apparues les fractures en surface. Ils sont moins énergétiques mais présentent des caractéristiques analogues à ce qui a été observé pour l'effondrement principal.

1 INTRODUCTION

Un effondrement a eu lieu le 9 janvier 2011 dans la carrière souterraine de ciment Vicat à Saint-Martin-le-Vinoux, à 3 km au nord de Grenoble dans le massif de la Chartreuse. Cet événement a été accompagné par l'apparition de fractures en surface et dans la carrière, et a produit des dégâts aux habitations du hameau du Mas Caché. Une galerie s'est effondrée sur 80 m de long et a été endommagée sur 200 m. Il est probable que d'autres galeries se soient aussi effondrées plus en amont, mais ces galeries, qui ne sont plus exploitées depuis plusieurs dizaines d'années, ne sont plus accessibles. La galerie située à 320 m d'altitude, un peu plus basse que celle qui s'est effondrée, n'a pas été endommagée. A l'affleurement de la couche à ciment (cote 750 m environ), un fontis formé en 1987 (effondrement du Jalla), de direction approximativement nord-sud (Figure 1), s'est réactivé. Immédiatement au nord de celui-ci, les éboulis de pente situés au pied de la paroi calcaire tithonique (mur de la couche à ciment) se sont décollés de celle-ci, formant une fissure plus ou moins continue sur plus de 200 m, avec une ouverture qui atteint par endroits 40 cm de large. Des fractures plus petites sont aussi visibles au hameau du Mas Caché, situé à 160 m de distance horizontale et 150 m plus haut que la galerie effondrée. Une dizaine de maisons de ce hameau ont été endommagées ; deux d'entre elles ont été évacuées. La maison Brown, située la plus en amont et la plus proche de la zone effondrée, a été traversée par une fracture de plus de 10 cm de large qui a coupé la maison en deux. D'après le témoignage des habitants, cette fracture ne s'est pas formée immédiatement, mais plusieurs minutes après les vibrations du sol. Des photos du site sont visibles sur le site web Omiv <http://www-lgit.obs.ujf-grenoble.fr/observations/omiv/SM>.

Quelques semaines après cet événement, un réseau d'observation a été installé. Trois antennes sismiques ont été installées à partir du 21 janvier 2011, puis un GPS le 24 janvier. A partir de février 2011, un réseau de nivellement de plus de 70 repères a été implanté, ainsi que 3 dispositifs extensométriques. Le couplage de l'extensométrie et du nivellement permet de mesurer les déplacements verticaux et horizontaux dans les zones de forêts où l'on ne peut pas utiliser de GPS ou d'imagerie aérienne. La Figure 1 montre une carte du réseau d'observation, des fractures apparues en surface, ainsi qu'un plan des couches exploitées dans la carrière et une coupe géologique.

2 SISMOLOGIE

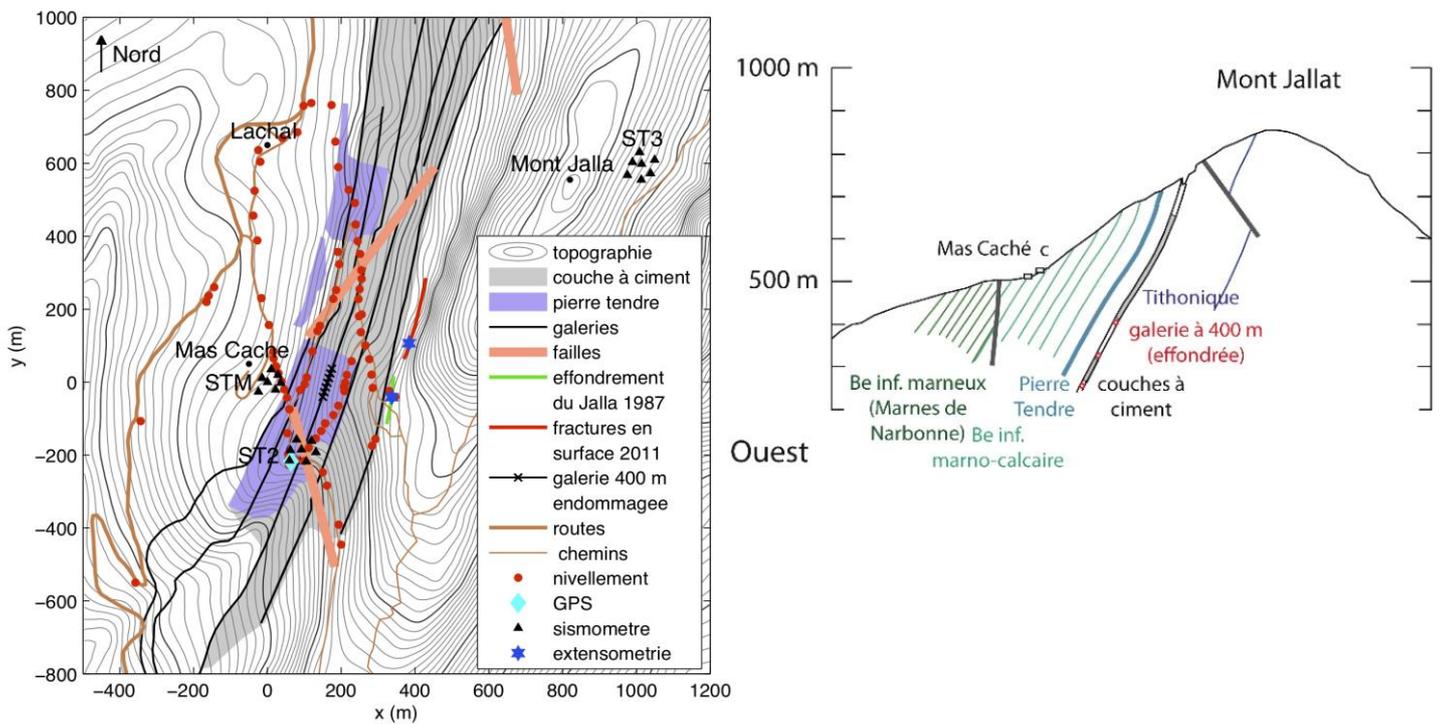


Figure 1: (gauche) plan de l'instrumentation du site, des fractures (superficielles ou dans les galeries), des zones de failles observées dans la carrière, et des couches exploitées ; (droite) coupe géologique passant par le Mas Caché et le Mont Jalla.

2.1 Événement principal

L'événement du 9 janvier 2011 a été enregistré par de nombreux capteurs sismologiques, situés jusqu'à plus de 300 km de distance. La station la plus proche est la station OGMU du Rap, située à 2,5 km au sud-est. L'énergie sismique libérée correspond à un séisme de magnitude estimée entre 1,6 (Sismalp) et 2,3 (LDG). Mais la fréquence dominante (environ 2 Hz) est plus faible que pour un séisme de cette magnitude, et la durée du signal (40 secondes pour une station située à 2,5 km) beaucoup plus longue. L'événement principal a été précédé 15 minutes plus tôt par un événement d'amplitude égale à environ 1 dixième du choc principal. De très nombreuses répliques ont été détectées par notre réseau du Mas Caché. Les plus grosses ont aussi été détectées par la station OGMU et par la station GRN de Sismalp, située à 3 km au nord. En comparant les amplitudes des répliques enregistrées par la station OGMU et par la station STM (celle-ci étant située dans une maison évacuée du Mas Caché), on peut évaluer le mouvement du sol qui a eu lieu au Mas Caché lors de l'événement principal. On obtient une vitesse maximale de l'ordre de 2 mm/s. Ce mouvement du sol relativement faible ne permet pas d'expliquer les dégâts observés dans les maisons et les fractures dans les routes et chemins. Ces dégâts ont peut-être été causés par un affaissement de la surface du sol, consécutif à l'effondrement souterrain, ou à un glissement gravitaire lent, non visible sur les sismogrammes. Cela expliquerait aussi pourquoi la fracture dans la maison Brown n'est apparue que plusieurs minutes après que les secousses eurent été ressenties.

2.2 Ecoute sismique depuis janvier 2011

Un réseau sismologique constitué de 3 antennes a été installé pour suivre l'évolution du site. La première antenne (STM) a été installée le 21 janvier 2011 dans et autour de la maison Brown au Mas Caché. L'antenne ST2 a été installée le 9 février à 300 m au sud-est de STM, au dessus du virage du sentier de Plomb. La dernière antenne ST3 a été installée le 11 février 200 m à l'est du Mont Jalla. Chaque antenne est constituée de 6 capteurs vélocimétriques verticaux de fréquence propre 2 Hz formant un cercle d'environ 50 m de rayon. Un capteur vélocimétrique 3 composantes au centre complète le dispositif. Toutes les stations ont fonctionné en continu avec une fréquence d'échantillonnage de 250 Hz. Près de 20000 microséismes ont été enregistrés par au moins une station entre le 21 janvier et le 11 juillet 2011. Nous avons utilisé une méthode pseudo automatique pour détecter les signaux à partir du spectrogramme moyenné sur toutes les traces d'une antenne. Cette méthode avait été développée pour l'écoute sismique du mouvement de terrain de Séchilienne (Helmstetter et Garambois, 2010 ; Lacroix et Helmstetter, 2011). Un exemple de sismogramme et de spectrogramme est présenté à la Figure 2.

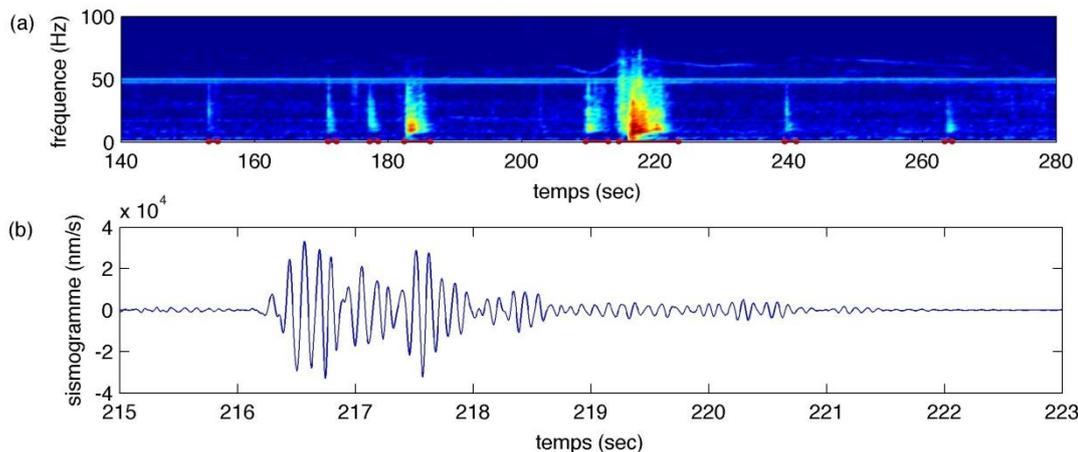


Figure 2: (a) Spectrogramme du signal enregistré le 11 février 2011 à 05:45 (UTC) par la station STM ; les traits rouges indiquent les événements détectés. (b) sismogramme du plus gros événement de cette fenêtre.

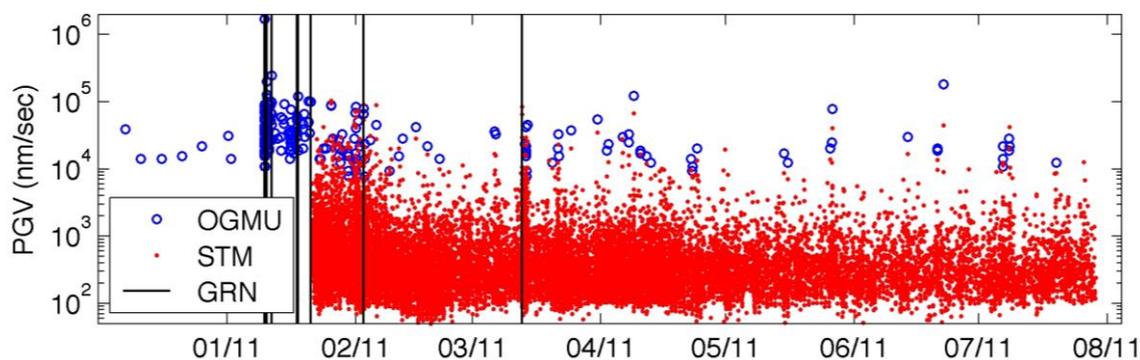


Figure 3: Amplitude de chaque événement enregistré par le réseau du Mas Caché, par la station OGMU (musée Dauphinois) ou la station GRN (Mont Rachais). Les amplitudes de la station accélérométrique OGMU ont été converties en vitesse en utilisant la relation entre les amplitudes enregistrées à OGMU et à STM pour tous les microséismes détectés par les deux stations.

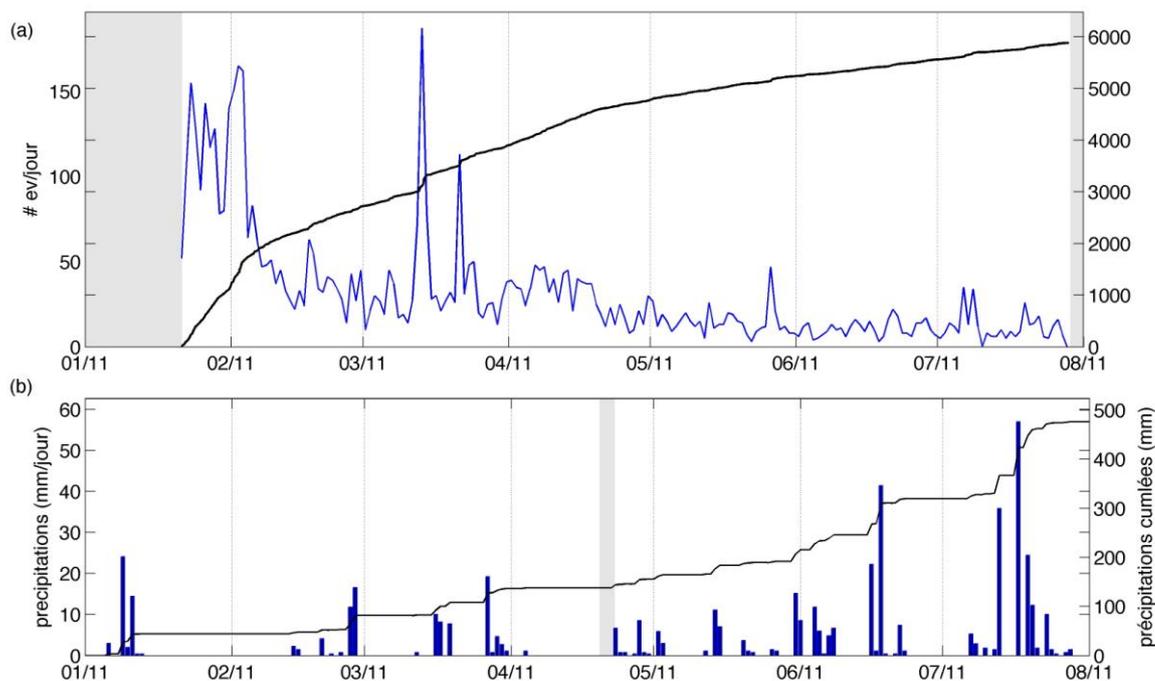


Figure 4: a) Nombre de microséismes par jour (en bleu) et nombre cumulé (en noir) ; seuls les événements avec une amplitude supérieure à 500 nm/s ont été pris en compte. (b) précipitations journalières (en bleu) et cumulées (en noir) pour la station météo amateur de Meylan, à environ 2 km à l'est de Saint-Martin-le-Vinoux.

L'activité a diminué rapidement après le 11 janvier, pour atteindre un niveau relativement constant depuis début avril, proche du niveau observé avant le choc principal, d'après l'analyse que nous avons pu faire des signaux continus enregistrés par la station OGMU. Plusieurs regains d'activité ont néanmoins eu lieu, notamment les 12 et 13 mars. Le niveau d'activité sismique semble être plus élevé que celui observé sur le mouvement de terrain de Séchilienne (Helmstetter et Garambois, 2010). La figure 3 montre l'évolution temporelle de la microsismicité depuis début janvier 2011. Le plus gros événement détecté, le 26 mai 2011, a une magnitude estimée à 1.2. Le seuil de détection est -1 à l'intérieur du réseau mais plus élevé en dehors. La distribution des magnitudes suit la loi de Gutenberg-Richter avec un exposant égal à 1.5. Cette valeur est plus grande que la valeur $b=1$ observée généralement pour les séismes, mais similaire à la valeur $b=1,6$ mesurée à Séchilienne (Lacroix et Helmstetter, 2011). Sur les deux sites, ces valeurs de b supérieures à 1,5 sont l'indicateur d'une déformation « ductile » : les plus petits séismes, parce qu'ils sont beaucoup plus nombreux que les plus grands, contribuent d'avantage à la déformation. La figure 4 compare le nombre de signaux par jour avec les précipitations. On ne voit aucune corrélation entre les précipitations et la microsismicité, contrairement à ce qui a été observé à Séchilienne (Helmstetter et Garambois, 2010). Mais le choc principal a peut-être été déclenché par la pluie, car il y a eu 24 mm de précipitations dans la journée du 9 janvier.

La sismicité est surtout localisée en amont du Mas Caché dans la zone anciennement exploitée, à proximité de la galerie effondrée (trait lilas sur la Figure 5). Dans la partie sud, la microsismicité est localisée au voisinage d'une zone de failles visible dans une carrière en surface. Plus au nord, une autre zone de failles ne semble pas correspondre à de la sismicité. Plusieurs événements sont localisés plus haut autour de la fracture observée en surface (trait rouge sur la Figure 5). Quelques signaux sont détectés au nord du réseau vers Lachal. L'essai au sud de ST2, en dehors de la zone exploitée, est peut-être mal localisé, surtout les points situés à la limite sud de la carte (limite imposée pour la localisation).

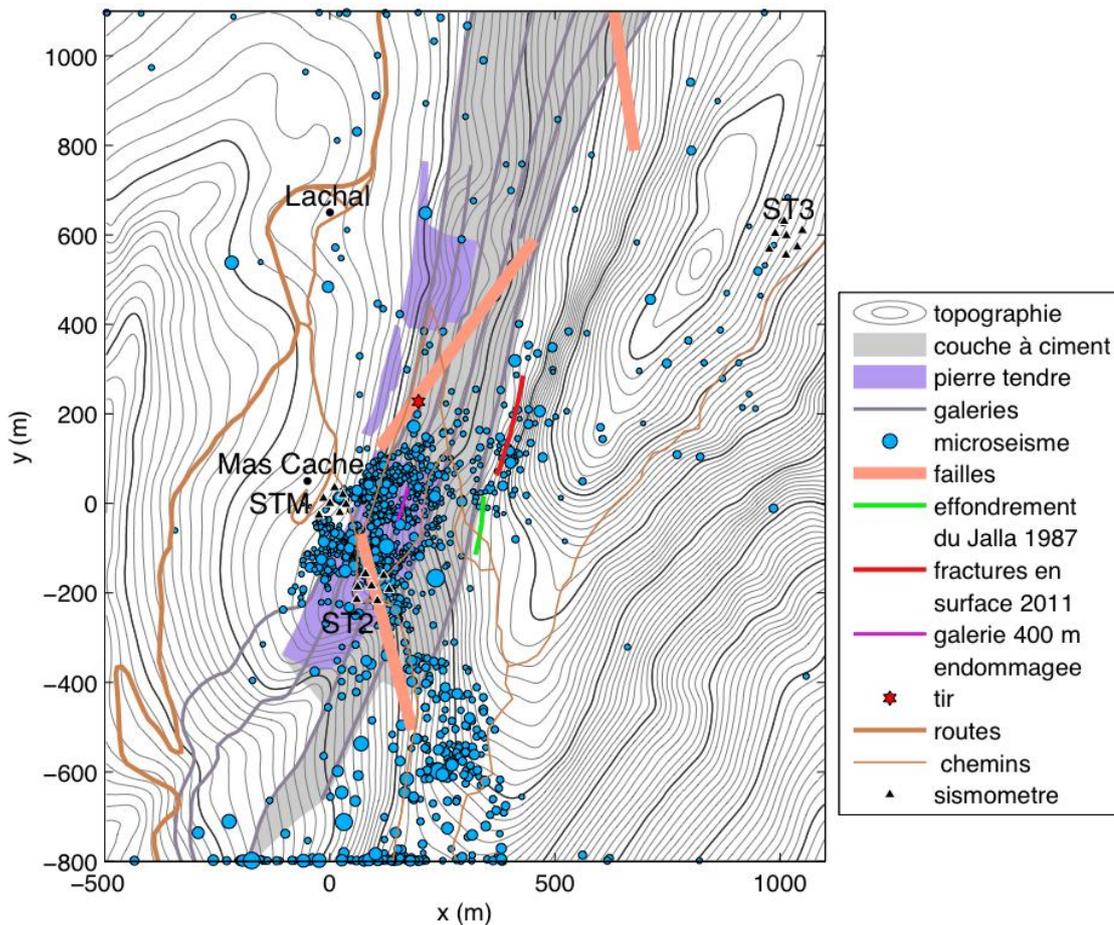


Figure 5: Carte des microséismes détectés par les trois antennes. La taille des symboles augmente avec l'amplitude mesurée. L'étoile rouge indique la position de tirs réalisés pour élargir une galerie, et que l'on a utilisés pour calculer les corrections de stations.

3 MESURES DE DEPLACEMENT

3.1 Mesures GPS

Un GPS (SMV) a été installé le 24 janvier 2011 à 250 m au sud du Mas Caché, à 659 m d'altitude (Figure 1). On calcule la ligne de base entre SMV et le point GPS permanent du RENAG du Saint-Eynard (STE) supposé fixe, localisé à environ 4 km du Mas Caché à une altitude de 1396 m. Le déplacement est calculé avec un pas horaire à partir des données enregistrées à 1 Hz, puis lissé sur 12h pour tenir compte de la répétabilité de la constellation de satellites. L'incertitude sur les mesures brutes est de 5 mm sur les composantes horizontales et 1 cm sur la verticale. A noter que la station STE était hors service du 17 mars au 5 avril. La Figure 6 montre l'anomalie des composantes du déplacement selon les directions E, N, et H. La composante verticale présente des fluctuations journalières liées à la variation de contenu en vapeur d'eau de la couche d'atmosphère entre SMV et STE. Ces variations sont fortes car STE est située à la limite de la couche limite atmosphérique. On peut corriger partiellement ces erreurs de manière empirique en inversant une relation entre les variations d'altitude, la pression atmosphérique et l'humidité relative mesurée à la station météorologique d'Engins, à 900 m d'altitude et 6 km de SMV. La composante verticale présentant encore de fortes fluctuations, elle est filtrée avec un filtre passe bas d'ordre 2 et une fréquence de coupure de 10 jours. Les mesures montrent un déplacement moyen de 0.9 mm/jour orienté N120°. Le mouvement a globalement ralenti depuis janvier 2011 (Figure 6a). L'orientation du déplacement a aussi varié au cours du temps (Figure 6b-c). Avant le 21 avril, le mouvement était orienté N112° avec un dip de 37°. Après cette date, la composante nord-sud devient plus importante et le dip est plus grand.

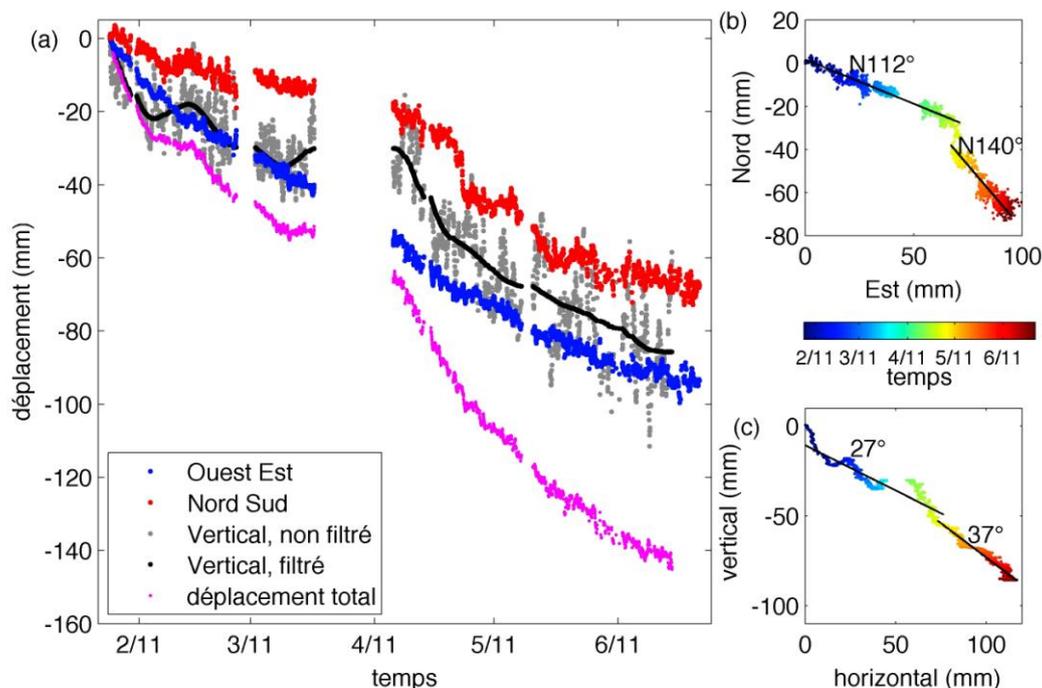


Figure 6 : (a) Déplacement suivant les 3 directions. (b) Déplacement dans le plan horizontal et (c) dans le plan vertical ; les segments noir indiquent des ajustements linéaires avant et après le 21 avril. Les valeurs indiquent l'azimut (b) et le dip (c) pour chaque période.

3.2 Extensométrie

Des repères extensométriques ont été posés sur les deux plus grandes fractures, le fontis du Jalla, qui date de 1987 mais qui a été réactivé en 2011, et la fracture plus au nord qui est apparue dans le prolongement du fontis en janvier 2011. Ces repères ont été mesurés au maximum 6 fois entre le 11 mars et le 1er juillet 2011. La Figure 7 illustre les points de mesure et les résultats. Pour la fracture nord (bases D et E), deux repères sont placés sur le mur tithonique, et un troisième sur un gros bloc en aval dans des éboulis. Deux bases ont été mesurées dans le fontis, la base A entre un bloc rocheux au fond du fontis et le bord est (tithonique) du fontis, et la base C entre les deux bords du fontis. Ces repères ont été également mesurés par nivellement pour mesurer le déplacement vertical. Pour la fracture nord, on peut calculer le mouvement vertical et horizontal de la pente d'éboulis par rapport au mur tithonique par triangulation en supposant que les deux repères sur le tithonique sont stables et que le mouvement se fait dans le plan qui contient les deux bases D et E. Dans les deux zones

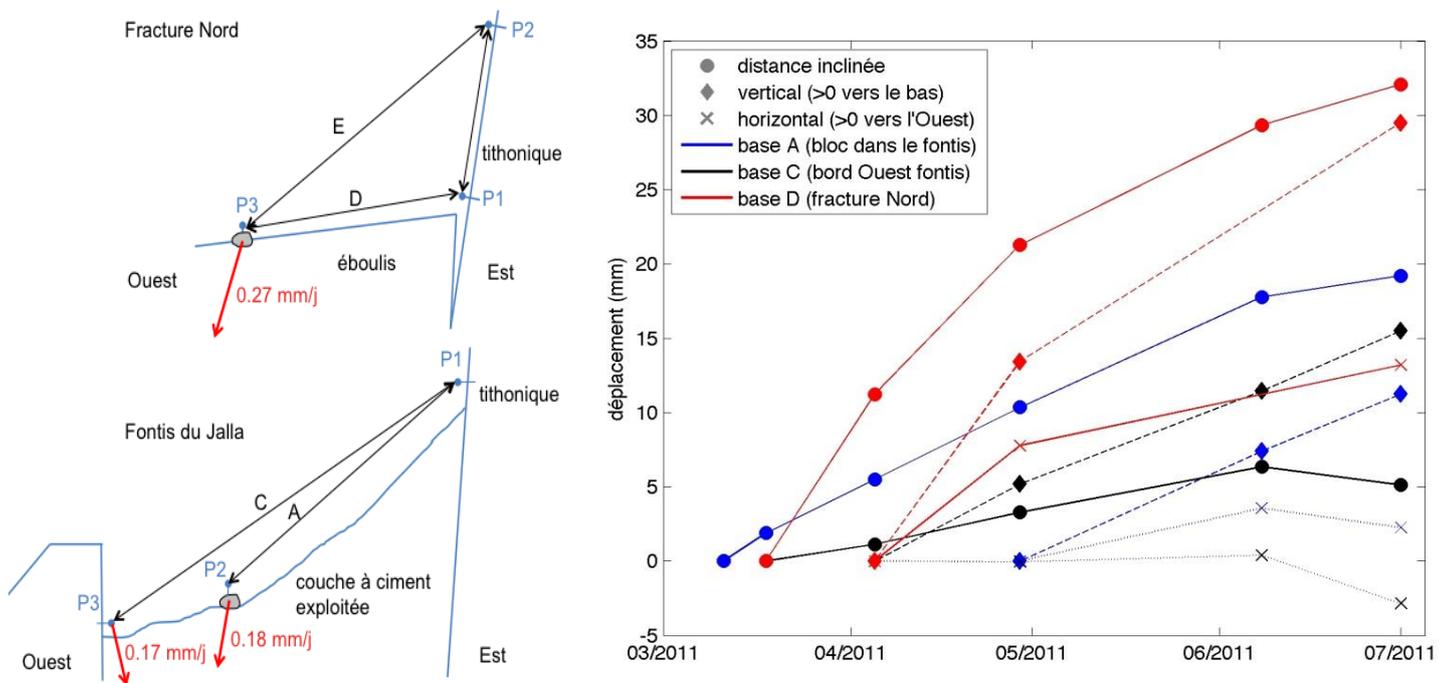


Figure 8: mesures extensométriques pour le fontis (bases A et C) et pour la fracture récente plus au Nord (bases D et E). Les flèches indiquent le déplacement moyen entre le 29/4 et le 1/7/2011.

surveillées, le mouvement des repères mobiles est surtout en affaissement. Le mouvement horizontal est dirigé vers l'ouest pour la pente sous la fracture nord (P3 Nord) et pour le bloc dans le fontis (P2 Jalla), alors que le bord ouest du fontis (P3 Jalla) se déplace vers l'est. Ce mouvement indique que la distance entre le mur et le toit des couches exploitées diminue, ce qui peut être dû à une flexion vers le vide des bancs du toit. Le mouvement du bloc situé dans le fossé (base A) est lui dirigé vers l'ouest, peut-être à cause de l'inclinaison vers l'ouest de la pente d'éboulis grossier qui remplit le fossé. Le mouvement vertical et horizontal est plus important pour la nouvelle fracture que pour le fontis (Figure 7). On observe un ralentissement du mouvement pour les trois bases au cours du temps.

3.3 Nivellement

Le réseau de nivellement (Figure 8) a pour but de cartographier la zone d'affaissement et son évolution en temps. Il comporte une soixantaine de repères répartis sur une distance de plus de 3 km et 270 m de dénivélé. Le réseau forme une maille principale sur laquelle se branchent trois antennes (Figure 1). Deux de ces antennes, en haut de versant, se rattachent au tithonique (rocher en place supposé fixe) : la première, vers le sud, au niveau d'une ancienne carrière à ciment ; la seconde, vers l'est, au niveau de l'effondrement du Jalla. La troisième antenne, en bas de versant, se rattache à un repère de 4^e ordre du réseau de l'IGN. Les mesures ont été réalisées avec un niveau automatique NA3000 et des mires invar de 3 mètres. Toutes les dénivelées ont été mesurées en aller et retour. Les écarts entre mesure aller et retour sont en général de quelques dixièmes de mm. Elles peuvent dépasser le mm pour les repères les plus éloignés. La mesure zéro s'est effectuée sur 16 jours pour la maille principale et 28 jours pour l'ensemble du réseau. L'erreur de fermeture (dans le sens horaire) de la maille principale est de -9,7 mm. Cette erreur est considérée classiquement comme due aux erreurs de mesures aléatoires. Dans le cas présent, les vitesses verticales et la durée de la mesure impliquent que l'erreur de fermeture est due en grande partie aux mouvements verticaux relatifs pendant la période de mesure. Cette erreur a pu être corrigée en partie a posteriori après la remesure du réseau et ramenée à -5,2 mm. La compensation de cette maille a été effectuée ensuite.

Le Sentier de Plomb (Figure 8) a été mesuré pour la première fois en mars-avril 2011 et a été remesuré fin mai 2011. La comparaison de ces mesures montre un affaissement important à l'extrémité sud d'environ 5 cm en 70 jours et un affaissement plus modéré au nord (1,5 à 3 cm). L'extrémité nord (Mas Caché) montre un affaissement de 5 mm (après correction de la différence de temps entre les mesures), dans la marge d'erreur. On ne sait donc pas si cette zone est stable ou en mouvement lent. Une remesure complète du réseau a eu lieu en juillet 2011 et une nouvelle maille a été ajoutée vers Lachal pour surveiller la zone plus au nord. Après compensation, la comparaison avec la mesure zéro fait apparaître une zone très affaissée au voisinage du point GPS, entourée par une zone moins affaissée (partie nord du sentier de plomb et zone à l'aplomb de la couche de pierre tendre) et des zones stable ou en mouvement lent sur les bords du réseau (Figure 8a). Les repères du Sentier de Plomb, déjà mesurés fin mai, montrent un ralentissement de l'affaissement (Figure 8b).

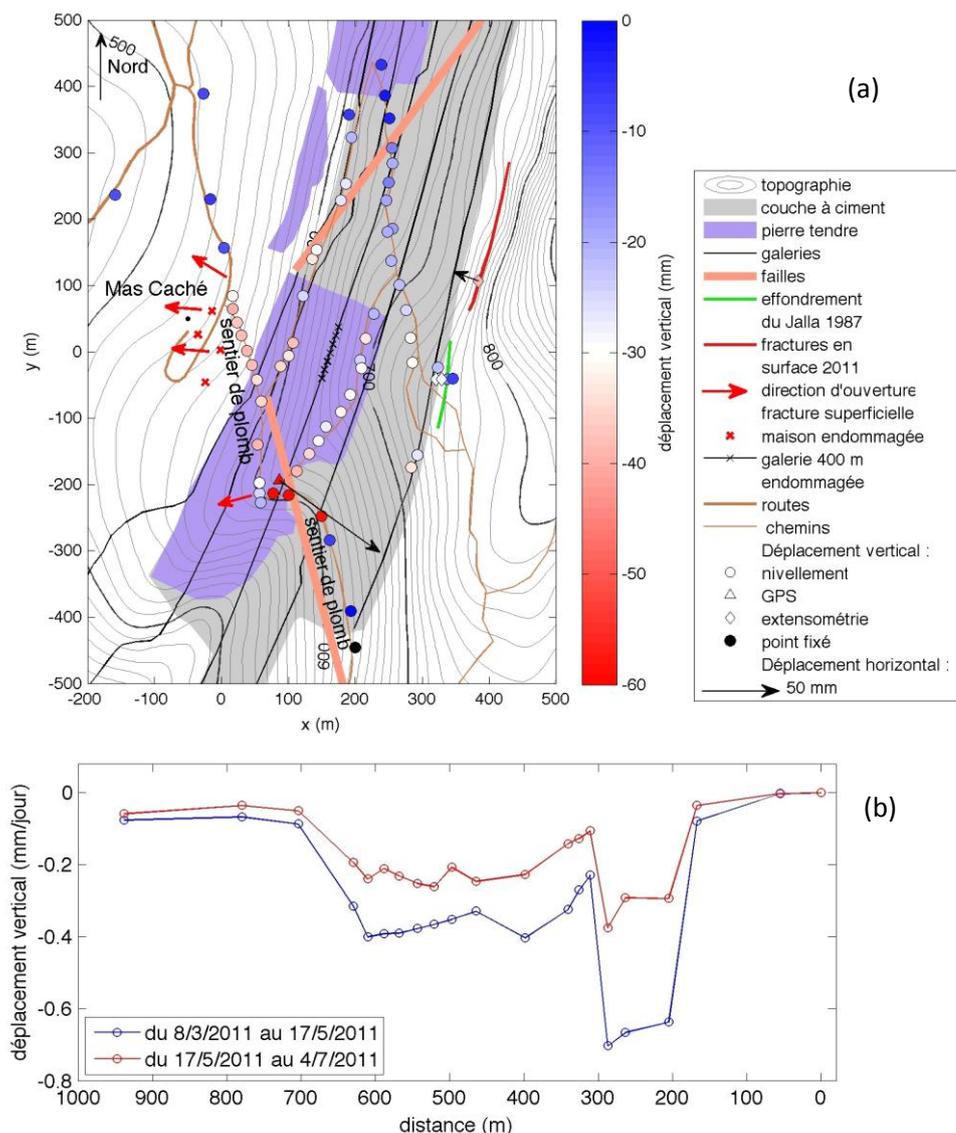


Figure 8 : (a) carte des déplacements verticaux et horizontaux observés par nivellement, extensométrie et GPS entre le 8/3/2011 et le 4/7/2011 ; (b) déplacement vertical le long du Sentier de Plomb pour les deux mesures de nivellement.

4 CONCLUSION

Le réseau d'observation (sismologie, GPS, extensométrie et nivellement) a permis de suivre l'évolution du site depuis l'effondrement de janvier 2011 et de mieux comprendre cet événement. Toutes les données suggèrent un ralentissement de la déformation, mais avec plusieurs périodes de regain d'activité identifiées par l'écoute sismique et le GPS. Le caractère brutal des limites de la zone d'affaissement important (0,7 mm/jour) suggère la superposition de deux phénomènes : un affaissement modéré couvrant une vaste superficie associé à un effondrement « profond » (couches à ciment prompt ?) et un affaissement plus localisé associé à un effondrement plus superficiel (couche tendre ?). La limite de la zone stable n'est pas bien contrainte actuellement, tant par les mesures de nivellement que par l'écoute sismique. Les zones de forte activité microsismique coïncident avec les zones de déplacement important (partie nord du Sentier de Plomb et fracture nord). La dynamique du mouvement ne semble pas être corrélée aux précipitations et n'a pas non plus été influencée par les séismes.

REMERCIEMENTS

Nous remercions tous les ingénieurs, techniciens, chercheurs et étudiants d'Isterre qui ont participé à l'installation et à la maintenance du réseau et aux mesures de nivellement, en particulier Lionel Darras et Coralie Aubert. Nous remercions la société Vicat pour les informations fournies sur la carrière et pour la visite de celle-ci, Stéphane Garambois pour avoir réalisé un profil sismique au Mas caché, et Robert Marie (RTM 38) pour la visite commentée du site et un partage d'informations. Ce projet a été financé par VOR.

RÉFÉRENCES

- Helmstetter, A. and S. Garambois, Seismic monitoring of Séchilienne Rockslide (French Alps): analysis of seismic signals and their correlation with rainfalls, *J. Geophys. Res.*, 115, F03016, doi:10.1029/2009JF001532 (2010)
- Lacroix, P. and A. Helmstetter (2011), Location of seismic signals associated with micro-earthquakes and rockfalls on the Séchilienne landslide, French Alps, *Bull. Seism. Soc. Am.* 101(1), 341-353, doi: 10.1785/012010011