



**HAL**  
open science

## Instrumentation d'une petite crise sismique à Salsigne (Aude)

Pascal Dominique, Fanny Le Loher, Madjid Bendif

► **To cite this version:**

Pascal Dominique, Fanny Le Loher, Madjid Bendif. Instrumentation d'une petite crise sismique à Salsigne (Aude). Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Jul 2012, Bordeaux, France. 8 p. hal-00822447

**HAL Id: hal-00822447**

**<https://brgm.hal.science/hal-00822447>**

Submitted on 14 May 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **INSTRUMENTATION D'UNE PETITE CRISE SISMIQUE À SALSIGNE (AUDE)**

### **SEISMIC CRISIS MONITORING (SALSIGNE, AUDE)**

Pascal DOMINIQUE<sup>1</sup>, Fanny LE LOHER<sup>2</sup>, Madjid BENDIF<sup>2</sup>

*1 BRGM, Orléans, France*

*2 BRGM, Gardanne, France*

**RÉSUMÉ** — L'exploitation de la mine d'or de Salsigne(Aude) s'est arrêtée progressivement au cours des années 2000. Depuis 2006, le Département de Prévention et Sécurité Minière (DPSM) du BRGM s'est vu confier la mission de gérer, de remettre en état et de surveiller les installations soumises au code de l'environnement et au code minier. Un événement sismique de magnitude 2,5 est survenu le mardi 15 novembre 2011 à 20h12 à proximité immédiate de Salsigne. Cet événement a été largement ressenti par la population. D'autres secousses ont été ressenties par la suite sur une vingtaine de jours. Le BRGM a déployé rapidement un réseau de stations sismiques afin de mieux détecter et localiser cette microsismicité. Cette surveillance rapprochée, menée sur plusieurs mois, a permis d'appréhender les hypothèses les plus plausibles quant à l'origine de ces vibrations successives.

**ABSTRACT** — The exploitation of the Salsigne gold mine (Aude) stopped gradually over the 2000s. Since 2006, the Department of Mine Safety and Prevention (DPSM) of BRGM has been tasked to manage, restore and monitor the installations under the Environmental Code and the mining code. A seismic event of magnitude 2.5 occurred on Tuesday, November 15, 2011 at 8:12 p.m. in the immediate vicinity of Salsigne. This event was widely felt by the population. Other tremors were felt later on about twenty days. BRGM has rapidly deployed a network of seismic stations to better detect and localize this microseismicity. This close surveillance, conducted over several months, helped apprehend the most plausible assumptions about the origin of these successive vibrations.

### **1. Introduction**

Au nord de Carcassonne, dans l'Aude, l'extraction minière dans la région de Salsigne est très ancienne et semble remonter au II<sup>ème</sup> siècle avant J.C. Les minéralisations à or, argent, arsenic, cuivre et bismuth ont été exploitées tout au long du XX<sup>ème</sup> siècle sur sept concessions sur le flanc sud de la Montagne Noire, parfois à cheval sur plusieurs communes : Salsigne, Villanière, Villardonnell, Les Isles, Mas-Cabardès, Miraval-Cabardès, Lastours. Une centaine de tonnes d'or a été produite sur le site principal de Salsigne. L'exploitation s'est développée autour des deux filons majeurs complexes et discontinus de Fontaine de Santé et Ramèle, à partir d'un intense réseau de travaux miniers souterrains (galeries : 14 niveaux, une

centaine de km de longueur, 400 m de profondeur, volume estimatif des vides : 2,4 millions de m<sup>3</sup> dont 600 000 m<sup>3</sup> hors nappe), mais aussi à partir d'une mine à ciel ouvert (MCO) dans les années 1980. Cette région présente des enjeux humains et économiques certes peu denses mais bien présents. Depuis 2004, toutes les exploitations sont arrêtées et la renonciation des concessions a été actée le 23 juin 2006. Le 15 novembre 2011, à 20h12, les habitants des communes de ces concessions et d'autres plus éloignées jusqu'à plus d'une dizaine de kilomètres, ont entendu une forte détonation, rapidement suivie par une brève vibration. Devant la répétition de ce phénomène et l'émoi des populations, le BRGM a très rapidement décidé d'implanter un réseau temporaire de surveillance microsismique pour analyser cette crise dès le 23 novembre. L'implantation des stations (triangles violets) autour de la MCO et l'emprise des travaux souterrains (en rouge) sont représentés sur la figure 1.

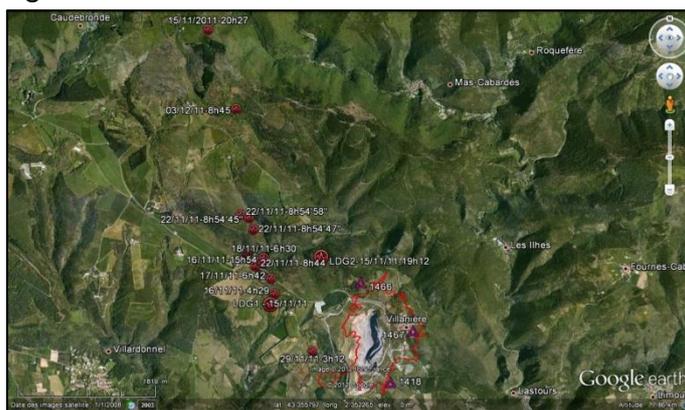


Figure 1 . Localisation de la MCO, des stations sismiques (triangles violets), de l'emprise des travaux souterrains (trait continu rouge) et des événements sismiques (en rouge) détectés par le CEA<sup>1</sup>

## 2. Aspects macrosismiques et instrumentaux

### 2.1. Sismicité régionale

Cette région située en bordure méridionale et occidentale de la Montagne Noire et sur les contreforts sud du Massif Central, connaît peu de séismes historiques. Cependant, la terre tremble régulièrement dans l'Aude. Historiquement, depuis 1428, trente-cinq séismes y ont été ressentis (SisFrance). L'intensité maximale ressentie est VII (SisFrance). Les séismes les plus fréquemment ressentis dans l'Aude surviennent généralement plus au sud, dans le massif pyrénéen et ses abords. Par exemple, le séisme historique de Camprodon (1428, Espagne, intensité épiscopale IX) a été ressenti plus fortement que le séisme de Saint-Paul-de-Fenouillet du 18 février 1996 (intensité épiscopale VI). Le séisme historique le plus remarquable de cette région est celui des Corbières de Camplong-d'Aude survenu le 28 juin 1950,

<sup>1</sup>Laboratoire de Détection Géophysique du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives. La translation de l'événement principal de la position LDG1 à LDG2 vers le nord-est correspond à une relocalisation intégrant les données espagnoles et celles du BRGM.

d'intensité épicentrale VI-VII. Depuis 1980, ce sont plus de 500 séismes, de magnitude faible (2 à 3 environ) qui sont enregistrés dans l'Aude ou à proximité immédiate. La magnitude maximale mesurée dans le département est de 4,5 le 23 avril 1981, à l'ouest de Limoux. Le zonage sismique réglementaire de la France<sup>2</sup> place cette région en zone de sismicité 1 (très faible sismicité) (Figure 2). La prise en compte d'événements de faible magnitude permet de dresser une carte de sismicité proche dans un rayon d'une dizaine de kilomètres autour du site minier de Salsigne portant sur la période 1962 à mars 2012. Il s'avère que l'ensemble des événements ont des magnitudes comprises entre 2,2 et 2,9 (Figure 2). La recherche d'informations macrosismiques relatives à ces événements dans plusieurs quotidiens de la presse régionale ne fait pas état de secousses ressenties. Cependant, selon certains témoignages d'anciens mineurs, les événements sismiques des 12 janvier 1982 à 14h35 locale et 6 septembre 1985 à 14h52 locale seraient liés aux premiers gros tirs effectués pour les besoins d'exploitation de la MCO.

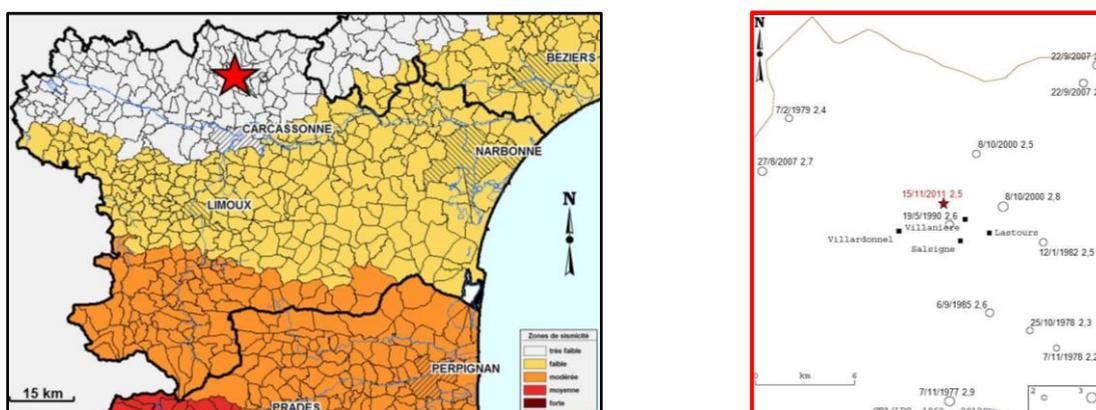


Figure 2 . Zonage sismique de la France et événement du 15/11/2011 (à gauche), zoom sur la sismicité autour de Salsigne (1962-2012) (données CEA) (à droite)

## 2.2. L'événement du 15 novembre 2011

Le réseau sismique national du CEA donne ses caractéristiques suivantes dans le tableau 1. Cet événement correspond au point « LDG2 » sur la Figure 1. L'événement « LDG1 » et les autres événements correspondent aux déterminations réalisées à partir des seules données du CEA. Il apparaît que cet événement est superficiel et de faible magnitude. Sa forte perception en champ proche s'explique par sa faible profondeur. Le recueil systématique des témoignages de la perception des vibrations a permis par une analyse affinée du CEA de retrouver les temps origine des différents événements. Ainsi, l'ensemble des épicentres déterminés par le CEA et recherchés sur la base de témoignages (Tableau 3) sont reportés sur la Figure 1. Suite à la secousse principale et à la fréquence des répliques qui ont suivi,

<sup>2</sup>le décret n°2010-1254 & 2010-1255 du 22 octobre 2010 fournit le zonage sismique applicable au 1<sup>er</sup> mai 2011

le BRGM a déployé un réseau de trois stations accélérométriques<sup>3</sup> autour de la MCO le 23 novembre afin d'améliorer la détection et la détermination des caractéristiques des événements sismiques et, si possible, d'en déterminer l'origine. Seuls, deux événements sont communs avec les détections du CEA et les témoignages de la population. L'analyse des enregistrements a permis de détecter plus d'une dizaine d'événements sismiques locaux non perçus par la population et non détectés par le CEA. Compte tenu du nombre variable de stations ayant déclenché et de leur nombre limité (3), les déterminations restent incertaines en termes de localisation (quelques centaines de mètres) et d'énergie (Tableau 2).

Tableau 1 . Caractéristiques de l'événement sismique du 15 novembre 2011

	Heure origine (TU)	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Magnitude	Profondeur (km)
localisation manuelle <sup>4</sup>	19h12 37,3	43,35	2,75	2,50	2

Tableau 2. Stations sismiques (à gauche) et événements sismiques du 23/11/2011 au 15/02/2012 (à droite)

Code	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Altitude (m)	Date aaaammjj	Heure origine(TU)	Magnitude (BRGM)	Magnitude (CEA)
1418	43,3353	2,3589	349	20111123	16h01	0,07	
1466	43,3473	2,3540	447	20111127	19h42	0,12	
1467	43,3415	2,3625	371	20111129	03h12	1,54	1,55
				20111129	05h17 52	0,22	
				20111129	05h17 56	0,04	
				20111202	20h04	0,49	
				20111203	04h47	0,29	
				20111203	08h45	0,95	1,18
				20111206	18h53	0,44	
				20111209	03h33	-0,03	
				20111231	17h41	0,36	
				20120112	23h57	0,19	

### 2.3. Répartition de la sismicité

#### 2.3.1. Qualification et nature des signaux enregistrés (Figure 3)

Sur les trois stations sismiques, l'analyse du bruit de fond ambiant, par la méthode appelée couramment H/V (Nakamura, 1989) montre un rapport spectral quasiment plat compris entre 1 et 2, amplifiant légèrement au-delà de 10 Hz. Cela traduit un substratum rocheux avec probablement une légère frange d'altération au droit de la station la plus au sud. Ceci accreditte l'hypothèse d'enregistrements non affectés par d'éventuels effets de site, pouvant amplifier localement la réponse du mouvement sismique, en raison de la géologie. L'analyse des signaux enregistrés aux 3 stations montre clairement que les ondes sont polarisées avec une identification nette des

<sup>3</sup> Le réseau était composé de trois stations équipées de capteurs accélérométriques triaxiaux avec une fréquence d'échantillonnage de 200 Hz. Les seuils de déclenchement sont de 0,4 mg (environ 4 mm/s<sup>2</sup>).

<sup>4</sup> Les données (66 pointés) proviennent du CEA, du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) et de l'Observatoire Midi-Pyrénées – Toulouse (OMP) (côté français), de l'Institut Géographique de Catalogne – Barcelone (IGC) et de l'Institut Géologique National – Madrid (IGN) (côté espagnol)

arrivées des ondes P (de compression) et S (de cisaillement). De même, l'incidence des rais aux stations est quasi verticale, en particulier pour les stations 1418 et 1467. Ce constat milite en faveur d'un mouvement de rupture brutale le long d'une faille et ne traduit pas un mécanisme d'effondrement, de chute de blocs, voire une rupture progressive en extension. La durée du signal, qui ne semble pas corrélée directement à la magnitude, est de l'ordre de 0,5 s à 1 s. Enfin, les signaux enregistrés présentent globalement un écart de temps entre l'arrivée des ondes S et des ondes P de l'ordre de 0,2 s (0,17 à 0,32 s), ce qui situe l'ensemble des événements sismiques à moins de 2 kilomètres de distance focale des stations.

Tableau 3 . Synthèse des phénomènes ressentis<sup>5</sup>

Date	Heure locale	Heure instrumentale <sup>6</sup>	Perception
8/11/2011	11h00	-	Forte déflagration et vibration d'une maison
15/11/2011	<b>20h12</b> <b>21h30</b>	<b>20h12 37,3</b> <b>20h27 13</b>	Détonation, bruit sourd, tremblement à Salsigne, Villanière, Lastours, les Martyrs, Villardonnell, Mas Cabardès à 20h15 et pendant la nuit
16/11/2011	<b>05h29</b> <i>10h00-11h00</i>	<b>05h29 57</b> -	Vibrations ressenties après une détonation. Ressenti à Lastours et Salsigne. Secousse ressentie vers 17h00.
	<b>16h54</b> <i>19h00-19h30</i>	<b>16h54 07</b> -	Bruit sourd entendu à Lastours
17/11/2011	<b>07h40</b> <i>16h00</i>	<b>07h42 54</b> -	Secousse ressentie vers 7h00. Une secousse aurait été ressentie à Lastours le soir (léger grondement), faible à Salsigne et à Villanière
	<b>21h53</b>	-	Ressenti à Lastours et Salsigne
18/11/2011	<b>07h30</b>	<b>07h30 54</b>	Ressenti par plusieurs personnes à Lastours.
21/11/2011	<b>16h30</b>	<b>16h30 32</b>	Ressenti à Lastours, (grondement et vibrations)
22/11/2011	<i>1h00</i>	-	
	<b>3h07</b>	-	
	<i>8h00</i>	-	
	<b>10h00 (4 fois)</b> <b>12h30 13h05</b>	<b>09h44 41</b> <b>09h54 45</b> <b>09h54 57</b> <b>09h54 58</b> -	Vers 10h00, 4 grondements en l'espace de 10 minutes, et vers 12h30 et 13h05 un grondement supplémentaire.
23/11/2011	<b>5h30</b>	-	Ressenti par un habitant de Villanière
29/11/2011	<b>4h11</b>	<b>4h12 30</b>	Ressenti essentiellement à Lastours, peu ou pas à Salsigne et Villanière
	<b>6h11 (2 fois)</b>	<b>6h17 52</b> <b>6h17 56</b>	2 grondements coup sur coup espacés d'environ 1 à 2 secondes
03/12/2011	<b>5h46</b>	<b>05h47 34</b>	Ressenti le matin
	<b>9h45</b>	<b>09h45 07</b>	2 témoignages
04/12/2011	<i>16h30-17h00</i>	-	Ressenti

2.3.2. Localisation des événements sismiques (Figure 3)

En tenant compte de l'altitude relative des stations, la localisation des événements effectuée d'une part de façon manuelle (méthode des cercles et prise en compte de l'azimut des rais) et d'autre part, en utilisant le logiciel HYPO71 (Lee et Lahr, 1975) uniquement pour les événements enregistrés aux trois stations conduit à une

<sup>5</sup> les heures en gras correspondent à des témoignages fiables, les heures en italiques sont moins précises

<sup>6</sup> Données CEA jusqu'au 23 novembre, données BRGM après le 23 novembre. L'heure locale est égale à l'heure Temps Universel (TU) plus 1 heure.

incertitude quant à la localisation des événements sismiques. L'approche manuelle situerait les événements sismiques (en jaune) à environ 300 m à l'est de l'emprise minière des travaux souterrains, alors que le logiciel HYPO71 les placerait à l'intérieur de cette emprise, à l'est de la MCO (en bleu), à une latitude comprise entre celles des stations 1418 et 1467<sup>7</sup>. Afin de préciser les localisations obtenues et en particulier le modèle de vitesse (ondes P et S), une station a été déplacée au droit d'une carrière proche. Malgré l'amélioration du modèle de vitesse, il nous paraît difficile de privilégier un type de localisation. Les profondeurs des foyers s'étagent entre 500 m et 1,5 km, ce qui semble exclure toute influence directe des ouvrages miniers.

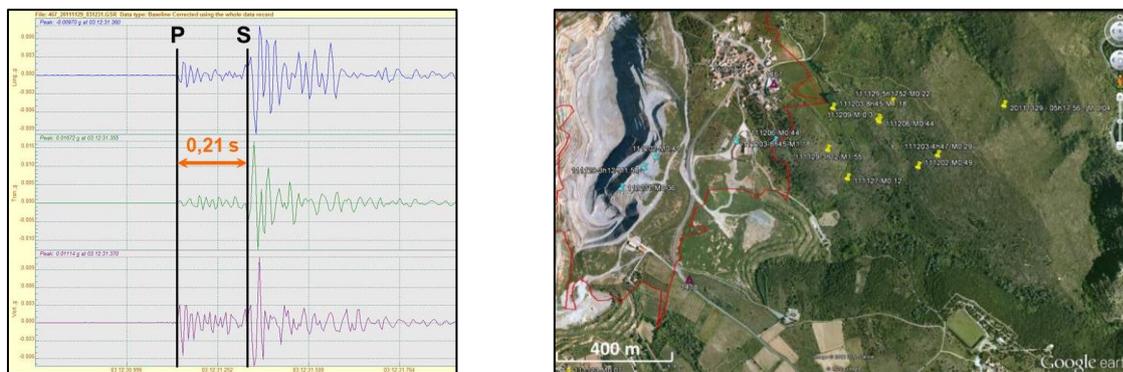


Figure 3 . Événement sismique du 29/11/2011 sur la station 1467 (à gauche), Localisation des séismes : manuelle (en jaune), avec HYPO71 (en bleu) (à droite)

### 3. Aspects météorologiques

#### 3.1. Sismicité et pluviométrie

Les processus pré-sismiques génèrent des modifications du champ de contrainte et de déformation en accord avec les mécanismes de rupture. Ces processus induisent des variations dans les niveaux des nappes souterraines (Rigo, 2010). Inversement, de nombreux articles font état de corrélation entre des phénomènes pluvieux et le déclenchement d'une microsismicité induite. En 2002, suite à des précipitations cumulées de 600 mm en 28 h sur la région nîmoise, Rigo *et al.* (2008) observent une soudaine augmentation de l'activité sismique accompagnant ce phénomène exceptionnel. Ils interprètent ces séismes déclenchés comme une réponse de la croûte à un chargement vertical brusque. Le contexte géologique de cette zone est caractérisé par la présence de bassins sédimentaires et un important réseau karstique dans un milieu calcaire permettant la rétention d'un tiers du volume d'eau de pluie pendant quelques semaines après la tempête. La sismicité de faible énergie (magnitude de 1 à 2) est superficielle (profondeur inférieure à 5 km). Si, compte tenu du chargement rapide, le 1<sup>er</sup> événement sismique survient 15 h après les précipitations, 40% des événements se produisent dans les deux semaines qui

<sup>7</sup> Il est à noter que les événements des 29/11/2011 et 3/12/2011 - localisés par le CEA aux extrémités nord et sud du groupement sismique représenté sur la figure 1 - se trouvent relocalisés au sud-est de la MCO. Cela pourrait traduire un biais de localisation dû à la répartition et aux distances des stations du réseau du CEA.

suivent. De même, en Allemagne, Hainzl *et al.* (2006) donnent une dizaine de jours de délai entre les pluies et les séismes pouvant atteindre 4 km de profondeur. Fin 2000, Courboux *et al.* (2007) constatent une séquence sismique dans l'arrière-pays niçois deux mois après un fort épisode pluvieux. Trois mécanismes probablement concomitants de déclenchement de ce type de sismicité sont cités : i) l'effet de chargement dû au remplissage de réservoirs ou d'un réseau karstique induisant une augmentation des contraintes élastiques dans la croûte (Miller, 2009) ; ii) l'augmentation de la pression de fluide des pores en réponse à l'augmentation des contraintes élastiques dans la croûte ; iii) les modifications de la pression de fluide des pores en raison de la migration de fluides dans la zone hypocentrale.

### 3.2. Cas spécifique de Salsigne

En milieu minier souterrain, il est connu que des événements microsismiques peuvent être générés par des ruptures de piliers. Souvent, cela est concomitant d'un ennoyage des quartiers concernés. Le séisme principal s'est produit 13 jours après l'épisode pluvieux du 2 novembre (95 mm de pluie en 24 h). Si l'on considère que le réseau créé par les vides miniers s'apparente à un réseau karstique, ce délai est tout à fait compatible avec les observations décrites ci-dessus au §3.1. La figure 4 présente l'évolution de la pluviométrie depuis 2006. D'une part, le niveau d'eau moyen dans la mine augmente progressivement en accord avec la pluviométrie cumulée annuelle qui augmente également depuis 2006. D'autre part, un certain décalage entre les épisodes pluvieux et la remontée saisonnière des niveaux est lié à l'infiltration et la migration dans les terrains. Sans être exceptionnelle, la pluviométrie mesurée en novembre 2011 est la 5<sup>ème</sup> plus forte depuis juillet 2005. Toutefois, deux éléments pourraient écarter ce type d'origine : d'une part, les foyers sont en dessous des travaux miniers, d'autre part, suite aux intempéries de mars 2011, la nappe est montée beaucoup plus haut qu'en novembre 2011 dans la mine sans que cela ne génère de microséisme par rupture de pilier ressenti en surface.

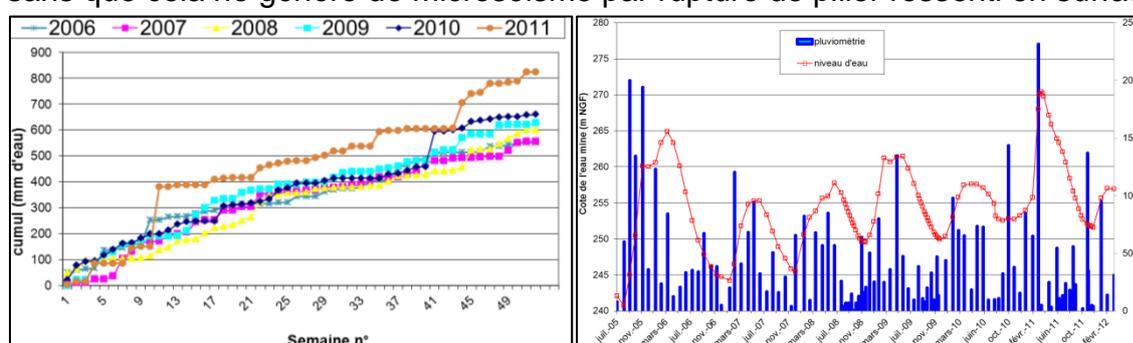


Figure 4 . Pluviométrie (2006-2011) (à gauche) et évolution du niveau de l'eau dans la mine souterraine et pluviométrie mensuelle depuis 2005 (à droite)

## 4. Conclusion

Les mouvements ressentis par la population de Salsigne et ses environs correspondent à des ruptures sur un ou plusieurs plans de faille (et non à des

effondrements souterrains). Une incertitude demeure quant à leur localisation au droit ou à 500 m à l'est des travaux miniers souterrains. Les profondeurs (incertitude de l'ordre de 200 m) des foyers se situent entre 500 m et 1,5 km, soit sous les ouvrages miniers. Les magnitudes enregistrées correspondent à des longueurs de ruptures de l'ordre de 10 à 200 m avec un déplacement de l'ordre du mm au cm. Le délai entre le fort épisode pluvieux du 2 novembre 2011 et l'événement du 15 novembre 2011 lui-même suivi d'une crise sismique permet de supposer que le déclenchement est lié au chargement et/ou à l'augmentation des pressions de fluide des pores à l'aplomb ou dans la zone hypocentrale. Ce chargement serait facilité par un réseau de galeries d'une centaine de kilomètres de longueur s'apparentant à un réseau karstique surmontant la zone de rupture. Une amélioration du modèle de vitesse à partir de tirs de carrière proche et l'élaboration du mécanisme au foyer des événements principaux devraient permettre d'affiner la localisation et de tenter d'identifier l'orientation et la géométrie des failles en jeu.

### **Remerciements**

Les auteurs remercient vivement les organismes en charge des réseaux sismologiques permanents pour leur gestion des stations et la mise à disposition des données : le CEA, l'OMP, l'IGC et l'IGN. Les stations accélérométriques pyrénéennes sont gérées par le BRGM et l'OMP, sous l'égide du RAP<sup>8</sup>.

### **Références bibliographiques**

BRGM, EDF, IRSN : SisFrance – [www.sisfrance.net](http://www.sisfrance.net).

Courboulex F., Larroque C., Deschamps A., Kohrs-Sansorny C., Gelis C., Got J. L., Charreau J., Stephan J. F. (2007). Seismic hazard on the French Riviera: observations, interpretations and simulations. *Geophys. J. Int.*, 170, 387-400, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03456.x.

Kraft T., Wassermann J., Schmedes E., Igel H. (2006). Meteorological triggering of earthquake swarms at Mt Hochstaufen, SE-Germany, *Tecton.*, 424, 245–258, doi:10.1016/j.tecto.2006.03.044.

Lee W.H.K., Lahr J.C. (1975). Hypo71 (revised): a computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion of local earthquakes. Open-file report, vol. 75–311, p. 114.

Miller S.A. (2008). Note on rain-triggered earthquakes and their dependence on karst geology. *Geophys. J. Int.*, 173, 334–338, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03735.x.

Nakamura Y. (1989). A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface, *Quarterly Rep. of Railway Techn. Res. Inst. (RTRI)*, 30, no.1.

Rigo A. (2010). Precursors & fluid flows in the case of the 1996, ML=5.2 Saint-Paul-de-Fenouillet earthquake (Pyrénées, France): A complete pre, co and post seismic scenario, *Tecton.*, 480, 109–118.

Rigo A., Bethous N., Masson F., Ritz J.-F. (2008). Seismicity rate and wave-velocity variations as consequences of rainfall: the case of the catastrophic storm of September 2002 in the Nîmes Fault region (Gard, France), *Geophys. J. Int.*, 173, 473–482, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03718.x.

---

<sup>8</sup> Réseau Accélérométrique Permanent français