

# MICROSISMICITE EN CONTEXTE MINIER - LE BASSIN HOULLER DE GARDANNE (FUVEAU, BOUCHES-DU-RHONE, PROVENCE)

## MICROSEISMICITY IN POST MINING CONTEXT - THE COAL BASIN OF GARDANNE (FUVEAU, BOUCHES-DU-RHONE, PROVENCE)

Pascal DOMINIQUE, Jean-Louis NEDELLEC

BRGM-DPSM, Département Prévention et Sécurité Minière, Orléans, France

BRGM-DPSM, Département Prévention et Sécurité Minière, Gardanne, France

**RÉSUMÉ** – En 2013, le BRGM/DPSM a déployé un réseau microsismique temporaire à l'Ouest de Fuveau, siège d'une forte activité microsismique ressentie fin 2012. Plus de 600 séismes détectés jusque 2015 intégrant une crise ressentie en fin 2014 montrent clairement l'évolution spatio-temporelle de la sismicité et l'activation d'une faille sous les travaux miniers, fonction des pics de pluie efficace et du battement de la nappe minière.

**ABSTRACT** – In 2013, BRGM / DPSM has deployed a temporary microseismic network west of Fuveau, seat of a strong microseismic activity experienced in late 2012. More than 600 earthquakes were detected until 2015 integrating a crisis felt in late 2014. It clearly shows the spatio-temporal evolution of the seismicity and the activation of a fault below the mining works, based on effective rainfall peaks and level of the mining groundwater.

### 1. Contexte

#### 1.1 Le bassin houiller de Provence

Le bassin houiller de Provence est situé à l'Est du département des Bouches du Rhône. Il s'étend sur un peu plus de 60 km<sup>2</sup> (Figure 1). L'exploitation industrielle du charbon s'est faite entre la première moitié du XIXe siècle et 2003. Elle a été initiée dans la partie Est du bassin minier, où les veines de charbon sont sub-affleurantes. Elle s'est ensuite déplacée de plus en plus profondément vers l'Ouest. A partir des années 60, environ 1,5 millions de tonnes de charbon étaient extraites annuellement par les houillères de Provence. Avec plus de 500 km de galeries et des niveaux exploités jusqu'à plus de 1350 m de profondeur, la mine de Gardanne constitue le premier domaine minier du Sud-Est de la France.

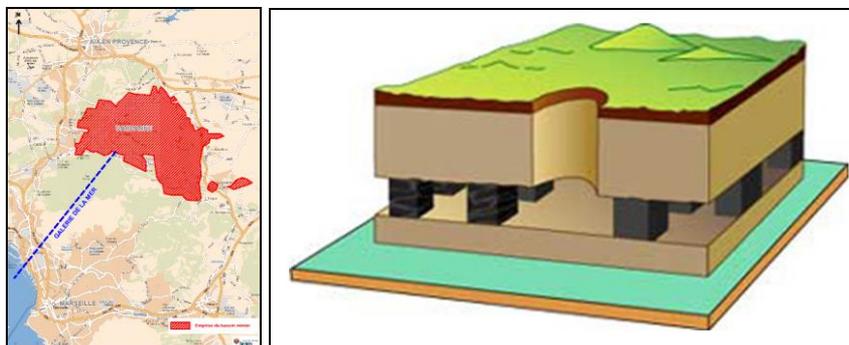


Figure 1 - localisation du bassin houiller de Provence (à gauche) et schéma représentant une mine exploitée par la méthode en chambres et piliers (DREAL Paca) (à droite)

## 1.2 Le secteur de Fuveau-Gréasque

Le secteur de Fuveau-Gréasque a été exploité depuis le XIXe siècle (Figure 2). L'essentiel des zones de travaux, situé entre 200 et 300 m de profondeur, a fait l'objet d'une exploitation par la méthode dite "en chambres et piliers". Cette technique consiste à creuser une série de galeries se recoupant perpendiculairement selon une maille assez régulière, tout en laissant des piliers de matériaux non prélevés assurant la tenue des vides miniers (Figure 1).

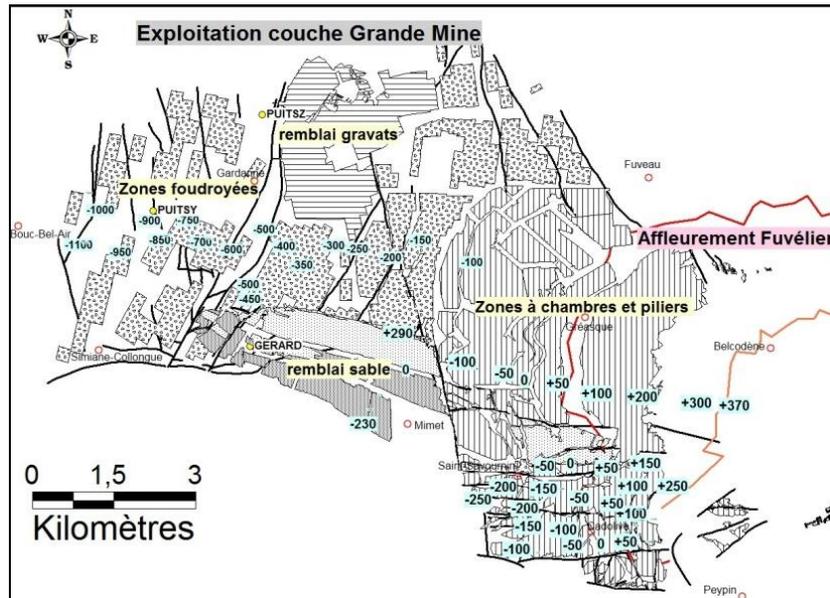


Figure 2 - Répartition des différents modes d'exploitation minière dans le bassin houiller de Provence (altitude des vides miniers en m NGF)

## 1.3 La nappe minière

Afin de pouvoir exploiter profondément le gisement houiller, les mineurs ont dû rapidement mettre en place à partir de 1830 environ tout un dispositif de pompage permettant de rabattre suffisamment la nappe pour dénoyer les chantiers d'exploitation du charbon et les ouvrages d'infrastructures permettant d'y accéder. Après l'arrêt définitif de l'exploitation en 2003, les pompes ont été stoppées et la nappe est rapidement remontée jusqu'en 2010 (remontée de plus de 1000 m en 7 ans), période à partir de laquelle de nouvelles pompes ont été réinstallées afin de stabiliser l'évolution du niveau des eaux de mine en renvoyant ces dernières jusqu'en Méditerranée via un tunnel de 15 km appelé "galerie de la mer" (Figure 1). Grâce à ce dispositif, la nappe minière est actuellement globalement stabilisée entre les cotes - 20 m NGF et + 10 m NGF, c'est-à-dire autour de 250 à 300 m de profondeur sous la commune de Fuveau.

## 2. Surveillance microsismique

### 2.1 Les raisons de surveiller

Les secteurs exploités "en chambres et piliers" peuvent parfois se révéler instables mécaniquement, notamment en présence d'eau ou de fluctuations de la nappe. Ainsi, des ruptures de piliers accompagnées d'effondrements plus ou moins importants du toit des travaux se manifestent le plus souvent par de petits séismes, parfois ressentis par la population. Dans certains cas, ces effondrements au niveau des travaux miniers génèrent

des mouvements de terrain jusqu'en surface pouvant être préjudiciables pour les constructions les plus fragiles. Afin de pouvoir identifier un éventuel risque de rupture avec des effets en surface (affaissements) le plus tôt possible (Figure 3), et ainsi protéger au mieux les populations, l'Etat a répertorié des zones à risque, c'est à dire les secteurs où les critères suivants se recoupent : densité de population significative, vides miniers relativement peu profonds (entre 50 et 250 m), zones exploitées en "chambres et piliers", vides miniers susceptibles d'être noyés par la nappe.

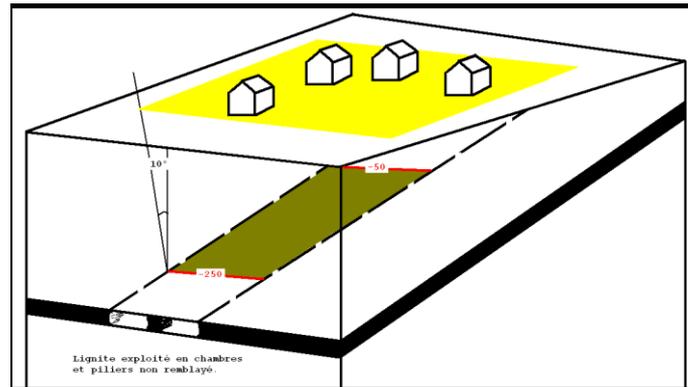


Figure 3 - schéma d'une zone à risque - en profondeur : vides miniers vulnérables - en surface : enjeux exposés aux affaissements miniers (GEODERIS)

## 2.2 Réseau de surveillance permanent

Pour cette raison, depuis 2008, le BRGM-DPSM a confié à l'INERIS, à la demande de l'Etat, la gestion opérationnelle d'un réseau permanent de 5 antennes microsismiques sur les communes de Gardanne, Fuveau, Saint-Savournin, Cadolive et Peypin. Elles sont constituées de plusieurs capteurs de vibration positionnés en profondeur dans des sondages dédiés. Ce réseau surveille l'activité microsismique dans les zones à risque se trouvant dans un rayon de 400 m autour des antennes (Figure 4).

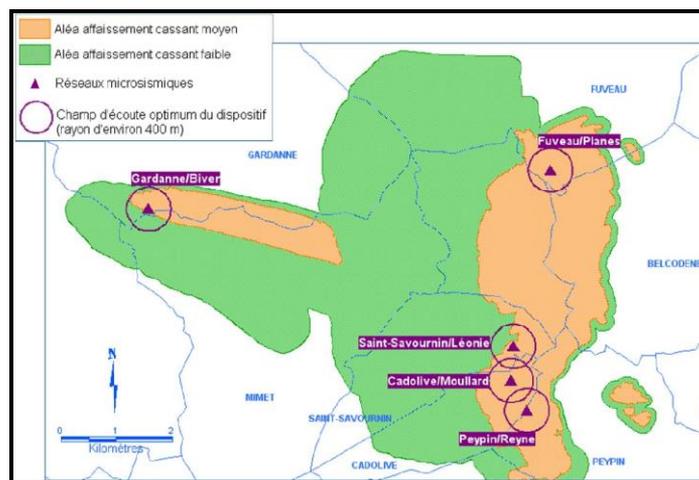


Figure 4 – dispositif de surveillance microsismique (GEODERIS)

## 2.3 Séisme du 1er novembre 2012

L'événement sismique du 1er novembre 2012 a été largement ressenti par la population de la commune de Fuveau (Ouest) et de Gréasque (Nord). Cet événement de magnitude modérée ( $M = 2,9$  ; INERIS) a été significativement perçu par les populations du fait de sa

faible profondeur. Toutefois, bien que l'évènement de 2012 ait été parfaitement enregistré par le réseau permanent, celui-ci est situé en dehors de la zone à risque directement surveillée dans un rayon de 400 m autour de la station, localisée à 2-3 km plus au Sud-Est. En raison de l'exploitation des stations permanentes de l'OCA (Observatoire de la Côte d'Azur) à une quinzaine de kilomètres plus au nord en plus de celles de l'INERIS, la localisation de l'évènement principal de 2h58 faite par le BRGM est la plus fiable et la plus cohérente avec la perception des populations. De la même façon, les évènements les plus forts survenus entre le 1<sup>er</sup> et le 3 novembre 2012 ont été repris. On constate d'une part, un regroupement des localisations par rapport à celles fournies initialement par le réseau permanent et, d'autre part, une meilleure cohérence avec la zone de perception au nord-est de la zone (Figure 5).

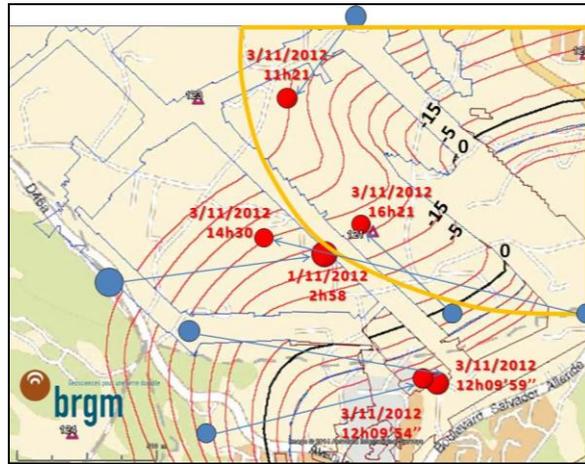


Figure 5 - Relocalisation des principaux évènements - 1er au 3 novembre 2012 (en foncé, localisation BRGM (données INERIS et OCA) ; en clair, localisation INERIS). L'arc de cercle au NE correspond à la zone de perception. Les chiffres inclinés indiquent la cote NGF (en m) des travaux miniers.

## 2.4 Réseau de surveillance complémentaire

Dès 2013, par le biais du BRGM-DPSM, gestionnaire de la surveillance du bassin minier, l'Etat a déployé en surface quatre stations sismiques temporaires, ceinturant la zone de Fuveau-ouest affectée par le séisme de 2012 (Figure 5 et Figure 6). La vocation de ce dispositif n'est pas de livrer un diagnostic rapidement après un évènement, contrairement aux capteurs permanents en forage. L'objectif est d'étudier l'activité microsismique du secteur de Fuveau Ouest, en regard des vides miniers en profondeur et d'aider à mieux diagnostiquer les évènements enregistrés par le réseau permanent en forages lorsque ceux-ci sont situés hors de la zone de surveillance.

## 3. La crise sismique de décembre 2014

### 3.1 Aspects macrosismiques

Le 1<sup>er</sup> décembre 2014, plusieurs témoignages d'habitants de Fuveau Ouest font état de "très fortes secousses". Le report des observations parvenues au BRGM/DPSM (punaises sur la Figure 6) laisse supposer une activité sismique proche d'une zone délimitée par les quartiers Espinades - Jas de Bassas - Prés Neufs - Quatre Termes - Gouste Soulet. Ces éléments macrosismiques ne donnent pas une précision fine de l'extension spatiale (épocentre et profondeur) des évènements ni de leur origine ou encore

moins du mécanisme mis en jeu. Cependant, on observe que les secousses ressenties se trouvent dans une zone de faible extension d'environ 600 m de diamètre en n'intégrant pas les zones plus peuplées que sont les centres urbains de Fuveau et Gréasque où la probabilité de perception était plus importante en cas de secousse. Ces constatations amènent à envisager, comme cela était déjà le cas pour la crise de novembre 2012, une activité "en essaim" qui dure quelques jours, une faible profondeur des événements limitée à quelques centaines de mètres et une localisation déjà assez précise circonscrite aux quartiers précités, sans toutefois connaître son extension et sa géométrie avec précision. Il convient cependant de pondérer ces informations en raison de la possibilité d'effets de sites lithologiques ou topographiques locaux qui pourraient modifier localement la nature des ondes sismiques et ainsi le niveau de perception par la population.

### 3.2. Aspects instrumentaux

#### 3.2.1. Détection et localisation épacentrale

Sur le mois de décembre 2014 et ce secteur de Fuveau ouest, près de 295 événements ont été détectés par le réseau temporaire BRGM (Figure 6), soit plus que toute la sismicité enregistrée depuis le début de l'implantation du réseau temporaire en 2013. Les 4 premiers jours de décembre ont été particulièrement actifs avec près de 205 événements détectés (70 % de l'activité du mois). À titre de comparaison, le réseau permanent, plus excentré, dénombre 25 % du total détecté par le réseau temporaire sur décembre. La Figure 6 montre la concentration des épacentres sur un secteur très délimité comme le laissait présager la macrosismicité avec une extension elliptique dont le grand axe de direction NO-SE est d'environ 500 m et le petit axe d'environ 250 m. Ce secteur avait déjà été mis en évidence par une activité plus soutenue sur la période instrumentée de juin 2013 à mars 2014 (Dominique, 2014). De plus, une relocalisation des événements principaux de la crise de novembre 2012 à partir de nouvelles données converge sur ce même secteur (Figure 5). Enfin, on peut mentionner les petites crises ressenties toujours sur ce secteur et détectées instrumentalement juin-juillet 2010, en octobre 2010 et en novembre 2010. Cette direction NO-SE pourrait être rapprochée de celle des travaux miniers sur ce secteur lesquels tenaient compte en général des caractéristiques géologiques locales : pendage des couches, failles (Figure 6).

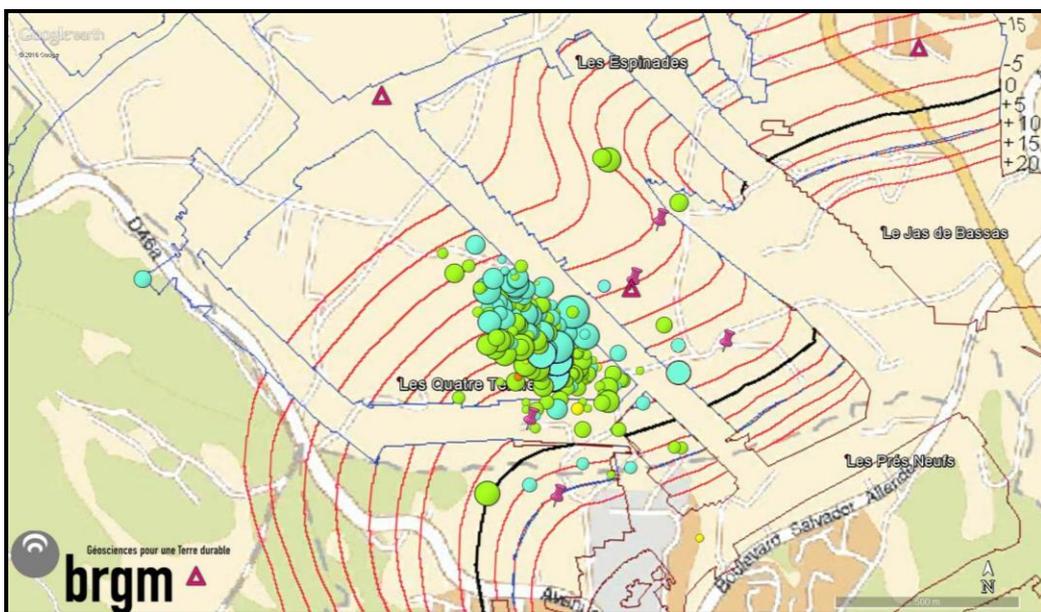


Figure 6 - Événements microsismiques sur fond de travaux miniers du 01/12/2014 au 31/12/2014. Diamètre des cercles proportionnel à la magnitude (de -1,3 à 1,4)

### 3.2.2. Profondeur

Sur l'ensemble de la crise enregistrée en décembre, la profondeur moyenne est de  $560 \pm 130$  m. On peut considérer l'incertitude sur la profondeur à environ  $\pm 100$  m. La Figure 7 présente la répartition des profondeurs sur le secteur. Les profondeurs des événements sismiques sont en-dessous des travaux miniers, lesquels se trouvent aux alentours de 300 m de profondeur. L'épaisseur de la zone active est de l'ordre de 250 m. Cette épaisseur reste peu compatible - même en considérant les incertitudes sur la détermination de la profondeur - avec des ruptures dans les travaux miniers dont l'ouverture maximale est de l'ordre de 3 m. Le pendage observé ( $60^\circ$  vers le NE) du nuage de sismicité (Figure 7) est également très supérieur à ceux de la géologie locale connue (de  $0^\circ$  à  $10^\circ$  maximum pour toutes les interfaces, principalement vers le NO) ou de la couche Grande Mine exploitée sur le secteur ( $3^\circ$  à  $6^\circ$  vers l'O-NO). Ces observations conduisent à supposer la présence d'une zone active (faille ou système de failles).

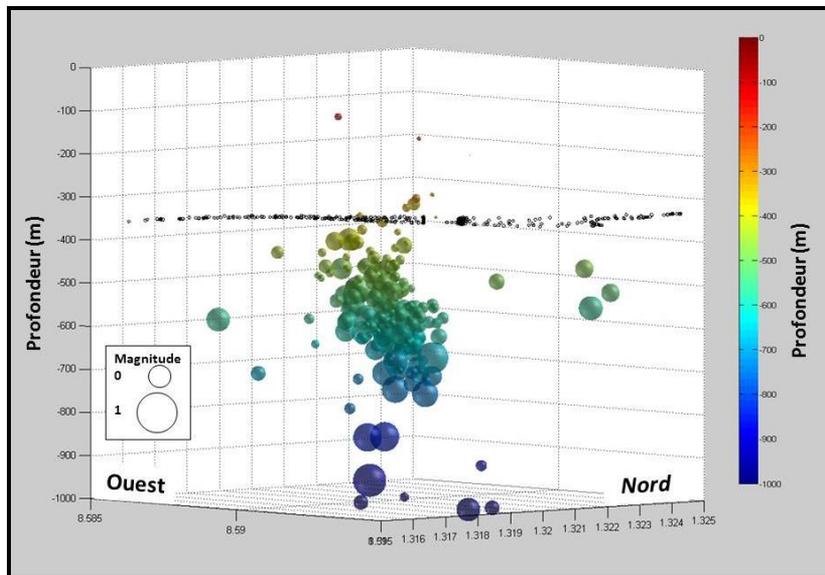


Figure 7 - Vue 3D SO-NE vers le Nord-Ouest. (pendage  $60^\circ$  vers le Nord-Est). Travaux miniers de la couche Grande Mine (Points noirs). Décembre 2014.

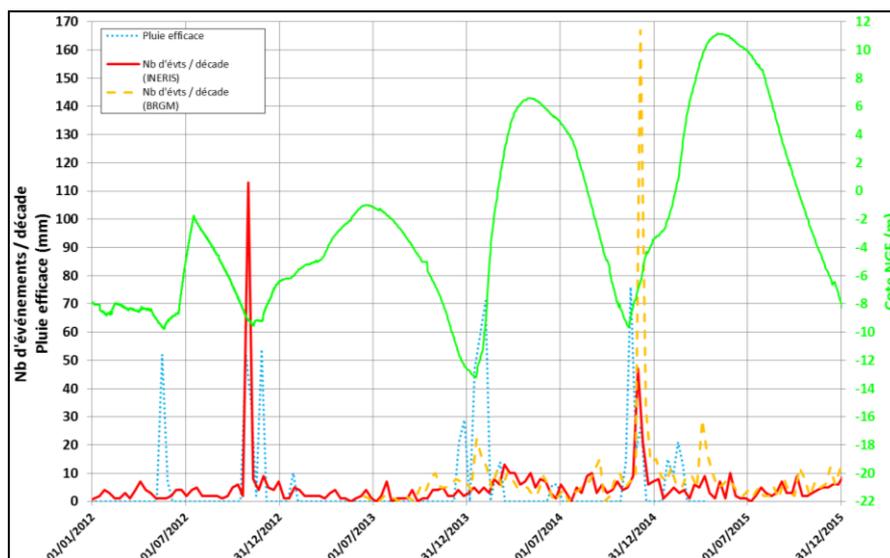


Figure 8 - niveau d'eau (clair), pluie efficace (pointillé) et nombre cumulé d'événements sismiques (tireté BRGM et continu INERIS). Données : BRGM/DPSM (sismicité et cote de la nappe), INERIS (sismicité), MÉTÉO FRANCE (pluie efficace) 2012-2015

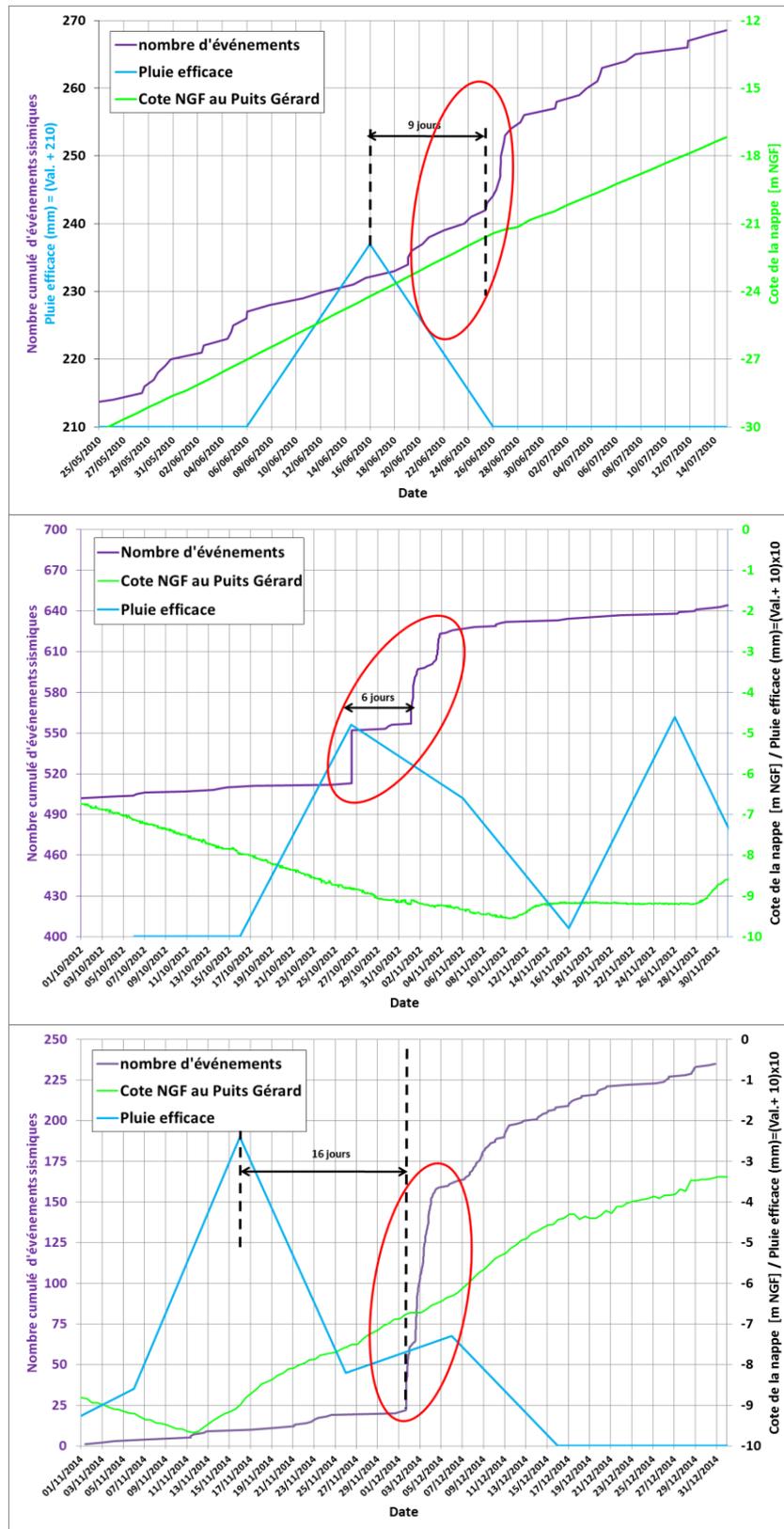


Figure 9 - niveau d'eau (courbe claire), pluie efficace (courbe segmentée) et nombre cumulé d'événements sismiques (courbe croissante). Données : BRGM/DPSM (sismicité en bas et cote de la nappe), INERIS (sismicité en haut et au milieu), MÉTÉO FRANCE (pluie efficace) 25/05/2010–14/07/2010 (haut) ; 1er/10/2012–30/11/2012 (milieu) ; 1er/11/2014-31/12/2014 (bas).

#### 4. Mécanisme de déclenchement de l'activité sismique et conclusions

Les 2 crises de novembre 2012 et décembre 2014, de courte activité, se sont produites sur le même secteur. La situation hydrologique du bassin minier de Gardanne sur ces 2 périodes, ainsi que sur des crises détectées en 2010 a donc été comparée (Figure 8). Les épisodes pluvieux de novembre 2012 et décembre 2014 font partie des plus forts depuis 5 ans, en dehors de ceux de novembre 2011 et de mi-janvier à début février 2014. La Figure 9 présente pour ces 2 crises, sur 2 mois, la hauteur de la nappe minière 6 km plus à l'ouest (puits Gérard), la sismicité (nombre d'événements cumulé) et la pluie efficace<sup>1</sup>. L'activité est précédée d'une dizaine de jours par un pic de pluie efficace ( $9 \pm 5$  jours en 2010,  $6 \pm 5$  jours en 2012,  $16 \pm 5$  jours en 2014) à la suite d'une période de baisse du niveau de la nappe pour 2012 et 2014 (3 à 8 mois). En juin 2010, la station permanente de Fuveau n'avait pas enregistré d'événement sur ce secteur depuis son installation le 1er novembre 2007, en dehors des événements isolés des 12 février 2010 et de ceux de mai 2010 et aucun événement n'avait été ressenti depuis l'arrêt de l'exploitation en 2003 (Beaufils, 2011). Par ailleurs, on assisterait à deux types de sismicité : l'un, plutôt diffus, à l'échelle kilométrique ou pluri kilométrique avec une migration sur plusieurs mois qui suivrait le déplacement de la nappe minière. Cette sismicité souvent non ressentie reste de faible magnitude et peut être considérée comme un bruit de fond sismique déclenché par la migration de la nappe (Dominique, 2014) ; l'autre, plus concentré en essaim, avec une migration possible sur quelques heures qui pourrait être relié à la propagation de rupture d'une faille à l'échelle de 100 à 200 m. Les chocs principaux de ces crises sont bien ressentis par la population. Le déclencheur de ce type de sismicité probablement rattaché à l'activité d'une faille serait un pic de pluie efficace, inversant la courbe d'évolution de la nappe et précédant d'une dizaine de jours le démarrage de crises (Dominique, 2015). Si les pics de pluie efficace n'ont pas tous déclenché une crise sismique, les crises sont systématiquement précédées de pics de pluie efficace.

#### 5. Conclusions

Le réseau temporaire déployé sur un secteur minier a permis de préciser la nature, la géométrie et la répartition spatiale et temporelle des crises qui s'y sont produites, ainsi que les mécanismes déclencheurs possibles. Il a permis de potentiellement relier l'activité sismique du secteur à des discontinuités naturelles. Par ailleurs, le dispositif paraît offrir des possibilités de développement qui pourraient permettre d'apporter un appui en terme de communication auprès des riverains, notamment lors ou juste après les épisodes les plus pluvieux.

#### 6. Références bibliographiques

- Beaufils B. (2011) - Bilan annuel 2010 de surveillance des zones sus-jacentes à des édifices miniers à risque d'affaissement à caractère cassant - Bassin houiller de Provence. *Note DRS-11-120558-03174A*.
- Dominique P. (2014) - Analyse préliminaire de la crise sismique de Fuveau (Bouches-du-Rhône). *Rapport BRGM/RP-63592-FR, 60 p.*
- Dominique P. (2015) – Bassin houiller de Provence (13). La crise sismique de Fuveau de décembre 2014. *Rapport BRGM/RP-65050-FR, 64 p.*

---

<sup>1</sup> La pluie efficace correspond au surplus d'eau qui peut s'écouler quand le sol est complètement saturé, soit pour un ruissellement jusqu'aux cours d'eau, soit pour un retour à la nappe phréatique. Cette pluie ou écoulement est dite "efficace" car elle seule contribue au réapprovisionnement des nappes. Elle dépend régionalement du type de sol. Les données sont enregistrées à Aix-en-Provence. Les relevés de pluie efficace sont décennaires. Pour la crise de novembre 2012, l'activité a réellement démarré au 1er novembre 2012 sur Fuveau Ouest. Les événements survenus 6 jours avant ont eu lieu plus au Sud, vers Cadolive et ne sont donc pas reliés à la crise.