

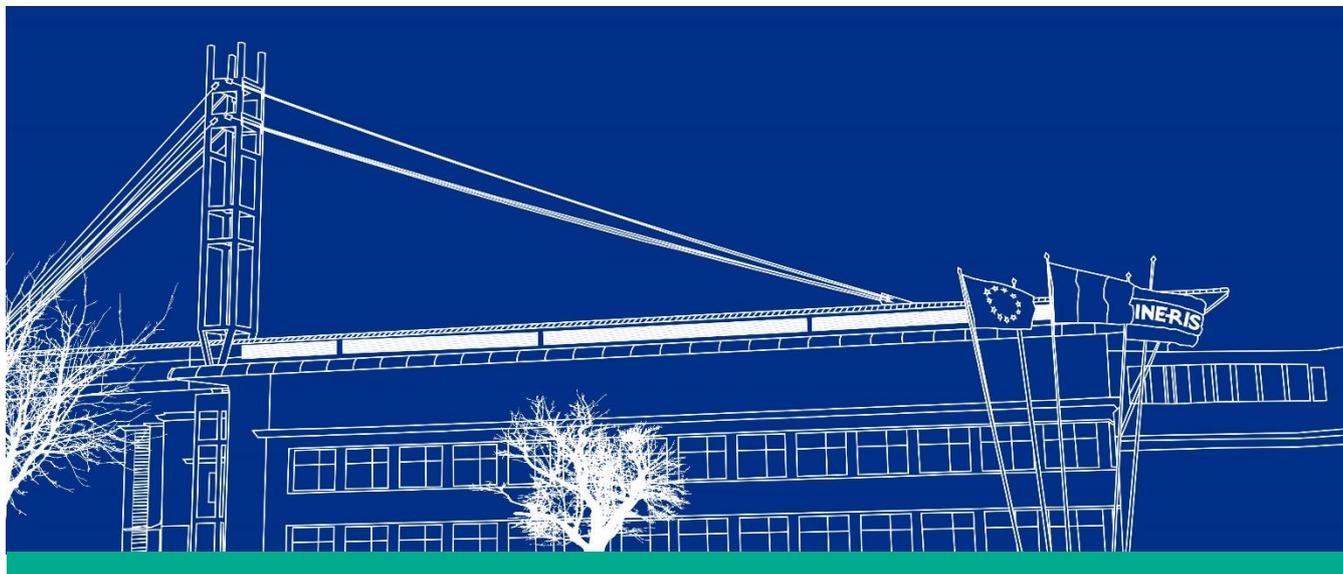


RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 213186 - 2789371 - v1.0

18/10/2024

**Synthèse des travaux réalisés sur la période
2020 – 2023 pour la compréhension et la
gestion de la sismicité enregistrée sur le site
de la mine abandonnée de Gardanne**

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : CONTRUCCI Isabelle et DRIF Kamel

Vérification : GOUZY AURELIEN; KLEIN EMMANUELLE; KINSCHER JANNES L

Approbation : BAROUDI HAFID - le 18/10/2024

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Table des matières

1	Introduction	6
2	Le site de Gardanne	8
2.1	Contexte minier et aléa mouvement de terrain	8
2.2	Système de surveillance appliqué à la prévention des mouvements de terrain	10
2.3	Instrumentation supplémentaire pour étudier la sismicité de l'essaim de Fuveau	12
3	Le rôle de l'eau dans les mécanismes à l'origine des séismes.....	13
4	Analyse des données sismiques en zone et hors zone de surveillance	14
4.1	Activité microsismique vue depuis le réseau de surveillance permanent	14
4.1.1	Activité microsismique dans les zones de surveillance 1, 2 et 3.....	14
4.1.2	Analyse en multiplets des événements microsismiques des zones 1 et 3	15
4.1.3	Activité microsismique hors zones de surveillance	21
4.2	Analyse de l'essaim de Fuveau à partir des stations sismologiques de recherche	23
4.2.1	Compilation du catalogue : détection, localisation et estimation de la magnitude	23
4.2.2	Analyse en multiplets.....	24
4.2.3	Mécanismes à la source	25
4.2.4	Les mouvements verticaux	26
4.3	Synthèse des résultats et suites envisagées	28
5	Implémentation des cartes de mouvements du sol et d'intensité sur e.cenaris	29
5.1	Principe général.....	29
5.2	Gestion des données à l'aide de la plateforme de surveillance web e.cenaris	29
5.3	Carte de mouvements du sol.....	29
5.4	Carte d'intensité macrosismique	30
5.5	Synthèse des travaux réalisés et suites envisagées.....	32
6	Campagne de mesure sur le terrain avec les nodes sismiques.....	33
6.1	Présentation des nodes sismiques.....	33
6.2	Déploiement sur le site Provence.....	33
6.2.1	Objectifs de l'expérimentation	33
6.2.2	Carte du réseau de nodes sismiques.....	33
6.2.3	Capacités de détection et de localisation du réseau de nodes sismiques couplé au réseau permanent de surveillance	34
6.3	Synthèse des résultats et suites envisagées	36
7	Conclusions	37
8	Références	38
	Annexes.....	40
	Annexe 1 : méthode d'analyse en multiplets des données sismiques du réseau permanent	41
	Annexe 2 : méthode d'analyse en multiplets des données sismiques du réseau de recherche.....	44
	Annexe 3 : méthode d'inversion du tenseur des moments pour le calcul des mécanismes au foyer à partir des données sismiques du réseau de recherche	45
	Annexe 4 : Equation de prédiction du mouvement du sol (GMPE) pour le site de Gardanne et échelle d'intensité.....	47
	Annexe 5 : Phase de test des nodes sismiques	49
	Annexe 6 : catalogue des multiplets.....	52

Résumé

L'ancien bassin houiller de Provence, fermé depuis 2003, fait depuis 2008, l'objet d'une surveillance microsismique. L'objectif est de détecter les signes précurseurs à un affaissement à caractère cassant qui serait provoqué l'effondrement des anciens travaux miniers.

Depuis le démarrage de la surveillance, aucun affaissement n'a affecté les zones à risque et près de 3 900 événements d'une magnitude locale comprise entre $-3 < M_L < 3$ ont été enregistrés. Un secteur en particulier, dit de l'essaim de Fuveau, situé hors des zones de surveillance et donc hors des zones d'aléa mouvement de terrain, attire l'attention depuis 2012 car il a fait l'objet de plusieurs épisodes sismiques ressentis en 2010, 2012, 2014, fin 2016 - début 2017, août 2017 et très récemment en mai 2024. Depuis 2017, il est acquis que l'essaim de Fuveau ne peut pas être expliqué par des phénomènes d'instabilité dans les anciens travaux miniers. L'hypothèse la plus probable est celle de la remobilisation de failles hydrauliquement connectées aux travaux miniers, avec une activité sismique qui est étroitement liée aux variations du niveau d'eau souterrain, elles-mêmes influencées par le pompage et les pluies efficaces.

Les travaux de recherche présentés dans la première partie ce rapport confirment et enrichissent les connaissances synthétisées en 2021 par Kinscher et al., tout en apportant de nouvelles perspectives. En effet, l'analyse en multiplets des données enregistrées par les stations du réseau de surveillance montre qu'une partie de la sismicité dans les zones de surveillance est également due à la réactivation de failles tectoniques. Cette conclusion est fondée sur la concordance entre la localisation des multiplets et l'orientation des failles principales cartographiées dans les zones étudiées, ainsi que sur le fait que les événements les plus forts appartiennent à ces multiplets. Concernant le secteur de l'essaim de Fuveau, l'analyse des mécanismes aux foyers montre des ruptures en faille normale et des mécanismes de compaction des terrains. Ces résultats sont confirmés par une subsidence de 50 mm observée par satellite entre 2015 et 2020. Ainsi l'ensemble des résultats confirment que la fermeture et l'ennoyage des mines peuvent conduire à la remobilisation de failles géologiques, et peuvent donc se traduire par l'occurrence répétée dans le temps d'événements sismiques ressentis en surface.

Ces éléments nous conduisent donc à recommander la révision de la liste des aléas post-miniers, qui dans l'état actuel, n'intègre pas l'aléa sismique post-minier dont il est question ici, et d'accompagner cette décision de la révision du guide d'Évaluations des aléas post-miniers (Franck et al., 2018) édité en 2018 par l'Ineris. Cela implique donc également une redéfinition du réseau de surveillance microsismique en place et de ses objectifs.

La seconde partie du rapport aborde le sujet de l'impact des vibrations sismiques en surface. Plus précisément elle décrit les travaux réalisés pour éditer, à partir du portail web e.cenaris (<https://cenaris.ineris.fr>), des cartes de mouvement du sol et d'intensité en cas d'événements dits forts. Ces travaux s'appuient sur une équation de prédiction des mouvements du sol (GMPE – Ground Motion Equation Prediction) spécifique au site Provence, et plus particulièrement le secteur de l'essaim de Fuveau. Son application à l'échelle du bassin et pour des événements de petites magnitudes doit encore faire l'objet de travaux complémentaires. C'est pour partie dans cet objectif, que 22 nodes sismiques ont été déployés pendant trois mois à l'automne 2023 à Gardanne. Au travers de simulations numériques, nous montrons l'apport de ces nodes sismiques pour réduire les erreurs de localisation, ajuster la GMPE et améliorer notre compréhension des sources sismiques. Les données acquises sont en cours d'analyse.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la mission d'appui aux pouvoirs publics de l'Ineris sur le sujet de la gestion des risques et des conséquences à long terme liés aux exploitations minières abandonnées ainsi que dans le cadre du projet européen RFCS PostMinQuake.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Synthèse des travaux réalisés sur la période 2020 – 2023 pour la compréhension et la gestion de la sismicité enregistrée sur le site de la mine abandonnée de Gardanne, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 213186 – 2789371 - v1.0, 18/10/2024.

Mots-clés :

Après-Mine, sismicité, surveillance, nodes sismiques, PGV, Intensité

Abstract

Since 2008, a microseismic monitoring system has been implemented in the former coal basin of Provence, closed since 2003, to detect precursor signs in risk areas of brittle subsidence that could lead to the collapse of old mining operations. Since the start of the microseismic monitoring, no subsidence has affected areas at risk, and nearly 3,900 events with a local magnitude between $-3 < ML < 3$ have been recorded. One particular area, known as the Fuveau swarm, located outside the monitored zones and therefore outside the ground movement risk zones, has been attracting attention since 2012 due to several seismic episodes felt in 2010, 2012, 2014, late 2016 - early 2017, August 2017, and very recently in May 2024.

Since 2017, it has become clear that the Fuveau swarm cannot be explained by instability phenomena in the old mine workings. The most likely hypothesis is the remobilization of geological faults hydraulically connected to the mining workings, with seismic activity closely linked to variations in underground water levels, which are in turn influenced by pumping and effective rainfall.

The research presented in the first part of this report confirms and enriches the knowledge synthesized in 2021 by Kinscher et al., while also providing new insights. Specifically, the multiplet analysis of data recorded by the monitoring network stations shows that part of the seismicity in the monitored zones is also due to the reactivation of tectonic faults. This conclusion is based on the alignment between the location of multiplets and the orientation of the main faults mapped in the studied areas, and on the fact that the strongest events belong to these multiplets. Regarding the Fuveau swarm area, the analysis of focal mechanisms indicates normal faulting and compaction mechanisms of the terrains. These results are confirmed by a subsidence of 50 mm observed by satellites between 2015 and 2020. All these results confirm that mine closure and flooding can lead to the remobilization of geological faults and can therefore result in the repeated occurrence over time of seismic events felt at the surface.

These elements therefore lead us to recommend revising the list of post-mining hazards, which in its current state does not include the post-mining seismic hazard discussed here, and to accompany this decision with the revision of the guide d'Évaluations des aléas post-miniers (Franck et al., 2018) published in 2018 by Ineris. This also implies a redefinition of the existing microseismic monitoring network and its objectives.

The second part of the report deals with the impact of seismic vibrations at the surface. More specifically, it describes the work carried out to produce ground motion and intensity maps for "strong" events, using the e.cenaris web portal (<https://cenaris.ineris.fr>). This work is based on a ground motion prediction equation (GMPE) specific to the Provence site, and more specifically the Fuveau swarm sector. Further work is still required to apply it on a basin-wide scale and for small magnitude events. With this in mind, 22 seismic nodes were deployed for three months in the fall of 2023 at Gardanne. Through numerical simulations, we are demonstrating the contribution of these seismic nodes to reducing localization errors, adjusting the GMPE and improving our understanding of seismic sources. The acquired data are currently being analyzed.

The work presented in this report was carried out as part of Ineris' mission to support public authorities in managing the risks and long-term consequences of abandoned mining operations, and as part of the European RFCS PostMinQuake project.

To cite this document, use the link below:

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Synthèse des travaux réalisés sur la période 2020 – 2023 pour la compréhension et la gestion de la sismicité enregistrée sur le site de la mine abandonnée de Gardanne, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 213186 – 2789371 - v1.0, 18/10/2024.

Keywords:

Post-mining, seismicity, monitoring, seismic nodes, PGV, Intensity

1 Introduction

En France, dans l'ancien bassin houiller de Provence, fermé et ennoyé depuis 2003, une sismicité persiste depuis le début de la surveillance microsismique en 2008 (Figure 1). Cette surveillance a été déployée initialement pour détecter les signes précurseurs à un mouvement de terrain consécutif à un effondrement des anciens travaux miniers. On compte aujourd'hui plus de 3 900 événements sismiques, dans et en dehors des zones surveillées notamment au centre du bassin, au niveau du front d'ennoyage. À 2 km à l'ouest de Fuveau (essaim de Fuveau, Figure 1), une zone particulière connaît des épisodes récurrents d'activité microsismique, caractérisés par des séquences d'événements sismiques atteignant une magnitude locale proche de 2, voire jusqu'à 3 pour le plus fort. Les événements les plus importants sont ressentis par la population locale, car ils se situent à faible profondeur.

Dès 2013, des interrogations ont émergé quant à l'origine de cette sismicité significative, de nature répétitive, qui ne peut être pleinement expliquée par les seuls travaux miniers. L'étude réalisée en 2021 (Kinscher et al., 2021) suggère que la sismicité dans l'essaim de Fuveau trouve son origine dans la remobilisation de failles situées sous les travaux miniers, hydrauliquement connectées à ces derniers. Cependant, après la dernière crise sismique de 2017, une diminution significative de l'activité sismique en nombre et en magnitude d'événements a été observée dans ce secteur. Cette diminution de l'activité sismique a alors été reliée à une augmentation de la capacité de pompage entraînant une baisse du niveau d'eau souterrain dans le secteur de l'essaim de Fuveau. Ainsi, la diminution du taux de sismicité pourrait être expliquée par une réduction du chargement hydraulique et de la pression hydrostatique générale dans la zone, stabilisant un certain nombre de failles (Kinscher et al., 2021).

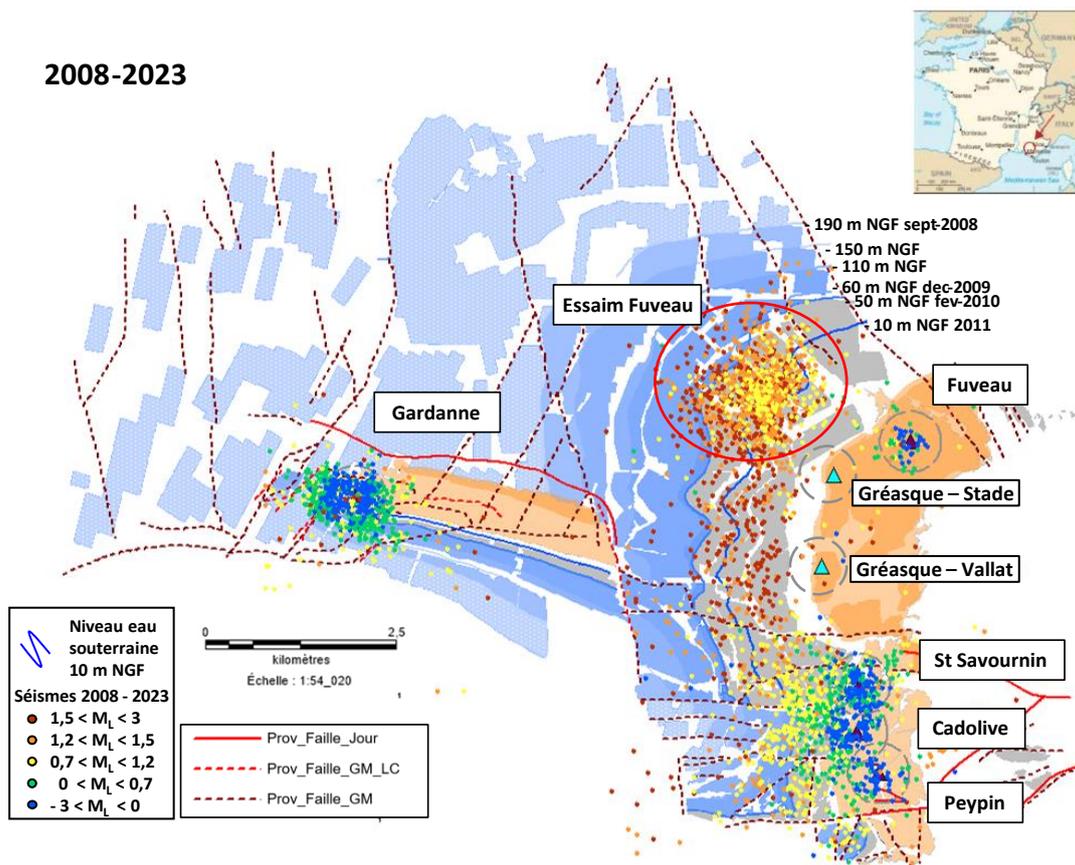


Figure 1 : vue générale de la sismicité enregistrée dans l'ancien bassin houiller de Gardanne entre 2008 et 2023.

Les travaux présentés dans ce rapport complètent l'étude réalisée en 2021, et se structurent en trois parties.

La première est consacrée aux rappels indispensables sur le contexte du site et de la mise en place de la surveillance microsismique, le dispositif de surveillance en opération depuis 2008 ainsi que

l'instrumentation complémentaire déployée pour approfondir la compréhension de la sismicité post-minièrè observée.

La seconde partie présente une analyse de l'activité enregistrée par le réseau permanent depuis 2008 ainsi qu'une analyse plus détaillée de la sismicité au niveau de l'essai de Fuveau où une instrumentation renforcée a été mise en place. Des outils novateurs ont été utilisés pour préciser l'évolution spatio-temporelle de la sismicité et les mécanismes des failles remobilisées. Ces outils, complémentaires à ceux utilisés en 2021, visent à mieux caractériser l'aléa sismique post-minier. La section se conclut par une synthèse exposant les mécanismes potentiels expliquant l'origine de la sismicité observée dans l'ancien bassin houiller de Gardanne.

La troisième partie est consacrée à la gestion du risque de sismicité post-minièrè et présente un développement réalisé sur la plateforme de web-monitoring e.cenaris de l'Ineris, dédiée à la gestion des risques géotechniques et géologiques. Ce développement consiste en la mise en place de cartes de mouvement du sol et d'intensité sismique en temps réel en cas de séismes de magnitude locale supérieure ou égale à 1,8. Ces cartes sont basées sur l'équation de prévision des mouvements du sol (GMPE – Ground Motion Prevision Equation) développée dans le cadre du projet européen RFCS PostMinQuake, basée sur les mouvements du sol enregistrés (Gehl et al., 2024). Ces cartes, couplées aux données de suivi en temps réel (sismique et piézomètre) sont accessibles à tous les acteurs impliqués dans la surveillance de l'ancien bassin houiller de Gardanne. En parallèle, 22 nodes sismiques, acquis par l'Ineris, ont été déployés sur le site de Gardanne pendant 3 mois, du 25 juillet au 25 octobre 2023. L'objectif de cette expérimentation est d'améliorer nos connaissances sur la sismicité induite post-minièrè et ainsi améliorer la GMPE existante.

Ces travaux ont été menés dans le cadre du projet européen RFCS PostMinQuake (20-2023) avec la collaboration du GFZ (Deutsches GeoForschungsZentrum) et du BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minièrè) et dans le cadre de la mission d'appui aux pouvoirs publics sur le sujet de la gestion des risques et des conséquences à long terme liés aux industries extractives et aux exploitations minières abandonnées.

2 Le site de Gardanne

2.1 Contexte minier et aléa mouvement de terrain

La région Provence abrite l'un des bassins houillers exploités les plus importants en France, connu sous le nom de Bassin de Gardanne. Proche de la ville de Marseille, le bassin s'étend sur 70 km d'est en ouest, de Saint-Maximin à l'étang de Berre, et sur 15 km du nord au sud entre Aix-en-Provence et Marignane. La mine de charbon a été exploitée entre le XVe siècle et le début des années 2000, à des profondeurs atteignant 1 400 mètres.

Comme tous les bassins ayant une longue histoire minière, les méthodes d'exploitation minière ont varié au fil du temps (Figure 2). Le bassin provençal apparaît comme l'un des plus riches en diversité de méthodes d'exploitation utilisées comme les méthodes d'extraction par chambres et piliers ou par longues tailles. Depuis le XVe siècle et jusqu'à la fermeture de la mine, la production a été estimée à environ 150 millions de tonnes au total. Durant son exploitation, la mine de Provence a été affectée par une activité microsismique importante, ainsi que par plusieurs coups de terrains et ruptures accompagnés d'événements sismiques, dont certains ont été ressentis localement par les populations riveraines (Senfaute, 1995 ; Hupé, 1999). L'événement majeur dans la région, enregistré le 19 février 1984, d'une magnitude de 4,5, a provoqué de légers dégâts et a été largement ressenti (Haessler et al., 1985) ; il aurait été provoqué par l'exploitation de la mine.

Cette activité sismique a été enregistrée par un réseau microsismique entre 1994 et 2002.

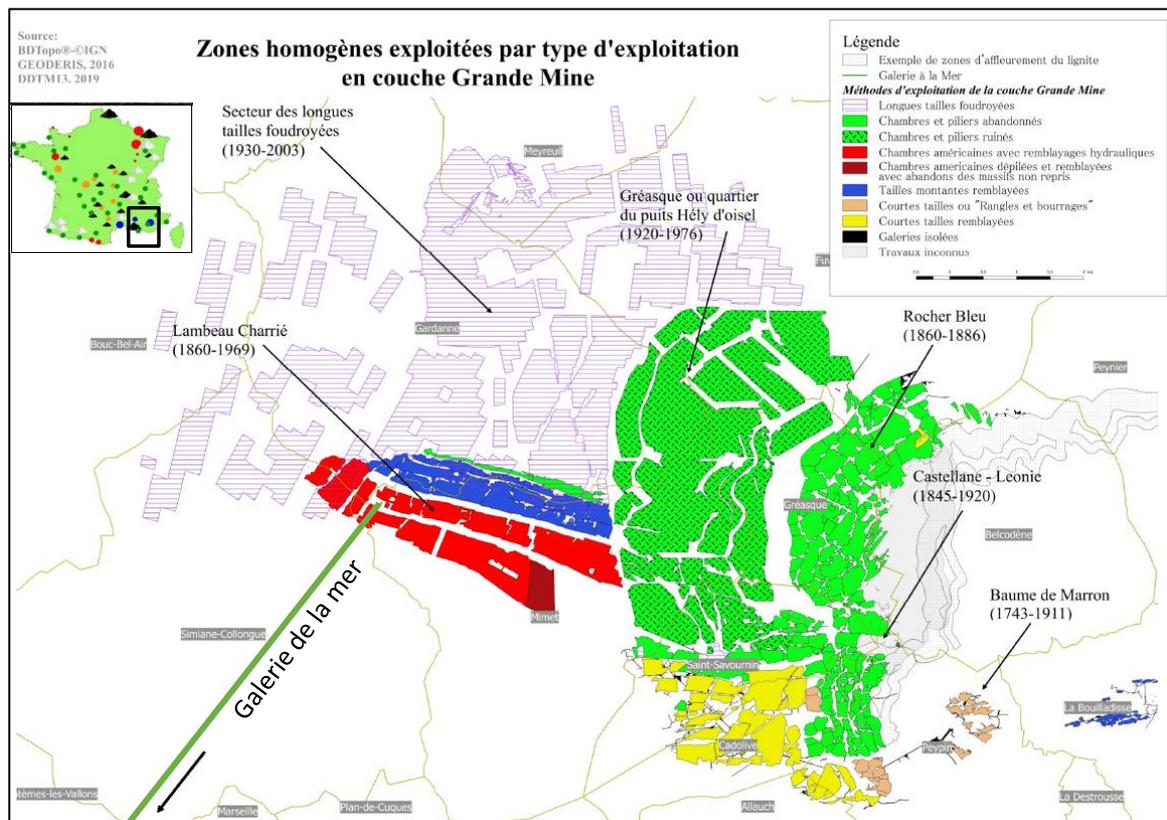


Figure 2 : vue de la couche Grande Mine de l'exploitation de Provence et méthode d'exploitation utilisées (GEODERIS, 2016).

Les principales actions et faits majeurs durant la période post-exploitation sont résumés sur la Figure 3. Après l'arrêt de l'exploitation minière en 2003, les chantiers souterrains ont été partiellement et progressivement envoyés. L'envoyage a progressé d'ouest en est à mesure que le pompage des eaux d'exhaure a été réduit pour ramener le niveau des eaux souterraines de - 1 100 m en 2003 à - 14 m en 2010, sous le niveau de la mer. A noter que depuis 2010, ce niveau bien que maintenu par pompage, a subi des fluctuations dues soit à des pannes des pompes, ou à l'accroissement de leur capacités, conjugués aux apports d'eau saisonniers. L'objectif de ce pompage est d'éviter que les eaux minières

se déversent directement dans le port de Marseille et provoquent une pollution visuelle. L'eau pompée est évacuée en mer, via la galerie de la mer (Figure 2), à distance du port de Marseille.

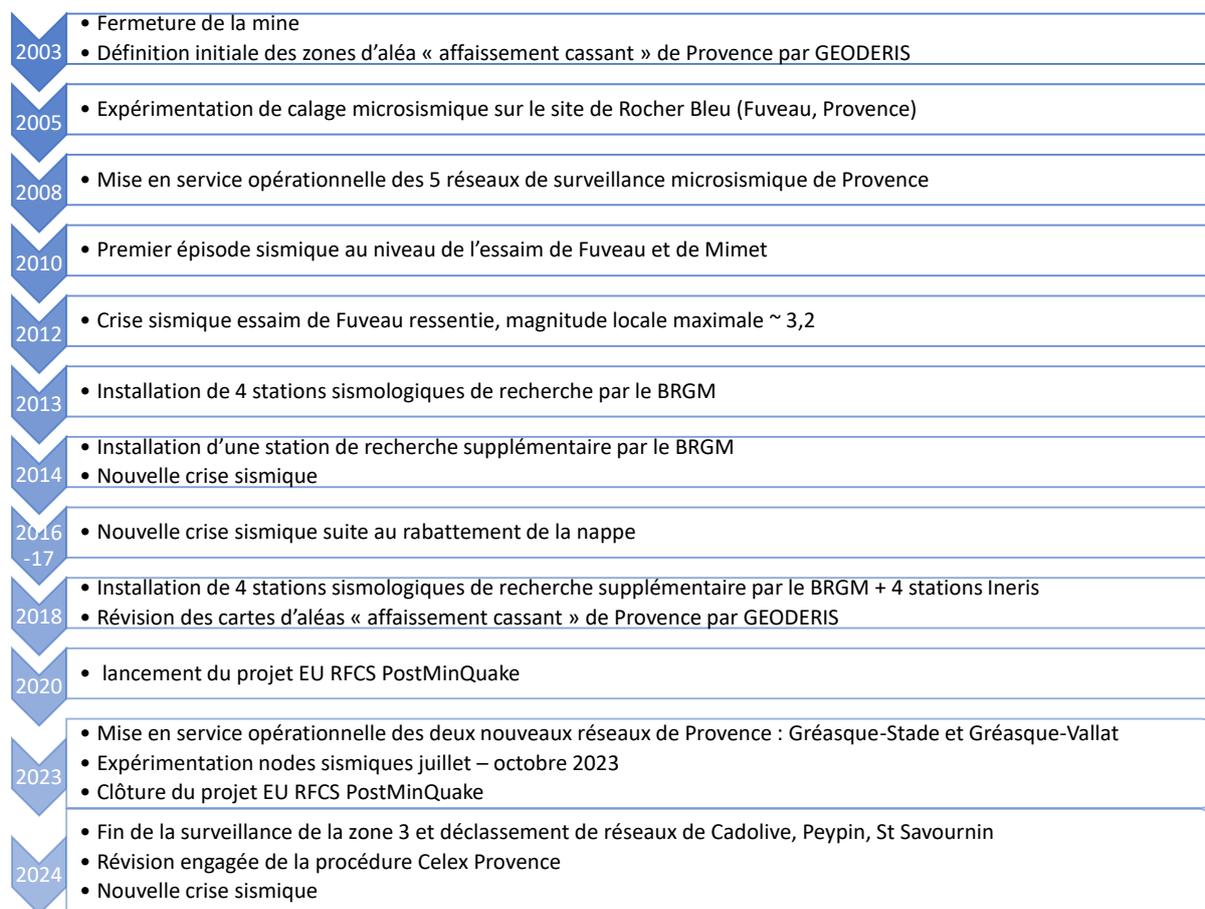


Figure 3 : chronologie des principales actions engagées et faits majeurs durant la période après-mine dans l'ancien bassin houiller de Gardanne

Entre-temps, des études ont été réalisées pour identifier les zones à risques de mouvements de terrains post-miniers par GEODERIS (GEODERIS, 2003). Les zones d'aléa qualifiées à risque de type « affaissement cassant » ont été définies en considérant la stabilité des travaux miniers souterrains et correspondent aux travaux miniers situés à moins de 250 mètres de profondeur (Figure 4). Ces zones initiales d'aléa sont délimitées par une ligne orange foncé sur la Figure 4. Aux endroits présentant des enjeux de surface, un réseau permanent de surveillance microsismique a été installé à la demande des autorités en 2008 (Figure 5). L'objectif de ce réseau est de surveiller les signes précurseurs à d'un affaissement cassant (Figure 4-b).

Au total, plus de 3 900 événements de 2008 à 2023 ont été détectés, avec de manière inattendue, une activité microsismique importante (cf. paragraphe 4.1) hors zones de surveillance qui se manifeste par des crises périodiques et des événements ressentis par la population locale

En 2016, GEODERIS a révisé la carte d'aléa "affaissement cassant" d'origine minière, conduisant à une réduction de l'étendue des zones soumises à cet aléa (GEODERIS, 2016). Les nouvelles zones ainsi délimitées sont indiquées en orange sur la Figure 4. Cette mise à jour entraîne la nécessité de redéployer les stations de surveillance microsismique sur les zones à risque, comme décrit dans le paragraphe 2.2. Pour 2024, les stations situées au sud-est, concernées par la suppression de l'aléa affaissement cassant par GEODERIS, changent temporairement de statut et deviennent des stations d'observations scientifique. Leur devenir au-delà de 2024 n'est à ce jour pas tranché.

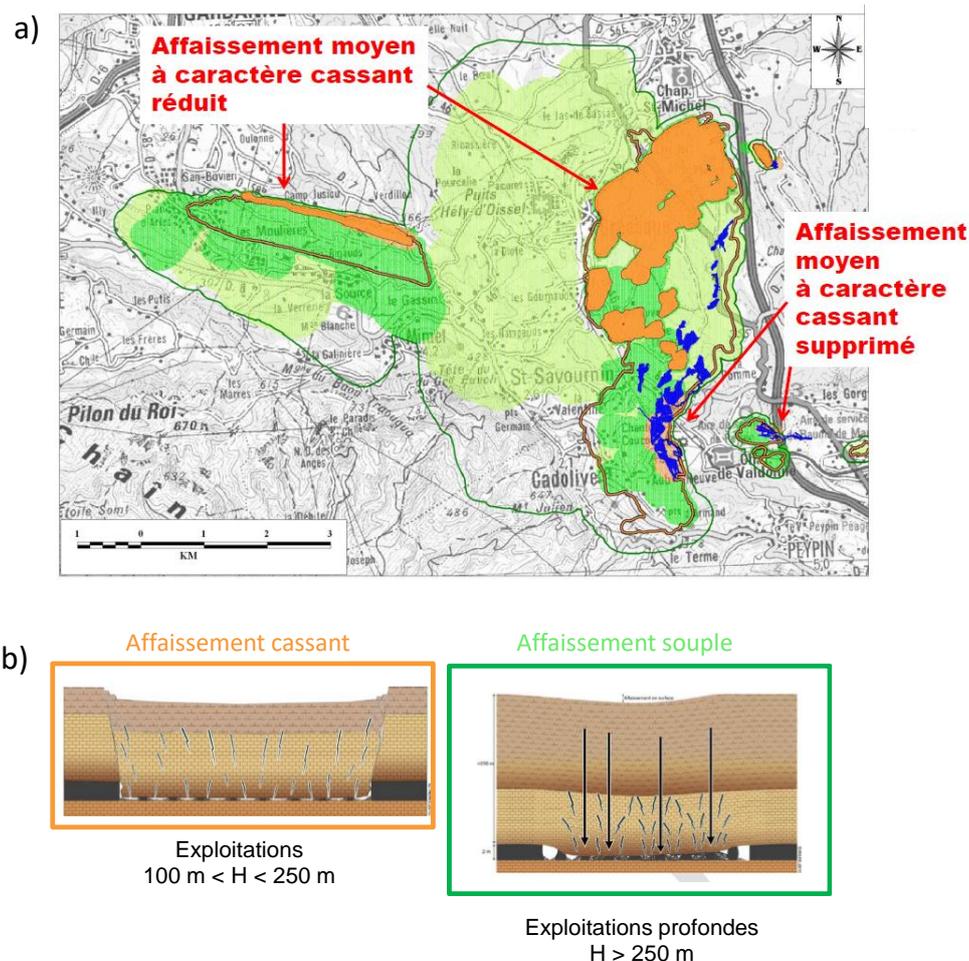


Figure 4 : a) représentation de la carte d'aléa dans l'ancien bassin houiller de Provence (GEODERIS, 2016). En vert sont représentées les zones qualifiées à affaissement souple par GEODERIS. En orange, les zones d'aléa affaissement cassant définies en 2016 par GEODERIS. La ligne orange foncé représente les limites de l'aléa affaissement cassant comme définies initialement en 2003 par GEODERIS. b) schéma représentatif des aléas de mouvement de terrain attendus dans la région.

2.2 Système de surveillance appliqué à la prévention des mouvements de terrain

Comme mentionné précédemment, le réseau sismique permanent a été conçu pour surveiller les zones à risque d'instabilités souterraines qualifiées à « affaissement cassant », là où existe une urbanisation importante. L'objectif principal est de détecter une instabilité ou une rupture souterraine au niveau des travaux miniers avant qu'elle n'atteigne la surface afin, le cas échéant, d'évacuer les personnes situées au-dessus ou à proximité. Cela fonctionne comme un système d'alerte précoce.

La profondeur des travaux miniers, le contexte géologique ainsi que l'expérimentation de calibration microsismique du « Rocher Bleu » (Driad-Lebeau, 2005) ont guidé la conception du réseau de surveillance microsismique. Elle résulte également d'un équilibre entre contraintes économiques et techniques d'implantation, ces dernières étant assez limitantes en raison de la forte densité de population dans les zones concernées.

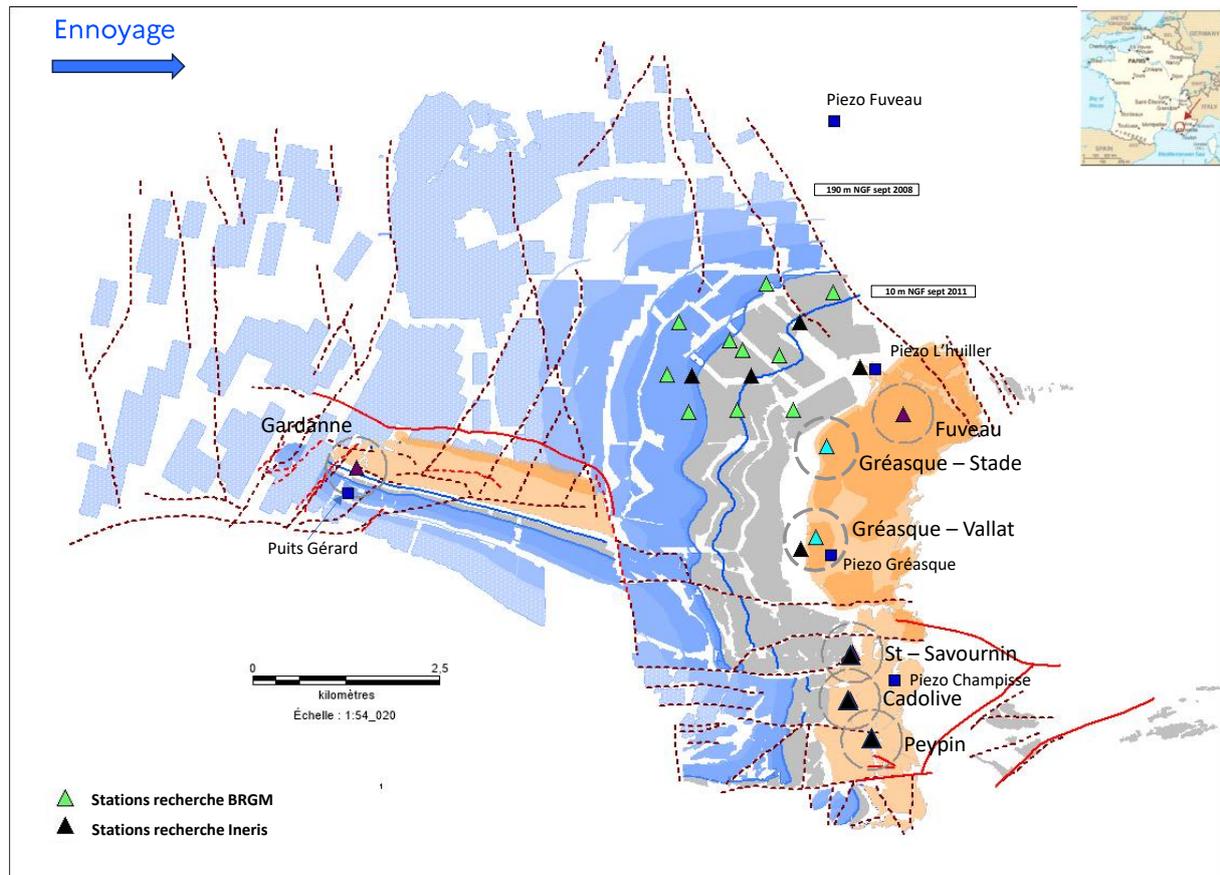
Le réseau a été initialement conçu pour surveiller les zones à risque d'affaissement cassant telles que définies par GEODERIS en 2003 (Zones orange clair sur la Figure 5-a ou ligne orange foncé sur la Figure 4-a). Ce réseau est déployé en 2007, et opérationnel depuis 2008. Il est alors composé de cinq stations microsismiques permanentes (Figure 5) exploitées par l'Ineris sur Gardanne (zone 1), Fuveau (zone 2), Saint-Savournin, Cadolive et Peypin (zone 3). À la suite de la révision des cartes d'aléa en 2016, deux stations supplémentaires ont été installées et mises en service opérationnel en 2023 : Gréasque – Stade (zone 4) et Gréasque-Vallat (zone 5). Le réseau comporte donc aujourd'hui 4 stations de surveillance permanentes (Figure 5), les 3 stations de la zone 3 (Saint-Savournin, Cadolive et

Peypin) étant considérées comme des stations d'observations scientifique en 2024 à la demande de GEODERIS. Leur devenir au-delà de 2024 est en cours de discussion à la date de rédaction de ce rapport.

L'acquisition d'événements microsismiques est basée sur un mode d'acquisition déclenché, ce qui signifie que l'enregistrement est déclenché lorsque l'amplitude du signal sur au moins 2 voies d'une sonde 3D dépasse un seuil d'amplitude défini en fonction du niveau de bruit de fond sismique lié à l'environnement urbain.

Des alarmes peuvent être déclenchées en cas d'activité sismique anormale dans les zones à risque surveillées représentées par une sphère de 400 m autour de chaque station (cercle en pointillés gris sur la Figure 5). L'objectif est de détecter l'initiation d'un effondrement avant l'apparition d'effet en surface. Sur la base de ces alarmes, l'administration peut alors prendre des mesures de protection et de sécurité envers la population, comme l'évacuation des habitations.

a)



b)

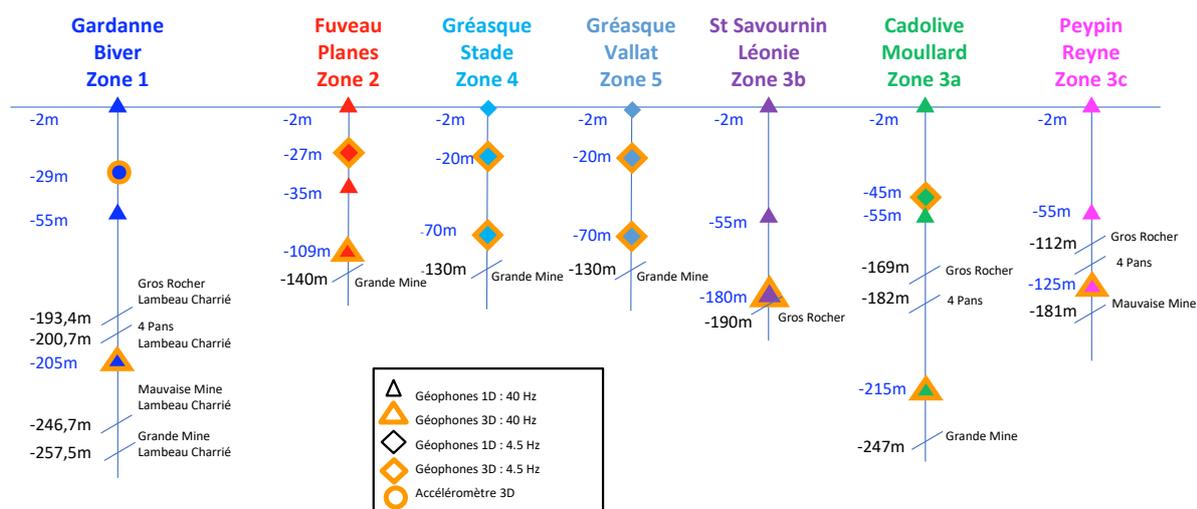


Figure 5 : (a) Carte présentant la disposition du réseau de surveillance permanent en 2023 et des équipements de recherche et d'observation (station sismique et piézométrique) déployés entre 2012 et 2023. Plusieurs symboles sont utilisés pour les différents réseaux présents sur la zone. Le cercle gris représente la zone surveillée à forte densité de population de 400 m autour des stations permanentes (zone à risque). La limite du front de d'envoyage situé à une profondeur de -10 m NGF est représentée par la ligne bleue. Les zones bleues et grises représentent l'extension de la couche d'exploitation de la mine « Grande mine », respectivement envoyées (bleues) et sèches (grises). Les zones orange clair représentent le risque d'affaissement cassant tel que défini en 2003 ; et les zones orange foncé correspondent à la superficie réduite telle que définie en 2016. Les lignes et tirets rouges représentent les failles connues. (b) configuration du réseau permanent, avec des stations situées en forages.

2.3 Instrumentation supplémentaire pour étudier la sismicité de l'essaim de Fuveau

Comme mentionné précédemment, plusieurs épisodes sismiques, depuis 2010 et surtout depuis novembre 2012, se sont produits au centre du bassin. Les vibrations sismiques régulièrement ressenties par la population sur le secteur de Fuveau-Gréasque ont conduit l'Ineris et le BRGM à déployer des stations sismiques de recherche et d'observation afin d'en préciser l'origine, incluant la possibilité de réactivation de failles préexistantes (Figure 5-a).

Un réseau de recherche de quatre stations en 2013, porté à cinq en 2014 puis neuf en 2018, a été installé par le BRGM dans la zone de l'essaim de Fuveau. 4 stations complémentaires ont été implantées par l'Ineris fin 2018 et début 2019. Trois sont encore en place à la date d'édition de ce rapport. A noter que les données des stations sismiques de recherche de l'Ineris sont également agrégées aux données des réseaux de surveillance au travers de la plateforme e.cenaris.

Pour améliorer le suivi et la connaissance du système hydrogéologique, notamment dans le secteur Est de la mine, trois forages existants ont également été instrumentés par l'Ineris : L'Huillier (en 2018), Champisse et Gréasque (en 2020). Les équipements piézométriques installés dans ces trois forages permettent de mesurer les variations du niveau d'eau en continu (échantillonnage au pas de temps de 10 minutes) avec une précision de l'ordre de la dizaine de centimètres et supportent une colonne d'eau de plusieurs dizaines de mètres. Le système de mesure de chaque forage est autonome et permet la transmission à distance des données vers la plateforme de suivi de l'Ineris, e.cenaris. Il assure également une sauvegarde des données pendant plusieurs mois, en cas de problème de transmission des données. A la date d'édition de ce rapport, seul un piézomètre est encore en place, il s'agit de celui de Gréasque.

A noter que les données des piézomètres de Fuveau et Gérard sont aussi mis à jour sur la plateforme e.cenaris. Les données du piézomètre de Fuveau proviennent de la base ADES, consultable en ligne, et reflète l'apport d'eau par pluviométrie. Les données du puits Gérard sont communiquées régulièrement par le BRGM-DPSM et reflète le niveau d'eau maintenu par pompage dans la zone.

3 Le rôle de l'eau dans les mécanismes à l'origine des séismes

L'eau joue un rôle majeur dans le déclenchement des tremblements de terre naturels ou provoqués par l'homme. Ce mécanisme est relativement bien connu dans les domaines industriels où les fluides interviennent dans l'exploitation du sous-sol, comme la géothermie profonde ; l'exploitation des hydrocarbures conventionnels et non conventionnels ainsi que le stockage du gaz ; séquestration du CO₂ ; extraction de solutions salines ; séquestration des eaux usées ; remplissage de barrages ; et plus encore (Contrucci & Klein, 2017 ; Foulger et al., 2018).

Dans le contexte post-minier, lorsque la mine est fermée, les eaux souterraines inondent généralement la mine par l'arrêt du pompage des eaux d'exhaure. L'eau remplit ensuite les vides miniers depuis les niveaux souterrains les plus profonds jusqu'à un niveau souvent maintenu par pompage pour contrôler la montée de la nappe phréatique. C'est le cas à Gardanne et dans d'autres bassins européens (Contrucci et al., 2023). Cette montée des niveaux d'eau entraîne des modifications de contraintes effectives, déjà modifiées par l'exploitation minière, à la fois par (1) la charge gravitaire due à la charge de la colonne d'eau ; (2) une augmentation par diffusion de la pression interstitielle dans le massif rocheux.

Dans ce contexte, deux types de sismicité peuvent être observés :

- Les premiers, dits « induits », peuvent être associés aux réajustements des ouvrages miniers (Figure 6 – hypothèse a) ou à leur dégradation mécanique. Cette sismicité est généralement de faible ampleur et apparaît après l'ennoyage (Kinscher et al., 2021).
- La seconde (Figure 6– hypothèse b), dite « déclenchée », est associée à la remobilisation d'une faille ou de plusieurs failles préexistantes et peut être de magnitude plus importante, en particulier en présence de fluides.

Notez que la première - sismicité induite - est limitée dans le temps (c'est-à-dire qu'une fois les ouvrages miniers écrasés/effondrés, ils ont atteint l'équilibre géomécanique) tandis que la seconde - sismicité déclenchée - peut durer plus longtemps, tant que les changements de pression affectent les failles.

La sismicité déclenchée est créée par une augmentation de la pression du fluide sur un plan de faille (Figure 6 – hypothèse b). Ce phénomène est responsable de la diminution de la résistance au cisaillement, favorisant ainsi le glissement sur le plan de faille. Ce processus est possible lorsqu'une faille est dans un état de stabilité quasi critique, orientée favorablement par rapport au champ de contraintes régional ou induit, et est impactée par l'augmentation de la pression du fluide. Cette sismicité peut apparaître plusieurs mois ou années après l'ennoyage (Kinscher et al., 2021 ; Goldbach, 2010). Il peut également apparaître de manière répétée en fonction des variations du niveau de la nappe phréatique (Kinscher et al., 2021 ; Namjesnik et al., 2022 ; Dominique et al., 2022).

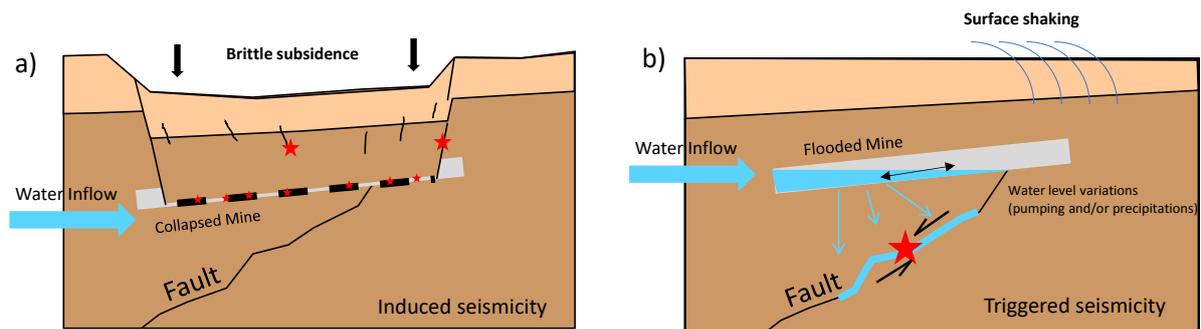


Figure 6 : vue schématique des deux configurations créant la sismicité. a) la sismicité induite produite par le réajustement des travaux miniers, qui peut atteindre l'effondrement avec un éventuel effet en surface. b) une sismicité déclenchée, avec réactivation de faille par chargement et migration d'eau vers le plan de faille.

4 Analyse des données sismiques en zone et hors zone de surveillance

4.1 Activité microsismique vue depuis le réseau de surveillance permanent

L'ennoyage a débuté en 2003 et a d'abord concerné les travaux les plus profonds exploités par longue taille situés à l'ouest de la zone. Puis le niveau d'eau souterrain est monté progressivement pour atteindre en la cote de -190 mètres NGF en 2008 (Figure 5 et Figure 14), date à laquelle les 5 réseaux de Provence ont été mis en service opérationnel. En 2010, la cote de -14 mètres NGF a été atteinte, celle-ci se situe au centre du bassin.

Depuis sa mise en service en 2008, le réseau permanent a enregistré plus de 3 900 événements de magnitude locale comprises entre $-3 < M_L < 3$ (Figure 15).

L'activité sismique localisée dans les zones de surveillance, c'est-à-dire les zones qualifiées à risque d'affaissement cassant telle que définies en 2003 par GEODERIS, est présentée dans le paragraphe 4.1.1 et 4.1.2. Celle située hors des zones de surveillance est détaillée dans le paragraphe 4.1.3.

A noter que nous ne présentons pas ici l'activité enregistrée par les nouvelles stations Gréasque-Vallat (zone 4) et Gréasque-Stade (zone 5) car elles ne sont opérationnelles que depuis le 1^{er} janvier 2023 (le recul sur les données dans ces zones n'est pas suffisant).

4.1.1 Activité microsismique dans les zones de surveillance 1, 2 et 3

L'activité sismique, dans les zones à risque d'affaissement cassant, c'est-à-dire à 400 mètres autour des stations permanentes, est observée principalement dans les zones 1 et 3, respectivement au niveau de Gardanne, d'une part, et de Cadolive, Peypin, St Savournin, d'autre part (Figure 7).

Les événements enregistrés en zone de surveillance ont atteint des magnitudes locales maximales détectées de l'ordre de $M_L 2$ (Figure 14).

Entre le 1^{er} janvier 2008 et le 31 décembre 2023, on compte :

- 458 événements en zone 1 (Gardanne) ;
- 54 événements en zone 2 (Fuveau) ;
- 740 événements en zone 3 (Cadolive, Peypin, St Savournin).

Les trois zones montrent des comportements sismiques différents. En effet, en zone 1, l'activité est diffuse et ponctuée de quelques événements plus forts, tandis qu'en zone 3, elle est plus soutenue et apparaît en essaims. Enfin, dans la zone 2, l'activité est sporadique avec une valeur de magnitude locale maximale de 1,5.

Dans les zones 1 et 3, ces événements sont très faiblement ressentis en surface (intensité III), et ils se situent au niveau de la limite d'ennoyage de ces deux zones (Figure 14). La zone 2 (Fuveau) est moins active, ce qui semble cohérent avec le fait que l'ennoyage n'a pas atteint ce secteur (Figure 14).

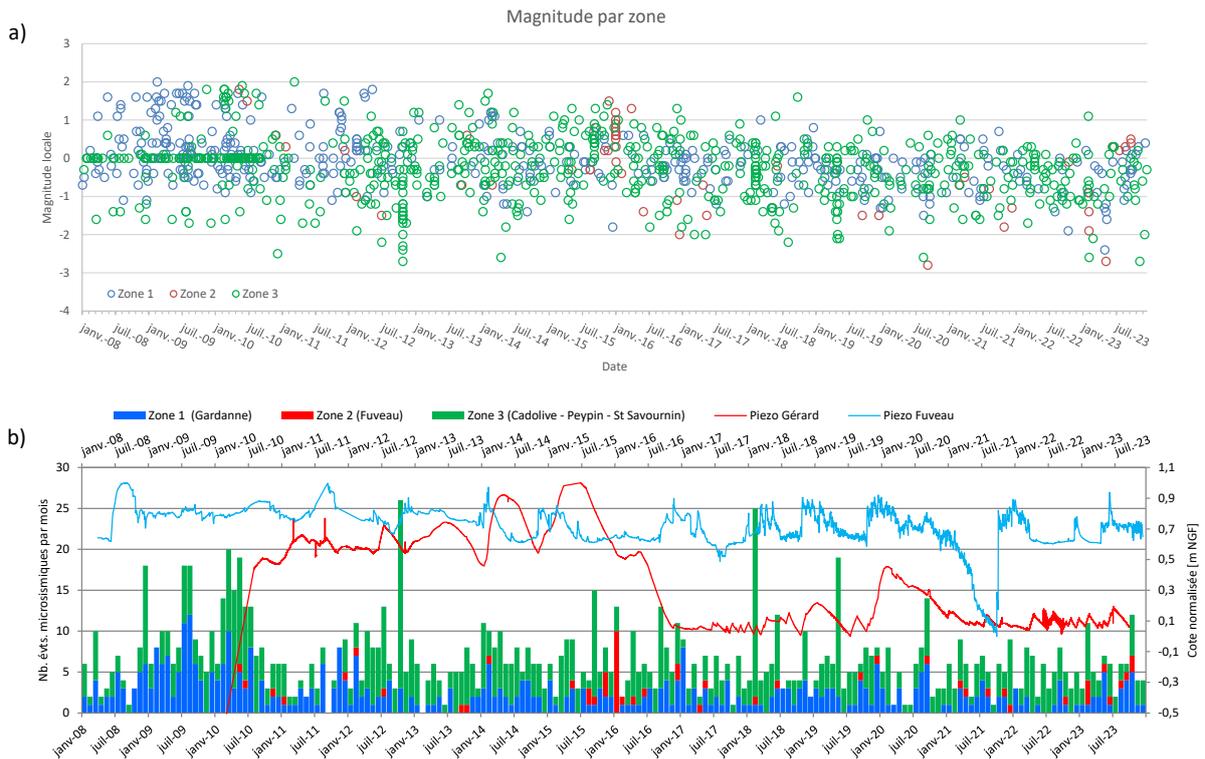


Figure 7 : a) magnitude locale des événements enregistrés depuis 2008 dans les zones à risque d'affaissement cassant telles que définies en 2003 par GEODERIS. b) histogramme empilé du nombre d'événement mensuel détecté depuis 2008 dans ces trois zones à risque d'affaissement cassant comme définies en 2003 par GEODERIS, auquel a été superposé le niveau piézométrique du Puits Gérard qui témoigne des variations de pompage et celui de Fuveau qui rend compte des apports d'eau naturelle dans la zone.

4.1.2 Analyse en multiplets des événements microsismiques des zones 1 et 3

Nous avons réalisé une analyse en multiplets dans, et autour, des zones de surveillance 1 et 3, qui sont les zones qui comportent le plus d'événements microsismiques depuis le début de la surveillance. Les données de la zone 2 sont écartées de cette analyse, en raison du faible nombre d'événements dans cette zone de surveillance. L'analyse en multiplet consiste à identifier des signaux qui présentent la même forme de signal, et ensuite à les classer en famille.

L'objectif de cette étude est de vérifier si ces familles de signaux, ou multiplets, perdurent dans le temps et témoigneraient donc de fractures, ou failles, réactivées qui contribueraient à la sismicité observée à proximité des zones à risque d'affaissement cassant.

La méthode utilisée est basée sur la cross-corrélation des signaux à partir d'un seul capteur 3D, développée par Namjesnik (2021). Le détail de la méthode est présenté dans l'annexe 1 de ce rapport, les catalogues des multiplets obtenus dans les 2 zones sont présentés en annexe 6 du rapport.

4.1.2.1.1 Résultats dans et aux alentours de la zone 1 – Gardanne

Pour l'analyse en multiplets du secteur de Gardanne, 782 événements ont été considérés dont la localisation est représentée sur la Figure 8, sur la période du 1^{er} janvier 2008 au 30 juin 2022. On constate, d'après l'étude paramétrique (annexe 1), que l'analyse en multiplets dans la bande de fréquence 1-30 Hz pour un seuil de corrélation de 0,8 est la combinaison de paramètres optimale pour l'identification des familles sur la sonde 3D 40 Hz Biver située à 205 mètres de profondeur.

Sur les 782 événements considérés, 221 événements ont été classés dans 72 familles, soit 28 % des événements. Néanmoins sur les 72 familles, 45 ne comportent que 2 événements (Figure 9).

Même si la localisation n'est pas très précise car réalisée avec une seule station, certaines familles d'événements semblent montrer des alignements en cohérence avec directions tectoniques principales cartographiées sur la zone, c'est-à-dire celles du Lambeau-Charrié (tirets rouge Figure 8) et celles des formations autochtones (tirets rouge foncé Figure 8).

Par exemple la famille 13 se localise le long d'une faille, de direction NW-SE, qui a été cartographiée dans la formation Grande Mine au moment de l'exploitation dans les formations autochtones. La famille 2, bien qu'elle ne soit pas associée à une faille cartographiée, montre aussi un alignement dans la même direction.

Les familles 10 et 41 (Figure 8 et Figure 10), par exemple, de direction NE-SW sont en accord avec des directions reconnues dans le Lambeau-Charrié. A noter que la famille 10 (Figure 10), qui se situe dans l'emprise de la zone de surveillance, est une de celle qui présente les magnitudes les plus fortes de l'échantillon d'événement classés avec 8 événements des magnitudes comprises entre 1 et 1,3. Elle a fonctionné entre 2009 et 2014. L'autre famille qui présente les magnitudes les plus importantes, de l'ordre de 1, est la 65 qui se localise le plus à l'ouest.

Au niveau de l'évolution temporelle (Figure 9), sur la période 2008 – 2010, la majorité des familles apparaissent en même temps que la remontée du niveau souterrain, qui passe de -205 mètres NGF à -12 mètres NGF environ. Deux autres séries de famille apparaissent en 2014 et 2015 et semblent être corrélée aux 2 variations consécutives du niveau d'eau d'une quinzaine de mètres. Enfin certaines familles fonctionnent sur toute la période.

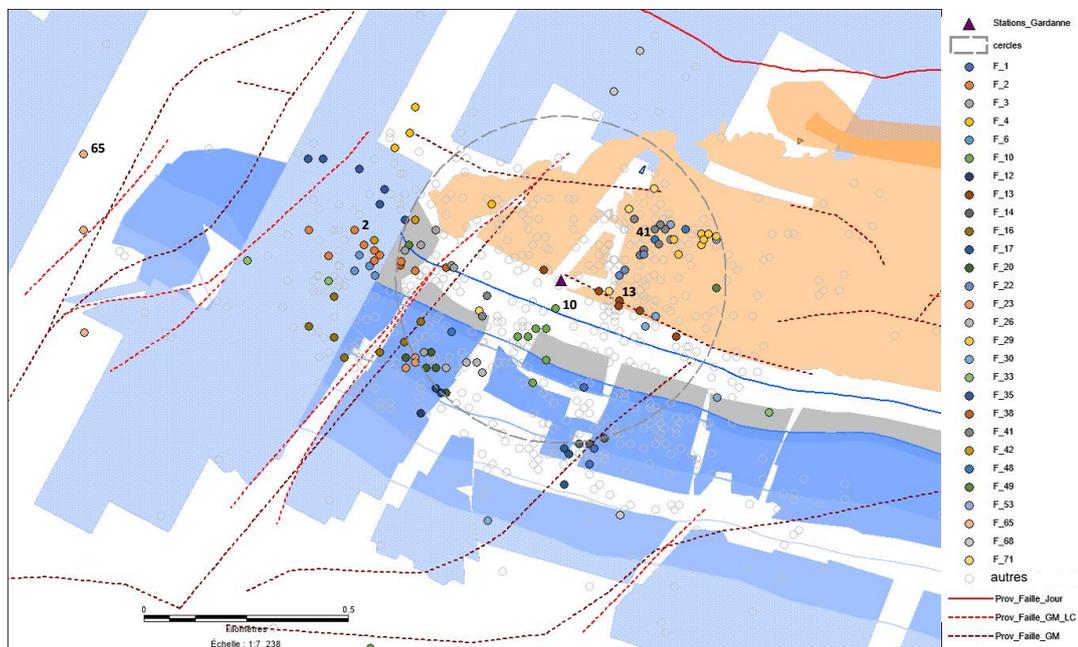


Figure 8 : localisation des familles de multiplets (cercles de couleurs) ayant plus de 2 événements par famille, et de tous les événements considérés dans l'étude (cercles gris) dans et aux alentours de la zone 1 – Gardanne. Evénements détectés par la sonde située à 205 mètres de profondeur Biver 40 Hz.

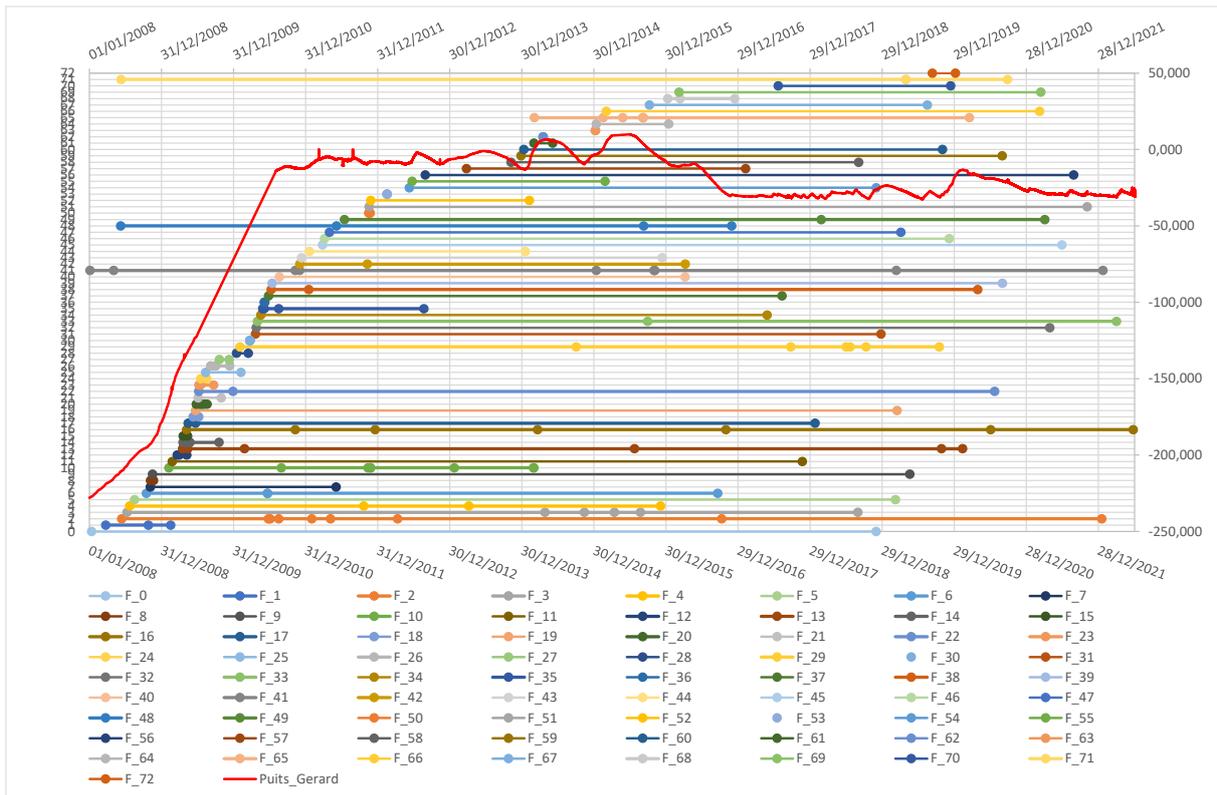
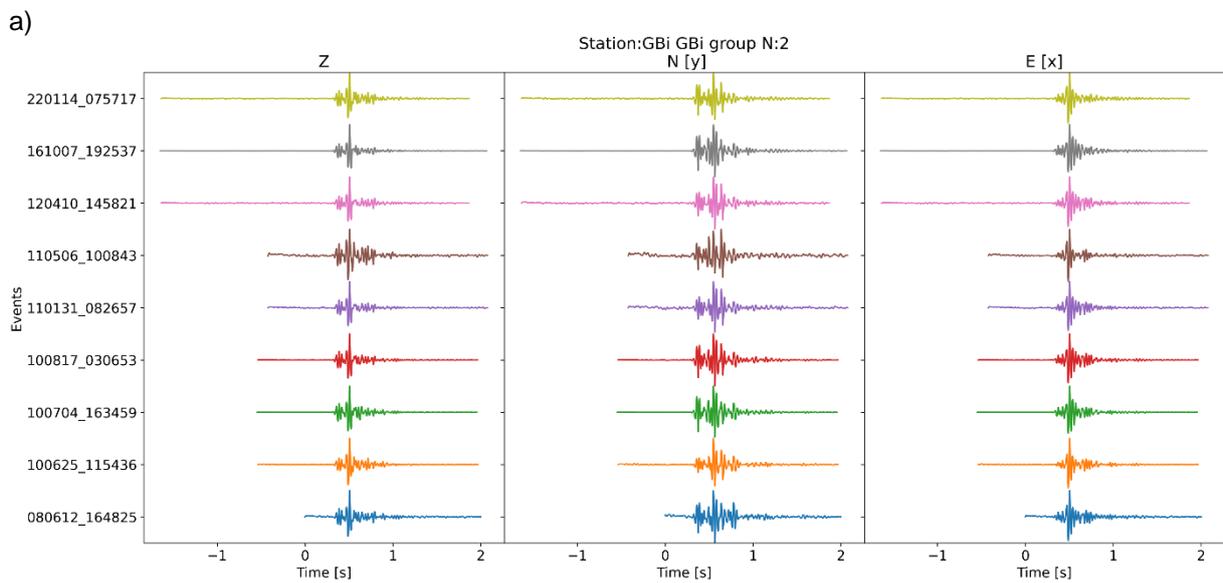


Figure 9 : répartition temporelle de chaque multiplet superposée au niveau d'eau mesuré au puits Gérard.



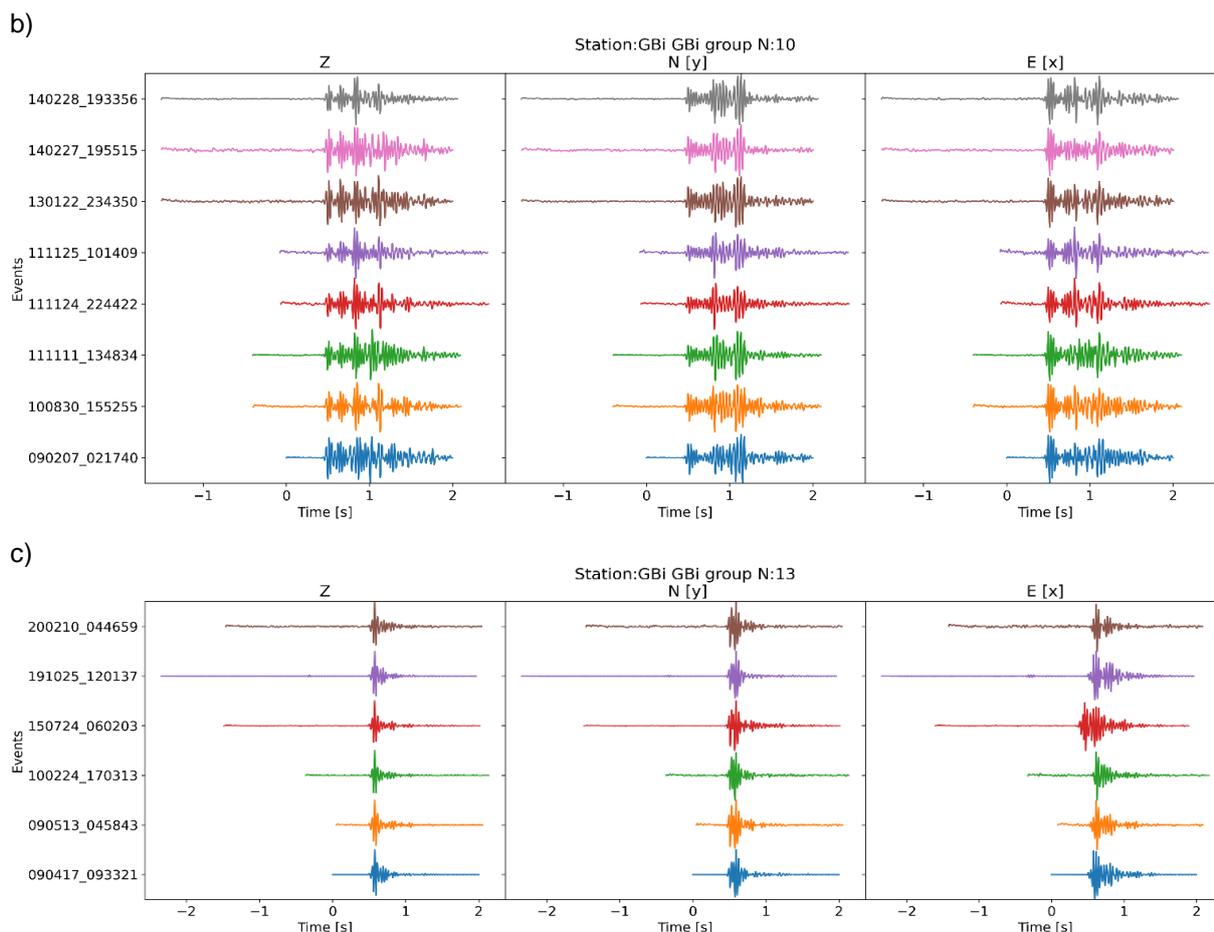


Figure 10 : exemple de multiplets, familles 2,10 et 13 localisées sur la Figure 8 en et autour de la zone 1 - Gardanne.

4.1.2.1.2 Résultats dans et aux alentours de la zone 3 – Cadolive – Peypin – St Savournin

L'analyse en multiplets a été réalisée sur 887 événements enregistrés par la sonde basse fréquence (4.5 Hz) de Cadolive située à 45 mètres de profondeur. L'étude paramétrique (annexe 1) montre que l'analyse en multiplets dans la bande de fréquence 1-30 Hz pour un seuil de corrélation de 0,8 est la combinaison de paramètres optimale pour l'identification des familles.

La localisation de ces événements est représentée sur la Figure 11, sur la période du 1^{er} octobre 2010 (date de mise en service de la sonde BF de Cadolive) au 30 juin 2022. Sur les 887, 204 événements ont été classés dans 57 familles, soit 23 % des événements. Sur les 57 familles, 30 ne comportent que 2 événements (Figure 12).

Les structures tectoniques de la région sont majoritairement d'orientation E-W. Bien que les localisations soient entachées d'erreur, plusieurs multiplets, notamment ceux qui comportent le plus d'événements, montrent aussi cette tendance. C'est le cas par exemple de la famille 26, qui comporte 13 événements (Figure 13-a). Elle semble suivre un linéament identifié dans la couche grande mine (Figure 11). Cette famille perdure de 2010 à 2019. Les magnitudes locales de ce multiplet sont proches de 1 et peuvent atteindre un maximum de 1,6.

La famille 41 (Figure 13-b), située à l'ouest de la station de Cadolive, montre également une tendance E-W (Figure 11). Elle fonctionne de 2014 à 2020 et comporte 12 événements avec des magnitudes locales entre 1 et 1,3. Aux erreurs de localisation près, cette famille pourrait être associée à une des failles cartographiées dans la couche Grande mine, qui en comporte plusieurs à cet endroit (Figure 11).

Sans entrer dans le détail de toutes les familles, on peut citer les multiplets 27, 28 et 31 qui présentent les événements les plus forts avec des magnitudes locales entre 1,9 et 2,1 (voir catalogue des données en annexe 6).

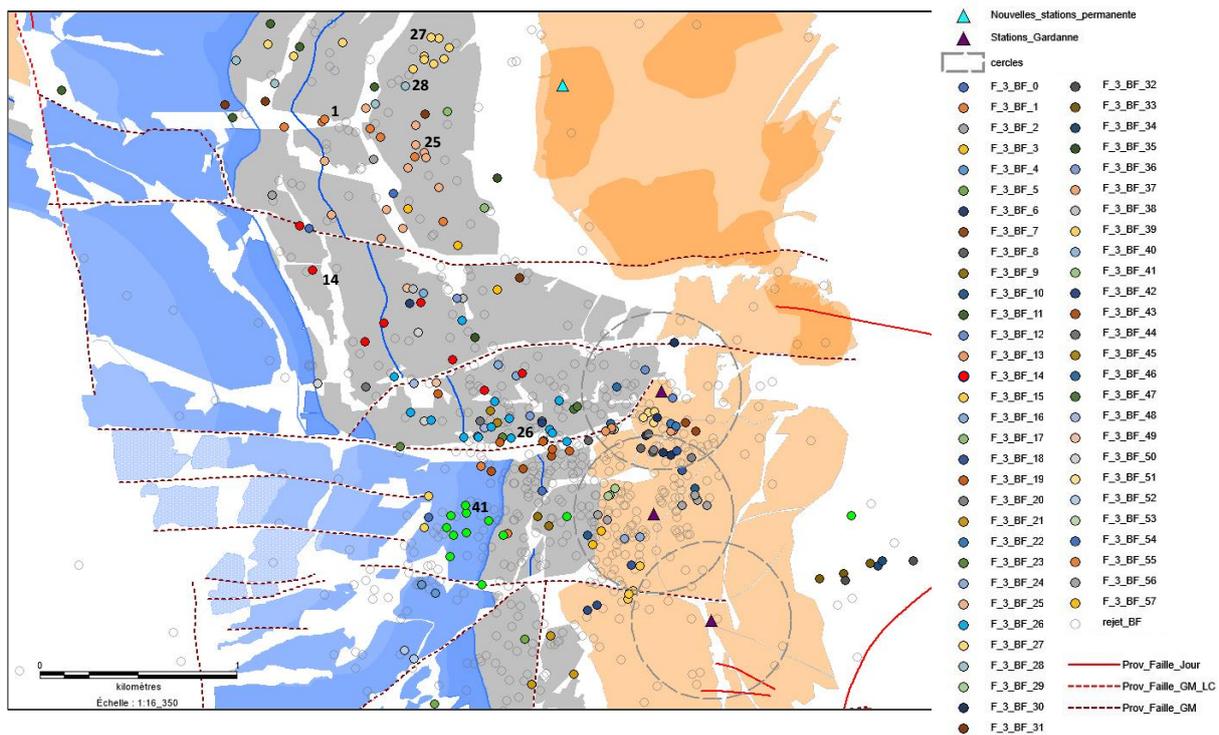


Figure 11 : localisation des multiplots (cercles de couleurs) et de tous les événements considérés dans l'étude (cercles gris) dans et aux alentours de la zone 3 – Cadolive – Peypin – St Savournin. Evènements détectés par la sonde 3D 4.5 Hz située à 45 mètres de profondeur.

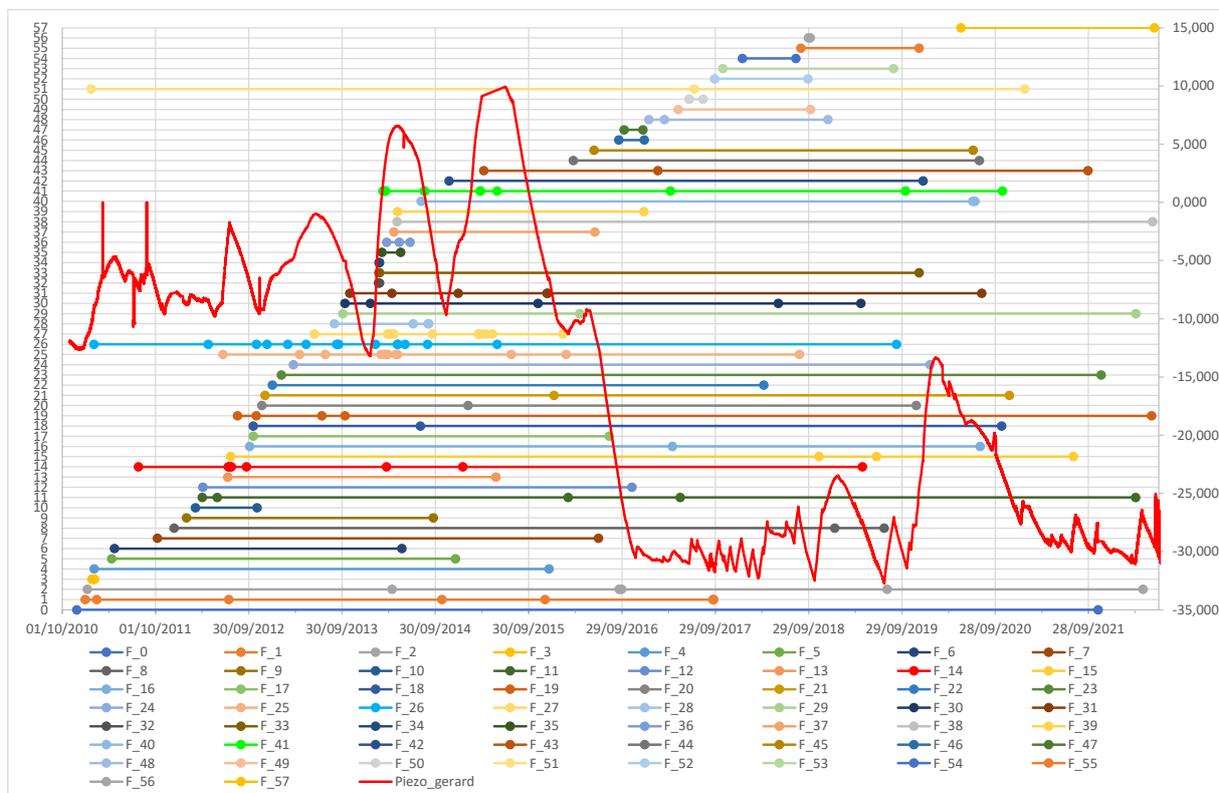


Figure 12 : répartition temporelle de chaque multiplot superposée au niveau d'eau mesuré au puits Gérard

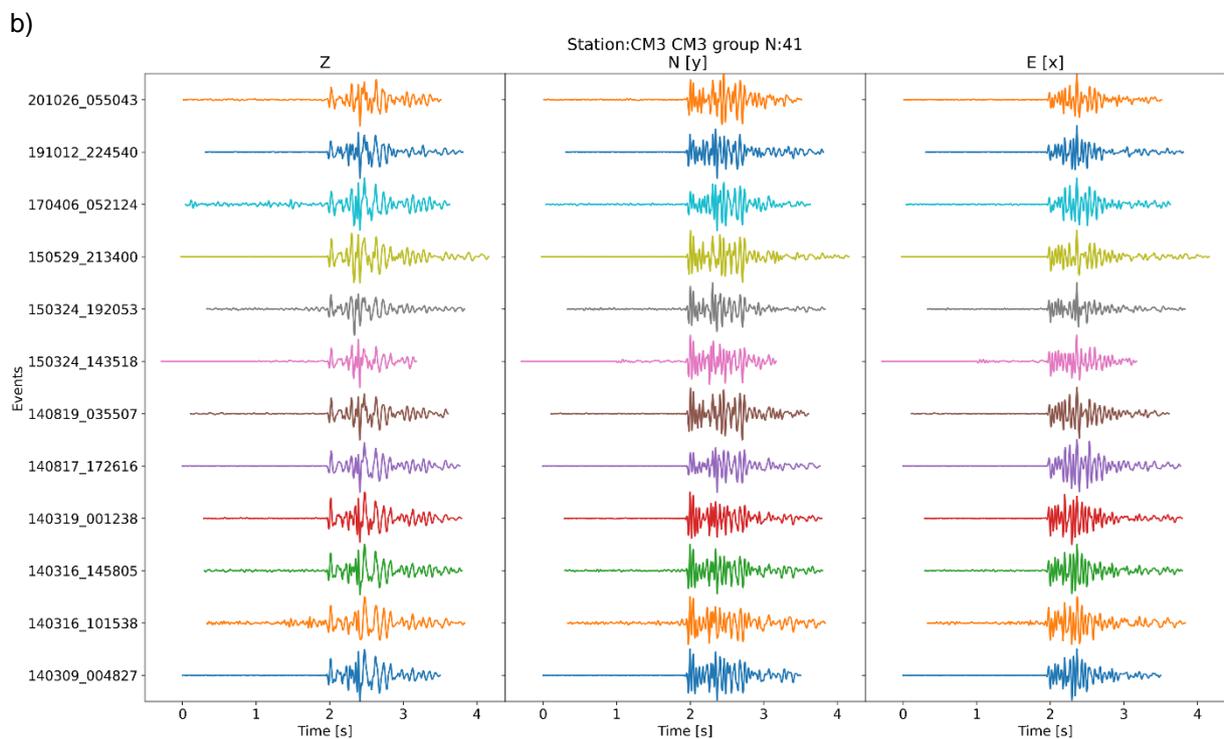
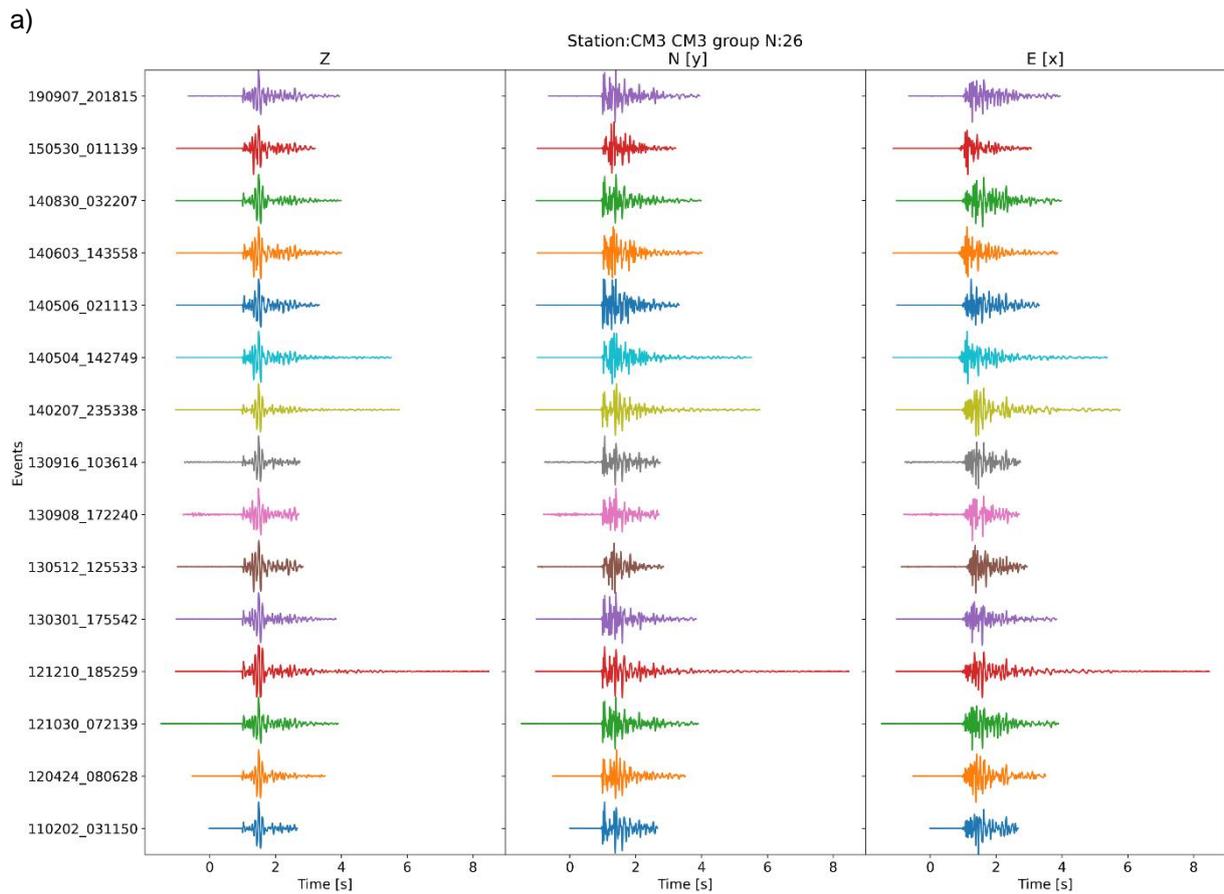


Figure 13 : exemple de multiplets, familles 26 et 41 localisées sur la Figure 11 en et autour de la zone 3 – Cadolive – Peypin – Saint Savournin.

4.1.3 Activité microsismique hors zones de surveillance

Entre le 1^{er} janvier 2008 et le 31 décembre 2023, le nombre total d'événements hors zone de surveillance détectés par le réseau permanent est de 2 636.

En 2010, le niveau d'eau a atteint un secteur minier situé au nord-est du bassin à environ 2 km à l'ouest de la station de surveillance de Fuveau (Figure 14). Depuis, une activité sismique répétitive est apparue à cet endroit (Kinscher et al., 2021) . Elle est spatialement concentrée et se poursuit encore jusqu'à aujourd'hui. Cet essaim sismique a été appelé « l'essaim sismique de Fuveau ». Six épisodes sismiques principaux ont été observés à cet endroit, toujours au centre du bassin, hors des zones qualifiées à risque d'affaissement cassant :

- En 2010, l'activité sismique a débuté à Mimet (de janvier à avril) et s'est poursuivie sur le site de l'essaim de Fuveau en mai et juin, où un nombre important d'événements a été enregistré. Il semble que cette activité soit intervenue en réponse à l'augmentation significative du niveau de la nappe phréatique (Figure 14 et Figure 15), qui a varié de -120 m à -14 m en près d'un an ;
- En novembre 2012, après 4 mois de montée des eaux souterraines, une crise sismique s'est produite à l'endroit de l'essaim sismique de Fuveau (Figure 14 et Figure 15). Cette crise sismique a également été ressentie par la population locale. L'événement le plus fort avait une magnitude locale proche de 3,2 ;
- Début 2014 (janvier à mars), un autre épisode sismique a été observé (Figure 14 et Figure 15) avec également des événements situés plus au sud que l'essaim sismique de Fuveau avec une magnitude maximale atteignant $M_L 2,3$;
- Fin 2014, une troisième crise sismique s'est déclenchée après des précipitations exceptionnellement fortes. Comme, les capacités de pompage ont été atteintes dans la zone, il n'a été possible de rabattre le niveau de la nappe (Figure 14 et Figure 15). Ce phénomène serait à l'origine de la deuxième crise sismique de décembre 2014 ;
- Fin 2016 et début 2017, une autre crise s'est produite au même endroit. Cette crise est probablement liée à la baisse importante du niveau de l'eau, qui est passé de +10 m à -30 m sous le niveau de la mer, corrélée à une période de fortes pluies (Figure 14 et Figure 15). Cette baisse a été provoquée par l'augmentation des capacités de pompage ;
- En août 2017, un épisode sismique atypique a été observé, car cette crise était corrélée à une période de sécheresse, contrairement aux autres épisodes sismiques (Figure 14 et Figure 15).

La Figure 15-a-b montre que la plupart des épisodes sismiques les plus importants ont lieu lorsque les précipitations sont les plus fortes, ce qui correspond à la recharge des nappes phréatiques. Sauf pour la dernière crise de 2017, où la crise sismique survient en période de sécheresse.

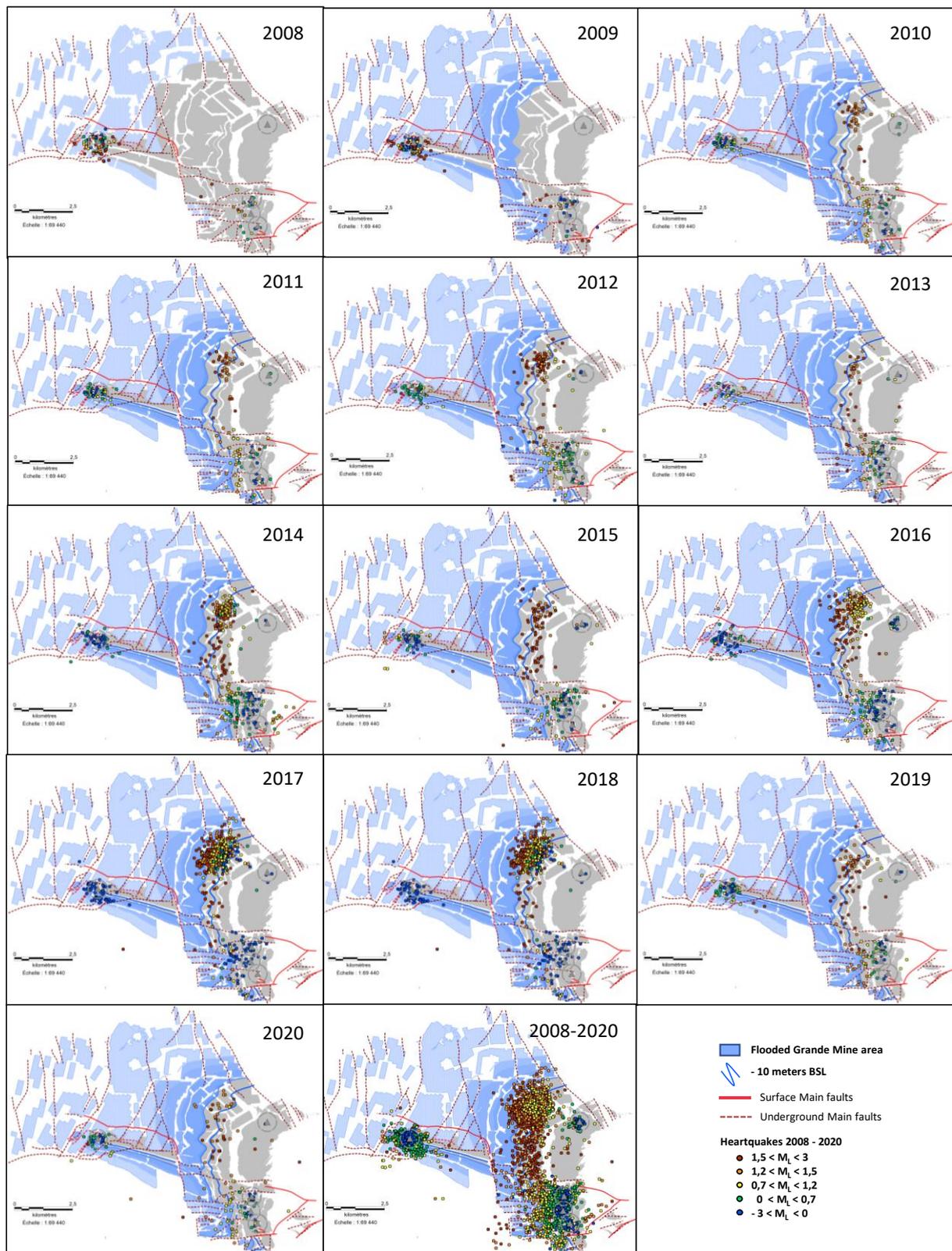


Figure 14 : Evolution spatio-temporelle de la sismicité enregistrée dans l'ancien bassin houiller de Gardanne entre 2008 et 2020, par le réseau de surveillance permanent.

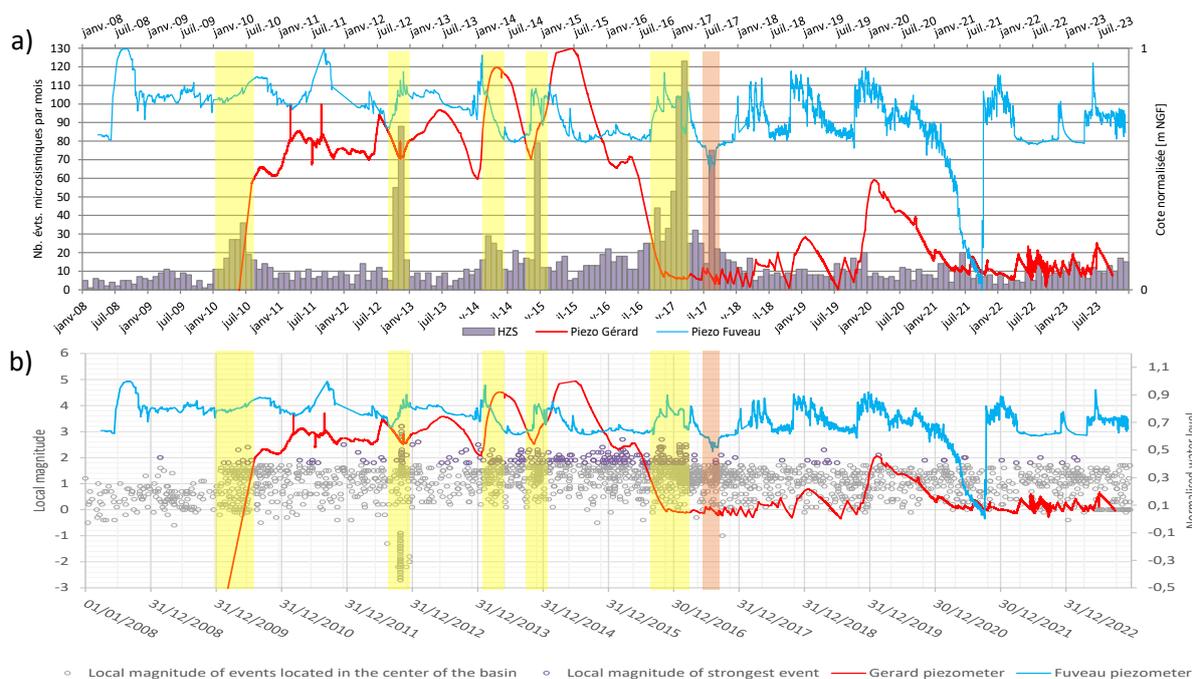


Figure 15 : a) Nombre d'événements par mois situés au centre du bassin, hors zones à risque, depuis 2008 dans l'ancien bassin houiller de Gardanne, superposé au niveau de la nappe phréatique mesuré au puits Gérard (situé à proximité des pompes) et au puits Fuveau qui représente l'apport de la pluie efficace. b) magnitude des événements situés au centre du bassin, hors zones à risque, superposée au niveau de la nappe phréatique mesuré au puits Gérard (situé à proximité des pompes) et au puits Fuveau (Contrucci et al. 2023).

4.2 Analyse de l'essaim de Fuveau à partir des stations sismologiques de recherche

Le déploiement d'un réseau sismique de recherche dans le secteur de l'essaim de Fuveau à partir de 2013, suivi de plusieurs extensions jusqu'en 2019, a ouvert des opportunités pour une analyse approfondie de l'activité sismique observée (§ 2.3 et Figure 5).

Les analyses effectuées englobent la détection, la localisation épacentrale, l'inversion du tenseur des moments, ainsi que l'analyse en multiplets d'événements. Ces approches reposent sur l'exploitation de la similarité des formes d'onde des signaux détectés par le réseau sismique. La période entre 2014 et 2017 ayant déjà été étudiée (Kinscher et Watelet, 2017, Kinscher et al., 2021 et Namjesnik et al. 2021). Notre étude s'est concentrée sur les données acquises en 2019 et 2020, acquises à partir des 13 stations d'observation. Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec le GFZ et le BRGM dans le cadre du projet européen RFCS PostMinQuake.

4.2.1 Compilation du catalogue : détection, localisation et estimation de la magnitude

L'approche utilisée pour l'analyse de l'ensemble des données de 2019/2020 suit le même protocole que celui employé par Namjesnik et al. (2021). Afin de minimiser les risques de fausses détections, une approche de détection sur différentes bandes de fréquences a été appliquée. Dans un deuxième temps, les événements ont été localisés à l'aide de BackTrackBB (BTBB) (Poiata et al., 2016, 2018). L'outil de localisation repose sur une analyse de cohérence de fonctions caractéristiques additionnées sur une grille spatio-temporelle de temps de trajet précalculés. Enfin, le calcul de la magnitude a été effectué en utilisant une loi de magnitude locale, qui tient compte de la correction de la propagation géométrique, élaborée par Namjesnik et al., (2021).

L'application de ces étapes de traitement aux données de 2019 et 2020 a fourni un catalogue de 154 événements avec une M_L comprise entre -3 et 1,2 dans la zone de l'essaim de Fuveau. A titre de comparaison, le catalogue établi pour la période 2014 à 2017 comportait 1 988 événements (Namjesnik et al., 2021), avec des magnitudes atteignant $M_L 1,4$. Une carte avec les résultats de localisation des catalogues est présentée sur la Figure 16, y compris les résultats de l'analyse en multiplets (décrits

dans le paragraphe suivant) et les résultats d'inversions du tenseur de moment (Figure 16, les événements du catalogue 2019/2020 sont représentés par des symboles carrés sur la figure).

4.2.2 Analyse en multiplets

La méthode d'analyse en multiplets utilisée est présentée en détail dans l'annexe 2 du rapport. Notons que cette approche qui utilise la similarité des formes d'ondes prend en compte aussi la qualité du signal ainsi que les résultats de localisation. De plus pour chaque famille les mécanismes au foyer des événements les plus forts sont calculés.

Cette analyse montre que les principales familles de la période 2014 à 2017 restent actives au cours des années 2019 - 2020 (Figure 16 et Figure 17). De plus, une activité sismique plus importante a été mise en évidence à l'extrême nord de la zone d'étude sur la période 2019-2020. Cependant, la mise en correspondance d'événements similaires est gênée par la localisation qui se situe en bordure du réseau sismique de recherche et est donc mal contrainte (Figure 16). Au total 39 événements sur 90 localisables ont pu être ainsi attribués aux familles existantes, soit 43 %, sur la période de 2019/2020.

Parmi les événements de la première période d'étude, 298 des 1 988 événements initiaux dans le processus de regroupement (38 %) ont pu être attribués à une famille. Même si le taux de sismicité a considérablement diminué, passant de 500 à 75 événements par an en comparant les deux périodes d'étude, le ratio d'événements classé dans des familles est resté similaire. L'augmentation de ce taux de regroupement d'événements indique probablement une réactivation répétitive au niveau de certains segments de failles à l'origine des clusters sismiques.

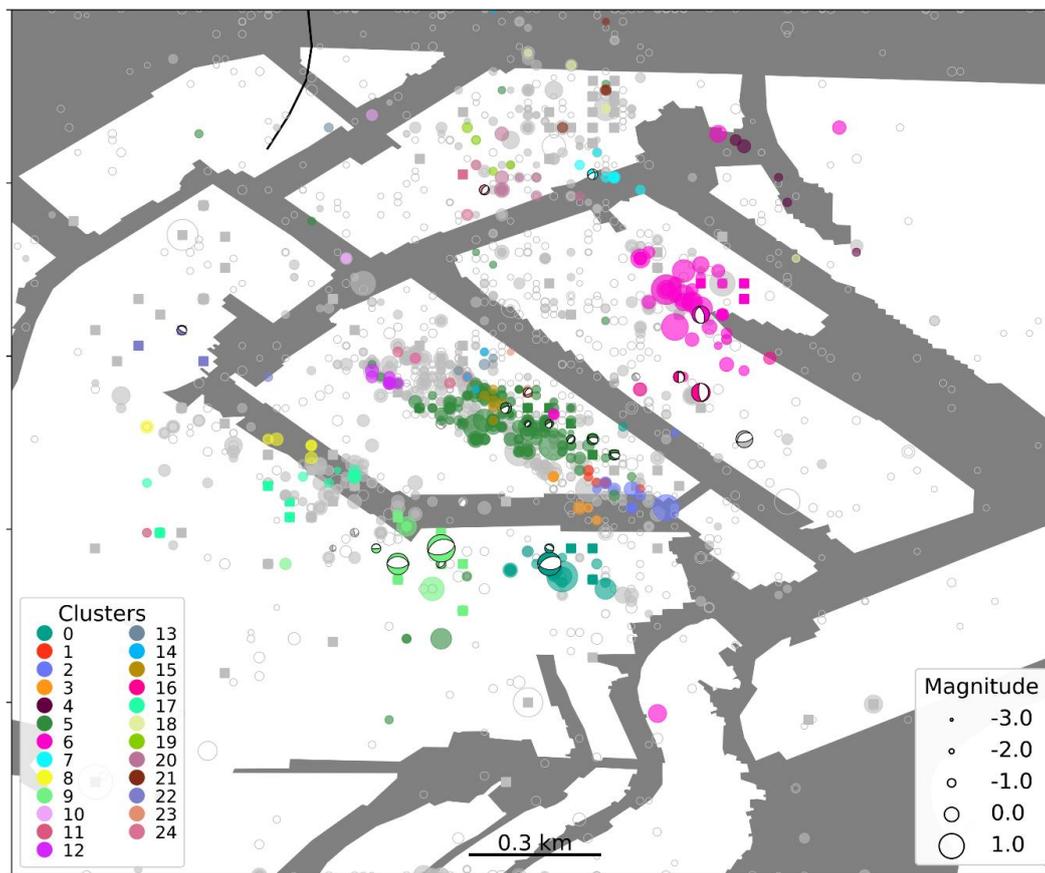


Figure 16 : Résultat du regroupement en famille (ou clustering) des événements sismiques par formes d'onde dans le secteur de l'essai de Fuveau., y compris représentation des mécanismes au foyer pour les événements les plus importants de 2019. Les zones excavées sont représentées en blanc ; la masse rocheuse restante dans la mine est représentée en gris. Les points colorés et les « beach balls » indiquent les groupes d'événements appartenant à la même famille. Les événements gris (remplis et vides) ne peuvent être attribués à aucune famille. Les événements après 2018 sont représentés sous forme de carrés ou avec le mécanisme double-couple correspondant.

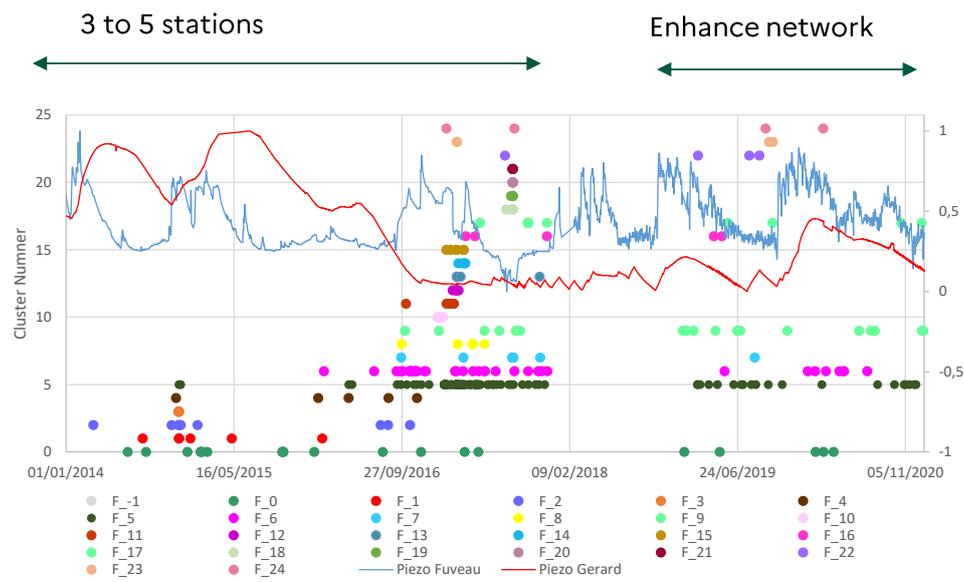


Figure 17 : représentation des différentes familles (cluster) issues de l'analyse des formes d'onde au cours du temps. L'activité sismique au sein de plusieurs familles d'événements est persistante sur toute la période d'étude de six ans, ce qui indique une activation répétée de failles identiques ou proches et glissant de manière similaire. Ces familles sont superposées au niveau de la nappe phréatique mesuré au puits Gérard (situé à proximité des pompes) et au puits Fuveau qui représente l'apport de la pluie efficace

4.2.3 Mécanismes à la source

La méthode d'analyse des mécanismes au foyer est présentée dans l'annexe 3 du rapport, elle contribue à une meilleure compréhension du phénomène sismique. Cette méthode prend en compte la forme d'onde complète du signal et permet une combinaison de différents types de données d'entrée provenant de sismomètres ou d'accéléromètres. La stabilité des inversions du tenseur des moments dépend fortement de la qualité des signaux qui est généralement meilleure pour les événements de fortes magnitudes, des données disponibles et de la couverture azimutale de la sphère focale, c'est-à-dire de l'emplacement des capteurs sismiques tout autour de l'événement (Figure 19).

Les solutions de profondeur focale ne sont pas très bien contraintes mais se situent principalement en dessous du niveau des travaux miniers. Les inversions du tenseur des moments montrent principalement des mécanismes en failles normales avec des directions d'orientation variables, souvent parallèles aux directions des massifs rocheux non exploités (NW-SE et NE-SW, Figure 18 et Figure 19). La direction NW-SE est cohérente avec la distribution spatiale de la sismicité (cf. § 4.2.2 et Figure 16). La difficulté de contraindre cette direction pourrait être attribuée à la complexité des processus à la source et au faible rapport signal/bruit de certains événements.

Les tenseurs des moments montrent aussi des composantes CLVD négatives orientées verticalement (Compensated Linear Vector Dipole ou Dipôle Vectoriel Linéaire Compensé en français). La détection de la composante CLVD et de sa direction fournit des informations supplémentaires sur le mécanisme de rupture associé aux séismes, en plus du mécanisme en faille normale mis en évidence précédemment. Dans notre cas la détection de composantes CLVD négatives orientées verticalement signifie qu'il y a également un mécanisme de compactage vertical sur la zone et que la déformation due aux séismes implique aussi une contraction verticale.

Enfin, les résultats montrent aussi quelques composantes isotropes négatives dans les mécanismes au foyer (Figure 18). Cela pourrait correspondre à la fermeture de certains vides miniers, avec un mécanisme de type implosion.

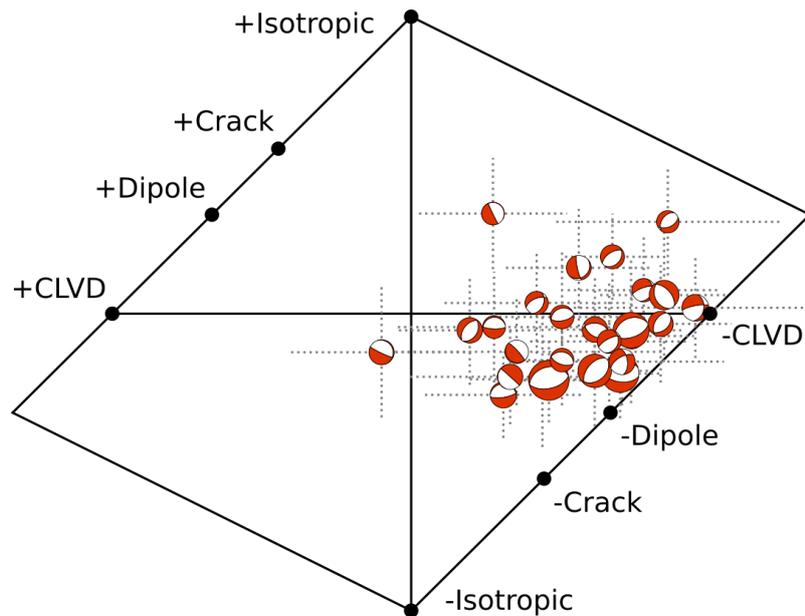


Figure 18 : Décomposition des tenseurs des moments pour les événements post-miniers à Gardanne : tracé d'Hudson montrant tous les tenseurs inversés : les événements ont des composantes CLVD et isotropes négatives. Les positions montrent la contribution relative du CLVD et des composantes isotropes à la solution MT complète. Les beach ball montrent la composante DC (double couple). Les lignes pointillées indiquent l'écart type des composantes CLVD et isotropes.

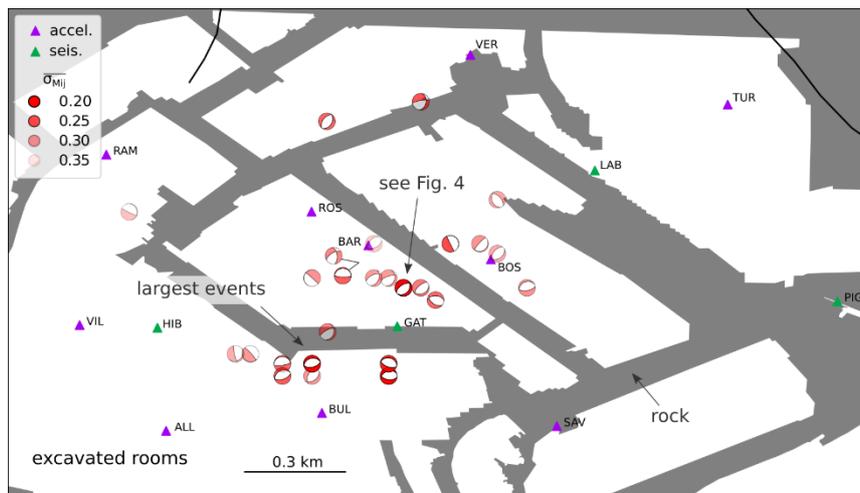


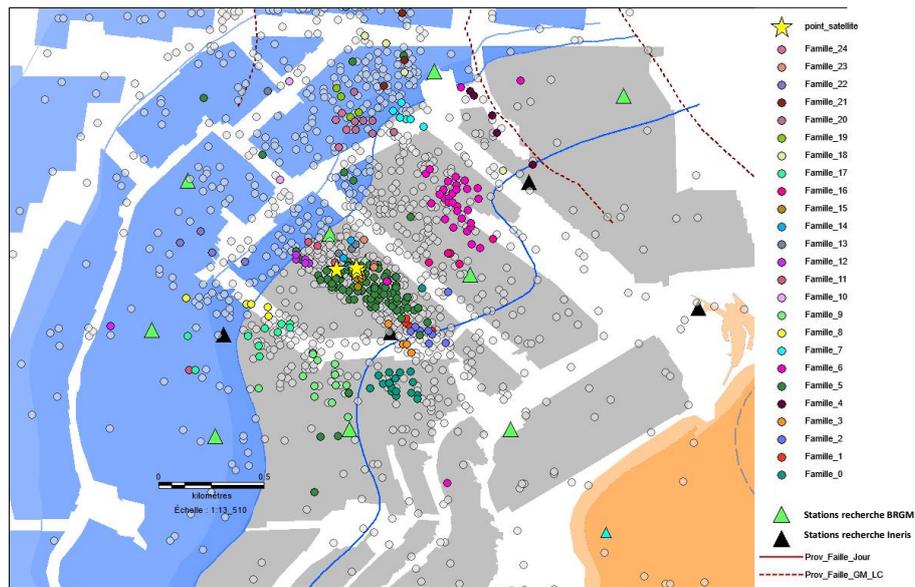
Figure 19 : Stabilité de l'inversion des tenseurs des moments. Vue cartographique montrant les composantes double couple des résultats complets de l'inversion MT, codées par couleur selon la stabilité de l'inversion (écart type moyen de six composantes MT). La stabilité de l'inversion est meilleure pour les événements dans la partie sud de la zone d'étude et décroît rapidement pour les événements en dehors du centre du réseau de stations.

4.2.4 Les mouvements verticaux

L'occurrence de mouvements verticaux, suggérée par l'analyse des mécanismes au foyer, dans la zone de l'essaim de Fuveau sur la période 2015 - 2020 peut être vérifiée sur les données satellitaires consultables sur le site européen Copernicus (<https://egms.land.copernicus.eu/>).

Cette période temporelle correspond au rabattement de la nappe qui est passée de la cote 0 mètres NGF à environ -30 mètres NGF, mesurée au puits Gérard. Sur 5 ans, un affaissement cumulé de l'ordre de 50 mm a été observé dans cette région (Figure 20). Cette subsidence montre une vitesse plus importante fin 2016 et durant l'année 2017, juste après la stabilisation du niveau souterrain à -30 mètres NGF. Elle est concomitante à deux crises sismiques sur la zone à cette période précise (Figure 20).

a)



b)

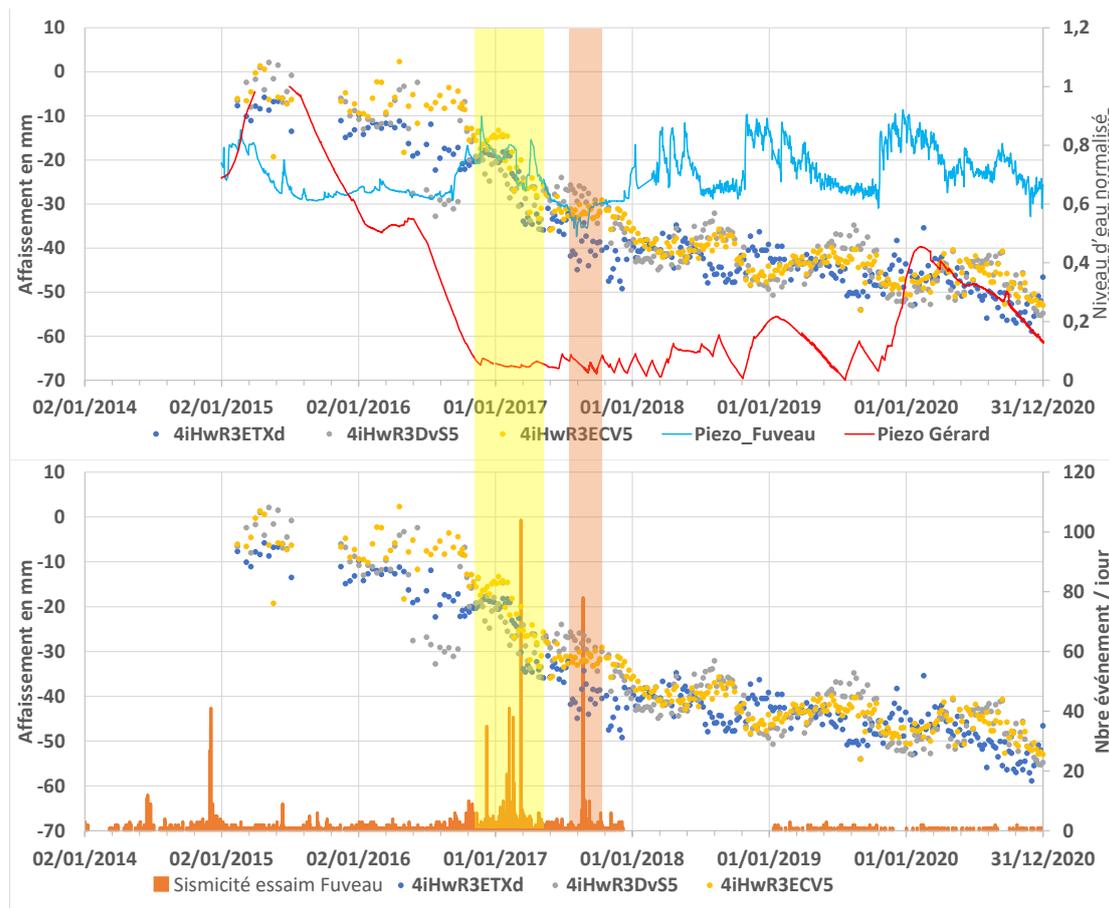


Figure 20 : a) localisation des 3 points de mesure satellitaire (étoiles jaunes) superposée à la localisation des familles de multipliets et aux travaux miniers de la couche Grande Mine (gris). b) données de mesure des 3 points satellitaires localisés en a) superposées au niveau de la nappe phréatique mesuré au puits Gérard (situé à proximité des pompes) et au puits de Fuveau qui représente l'apport de la pluie efficace.

4.3 Synthèse des résultats et suites envisagées

Depuis sa mise en place en 2008, le réseau permanent a enregistré plus de 3 900 événements de magnitude locale comprises entre $-3 < M_L < 3$ (Figure 15). L'activité sismique est localisée dans les zones de surveillance, c'est-à-dire les zones qualifiées à risque d'affaissement cassant telles que définies en 2003 par GEODERIS, et hors des zones de surveillance. Ce réseau à l'origine conçu pour la surveillance des signes précurseurs à un effondrement minier permet aussi d'avoir une vue globale de l'activité sismique à l'échelle du bassin. On peut notamment distinguer 6 épisodes sismiques, avec des événements ressentis en surface dans la zone dite de l'Essaim de Fuveau, corrélés avec les variations du niveau d'eau souterrain contrôlé par le pompage réalisé au niveau du puits Gérard.

Les travaux présentés dans ce rapport complètent et confortent l'étude réalisée en 2021 par Kinscher et al. D'abord, l'analyse en multiplets réalisée à partir des données enregistrées par les stations permanentes montre que plus de 20 % des événements peuvent être classés dans des multiplets, qui pour certains sont actifs depuis le début de la surveillance en 2008. La localisation de ces multiplets montre des directions qui semblent en accord avec l'orientation des failles principales cartographiées dans les zones étudiées. A noter également que les événements de magnitudes locales les plus fortes, entre 1 et 2, se regroupe dans des familles. Ainsi, **on peut en déduire qu'une partie de la sismicité détectée en zone de surveillance 1 et 3, et au voisinage de ces zones, trouve son origine dans la réactivation de failles tectoniques.**

Ensuite, l'analyse détaillée de la sismicité au niveau de l'essaim de Fuveau a été complétée à partir des signaux enregistrés par les 14 stations sismologiques et étendue à la période 2019- 2020. **On observe ainsi que certains multiplets actifs dans l'essaim de Fuveau dès 2014 le sont encore en 2020. Plus généralement tous témoignent de la remobilisation de segments de faille par les variations du niveau d'eau** dans les travaux miniers souterrains.

L'analyse des mécanismes au foyer des événements forts au sein de ces multiplets **montre à la fois des mécanismes en failles normales** de directions NW-SE **et également des mécanismes de compactage vertical dans le secteur de Fuveau** ainsi que quelques événements qui pourraient être liés à la fermeture de vides miniers. **L'occurrence de mouvements verticaux**, suggérée par l'étude des mécanismes au foyer, **est confirmée par l'analyse des données satellitaires disponibles sur la zone.** On observe une subsidence de l'ordre de 50 mm entre 2015 et 2020, avec une augmentation de la vitesse fin 2016 et en 2017 liée au rabattement important de la nappe qui est passée de 0 mètre NGF à environ -30 mètres NGF.

En synthèse, les nombreuses études réalisées ces dernières années à Gardanne, mais aussi ailleurs en Europe (Contrucci et al. 2023), montrent que la fermeture et l'ennoyage des mines peut conduire à la remobilisation de failles géologiques, et peut donc se traduire par l'occurrence répétée dans le temps d'événements sismiques ressentis en surface. Cette conclusion nous conduit à recommander la révision de la liste des aléas post-miniers (Franck et al, 2018), qui dans l'état actuel, n'intègre pas l'aléa sismique post-minier dont il est question ici.

5 Implémentation des cartes de mouvements du sol et d'intensité sur e.cenaris

5.1 Principe général

Les vibrations sismiques peuvent dans certaines conditions être ressenties par les personnes lors de leurs activités quotidiennes. Il est donc important d'évaluer le niveau et les effets de la sismicité à partir des données de surveillance. Pour cela, il est nécessaire d'établir une équation de prédiction du mouvement du sol (GMPE) qui permet d'estimer le mouvement du sol attendu en un endroit donné pour un événement sismique potentiellement ressenti en surface et d'établir une carte des secousses sismiques ou de l'intensité macrosismique à l'échelle du site surveillé.

Une GMPE a été développée spécifiquement pour le site minier de Provence dans le cadre du projet européen RFCS PostMinQuake. Les détails de cette équation sont présentés en annexe 4.

5.2 Gestion des données à l'aide de la plateforme de surveillance web e.cenaris

Le dispositif de surveillance est piloté par le Cenaris (Centre National des Risques du Sol et du sous-sol) selon une procédure de surveillance qui précise les attentes en termes de performance et de maintenance du système ainsi que l'expertise des données. Cette procédure définit donc également les conditions (critères, seuils et délais de réponse), les acteurs et les actions spécifiques à mettre en œuvre en cas de situation de vigilance ou d'alerte sur le site de Gardanne.

Toutes les données (sismologiques et hydrologiques) sont centralisées sur l'infrastructure et le portail web de surveillance e.cenaris (<https://cenaris.ineris.fr>, sous réserve de demande d'autorisation d'accès). D'autres données publiques pertinentes ont également été ajoutées, comme les données pluviométriques des stations météorologiques (Météo-France) de la zone, ainsi que d'autres données disponibles sur le portail Accès National aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES).

Le portail web permet une visualisation interactive en temps réel des données et des résultats (localisation de l'événement et paramètres sources associés) sous différentes formes (graphiques 2D, cartes de sismicité, etc.). Il permet également d'éditer des rapports personnalisés. Par exemple, lorsqu'un événement sismique d'une magnitude locale supérieure ou égale à 1,8 ($M_L \geq 1,8$) survient dans le bassin, un bulletin d'information peut être automatiquement édité à partir de cette plateforme web. Ce bulletin contient des informations sur les principales caractéristiques de l'événement sismique comme l'emplacement, la magnitude et le PGV (Peak Ground Velocity – vitesse maximale du sol) mesuré aux stations.

Pour améliorer la qualité des informations fournies dans ce bulletin sur événement fort, un calcul en temps réel d'une carte de vibrations sismiques a été développé dans le cadre du projet européen RFCS PostMinQuake. Cette carte est intégrée au bulletin d'information depuis début 2024, pour visualiser la zone où se situent les mouvements du sol les plus forts. Les détails de ce développement sont décrits dans le paragraphe suivant.

5.3 Carte de mouvements du sol

Pour chaque événement microsismique détecté et localisé par le réseau de surveillance (y compris les stations sismologiques de recherche de l'Ineris), les PGA et PGV théoriques peuvent être calculés à l'aide de la GMPE établie pour le site de Gardanne (voir annexe 4 pour les détails) en différents points dans un rayon de 10 km autour de l'épicentre. En prenant également en compte les valeurs de PGA (Peak Ground Acceleration – accélération maximale du sol) et PGV (Peak Ground Velocity – vitesse maximale du sol) observées aux sondes de surface de chaque station de mesure, on peut établir la carte de mouvement du sol (ou secousses) en PGV ou PGA. Ces cartes sont représentées sous forme d'iso-courbes en vitesse (PGV en m/s) ou en accélération (PGA en m/s^2).

Ces cartes illustrent les zones touchées par l'événement microsismique, notamment lorsque l'épicentre se trouve à l'intérieur des zones à risque (à 400 m autour des stations sismiques). Elles permettent également d'évaluer comment un événement dont l'épicentre est situé en dehors de ces zones de surveillance peut être ressenti et avoir un impact au sein de ces zones (Figure 21).

L'édition de cartes de mouvement du sol en PGV et PGA interactives a été introduite dans la page de web-monitoring e.cenaris du site de Gardanne (Figure 21). Cette carte affiche les stations installées, les travaux miniers, les zones de surveillance et les événements microsismiques survenus (sur une période donnée). La Figure 21 représente la carte de secousses associée à un événement sismique en PGV.

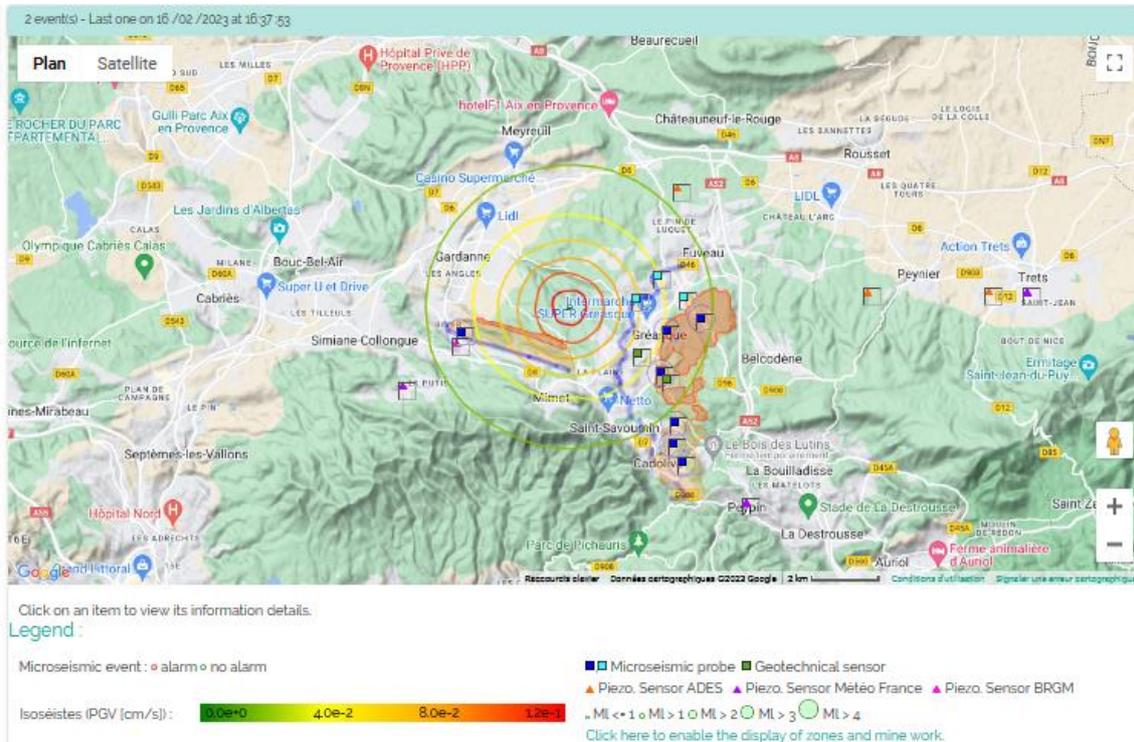


Figure 21 : Exemple de carte de secousses sismiques en PGV affichée sur e.cenaris pour un événement M_L 2 survenu le 16 février 2023 hors zone de surveillance, à l'Ouest de l'essai de Fuveau.

5.4 Carte d'intensité macrosismique

En plus des cartes de secousses sismiques, il est possible d'éditer des cartes pour montrer la distribution spatiale des intensités macrosismiques liées à un événement sismique. Ces cartes sont complémentaires aux précédentes car l'intensité reflète la manière dont l'événement est ressenti par la population, et son impact potentiel en termes de dégâts aux structures et bâtiments. Elle caractérise la sévérité de la secousse en surface (Figure 22).

Degré	Secousse	Dégâts
I	imperceptible	La secousse n'est pas perçue par les personnes, même dans l'environnement le plus favorable.
II	à peine ressentie	Les vibrations ne sont ressenties que par quelques individus au repos dans leur habitation, plus particulièrement dans les étages supérieurs des bâtiments.
III	faible	L'intensité de la secousse est faible et n'est ressentie que par quelques personnes à l'intérieur des constructions. Des observateurs attentifs notent un léger balancement des objets suspendus ou des lustres.
IV	ressentie par beaucoup	Le séisme est senti à l'intérieur des constructions par quelques personnes, mais très peu le perçoivent à l'extérieur. Certains dormeurs sont réveillés. La population n'est pas effrayée par l'amplitude de la vibration. Les fenêtres, les portes et les assiettes tremblent. Les objets suspendus se balancent.
V	forte	Le séisme est senti à l'intérieur des constructions par de nombreuses personnes et par quelques personnes à l'extérieur. De nombreux dormeurs s'éveillent, quelques-uns sortent en courant. Les constructions sont agitées d'un tremblement général. Les objets suspendus sont animés d'un large balancement. Les assiettes et les verres se choquent. La secousse est forte. Le mobilier lourd tombe. Les portes et fenêtres battent avec violence.
VI	légers dommages	Le séisme est senti par la plupart des personnes, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur. De nombreuses personnes sont effrayées et se précipitent vers l'extérieur. Les objets de petite taille tombent. De légers dommages sur la plupart des constructions ordinaires apparaissent : fissurations et chute de débris de plâtres.
VII	dommages significatifs	La plupart des personnes sont effrayées et se précipitent dehors. Le mobilier est renversé et les objets suspendus tombent en grand nombre. Beaucoup de bâtiments ordinaires sont modérément endommagés : fissurations des murs ; chutes de parties de cheminées.
VIII	dommages importants	Dans certains cas, le mobilier se renverse. Les constructions subissent des dommages : chutes de cheminées ; lézards larges et profonds dans les murs ; effondrements partiels éventuels.
IX	destructive	Les monuments et les statues se déplacent ou tournent sur eux-mêmes. Beaucoup de bâtiments s'effondrent en partie, quelques-uns entièrement.
X	très destructive	Beaucoup de constructions s'effondrent.
XI	dévastatrice	La plupart des constructions s'effondrent.
XII	catastrophique	Pratiquement toutes les structures au-dessus et au-dessous du sol sont gravement endommagées ou détruites.

Figure 22 : échelle d'intensité macrosismique européenne EMS98.

Plusieurs échelles d'intensité macrosismique existent mais n'ont pas été établies spécifiquement pour les séismes induits, qui sont généralement une magnitude moindre et se produisent à des profondeurs moins importantes comparativement aux séismes naturels.

Après une étude comparative des échelles d'intensité (Annexe 4), nous avons choisi l'échelle EMS98. Nous utilisons ainsi les relations de conversion EMS98 proposées dans Zanini et al. (2019) comme suit :

$$I_{EMS98} = 4.16 + 1.62 \log_{10} PGV \quad (5)$$

$$I_{EMS98} = 2.03 + 2.28 \log_{10} PGA \quad (6)$$

La Figure 23 présente un exemple de carte d'intensité pour un événement M_l 3 théorique utilisant la conversion depuis les valeurs de PGV décrite ci-dessus.

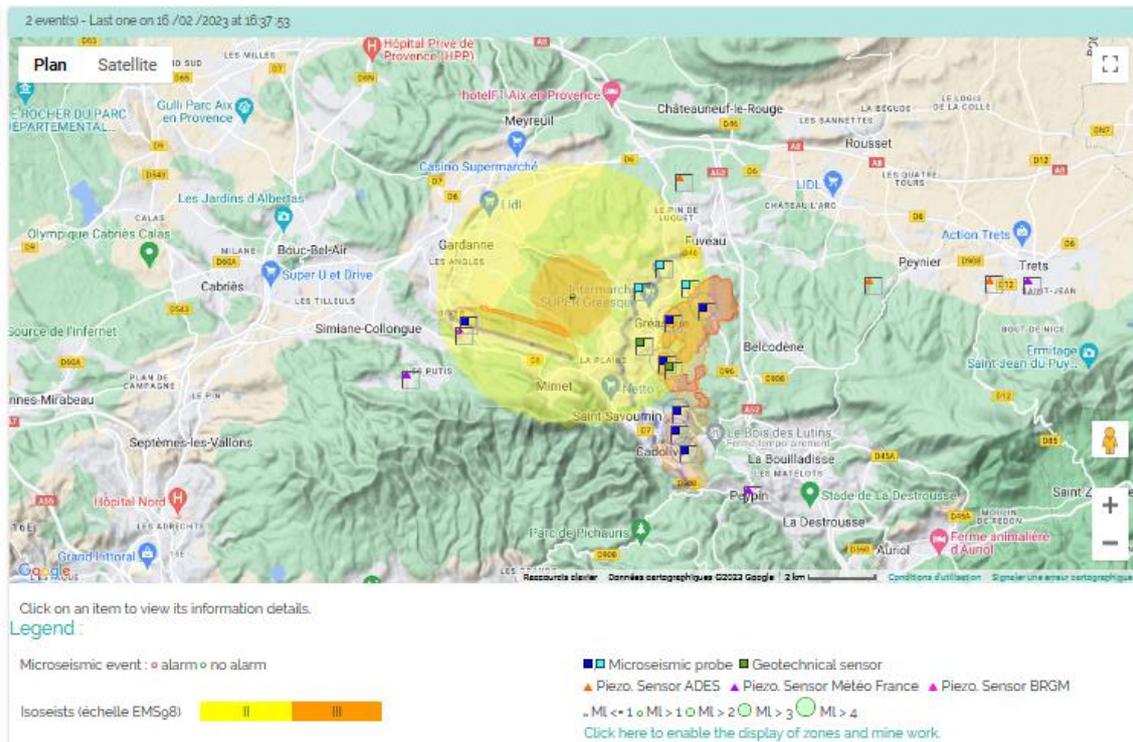


Figure 23 : Exemple de carte d'intensité affichée sur e.cenaris pour événement sismique théorique de magnitude locale M_l 3.

5.5 Synthèse des travaux réalisés et suites envisagées

La définition d'une GMPE pour le site de Gardanne s'est accompagnée de l'implémentation d'une fonctionnalité permettant d'éditer des cartes de mouvement du sol et d'intensité en temps quasi réel en cas d'événement fort ($M_L \geq 1,8$) qui sont consultables sur le portail web e.cenaris.

D'un point de vue technique la fonctionnalité est opérationnelle depuis début 2024.

Il est néanmoins nécessaire de tester la robustesse de la GMPE dans le temps en comparant les mesures de surface en PGA et PGV faites aux stations avec les PGA et PGV estimés à partir de la GMPE. En effet la GMPE a été établie à partir des enregistrements aux stations sismologiques déployées à l'aplomb de l'essai de Fuveau. Dans l'état actuel, elle n'est pas bien calibrée pour une utilisation à l'échelle du bassin et seules de nouvelles données permettront de la réviser pour prendre en compte d'éventuels effets locaux sur le site qui n'ont pas été observés ni pris en compte dans l'actuelle GMPE. L'expérimentation décrite dans la suite, avec le déploiement de nodes sismiques a été conduite pour partie dans cet objectif (voir partie 6).

Il est également nécessaire d'évaluer la sensibilité des cartes de mouvements du sol en fonction de la qualité de la localisation des événements sismiques. Les événements forts ($M_L \geq 1,8$) dans l'essai de Fuveau sont localisés avec une précision qui permet l'utilisation de la GMPE et donc l'édition de cartes de mouvements du sol et d'intensité macrosismique avec un bon indice de confiance.

Pour des événements localisés ailleurs dans le bassin notamment le long du front d'envoyage, au sud de l'essai de Fuveau, l'indice de confiance sera moins bon. Dans ces cas de figure, l'édition de cartes de mouvements du sol et d'intensité macrosismique devra s'accompagner d'un contrôle de cohérence des données, notamment vis-à-vis de la profondeur des événements.

6 Campagne de mesure sur le terrain avec les nodes sismiques

6.1 Présentation des nodes sismiques

L'Ineris a acquis un ensemble de nodes sismiques autonomes, spécialement sélectionnés pour leur facilité de déploiement sur le terrain et leur autonomie pouvant aller jusqu'à 3 mois.

Deux types d'instruments ont été acquis (Figure 24). Les deux disposent d'un capteur à 3 composantes (5 Hz) mais le premier type d'instrument dispose d'une batterie externe qui permet un enregistrement autonome pendant environ 3 mois, tandis que le deuxième type possède une batterie interne qui permet d'enregistrer pendant environ un mois environ. Les deux types d'instruments sont faciles à installer grâce à leurs pointes qui peuvent être enfoncées dans le sol depuis la surface ou, si nécessaire, enterrées jusqu'à 50 cm de profondeur (à partir de la tête du node sismique).

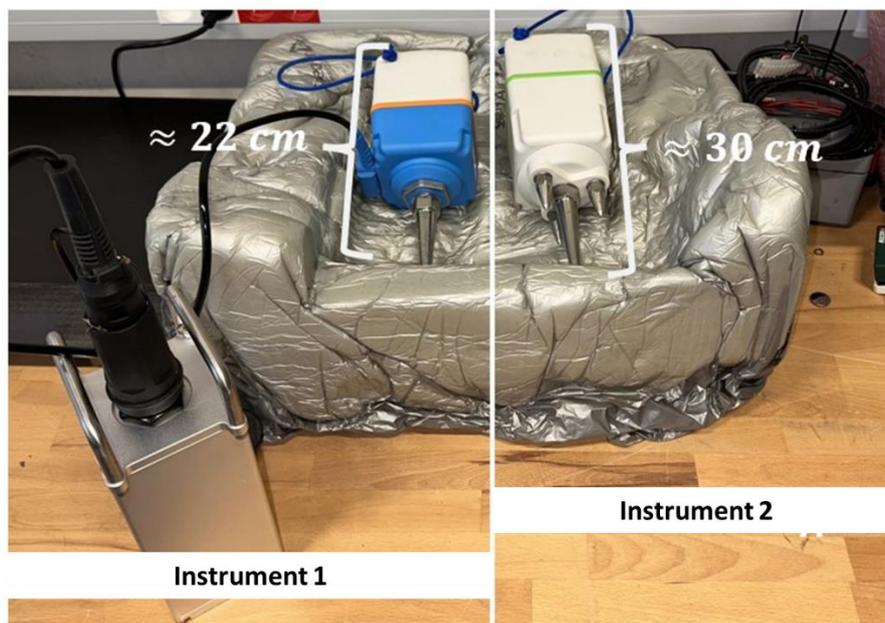


Figure 24 : Les deux types de nodes sismiques (instruments) utilisés dans notre campagne de terrain. L'instrument 1 dispose d'une batterie externe alors que l'instrument 2 dispose d'une batterie interne.

6.2 Déploiement sur le site Provence

6.2.1 Objectifs de l'expérimentation

22 nodes sismiques ont été déployés sur le site de surveillance de Gardanne pendant 3 mois du 25 juillet 2023 au 25 octobre 2023, après une phase de test décrite dans l'annexe 5.

L'objectif principal de cette expérience était de calibrer et de tester les performances des nodes sismiques en termes de détection et de localisation des événements microsismiques, par rapport au réseau de stations existant.

6.2.2 Carte du réseau de nodes sismiques

15 nodes sismiques ont été déployés pour couvrir la zone de plus forte activité sismique, c'est-à-dire proche du front d'envoyage et de l'essaim de Fuveau.

7 autres nodes sismiques ont été déployés à proximité immédiate de 6 stations sismiques Ineris existantes et d'une station sismique temporaire du BRGM (Figure 25). Ces 7 stations ont été choisies de manière à pouvoir comparer les performances des nodes sismiques avec chacun des différents types de capteurs du réseau de stations existant.

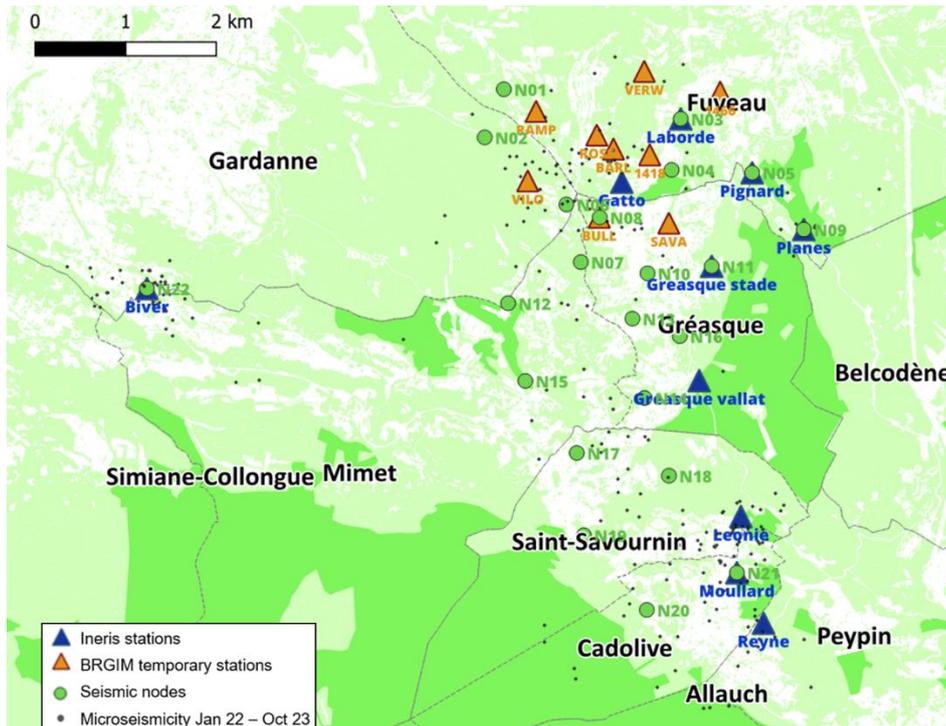


Figure 25 : Carte du réseau sismique durant les 3 mois d'expérimentation.

6.2.3 Capacités de détection et de localisation du réseau de nodes sismiques couplé au réseau permanent de surveillance

Les performances de détection et de localisation du réseau ont été évaluées et comparées à celle du réseau de surveillance permanent sans et avec les nodes sismiques.

Des simulations numériques (De Santis et al., 2017) ont été réalisées pour évaluer la magnitude minimale pouvant être détectée et localisée par le réseau de nodes sismiques et l'erreur de localisation attendue pour une magnitude donnée se produisant à une profondeur donnée.

Les simulations prennent en compte la géométrie du réseau, le niveau de bruit à chaque nodes, la loi d'atténuation (GMPE, annexe 4) et le modèle de vitesse du milieu (milieu semi-infini avec $V_p = 3200$ m/s and $V_s = 1848$ m/s).

Dans notre approche, nous avons considéré que le réseau sismique peut détecter et localiser une grandeur donnée lorsqu'il est capable d'enregistrer 3 temps d'arrivée d'ondes P et 5 temps d'arrivée d'ondes S avec un SNR (Rapport Signal sur Bruit) d'au moins 3 pour l'onde P et 5 pour l'onde S.

La Figure 26 et la Figure 27 représentent la magnitude du moment minimale que le réseau sismique peut détecter et localiser pour des événements microsismiques se produisant à 500 m et 1000 m de profondeur respectivement. Dans la zone d'intérêt, la magnitude minimale pouvant être détectée et localisée est $M_w -2,5$ à 500 m de profondeur et $M_w -2$ à 1000 m de profondeur. Les nodes sismiques améliorent les capacités de détection et de localisation en couvrant mieux le nuage sismique.

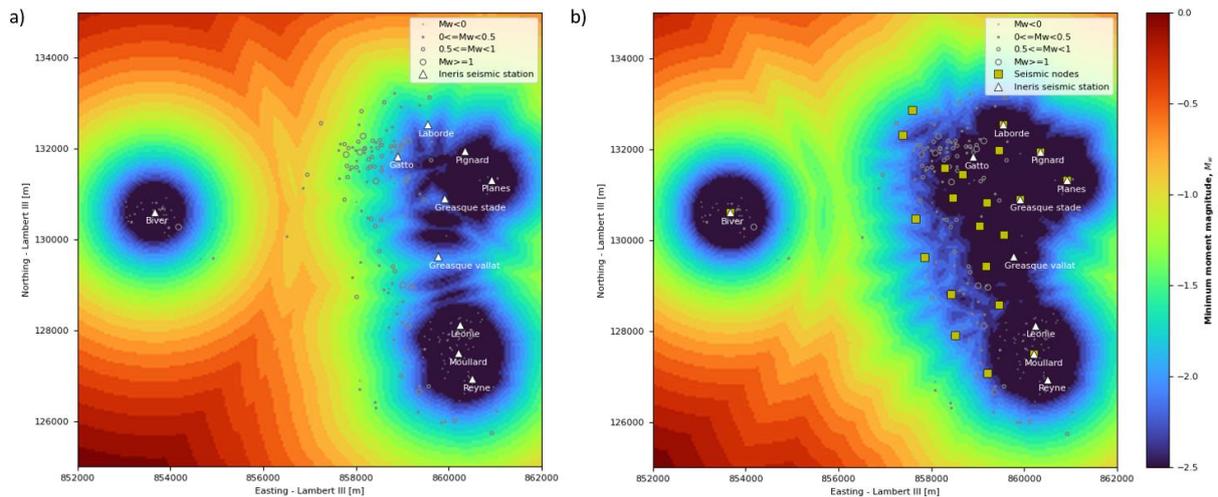


Figure 26 : Carte de détection des événements microsismiques se produisant à $Z = -500$ m en considérant a) le réseau sismique actuel et b) le réseau sismique incluant les nodes sismiques. La sismicité représentée s'étend de janvier 2022 à octobre 2023.

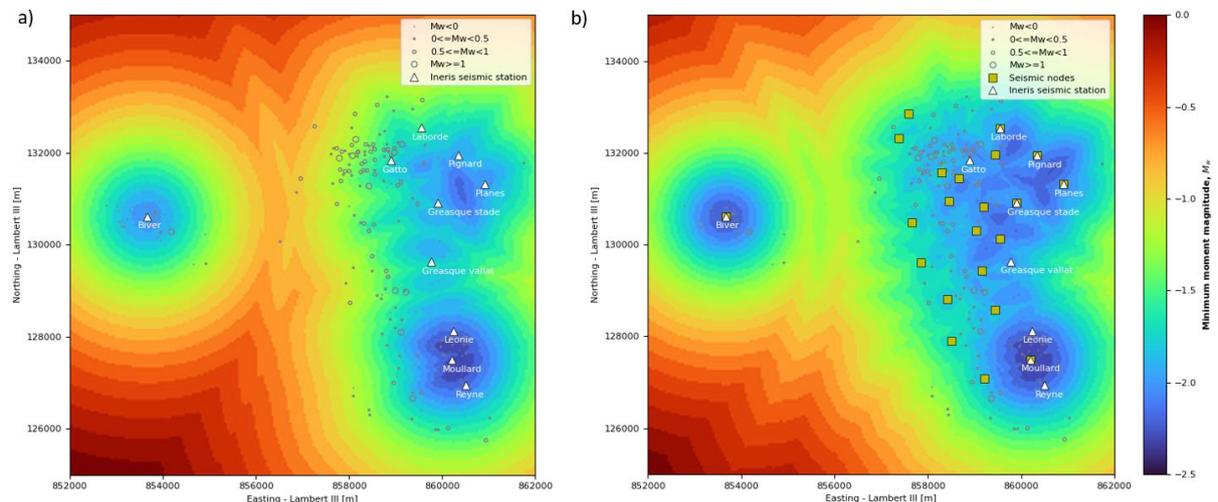


Figure 27 : Carte de détection des événements microsismiques se produisant à $Z = -1000$ m en considérant a) le réseau sismique actuel et b) le réseau sismique incluant les nodes sismiques. La sismicité représentée s'étend de janvier 2022 à octobre 2023.

Pour l'analyse sismique et surtout pour une meilleure compréhension des mécanismes à l'origine, la localisation précise des événements microsismiques est cruciale.

Nous présentons sur la Figure 28 et la Figure 29 les cartes de l'erreur de localisation maximale en considérant avec un intervalle de confiance de 95% pour les événements sismiques se produisant à une profondeur de 500 m et de magnitude M_w -2 et M_w -1 respectivement.

Comme le montre la Figure 29-a, le réseau actuel permet de localiser des séismes de magnitude M_w -1 jusqu'à une profondeur maximale de 500 m, avec une erreur inférieure à 100 m si l'épicentre est situé à proximité immédiate d'une station. Pour les séismes de magnitude M_w -2 (Figure 28-a), l'erreur maximale est d'environ 150 m lorsque l'épicentre est proche d'une station de la zone la plus dense (Est). Cependant, pour la zone située à l'ouest (Gardanne), la précision de localisation est plus faible. De plus, la sismicité qui se produit principalement sur le front ouest se situe dans une zone où l'erreur de localisation peut être deux fois plus élevée (soit environ 250 m) que dans la zone dense en stations

Ceci peut être réduit par les nodes sismiques. En effet, comme le montrent les Figure 28-b et Figure 29-b, l'erreur de localisation devient inférieure à 100 m dans la majeure partie du nuage sismique pour les événements de magnitude M_w -1 ou M_w -2.

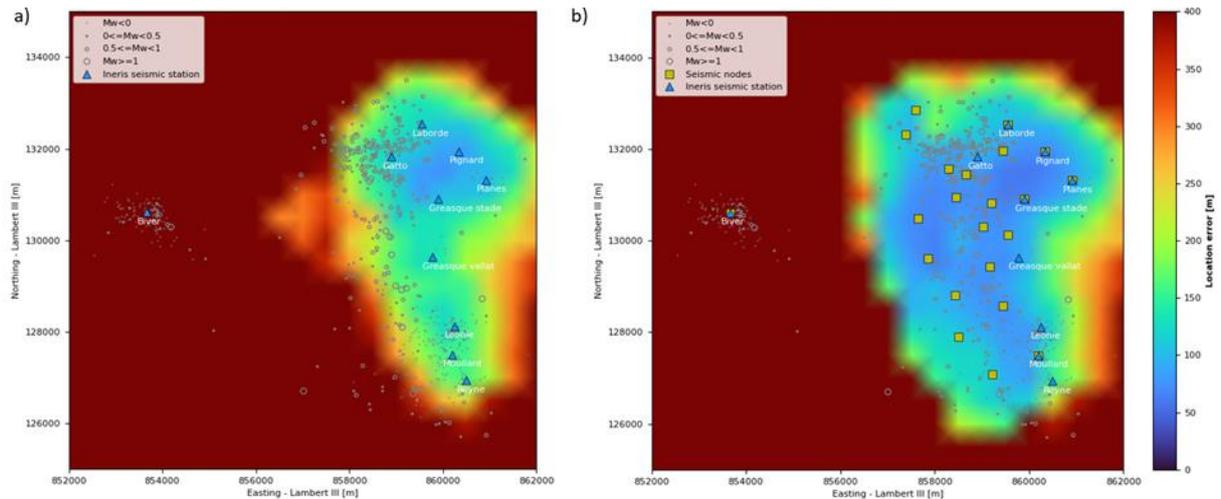


Figure 28 : Carte d'erreur de localisation maximale avec un niveau de confiance de 95 % pour les événements microsismiques (M_w -2) se produisant à $Z = -500$ m en considérant a) le réseau sismique actuel et b) le réseau sismique incluant les nodes sismiques. La sismicité représentée s'étend de janvier 2022 à octobre 2023.

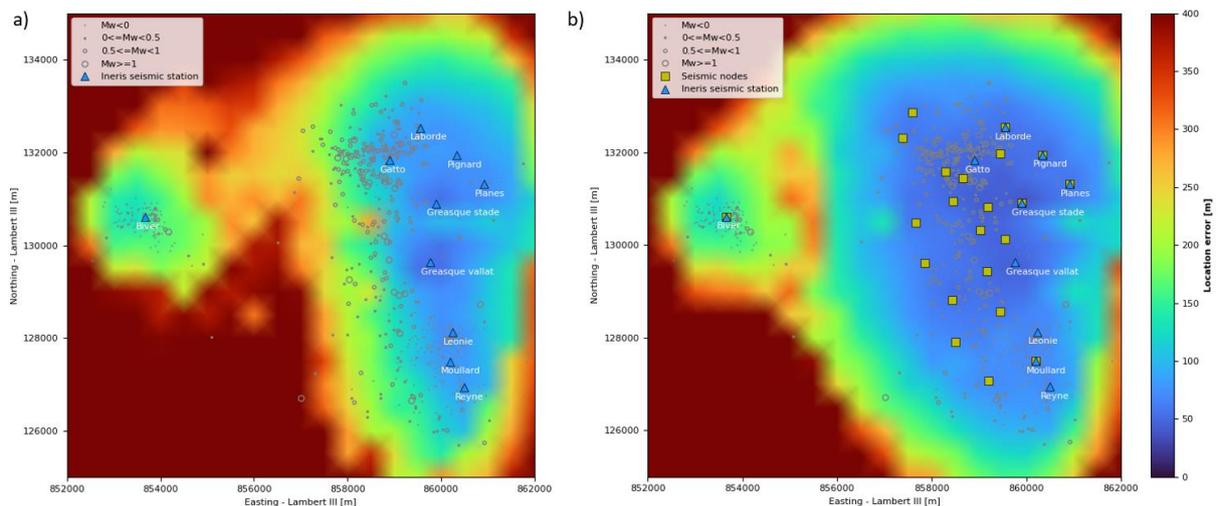


Figure 29 : Carte d'erreur de localisation maximale avec un niveau de confiance de 95 % pour les événements microsismiques (M_w -1) se produisant à $Z = -500$ m en considérant a) le réseau sismique réel et b) le réseau sismique incluant les nodes sismiques. La sismicité s'étend de janvier 2022 à octobre 2023

6.3 Synthèse des résultats et suites envisagées

Le parc de nodes sismiques acquis par l'Ineris en 2023 a été pris en main en laboratoire puis déployés pendant trois mois sur le site de Gardanne.

Les simulations numériques réalisées montrent que les nodes sismiques peuvent contribuer à minimiser considérablement l'erreur de localisation et ainsi être plus précis sur toute analyse sismique, notamment pour l'analyse de l'origine de la sismicité. De plus, les nodes peuvent enrichir notre catalogue de données et notre compréhension des sources sismiques.

Durant la période de déploiement des capteurs, l'activité sismique à l'échelle du bassin était faible (aucun événement fort enregistré). Cela dit, **les données acquises** (les enregistrements sont continus sur les 3 mois) **pourront servir de base de référence dans le cadre d'une prochaine campagne de mesure dans le bassin**, par exemple pour étudier l'évolution du bruit de fond sismique dans le temps et en tirer des enseignements sur les performances de détection et localisation.

7 Conclusions

Le bassin de Gardanne fait l'objet d'une surveillance microsismique depuis 2008 de façon à détecter les signes précurseurs à un affaissement cassant sur les zones définies à risque à la suite des études d'aléa menées par GEODERIS en 2003. Ces zones ont été révisées en 2016, ce qui a conduit à modifier en 2023 la configuration du réseau de surveillance. Cette révision s'est traduite par l'ajout de 2 stations de surveillance à l'est, et s'est accompagnée début 2024 du déclassement de 3 stations au sud, l'aléa dans le secteur concerné ayant été supprimé.

Depuis le démarrage de la surveillance microsismique en 2008, aucun affaissement n'a affecté les zones de surveillance et près de 3 900 événements d'une magnitude locale comprise entre $-3 < M_L < 3$ ont été enregistrés. Un secteur en particulier, dit de l'essaim de Fuveau, situé hors des zones de surveillance et donc hors des zones d'aléa mouvement de terrain, attire l'attention depuis 2012 car il a fait l'objet de plusieurs épisodes sismiques ressentis en 2010, 2012, 2014, fin 2016 - début 2017, août 2017 et très récemment en mai 2024¹.

De nombreuses études ont été menées ces dernières années pour comprendre l'origine de cette sismicité hors zone. Elles montrent que la sismicité de l'ensemble du bassin est étroitement liée aux variations du niveau d'eau souterrain, maintenu artificiellement par pompage. Les travaux de recherche menés dans cette étude valident et enrichissent la synthèse des connaissances établie en 2021 par Kinscher et al. Ils apportent également des enseignements nouveaux :

- L'analyse en multiplets des données acquises par les stations du réseau de surveillance montre qu'une partie de la sismicité détectée en et aux alentours des zones de surveillance 1 et 3 trouve son origine dans la réactivation de failles tectoniques. Cette conclusion s'appuie sur le fait que la localisation des multiplets est en accord avec l'orientation des failles principales cartographiées dans les zones étudiées et que les événements les plus forts appartiennent aux multiplets identifiés ;
- Pour ce qui concerne le secteur de l'essaim de Fuveau, l'analyse des mécanismes aux foyers met en évidence des mécanismes de rupture en faille normale, ainsi que des mécanismes de compaction des terrains. Ces résultats sont corroborés par une subsidence de 50 mm observée à partir des satellitaires sur la période 2015 – 2020.

L'ensemble des résultats acquis nous amènent à recommander la réactualisation de la liste des aléas post-miniers de façon à prendre en compte la sismicité qui peut survenir après la fermeture et l'ennoyage des mines par remobilisation de failles géologiques préexistantes. Cette réactualisation doit également s'accompagner de la révision du guide d'Évaluations des aléas post-miniers édité en 2018 par l'Ineris (Franck et al., 2018) et d'une redéfinition du réseau de surveillance microsismique en place et de ses objectifs. Les événements récents de mai 2024¹ plaident également en faveur de l'évolution de la doctrine existante en la matière.

Les travaux réalisés portent aussi sur la mise au point de nouveaux outils pour mieux évaluer et quantifier l'impact des secousses sismiques en surface. Ils concernent l'implémentation d'une fonctionnalité accessible par le portail web e.cenaris pour éditer des cartes interactives de mouvement du sol et d'intensité macrosismique en cas d'événement fort ($M_L \geq 1,8$). L'édition de ces cartes s'appuie sur une équation de prédiction des mouvements du sol (GMPE) établie pour le site de Gardanne. Cependant, cette GMPE présente certaines limites et incertitudes, dues principalement au manque de mesures des mouvements de surface du sol, notamment pour les petites magnitudes ($M_w < 0,3$) et aux différentes conditions de site à l'échelle du bassin (les mesures utilisées pour la calibrer concernent principalement le secteur de l'essaim de Fuveau). Une étude de sensibilité de la GMPE doit donc être menée et cette GMPE devra être recalibrée périodiquement, après l'occurrence d'événements forts.

¹ La crise de mai 2024 avec plusieurs événements ressentis entre le 1^{er} et le 13 mai est trop récente pour être présentée en détails ici.

8 Références

- Caprio, M., Tarigan, B., Worden, C. B., Wiemer, S., & Wald, D. J. (2015). Ground motion to intensity conversion equations (GMICEs): A global relationship and evaluation of regional dependency. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(3), 1476-1490.
- Contrucci, I., Namjesnik, D., Niemz, P., Primo, P., Kotyrba, A., Mutke, G., Konicek, P., Dominique, P., Rudolph, T., Mollerherm, S., Kinscher, J., Klein, E. and Cesca, S., 2023, European feedback on post-mining seismicity. *Journal of Sustainable Mining*, 22: 195-218.
- Contrucci, I., et Klein, E., 2017, Etat des connaissances concernant les aléas et les risques liés à la sismicité anthropique, [DRS-17-149681-07390D](https://doi.org/10.1007/s10230-022-00860-z).
- De Santis, F., Matrullo, E., Bernard, P. & Niström, A. (2017). Evaluation of microseismic array performances: case study of. In RaSim9: Proceedings of the 9th Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines.
- Dominique P., Aochi H., Morel J. (2022): Triggered seismicity in a former flooded coal mining basin (Gardanne area). 2022 in Mine Water and the Environment. <https://doi.org/10.1007/s10230-022-00860-z>.
- Driad-Lebeau, L., (2005), Expérimentation de calage microsismique sur le site de Rocher Bleu (Fuveau, Provence), Ineris DRS-05-48250/RN02.
- Durrheim, R.J., Anderson, R.L., Cichowicz, A., Ebrahim-Trollope, R., Hubert, G., Kijko, A., McGarr, A., Ortlepp, W.D., Van der Merwe, N., The Risks to Miners, Mines and the Public Posed by Large Seismic Events in the Gold Mining Districts of South Africa, Chapter 4 in Challenges in Deep and High Stress Mining, Y Potvin, J Hadjigeorgiou and D Stacey (editors), Australian Centre for Geomechanics, pp. 33-40. . 2007.
- Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., Xu, X., et al., 1996. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise, in KDD'96: Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 226–231.
- Franck, C., Salmon, R., Didier, C., Paquette, Y., Pokryszka, Z., 2018, Évaluation des aléas miniers, Ineris 17-164640-01944A.
- Foulger, G. R., Wilson, M. P., Gluyas, J. G., Julian, B. R., & Davies, R. J. (2018). Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*, 178, 438-514.
- Gehl, P., Dominique, P., Aochi, H., Delatre, M., Kinscher, J. and Contrucci, I., 2024, Development of an empirical ground-motion model for post-mining induced seismicity near Gardanne, France. *Journal of Sustainable Mining*, 23: 98-117.
- Geller, R. J., & Mueller, C. S., 1980. Four similar earthquakes in central California. *Geophysical Research Letters*, 7(10), 821–824. <https://doi.org/10.1029/GL007i010p00821>
- Geoderis (2003), Expertise internationale du dossier d'arrêt définitif des travaux des concessions de Gardanne (13). Rapport Geoderis 03-PACA-5001R03, octobre 2003Rep.
- Geoderis (2016), Bassin de lignite de Provence (13) Révision et mise à jour des aléas liés à l'ancienne activité minière, S-2016/004DE-16PAC22070.Rep.
- Goldbach, O. What is the seismic risk of mine flooding. in CSIR 3rd Biennial Conference 2010. Science Real and Relevant. 2010. Pretoria, South Africa.
- Haessler H., Hoang-Trong P., Legros Y. (1985). L'événement sismique du 19 février 1984 en Provence occidentale : séisme tectonique ou coup de terrain minier ? P. Melchior (ed.), *Seismic Activity in Western Europe*, 223—232. D. Part of the NATO ASI Series book series (ASIC, volume 144). Reidel Publishing Company. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-5273-7_18 [in French].
- Heimann, S., Isken, M., Kühn, D., Sudhaus, H., Steinberg, A., Vasyura-Bathke, H., Daout, S., Cesca, S., and Dahm, T., 2018. Grond – A probabilistic earthquake source inversion framework, <https://doi.org/10.5880/GFZ.2.1.2018.003>
- Heimann, S., Vasyura-Bathke, H., Sudhaus, H., Isken, M. P., Kriegerowski, M., Steinberg, A., and Dahm, T., 2019. A Python frame-work for efficient use of pre-computed Green's functions in seismological and other physical forward and inverse source problems, *Solid Earth*, 10, 1921–1935, <https://doi.org/10.5194/se-10-1921-2019>

- Hupé, C., 1999, Identification des mécanismes de rupture des événements microsismiques induits par une exploitation minière : approche méthodologique, Thèse de doctorat en Génie civil, hydrosystèmes, géotechnique, Université de Lorraine
- Kinscher, P., Gombert, I., Contrucci, and A. Thoraval (2021), Origine de l'essaim sismique de Fuveau et son lien avec l'envoyage des anciens travaux miniers du bassin de Gardanne : Apport des analyses sismique, hydrogéologique et géomécanique. Ineris - 201216 - 2215842 - v1.0
- Kinscher, J., Watelet, J.-M., Contrucci and I., Klein, E., 2017. Origine de la sismicité post-minière du bassin houiller de Gardanne : apport de l'analyse des mécanismes à la source de l'essaim sismique de Fuveau. Rapport. DRS-17-164272-00556A.
- Kinscher, J. (2015), The analysis and interpretation of microseismicity induced by a collapsing solution mining cavity, thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- Kinscher, J., P. Bernard, I. Contrucci, A. Mangeney, J. P. Pigué, and P. Bigarre (2015), Location of microseismic swarms induced by salt solution mining, *Geophys. J. Int.*, 200(1), 337-362, doi:10.1093/gji/ggu396.
- Namjesnik, D., 2021, [Origine de la sismicité observée dans le bassin houiller abandonné de Gardanne et son lien avec l'envoyage des travaux miniers](#), thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- Namjesnik, D., Kinscher, J., Contrucci, I. and Klein, E., 2022, Impact of past mining on public safety: seismicity in area of flooded abandoned coal Gardanne mine, France. *International Journal of Coal Science & Technology*, 9.
- Namjesnik, D., Kinscher, J., Gunzburger, Y., Poiata, N., Dominique, P., Bernard, P. and Contrucci, I., 2021, Automatic detection and location of microseismic events from sparse network and its application to post-mining monitoring. *Pure and Applied Geophysics*, 178: 2969-2997.
- Niederhuber, T., Rische, M., Röckel, T., Müller, B., & Schilling, F. (2023). Flooding Induced 1312 Seismicity in the Ruhr Area – a geomechanics numerical modelling approach. EGU23-1313 15990. EGU General Assembly 2023 (24-28.04.2023), Vienna. 1314 <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-15990>.
- Petersen, G. M., Niemz, P., Cesca, S., Mouslopoulou, V., & Bocchini, G. M., 2021. Clusty, the waveform-based network similarity clustering toolbox: Concept and application to image complex faulting offshore Zakynthos (Greece). *Geophysical Journal International*, 224(3), 2044–2059. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa568>
- Poiata, N., Satriano, C., Vilotte, J.-P., Bernard, P., & Obara, K., 2016. Multiband array detection and location of seismic sources recorded by dense seismic networks. *Geophysical Journal International*, 205, 1548–1573. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw071>
- Poiata, N., Vilotte, J.-P., Bernard, P., Satriano, C., & Obara, K., 2018. Imaging different components of a tectonic tremor sequence in southwestern Japan using an automatic statistical detection and location method. *Geophysical Journal International*, 213, 2193–2213. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy070>
- PostMinQuake, 2022, Deliverable D.5.3: Synthesis on Ground motion prediction equation (GMPE).
- Rische, Martina & Fischer, Kasper & Friederich, Wolfgang. (2023). FloodRisk – Induced seismicity by mine flooding – Observation, characterisation and relation to mine water rise in the eastern Ruhr area (Germany). *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*. 173. 10.1127/zdgg/2023/0346.
- Senfaute, G. 1995. La surveillance microsismique de l'exploitation souterraine du charbon aux Houillères de Provence: Contribution à la détection des risques de coups de terrains par écoute microsismique. Doctoral thesis, INPL, Lyon.
- Wang, R., 1991. A simple orthonormalization method for stable and efficient computation of Green's functions, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 89, 733–741.
- Zanini, M-A., Hofer, L., Faleschini, F., 2019, Reversible ground motion-to-intensity conversion equations based on the EMS-98 scale, *Engineering Structures*, Volume 180, Pages 310-320, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.032>.

Annexes

Liste des annexes :

- Annexe 1 : méthode d'analyse en multiplets des données sismiques du réseau permanent
- Annexe 2 : méthode d'analyse en multiplets des données sismiques du réseau de recherche
- Annexe 3 : méthode d'inversion du tenseur des moments pour le calcul des mécanismes au foyer à partir des données sismiques du réseau de recherche
- Annexe 4 : Equation de prédiction du mouvement du sol (GMPE) pour le site de Gardanne et échelle d'intensité
- Annexe 5 : phase de test des nodes sismiques
- Annexe 6 : catalogue des multiplets en zones 1 et 3

Annexe 1 : méthode d'analyse en multiplets des données sismiques du réseau permanent

Pour regrouper des évènements en famille, cette étude ne se base uniquement sur les coefficients de corrélation. C'est à ce jour l'outil mathématique le plus efficace. La qualité des résultats va donc dépendre majoritairement du filtrage et du découpage des traces. On définit le coefficient de corrélation dans la formule suivante (la longueur des traces étant finie, la formule de cross-corrélation est donnée pour des données discrétisées) :

$$CC_{f,g} = \max \left(\frac{(f * g)(\tau)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N f(t_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N f(g_i)^2}} \right) \quad \text{où} \quad (f * g)(\tau) = \sum_{i=1}^N f(t_i)g(t_i + \tau) \quad (6)$$

Le coefficient de corrélation entre les deux évènements est défini comme la moyenne des coefficients de corrélation sur les trois composantes spatiales (X, Y et Z). Pour une composante donnée, le coefficient de corrélation est défini comme le maximum de la cross-corrélation entre les signaux d'une même composante de deux évènements. Pour chaque couple d'évènements, on calcule le coefficient de corrélation et on représente l'ensemble de ces coefficients dans une matrice de corrélation en Figure 30 (gauche).

$$CC_{ev_1, ev_2} = \frac{CC_{ev_1, ev_2}^Z + CC_{ev_1, ev_2}^Y + CC_{ev_1, ev_2}^X}{3} \quad (7)$$

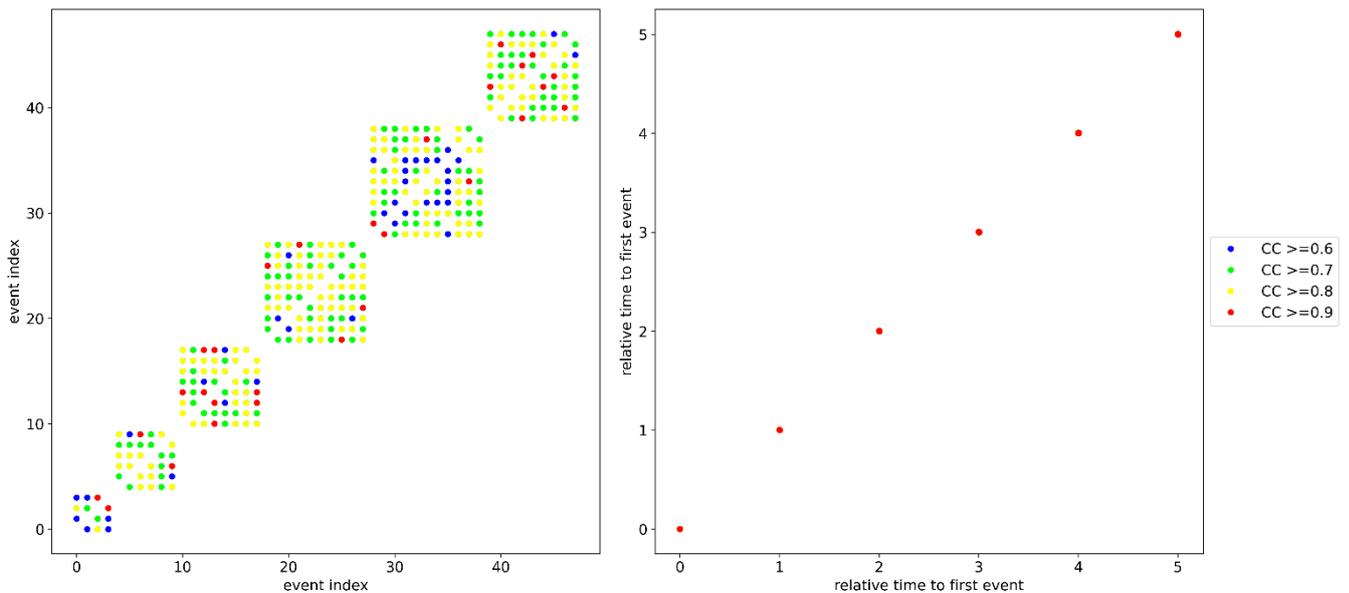


Figure 30 : (Gauche) Matrice de corrélation des traces synthétiques obtenue après l'analyse en multiplets (Droite) Matrice de corrélation des traces synthétiques représentées dans le temps et relativement au premier évènement. Les coefficients de corrélation supérieurs à 0.6 sont représentés dans la matrice par des points bleus, ceux supérieurs à 0.7 en vert, à 0.8 en jaune et à 0.9 en rouge. Les coefficients de corrélation égaux à 1 (sur la diagonale, les coefficients calculés par autocorrélation) ne sont pas affichés.

On constate sur la Figure 30 (gauche) une similarité entre les deux matrices de corrélation et que les 6 familles sont parfaitement identiques (l'indexation des évènements est identique pour faciliter la comparaison). On peut également noter que la répartition en temps des familles synthétiques est correcte. Par conséquent, la méthode utilisant la cross-corrélation fonctionne.

En pratique, il faut prendre en compte que le seuil de corrélation pour déterminer l'appartenance d'un évènement dans une famille n'est pas connu. Il doit être choisi de manière subjective en fonction de la pertinence des résultats et peut varier entre les zones d'étude. Afin de nous aider pour faire le choix du seuil de corrélation à chaque analyse, il est intéressant d'observer la variation des résultats en fonction

du seuil de corrélation. On effectue alors l'analyse en multiplets pour des seuils de corrélation différents (0.5 à 0.95 inclus avec un pas de 0.05). Les résultats de cette expérience sont affichés sur la Figure 31.

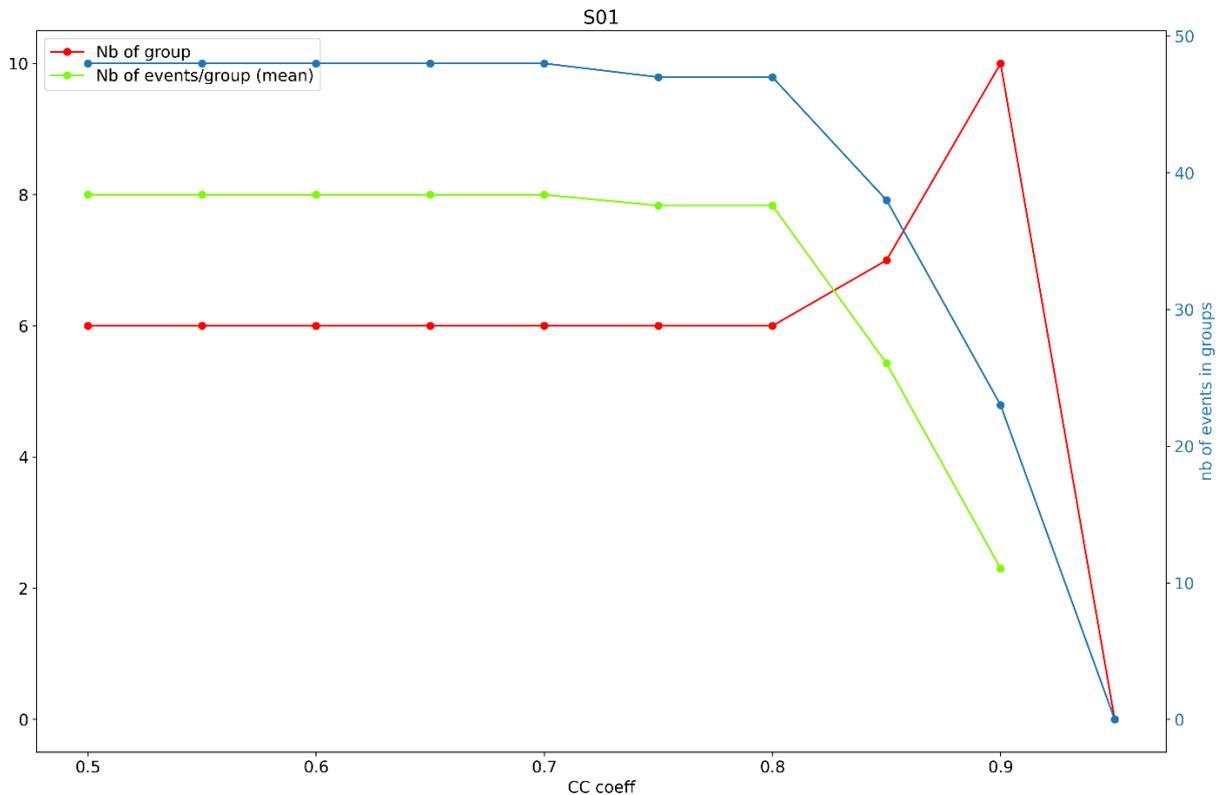


Figure 31 : Nombre de familles (rouge), Nombre d'évènements regroupés dans des familles (bleu) et le nombre d'évènements moyen par famille (vert) en fonction du seuil de corrélation.

Pour un seuil qui augmente, on constate comme attendu que le nombre d'évènements classés dans des familles diminue car augmenter le seuil durci les conditions d'appartenance des familles. On constate également que le nombre de famille augmente et donc que le nombre d'évènements moyen par famille diminue car certaines familles se séparent en sous-familles. Lorsque le seuil tend vers 1, les évènements sont considérés indépendants et ne constitue aucune famille étant donné que notre population de synthétiques se veut réaliste sur le fait qu'aucun évènement ne peut être purement identique. On peut observer l'évolution de chaque famille pour différents seuils de corrélation dans la Figure 31.

Pour un seuil qui diminue, on observe les phénomènes contraires, avec des familles qui se regroupent et pour un seuil qui tend vers -1, l'ensemble des évènements sont regroupés en une unique famille.

Le regroupement d'évènements en famille permet ensuite de les associer à des phénomènes physiques définis comme sources sismiques. Il est donc important que les traces sismiques soient suffisamment corrélées pour que les résultats soient physiquement exploitables. Il faut choisir également un seuil de corrélation qui minimise le nombre de famille dont la taille est inférieure à 3 éléments pour que les familles soient représentatives et que cela évite d'associer un processus sismique différent ou source sismique sans le/la dimensionner.

Dans le cas de synthétiques, l'obtention des multiplets dépend uniquement du seuil de corrélation. Les signaux synthétiques ne prennent pas en compte la physique c'est-à-dire que les évènements ont un contenu fréquentiel et une durée purement identiques entre eux. Ces paramètres vont donc être des facteurs qui vont avoir une influence sur les résultats.

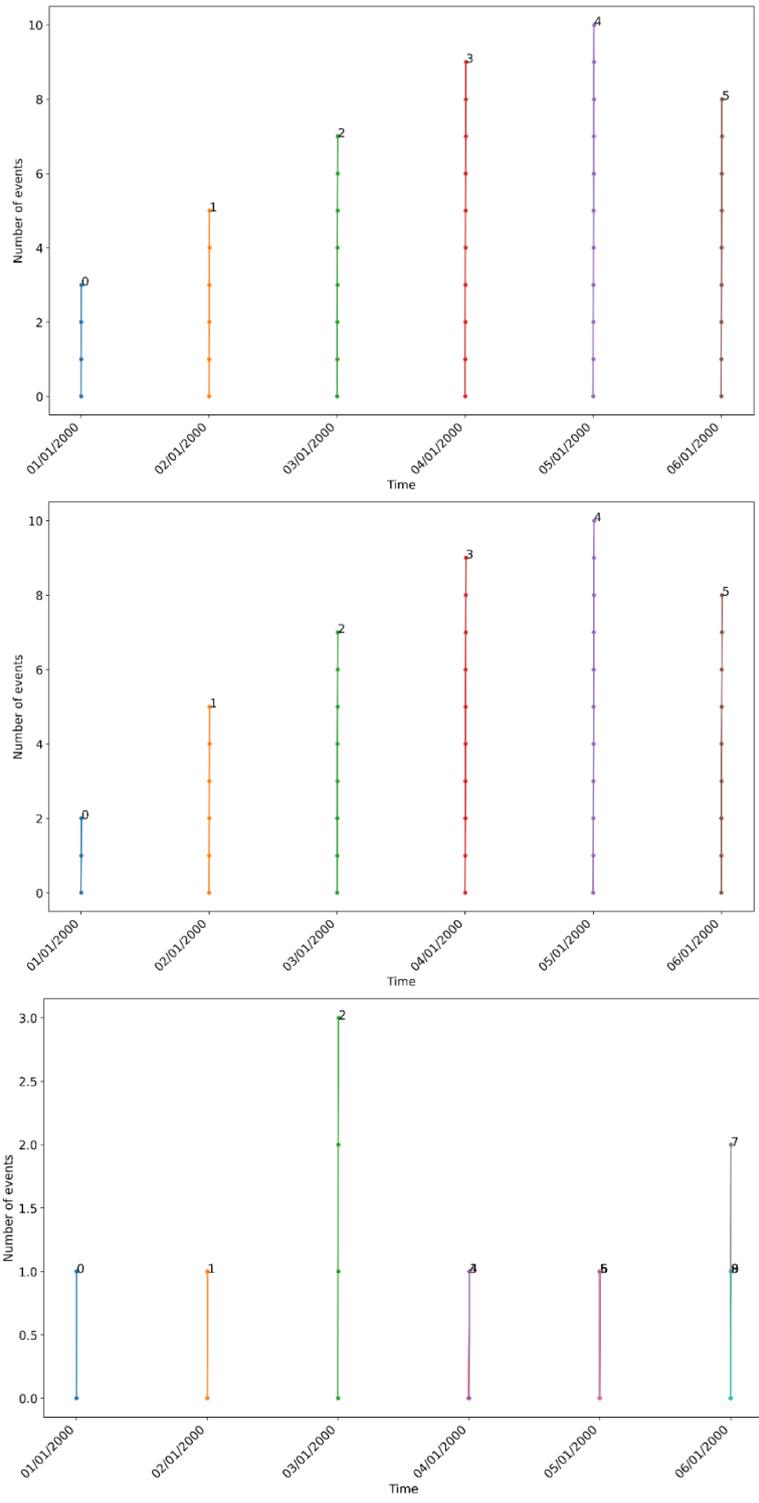


Figure 32 : Répartition des évènements synthétique en temps pour chaque famille représentée de couleurs différentes pour des seuils de corrélation de 0.7 (haut), 0.8 (milieu), 0.9 (bas).

Annexe 2 : méthode d'analyse en multiplets des données sismiques du réseau de recherche

La boîte à outils *Clusty* d'analyse de clustering, développée par le GFZ, a été utilisée pour étudier la formes des ondes des signaux (Petersen et al., 2021). Cela a permis d'identifier des groupes d'événements similaires dans le catalogue de 2014 à 2017 et d'analyser les 154 événements plus récents enregistrés en 2019 et 2020. La similarité des formes d'onde sur plusieurs stations constitue une mesure conjointe robuste de la similarité du mécanisme au foyer et de la localisation de la rupture (Geller et Mueller, 1980).

L'analyse relative des paires d'événements annule les effets de l'instrument et du trajet événement-récepteur - par exemple, les détails inconnus de la structure de vitesse dans le sous-sol - tant que les événements sont proches les uns des autres et relativement éloignés du récepteur. Une bande passante plus élevée (3-7 Hz) a été utilisée ainsi que des fenêtres temporelles plus longues (2,2 s) pour obtenir une meilleure résolution des petites différences entre les formes d'onde et inclure des événements plus petits avec des incertitudes de localisation plus élevées.

L'approche multi-station de la boîte à outils *Clusty*, incluant les similitudes de formes d'onde de plusieurs stations, produit des résultats plus robustes et, aussi plus sensibles qu'une analyse réalisée à station unique grâce à un meilleur échantillonnage de la sphère focale.

La migration d'événements le long d'une faille active, avec un changement de localisation de l'événement, modifiera progressivement les formes d'onde enregistrées à une station donnée. Nous exploitons ce changement progressif pour la cartographie des failles en le suivant avec un algorithme de clustering en chaîne (DBSCAN, Ester et al., 1996).

Annexe 3 : méthode d'inversion du tenseur des moments pour le calcul des mécanismes au foyer à partir des données sismiques du réseau de recherche

Le tenseur des moments (MT) a été calculé pour des événements enregistrés en 2019 à l'aide de l'outil probabiliste d'inversion de forme d'onde complète *Grond* (Heimann et al., 2018) développé par le GFZ. Cet outil permet une combinaison de différents types de données d'entrée. Pour l'inversion des événements induits par l'envoyage des travaux souterrains, les amplitudes spectrales des sismomètres et des accéléromètres ainsi que les traces correspondantes en vitesse et accélération (Z, R et T, respectivement) ont été utilisés comme données d'entrée (Petersen et al., 2021).

La fenêtre temporelle a été réglée de manière asymétrique (-0,15 / 0,85 s) autour de l'arrivée théorique de l'onde P, calculée lors du processus de localisation (section 4.2.1) sur la base d'un modèle de vitesse homogène avec une vitesse P de 3 900 m/s. La présence possible d'une couche de mine à faible vitesse de quelques mètres n'influence pas l'inversion MT dans la gamme de fréquence choisie entre 1 et 5 Hz. Le réglage du filtre a été choisi après une inspection visuelle des formes d'onde.

La Figure 33 présente un exemple de résultat obtenu. Les stations contributrices du réseau de recherche sont situées à moins de 3 km du nuage de sismicité. Outre le tenseur des moments, la profondeur de l'événement et l'heure d'origine sont également inversées et les incertitudes détaillées pour ces paramètres sont également calculées. Les fonctions de Green, utilisées pour produire des formes d'onde synthétiques au sein de l'inversion, ont été calculées à l'aide du code *qseis* de Wang (1991) tel qu'implémenté dans le logiciel *fomosto* (Heimann et al., 2019).

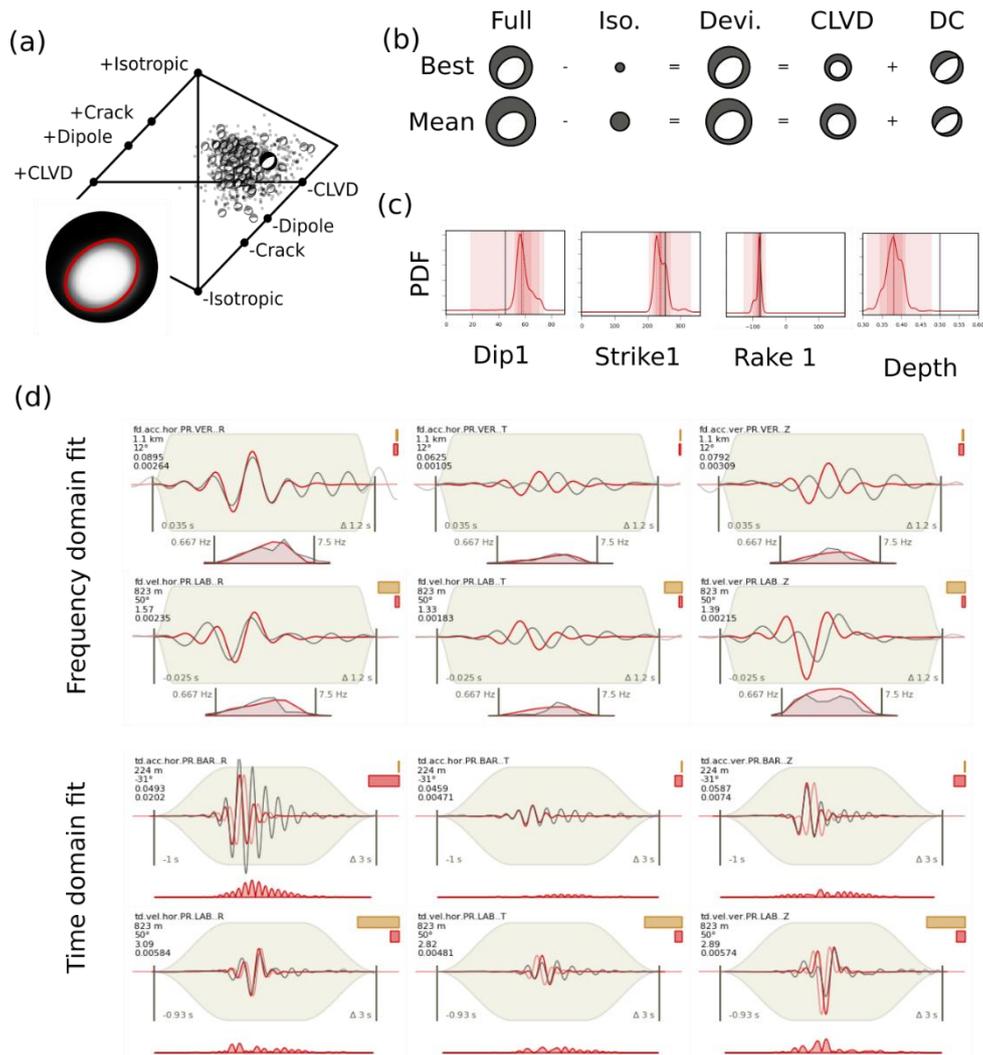


Figure 33 : Exemple de résultat d'une inversion probabiliste complète du tenseur des moments pour l'événement $M_w 0.25$ (catalogue $M_L - 0.9$) du 12 juin 2019 à 01h45. Les incertitudes sont visualisées par 101 solutions d'ensemble. (a) Le tracé d'Hudson montre l'incertitude dans la contribution des composants non DC (voir également la légende de la figure 8). Le « MT flou » dans l'encadré montre les beach balls empilés de l'ensemble et la meilleure solution en rouge. (b) Décomposition MT en composante isotrope, CLVD et DC, pour la moyenne des solutions d'ensemble et la meilleure solution. Des solutions meilleures et moyennes similaires indiquent une inversion stable. (c) Fonctions de densité probabilistes (PDF) pour la direction, le pendage, l'inclinaison et la profondeur. Les pics focalisés indiquent une inversion stable. (d) Exemples de spectres d'amplitude et d'ajustements de forme d'onde (RTZ).

Annexe 4 : Equation de prédiction du mouvement du sol (GMPE) pour le site de Gardanne et échelle d'intensité

Les GMPE existantes pour les séismes tectoniques ne sont pas applicables aux séismes induits, en particulier dans les zones où la sismicité induite se produit à faible profondeur et est associée à une atténuation particulière des ondes. Une GMPE a été développée spécifiquement pour le site minier de Provence. Les mouvements du sol observés à des distances hypocentrales comprises entre 0,4 et 8 km pour des séismes de magnitude de moment comprises entre 0,3 et 1,7 ont été utilisés pour établir la GMPE (PostMinQuake, 2022).

La forme simplifiée de cette GMPE est :

$$PGV(R_{hyp}, M_w) = -0.443 + 0.994M_w + 0.088M_w^2 - 2.429 \log_{10}(R_{hyp}) - 0.026R_{hyp} \quad (1)$$

$$PGA(R_{hyp}, M_w) = -2.562 + 0.967M_w + 0.109M_w^2 - 2.021 \log_{10}(R_{hyp}) - 0.028R_{hyp} \quad (2)$$

où M_w est la magnitude du moment, R_{hyp} est la distance hypocentrale en km, PGV et PGA sont respectivement le « Peak Ground Velocity » en cm/s et le « Peak Ground Acceleration » en mg/s.

La Figure 34 montre les PGV estimés à partir de la GMPE en fonction de R_{hyp} pour différents M_w . Il convient de noter que sur de courtes distances ($R_{hyp} < 0.4$ km), la GMPE semble surestimer le mouvement du sol pour $M_w \geq 1$. Par exemple, un événement de magnitude $M_w 2$ devrait produire un $PGV > 10$ cm/s pour $R_{hyp} < 0.4$ km.

Ceci pourrait s'expliquer par l'absence d'observations à courte distance et pour $M_w > 1.7$, conduisant à une moins bonne adéquation de la loi en dehors de ces limites. En conséquence, pour $M_w \geq 1$ et pour de courtes distances ($R_{hyp} < 0.4$ km), les valeurs estimées du mouvement du sol doivent être prises avec prudence. Pour prendre en compte un effet de saturation de l'atténuation proche de la source (i.e. à courtes distances), les Eq. 1 and 2 peuvent être modifiées en intégrant un terme r tel que :

$$PGV(R_{hyp}, M_w) = -0.443 + 0.994M_w + 0.088M_w^2 - 2.429 \log_{10}(R_{hyp} + r) - 0.026(R_{hyp} + r) \quad (3)$$

$$PGA(R_{hyp}, M_w) = -2.562 + 0.967M_w + 0.109M_w^2 - 2.021 \log_{10}(R_{hyp} + r) - 0.028(R_{hyp} + r) \quad (4)$$

La Figure 34 montre l'impact sur le PGV estimé de l'intégration de l'effet de saturation en considérant $r = 0.4$ km (voir les lignes pointillées). En conclusion cette GMPE n'est pas bien contrainte à faible distance hypocentrale pour des magnitudes du moment supérieures ou égale à 1.

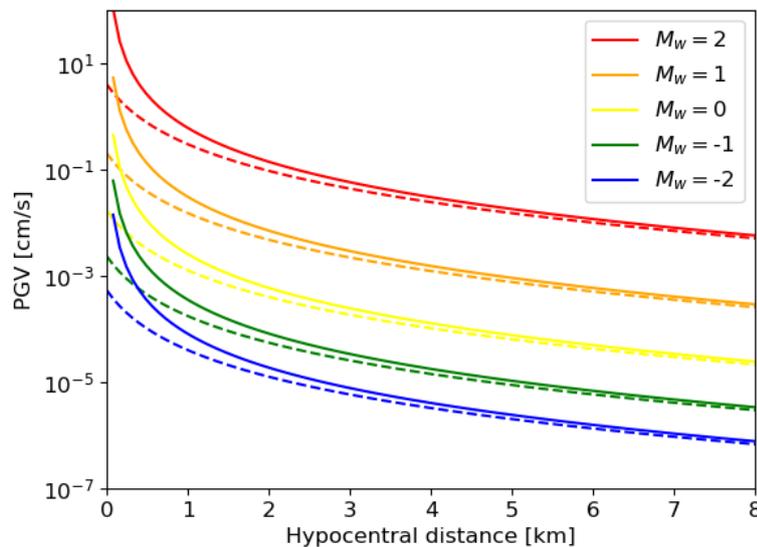


Figure 34 : PGV calculés à partir de la GMPE pour différentes magnitudes de moment M_w . Les lignes pointillées représentent les PGV corrigés sur courte distance ($r = 0,4$).

Dans le cadre du projet RFCS PostMinQuake, une échelle d'intensité a été établie (MSIIS-22, PostMinQuake, 2022) utilisant uniquement des données sismiques induites dans un contexte minier. L'échelle MSIIS-22 comporte 8 degrés de I (non ressenti) à VIII (destructeur).

Nous avons comparé les intensités obtenues avec MSIS-22 avec trois autres échelles, à savoir l'échelle EMS98 (European Macroseismic Scale), l'échelle MMI (Modified Mercalli Intensity) et l'échelle Mercalli – Cancani – Sieberg (MCS). Les échelles EMS98, MMI et MCS ont 12 degrés d'intensité, de I (non ressenti) à XII (catastrophique). Toutes les échelles ci-dessus sont similaires pour les intensités les plus faibles (inférieures à V). Les intensités de ces différentes échelles peuvent être déduites des PGV calculées à partir de la GMPE (voir Eq. 1 ou 2 de l'annexe 4) en utilisant des relations de conversion.

Nous avons utilisé les relations de conversion entre PGV et intensités macrosismiques de Zanini et al. (2019) pour EMS98 et Caprio et al. (2015) pour les échelles MMI et MCS.

Une comparaison de toutes les échelles est présentée sur la Figure 35.

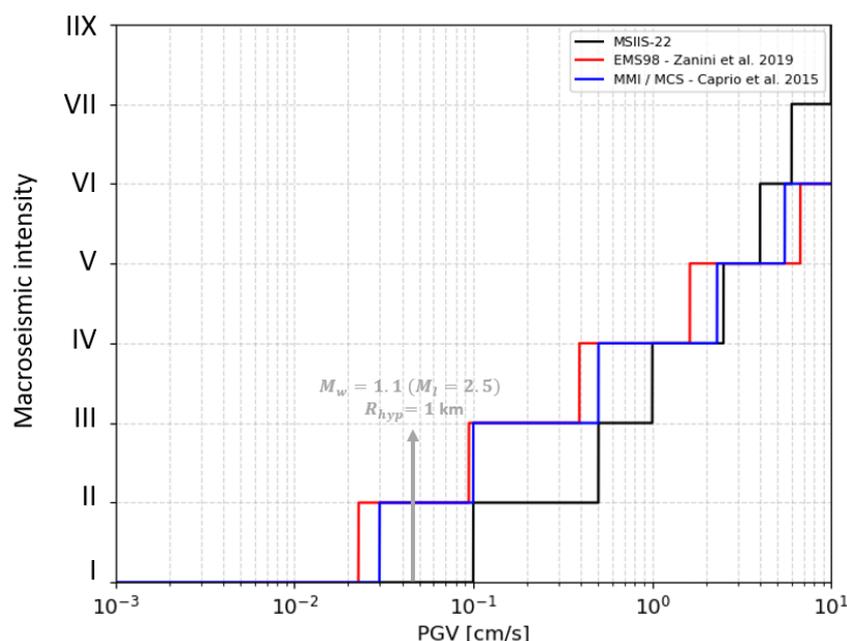


Figure 35 : Comparaison des échelles d'intensités macrosismiques selon la relation de conversion. Les intensités MSIS-22 ont été obtenues en considérant une durée d'événement de 5 s. Le PGV pour l'événement microsismique hypothétique de M_L 2,5 a été obtenu en utilisant la GMPE dans l'équation (1) de l'annexe 4.

La Figure 35 montre que pour les intensités situées entre I et V, l'échelle MSIS-22 sous-estime l'intensité par rapport aux autres échelles pour une même valeur de PGV. Par exemple l'intensité II est atteinte pour un PGV plus fort pour MSIS-22, de l'ordre de 0,5 cm/s, alors que pour les autres échelles, EMS98 et MMI/MCS, il est de l'ordre de 0,1 cm/s. Au-delà de l'intensité V, la tendance s'inverse, l'échelle MSIS-22 surestime l'intensité par rapport aux autres échelles pour une même valeur de PGV.

Autrement dit, pour un PGV de l'ordre de 0,1 cm/s, l'échelle MSIS-22 considère que le mouvement du sol n'est pas ressenti car cela correspond à une intensité de I. Par exemple, un événement microsismique de magnitude locale M_L 2,5 ne serait pas ressenti à une distance hypocentrale de 1 km selon MSIS-22 (Figure 35). Dans le cas de Gardanne, les témoignages de riverains indiquent un ressenti des micro-séismes de magnitude inférieure à M_L 2,5. Cela pourrait probablement dû à un effet de site (présence d'une couche majoritairement calcaire avec une atténuation relativement faible), que MSIS-22 ne prendrait pas en compte.

De plus, les intensités obtenues pour EMS98 et MMI/MCS sont similaires mais EMS98 anticipe légèrement l'intensité supérieure (vrai pour les intensités inférieures à V).

Annexe 5 : Phase de test des nodes sismiques

Objectifs de la phase de test :

Le parc est constitué de 11 nodes sismiques de type 1 et de 11 nodes sismiques de type 2 (Figure 24). Cet ensemble est accompagné d'un boîtier permettant de recharger les batteries et de récolter les données, ainsi qu'un ordinateur pour la configuration des nodes et le post-traitement des données.

Avant tout déploiement sur le terrain, des tests ont été réalisés afin de répondre aux objectifs suivants :

1. Tester le bon fonctionnement des instruments : batterie, capteurs et récolte de données ;
2. Testez le logiciel de post-traitement.

Méthodologie des tests :

Pour la réalisation de ces tests, un protocole a été élaboré pour vérifier si les capteurs 3C répondent tous de manière cohérente à la même source de signal sismique et proportionnellement à la distance et à l'intensité de la source. Deux types de tests ont été réalisés.

1^{er} test : les 22 nodes sismiques ont été placés très proches les uns des autres (moins de 5 cm), et une perturbation du sous-sol a été simulée d'un champ lointain vers un champ proche (3 positions) (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). La perturbation a été créée par la chute d'un poids d'une hauteur d'environ 2,5 m. De plus, avec la distance, l'intensité de la perturbation changeait. Des poids de 4, 10 puis 20 kg ont été utilisés consécutivement.

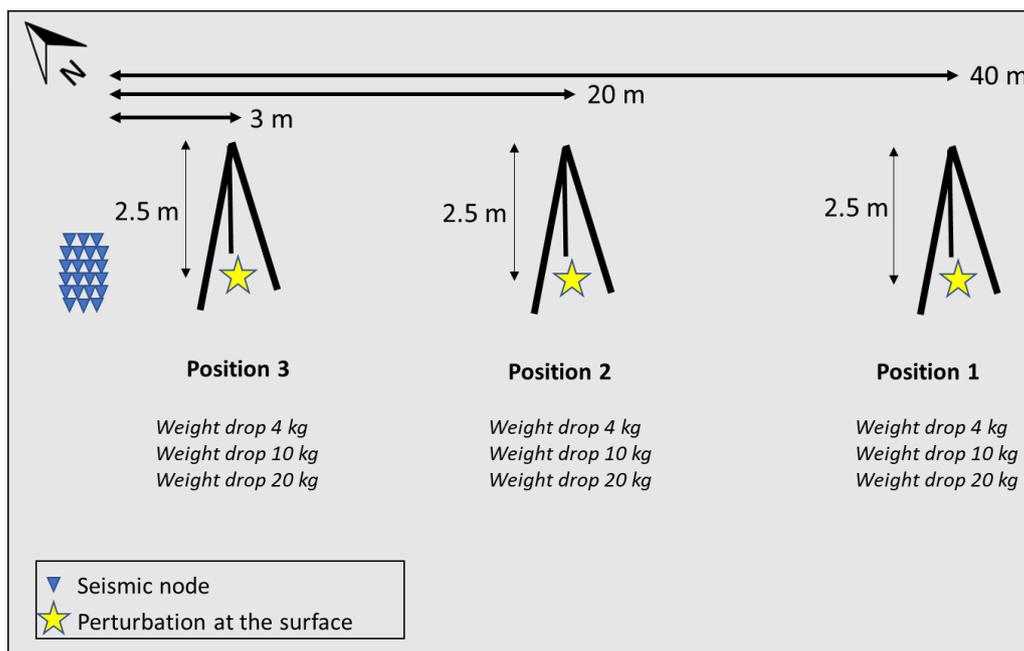


Figure 36 : Schéma du 1^{er} test en laboratoire des nodes sismiques, la masse est larguée d'une hauteur de 2,5 m.

2^{ème} test : les 22 nodes sismiques ont été placés à équidistance autour de la zone de chute de poids et plusieurs poids ont été lâchés au même endroit. Comme lors du test 1, la perturbation a été provoquée par des chutes de poids successives de 4, 10 et 20 kg. La Figure 37 montre le schéma de ce deuxième test.

Ce test a permis de vérifier la précision du GPS intégré en comparant les positions et distances calculées à l'aide des mesures GPS avec les mesures in situ. De plus, comme la perturbation est localisée au centre des 22 nodes, il a également été possible de vérifier si les composants des nodes sismiques étaient capables de détecter l'amplitude polarisée de l'onde P générée par la chute de poids.

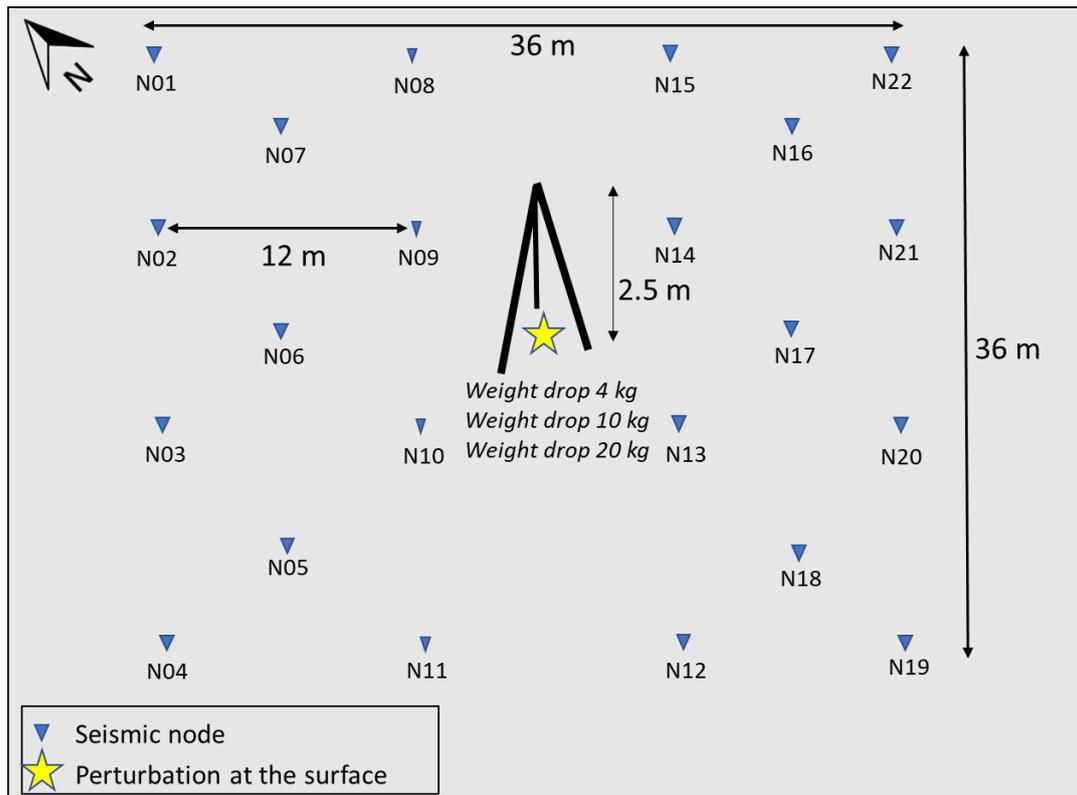


Figure 37 : schéma de la seconde série de test des nodes sismiques.

Résultats de la phase de test :

Nous avons analysé les PGV des traces sismiques des trois composantes des 22 nodes pour chaque chute de poids réalisée lors des deux tests. Les traces sismiques ont été déconvoluées de la réponse instrumentale des capteurs. Aucun filtre numérique n'a été appliqué.

Pour le test 1 nous avons comparé les PGV obtenus sur chacune des 3 composantes en fonction de la chute de poids et de la distance (Figure 38). Nous notons que la variation des PGV calculés est cohérente avec les variations de l'intensité du poids et de la distance. En effet, plus le poids est élevé, plus le PGV est élevé. Il en va de même pour la distance : plus la distance est courte, plus le PGV est élevé. La dispersion des mesures entre les 22 nodes reste tout à fait acceptable, compte tenu des barres d'erreur représentées sur la Figure 38 (le coefficient de variation est globalement de l'ordre de 10 %).

Pour le test 2, nous avons également comparé les PGV sur chaque composante en fonction de la masse du poids et de la distance. Compte tenu de la configuration du réseau, il est possible d'analyser la réponse 3D des capteurs. Pour chaque node sismique (SN) et pour chaque chute de poids ($w = 4, 10, 20$ kg), nous avons calculé le PGV enregistré normalisé par composante ($C = N, E, Z$), $\overline{PGV}_{SN}(C, w)$ comme :

$$\overline{PGV}_{SN}(C, w) = \frac{PGV_{SN}(C, w)}{\sum_{i=4,10,20 \text{ kg}} PGV_{SN}(C, i)} \quad (7)$$

Comme lors du premier test, la réponse en intensité des capteurs était cohérente avec l'intensité de la chute de poids et la distance. De plus, on peut noter une cohérence globale dans la réponse spatiale des capteurs en fonction de leur position. Les nodes dont les composantes sont orientées dans la direction du mouvement du sol (azimut du capteur proche de 0) ont des PGV plus élevés. Par exemple, les PGV calculés sur la composante Nord sont plus élevés pour les nodes placés sur l'axe reliant le Nord et la source de perturbation.

De même, les PGV calculés sur la composante Est sont plus élevés sur les nodes placés sur l'axe reliant l'Est et la source de perturbation. Deux nodes sismiques s'écartent de cette observation (voir les nodes encadrés sur la Figure 39). Cela est probablement dû à une mauvaise orientation de ces deux nodes sismiques ou à un mauvais couplage avec le sol lors de l'expérience. En effet, comme nous n'avons observé aucune anomalie de ces deux nodes sismiques spécifiques lors du test 1 et que les composantes Z ont répondu uniformément autour de la source, il est peu probable qu'il y ait une anomalie au niveau des capteurs ou une hétérogénéité dans le sous-sol.

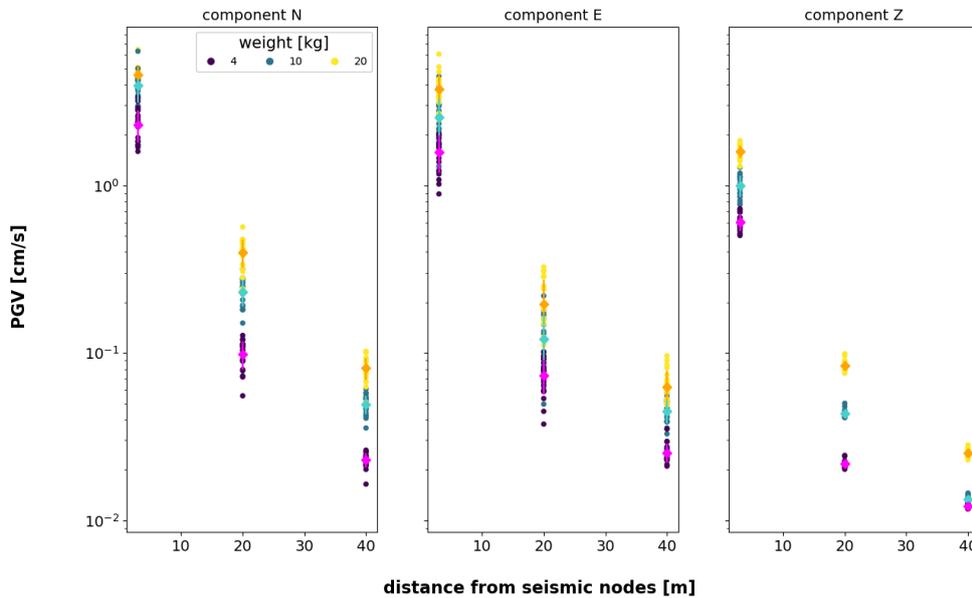


Figure 38 : Vitesse au sol maximale enregistrée (PGV) par les 22 nodes lors du test 2. Les PGV pour 4 kg, 10 kg et 20 kg sont normalisées par composante (voir équation 7).

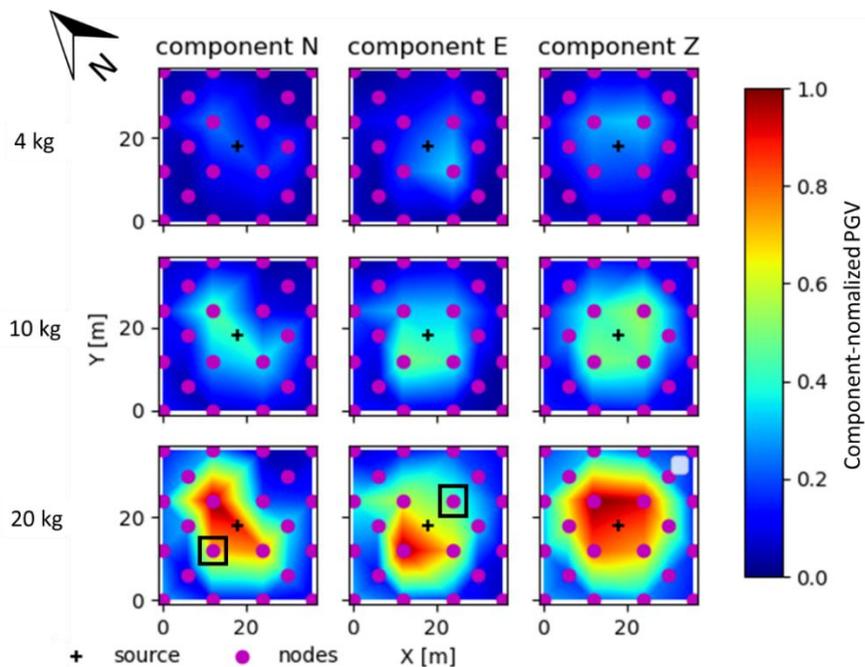


Figure 39 : Vitesse au sol maximale enregistrée (PGV) par les 22 nodes lors du test 2. Les PGV pour 4 kg, 10 kg et 20 kg sont normalisés par composante (voir équation 7). Les PGV des deux nodes sismiques encadrés présentent des anomalies (voir détails dans le texte).

Annexe 6 : catalogue des multipléts

En zone 1 :

Date - Heure	Fichier	X	Y	Z	Magnitude	multipléts
12/01/2008 17:14	080112_17141238.Gar	853894,50	130387,00	-18,75	-0,54	0
29/11/2018 04:12	181129_04124912.Gar	853818,10	130375,10	34,89583	-0,13	0
23/03/2008 17:35	080323_17351445.Gar	853733,40	130162,60	-168,75	0,57	1
25/10/2008 19:39	081025_19390372.Gar	853721,00	130349,60	-193,75	0,7	1
16/02/2009 00:23	090216_00230612.Gar	853745,80	130200,00	-193,75	0,39	1
12/06/2008 16:48	080612_16482559.Gar	853225,10	130673,80	-68,75	-0,39	2
25/06/2010 11:54	100625_11543614.Gar	853212,80	130686,20	-81,25	-0,12	2
04/07/2010 16:34	100704_16345900.Gar	853101,20	130673,80	-118,75	-0,04	2
17/08/2010 03:06	100817_03065362.Gar	853163,20	130736,10	-118,75	0,05	2
31/01/2011 08:26	110131_08265784.Gar	853212,80	130661,30	-56,25	-0,31	2
06/05/2011 10:08	110506_10084313.Gar	853311,90	130636,40	-43,75	-0,29	2
10/04/2012 14:58	120410_14582143.Gar	853188,00	130698,70	-106,25	0,1	2
07/10/2016 19:25	161007_19253721.Gar	853277,80	130658,50	-36,71875	0,23	2
14/01/2022 07:57	220114_07571750_...Gar	853052,80	130737,00	8,618055	0,17	2
09/07/2008 21:39	080709_21395126.Gar	853287,10	130686,20	-68,75	-0,43	3
26/04/2014 09:22	140426_09221787.Gar	853398,70	130649,10	-18,75	0,08	3
11/11/2014 20:01	141111_20013766.Gar	853361,50	130736,40	68,75	-0,13	3
12/04/2015 20:53	150412_20533086.Gar	853324,30	130699,00	11,97917	-0,08	3
23/08/2015 19:10	150823_19100550.Gar	853404,90	130642,90	17,70833	-0,09	3
28/08/2018 09:35	180828_09350133.Gar	853332,20	130437,50	126,5625	0,3	3
22/07/2008 16:17	080722_16175715.Gar	853497,90	130798,40	56,25	0,48	4
21/10/2011 12:21	111021_12211423.Gar	853299,50	130973,00	31,25	0,47	4
06/04/2013 10:17	130406_10173338.Gar	853262,40	130935,90	-6,25	0,42	4
03/12/2015 13:54	151203_13542722.Gar	853311,90	131035,70	23,4375	0,46	4
17/08/2008 02:57	080817_02575923.Gar	853820,10	130399,50	18,75	0,51	5
06/03/2019 14:08	190306_14085975.Gar	853903,10	130287,80	11,97917	0,12	5
15/10/2008 09:44	081015_09443863.Gar	853163,20	130636,40	-81,25	-0,07	6
20/06/2010 06:29	100620_06294509.Gar	853175,60	130673,80	-168,75	0,23	6
22/06/2010 00:54	100622_00542199.Gar	853200,40	130648,80	-68,75	-0,01	6
17/09/2016 06:00	160917_06002284.Gar	853212,80	130624,20	-68,22916	0,34	6
04/11/2008 21:33	081104_21334820.Gar	853807,80	130536,60	6,25	0,19	7
03/06/2011 06:00	110603_06001715.Gar	853931,80	130536,60	-168,75	0,32	7
05/11/2008 15:50	081105_15502134.Gar	853609,40	130175,10	-193,75	0,51	8
21/11/2008 08:21	081121_08215543.Gar	853597,00	130187,50	-193,75	0,51	8
15/11/2008 23:06	081115_23060289.Gar	854353,20	130623,90	-18,75	0,43	9
18/05/2019 09:31	190518_09310664.Gar	854158,30	130450,00	18,23609	0,23	9
07/02/2009 02:17	090207_02174034.Gar	853603,30	130493,00	-112,5	1,26	10
30/08/2010 15:52	100830_15525576.Gar	853200,40	129713,80	-193,75	1,28	10
11/11/2011 13:48	111111_13483413.Gar	853584,60	130474,30	-156,25	1,21	10
24/11/2011 22:44	111124_22442299.Gar	853652,80	130542,90	-12,5	1,11	10
25/11/2011 10:14	111125_10140903.Gar	853628,00	130418,20	-187,5	0,97	10
22/01/2013 23:43	130122_23435042.Gar	853597,00	130362,40	-193,75	1,03	10
27/02/2014 19:55	140227_19551553.Gar	853559,90	130474,60	-181,25	1,15	10
28/02/2014 19:33	140228_19335654.Gar	853628,00	130493,30	-112,5	1,07	10
23/02/2009 18:49	090223_18495089.Gar	853163,20	130349,60	-131,25	1,65	11
19/11/2017 16:25	171119_16250564.Gar	853435,40	130743,20	-5,208333	-0,23	11
21/03/2009 08:23	090321_08234169.Gar	853373,90	130337,10	-193,75	0,3	12
31/03/2009 06:27	090331_06272649.Gar	853324,30	130287,30	-193,75	0,59	12
08/05/2009 06:12	090508_06120481.Gar	853361,50	130349,60	-168,75	0,31	12
17/04/2009 09:33	090417_09332149.Gar	853758,20	130586,50	31,25	-0,36	13
13/05/2009 04:58	090513_04584343.Gar	853944,10	130474,30	-43,75	-0,74	13
24/02/2010 17:03	100224_17031378.Gar	853857,40	130536,60	-6,25	-0,85	13
24/07/2015 06:02	150724_06020393.Gar	853807,80	130561,90	11,97917	-0,31	13
25/10/2019 12:01	191025_12013745.Gar	853805,90	130549,80	7,703906	-0,85	13
10/02/2020 04:46	200210_04465955.Gar	853623,80	130637,20	91,9614	-1,15	13
19/04/2009 12:30	090419_12300712.Gar	853745,80	130200,00	-181,25	0,51	14
05/05/2009 18:06	090505_18063051.Gar	853708,60	130212,50	-143,75	0,45	14
24/05/2009 11:01	090524_11014827.Gar	853770,60	130224,90	-181,25	0,46	14
18/10/2009 23:21	091018_23214779.Gar	853733,40	130212,50	-156,25	0,43	14
20/04/2009 12:03	090420_12030533.Gar	853745,80	130200,00	-193,75	0,44	15
12/05/2009 14:33	090512_14335840.Gar	853807,80	130212,50	-193,75	0,42	15
07/05/2009 03:10	090507_03101242.Gar	853113,60	130474,30	-193,75	0,45	16
09/11/2010 02:56	101109_02560058.Gar	853138,40	130424,40	-193,75	0,31	16
18/12/2011 17:45	111218_17451498.Gar	853324,30	130511,70	-193,75	0,04	16
19/03/2014 16:12	140319_16123992.Gar	853225,10	130437,20	-193,75	0,34	16
28/10/2016 23:11	161028_23113778.Gar	853113,60	130574,30	-79,6875	0,49	16
01/07/2020 05:57	200701_05575245_...Gar	853283,60	130462,50	-63,29961	0,1	16
22/06/2022 21:30	220622_21302455.Gar	853052,80	130499,90	103,1883	0,33	16
15/05/2009 06:10	090515_06100969.Gar	853671,40	130112,70	-193,75	0,65	17
21/06/2009 13:54	090621_13545107.Gar	853683,80	130187,50	-93,75	0,28	17
23/01/2018 18:49	180123_18491809.Gar	853672,30	130200,40	57,8125	0,28	17
09/06/2009 11:18	090609_11182940.Gar	853225,10	130299,80	-193,75	0,06	18
07/07/2009 23:31	090707_23314758.Gar	853249,90	130312,20	-193,75	0,08	18
21/06/2009 07:28	090621_07285486.Gar	853535,10	130711,20	-6,25	0,38	19
15/03/2019 00:37	190315_00370885.Gar	853514,40	130687,10	57,8125	-0,67	19

26/06/2009 04:20	090626_04205668.Gar	853349,10	130436,90	-118,75	0	20
16/07/2009 03:00	090716_03005599.Gar	853336,80	130399,50	-118,75	0	20
23/07/2009 13:08	090723_13080473.Gar	853386,30	130337,10	-81,25	0,3	20
04/08/2009 02:42	090804_02423707.Gar	853361,50	130399,50	-93,75	-0,01	20
19/08/2009 15:59	090819_15593045.Gar	853287,10	130424,40	-131,25	0,04	20
05/07/2009 04:50	090705_04500560.Gar	853584,60	130399,50	56,25	-0,35	21
29/10/2009 14:01	091029_14012702.Gar	853745,80	130761,00	68,75	-0,66	21
07/07/2009 22:55	090707_22553824.Gar	853807,80	130623,90	56,25	0,08	22
28/12/2009 15:53	091228_15535630.Gar	853820,10	130636,40	43,75	0,19	22
20/07/2020 16:11	200720_16111147.Gar	853866,70	130674,60	-54,8666	-0,83	22
09/07/2009 07:42	090709_07420183.Gar	853287,10	130399,50	-106,25	0,03	23
16/07/2009 14:53	090716_14530635.Gar	853311,90	130424,40	-118,75	0,09	23
21/09/2009 23:52	090921_23523104.Gar	853311,90	130412,00	-106,25	0,05	23
18/07/2009 08:35	090718_08350051.Gar	853411,10	130387,00	-118,75	-0,53	24
16/08/2009 22:27	090816_22271436.Gar	853336,80	130287,30	-193,75	0,15	24
12/08/2009 13:34	090812_13340382.Gar	853708,60	130237,40	-56,25	0,26	25
06/02/2010 18:46	100206_18464884.Gar	853733,40	130175,10	-81,25	0,25	25
06/09/2009 07:54	090906_07541274.Gar	853473,10	130387,00	-93,75	-0,64	26
26/09/2009 10:53	090926_10534336.Gar	853460,70	130412,00	-143,75	-0,37	26
02/10/2009 09:22	091002_09223066.Gar	853386,30	130399,50	-93,75	-0,41	26
11/12/2009 01:40	091211_01401479.Gar	853435,90	130412,00	-93,75	-0,06	26
20/10/2009 18:56	091202_18560165.Gar	853795,40	130237,40	-118,75	0,41	27
08/12/2009 20:40	091208_20404410.Gar	853832,60	130249,90	-106,25	0,25	27
15/01/2010 17:38	100115_17381177.Gar	853894,50	130249,90	-93,75	0,67	28
15/03/2010 23:00	100315_23005691.Gar	853944,10	130237,40	-106,25	0,73	28
01/02/2010 02:55	100201_02553632.Gar	854006,10	130698,70	31,25	0,6	29
01/10/2014 11:15	141001_11153485.Gar	854006,10	130724,00	43,75	0,14	29
22/09/2017 18:52	170922_18522027.Gar	854012,50	130712,00	34,89583	0,47	29
29/06/2018 12:37	180629_12371096.Gar	854024,60	130724,50	57,8125	0,27	29
19/07/2018 14:49	180719_14492350.Gar	853939,60	130712,00	149,4792	0,2	29
09/10/2018 02:49	181009_02495497.Gar	853951,80	130674,60	92,1875	-0,13	29
14/10/2019 23:02	191014_23023403.Gar	854042,90	130718,30	125,9281	0,08	29
23/03/2010 13:55	100323_13555768.Gar	853894,50	130524,20	-193,75	-0,46	30
23/03/2010 13:58	100323_13581935.Gar	854043,30	130325,00	-193,75	0,54	30
23/03/2010 14:31	100323_14315395.Gar	853485,50	130025,70	-193,75	0,14	30
23/03/2010 14:32	100323_14325203.Gar	853869,80	130499,20	-193,75	0,55	30
20/04/2010 19:32	100420_19322092.Gar	853249,90	130586,50	-81,25	0,06	31
23/12/2018 12:04	181223_12043044.Gar	854018,60	130493,70	-119,7917	0,3	31
25/04/2010 05:45	100425_05450150.Gar	853510,30	130810,90	-156,25	-0,5	32
26/04/2021 14:52	210426_14522422.Gar	853526,60	130799,40	-38,31804	-0,91	32
01/05/2010 17:22	100501_17221899.Gar	852902,90	130661,30	-193,75	0,32	33
29/09/2015 02:52	150929_02520317.Gar	853101,20	130611,70	-125,5208	0,36	33
30/03/2022 12:58	220330_12580093.Gar	854170,40	130287,80	31,89757	0,35	33
18/05/2010 01:21	100518_01212185.Gar	853150,80	130623,90	-118,75	-0,02	34
25/05/2017 12:49	170525_12495653.Gar	853299,50	130574,30	0,5208333	-0,08	34
28/05/2010 11:22	100528_11222235.Gar	853287,10	130761,00	-181,25	0,88	35
29/05/2010 10:37	100529_10375576.Gar	853088,80	130910,70	-193,75	0,38	35
30/05/2010 19:51	100530_19513510.Gar	853175,60	130885,70	-156,25	0,52	35
04/06/2010 10:10	100604_10100875.Gar	853237,60	130835,90	-106,25	0,35	35
17/08/2010 10:36	100817_10364061.Gar	853051,60	130910,70	-193,75	0,2	35
21/08/2012 13:45	120821_13451639.Gar	853225,10	130798,40	-93,75	0,23	35
04/06/2010 21:13	100604_21132845.Gar	853249,90	130623,90	-68,75	-0,01	36
07/06/2010 20:42	100607_20425586.Gar	853225,10	130611,40	-81,25	0,12	36
26/06/2010 14:15	100626_14152275.Gar	853237,60	130623,90	-156,25	0,36	37
09/08/2017 12:09	170809_12090349.Gar	853138,40	130599,30	92,1875	0,21	37
09/07/2010 17:49	100709_17494628.Gar	853274,80	130648,80	-43,75	-0,12	38
16/01/2011 04:43	110116_04434735.Gar	853274,80	130648,80	-56,25	-0,13	38
26/04/2020 14:12	200426_14122630.Gar	853386,80	130643,40	25,63828	-0,13	38
15/07/2010 01:11	100715_01113861.Gar	853820,10	130599,00	56,25	-0,92	39
29/08/2020 06:51	200829_06514751.Gar	853872,80	130568,50	116,0841	0	39
20/08/2010 05:09	100820_05094163.Gar	853126,00	130611,40	-118,75	0,16	40
05/04/2016 14:37	160405_14375879.Gar	853126,00	130649,10	-79,6875	0,32	40
04/01/2008 18:33	080104_18333595.Gar	853919,30	130736,10	43,75	-0,69	41
03/05/2008 16:06	080503_16060239.Gar	853894,50	130736,10	43,75	-0,47	41
09/11/2010 08:54	101109_08545707.Gar	853906,90	130748,60	-31,25	-0,4	41
30/11/2010 22:22	101130_22225399.Gar	853485,50	130574,00	56,25	-0,46	41
11/01/2015 15:33	150111_15332642.Gar	853857,40	130674,10	69,27084	-0,29	41
30/10/2015 10:30	151030_10301576.Gar	853473,10	130524,50	34,89583	-0,54	41
04/11/2015 03:09	151104_03090151.Gar	853844,90	130761,40	69,27084	0,54	41
11/03/2019 07:04	190311_07042567.Gar	853903,10	130699,60	57,8125	-0,3	41
20/01/2022 14:14	220120_14143979.Gar	853866,70	130687,10	59,71358	-0,4	41
02/12/2010 04:41	101202_04412773.Gar	853212,80	130711,20	-131,25	-0,27	42
09/11/2011 10:02	111109_10020091.Gar	853287,10	130761,00	-31,25	0,13	42
06/04/2016 02:46	160406_02460149.Gar	853311,90	130761,40	-68,22916	0,14	42
09/12/2010 21:37	101209_21371664.Gar	853163,20	130736,10	6,25	0,32	43
11/12/2015 15:13	151211_15132153.Gar	853200,40	130661,60	-33,85417	1,05	43
19/01/2011 18:53	110119_18531920.Gar	853200,40	130823,40	-18,75	0,22	44
17/01/2014 18:46	140117_18461076.Gar	853163,20	130786,30	-31,25	0,22	44
26/03/2011 18:06	110326_18062591.Gar	853944,10	130274,80	-6,25	0,62	45
26/06/2021 21:51	210626_21511066.Gar	853915,30	130250,40	47,36097	0,05	45
06/04/2011 15:18	110406_15182389.Gar	853547,40	130461,80	-143,75	0,6	46

04/12/2019 14:56	191204_14561799.Gar	853550,80	130437,50	-141,5508	-0,02	46
01/05/2011 09:52	110501_09524227.Gar	853113,60	130524,20	-193,75	0,24	47
03/04/2019 13:52	190403_13521463.Gar	853259,30	130487,40	-91,14584	0,28	47
07/06/2008 20:26	080607_20265484.Gar	853968,90	130736,10	43,75	0,12	48
05/06/2011 22:36	110605_22362831.Gar	853894,50	130711,20	68,75	-0,69	48
08/09/2015 20:10	150908_20102510.Gar	853906,90	130748,90	57,8125	0,71	48
27/11/2016 10:15	161127_10155945.Gar	853398,70	130487,00	126,5625	-0,1	48
16/07/2011 04:46	110716_04462473.Gar	853212,80	130686,20	-131,25	0,58	49
23/02/2018 21:43	180223_21432834.Gar	854042,90	130593,50	-28,125	0,17	49
01/04/2021 15:56	210401_15560176.Gar	853295,80	130699,60	59,71358	0,28	49
15/11/2011 17:23	111115_17235750.Gar	853584,60	130474,30	-131,25	0,69	50
23/11/2011 00:13	111123_00133563.Gar	853497,90	130399,50	-193,75	0,77	50
18/11/2011 01:04	111118_01043608.Gar	853336,80	130474,30	-93,75	-0,23	51
02/11/2021 05:22	211102_05221260.Gar	853320,00	130475,00	10,30312	-0,22	51
26/11/2011 11:10	111126_11103406.Gar	853950,30	130617,70	-12,5	0,62	52
06/02/2014 11:40	140206_11400221.Gar	853981,30	130649,10	31,25	0,16	52
16/02/2012 13:13	120216_13134285.Gar	854043,30	130711,20	-6,25	0,52	53
16/02/2012 13:37	120216_13370965.Gar	853931,80	130711,20	-193,75	0,39	53
16/02/2012 13:37	120216_13371476.Gar	853931,80	130748,60	-193,75	0,34	53
08/06/2012 12:16	120608_12165592.Gar	853559,90	130786,00	-6,25	-0,38	54
29/11/2018 06:27	181129_06273355.Gar	853605,50	130718,30	40,625	-0,9	54
23/06/2012 07:20	120623_07203303.Gar	853919,30	130212,50	-106,25	0,24	55
24/02/2015 17:08	150224_17081696.Gar	853894,50	130212,70	-106,25	0,07	55
28/08/2012 00:03	120828_00034345.Gar	853361,50	130636,40	-56,25	-0,35	56
25/08/2021 11:16	210825_11163562.Gar	853283,60	130874,30	22,81158	0,27	56
24/03/2013 16:07	130324_16075243.Gar	853175,60	130773,80	-118,75	0,84	57
05/02/2017 06:54	170205_06543874.Gar	853249,90	130823,70	11,97917	0,18	57
05/11/2013 23:26	131105_23262319.Gar	853386,30	130399,80	-93,75	-0,16	58
01/09/2018 06:35	180901_06353095.Gar	853392,90	130425,00	0,5208333	-0,06	58
26/12/2013 16:58	131226_16583744.Gar	853485,50	130811,20	43,75	-0,03	59
28/08/2020 05:15	200828_05153540.Gar	853514,40	130749,50	22,25848	-0,4	59
09/01/2014 01:24	140109_01240957.Gar	854080,50	130649,10	106,25	0,69	60
31/10/2019 08:41	191031_08415771.Gar	854073,30	130674,60	39,30047	0,45	60
01/03/2014 10:56	140301_10561137.Gar	853249,90	130973,30	-43,75	0,36	61
04/06/2014 22:21	140604_22215533.Gar	853212,80	130911,00	43,75	0,51	61
16/04/2014 09:38	140416_09384311.Gar	852878,10	131272,60	-193,75	0,65	62
18/04/2014 16:41	140418_16411583.Gar	854588,70	130038,20	-56,25	0,57	62
06/01/2015 10:26	150106_10262050.Gar	853572,30	130362,40	243,75	0,62	63
07/01/2015 09:03	150107_09034248.Gar	853497,90	130262,60	243,75	0,67	63
11/01/2015 10:48	150111_10484859.Gar	853721,00	130300,00	-18,75	0,34	64
13/01/2016 21:25	160113_21250794.Gar	853696,20	130175,30	-194,2708	-0,07	64
04/03/2014 05:10	140304_05104563.Gar	852518,60	129676,60	-193,75	1,12	65
16/02/2015 03:49	150216_03495381.Gar	852506,20	129389,80	-193,75	1,06	65
25/05/2015 17:21	150525_17211647.Gar	852617,80	129377,30	-194,2708	1,08	65
05/09/2015 13:27	150905_13274673.Gar	852506,20	130736,40	-194,2708	1,47	65
05/09/2015 15:33	150905_15330296.Gar	852506,20	130487,00	-194,2708	1,27	65
05/09/2015 19:28	150905_19280096.Gar	852506,20	130923,50	-194,2708	1,38	65
15/03/2020 02:29	200315_02295858.Gar	852542,50	129676,40	-307,1809	0,79	65
02/03/2015 11:18	150302_11180376.Gar	853002,00	130724,00	-18,75	0,88	66
05/03/2021 19:08	210305_19085330.Gar	853077,10	130786,90	-2,049489	0,46	66
08/10/2015 00:33	151008_00332502.Gar	853733,40	130063,10	-125,5208	0,34	67
15/08/2019 19:52	190815_19524604.Gar	853818,10	130050,70	145,966	0,48	67
08/01/2016 09:09	160108_09093945.Gar	853857,40	131172,80	-45,3125	1,23	68
10/03/2016 13:28	160310_13285282.Gar	853795,40	131073,10	-91,14584	1,62	68
12/12/2016 09:48	161212_09482005.Gar	853807,80	130038,20	-136,9792	0,3	68
06/03/2016 02:52	160306_02523493.Gar	854080,50	130362,40	-148,4375	0,51	69
11/03/2021 21:33	210311_21331328.Gar	853963,90	130425,00	58,27361	0,48	69
21/07/2017 01:41	170721_01410156.Gar	852890,50	131796,30	-194,2708	0,95	70
11/12/2019 15:55	191211_15553544.Gar	853696,60	130737,00	-35,01445	0,01	70
09/06/2008 03:56	080609_03560367.Gar	853783,00	130586,50	31,25	-0,17	71
28/04/2019 04:34	190428_04340675.Gar	853891,00	130836,80	134,0901	-0,58	71
28/04/2019 04:34	190428_04340888.Gar	853830,30	130786,90	91,9614	-0,38	71
24/09/2020 15:02	200924_15022088.Gar	853465,80	130537,30	-39,10733	-1,21	71
09/09/2019 07:23	190909_07234064.Gar	853866,70	130737,00	171,6711	-0,06	72
04/01/2020 17:05	200104_17052892.Gar	853781,70	130774,40	39,30047	-0,46	72

En zone 3

Date - Heure	Fichier	X	Y	Z	Magnitude	multiplet
27/11/2010 01:42	101127_01421674.Prov	859639,80	127618,00	-31,25	0,74	0
04/11/2021 13:45	211104_13450148.Prov	859065,50	127481,70	161,45	0,84	0
30/12/2010 08:46	101230_08465052.Prov	858536,20	129490,90	-193,75	1,73	1
13/02/2011 08:23	110213_08231661.Prov	858548,60	129503,40	-193,75	1,69	1
13/07/2012 13:43	120713_13430437.Prov	859141,40	128986,20	-193,75	1,64	1
25/10/2014 20:45	141025_20452587.Prov	858344,10	129465,00	68,75	2,02	1
02/12/2015 23:36	151202_23365354.Prov	859002,60	129313,80	-194,27	1,9	1
20/09/2017 01:49	170920_01495048.Prov	858830,00	129415,10	-148,44	1,69	1
22/09/2017 12:36	170922_12364591.Prov	858775,00	129454,70	-194,27	2,1	1
07/01/2011 21:18	110107_21183358.Cad	860419,10	127568,00	81,25	-0,46	2
13/04/2014 06:44	140413_06441408.Cad	860469,10	127543,00	56,25	0,39	2

17/09/2016 17:43	160917_17432298.Cad	859965,00	127468,00	46,35	-0,17	2
27/09/2016 13:49	160927_13494842.Cad	859919,10	127496,10	32,03	-0,31	2
02/08/2019 20:47	190802_20470212.Cad	860344,10	127543,10	148,05	-0,97	2
29/04/2022 02:17	220429_02174219.Prov	860409,80	127593,10	76,40	0,11	2
25/01/2011 16:53	110125_16531707.Prov	859215,90	128861,50	-193,75	1,48	3
31/01/2011 13:42	110131_13421157.Prov	858966,10	129049,50	-193,75	1,49	3
04/02/2011 16:51	110204_16513061.Prov	859415,30	128637,00	-193,75	1,53	3
03/02/2011 04:37	110203_04374619.Prov	859101,10	127100,10	-168,75	1,06	4
18/12/2015 19:18	151218_19183067.Cad	859033,40	127143,10	-159,90	1,18	4
12/04/2011 14:47	110412_14475314.Prov	859096,80	126537,90	-193,75	0,65	5
17/12/2014 07:24	141217_07243001.Prov	859550,80	126865,90	68,75	0,47	5
23/04/2011 20:41	110423_20414781.Prov	859641,10	127963,50	-118,75	1,07	6
21/05/2014 19:30	140521_19300034.Prov	858974,80	128571,40	-193,75	1,58	6
08/10/2011 13:20	111008_13204739.Prov	860363,20	127962,70	93,75	0,37	7
28/06/2016 17:46	160628_17464207.Prov	860411,80	127919,80	103,65	0,31	7
12/12/2011 21:56	111212_21564586.Prov	860136,00	127833,10	43,75	0,52	8
09/01/2019 13:45	190109_13450891.Prov	859870,40	127869,50	57,81	0,15	8
22/07/2019 01:00	190722_01003738.Prov	860175,60	127907,40	65,18	0,16	8
29/01/2012 23:48	120129_23480818.Prov	859674,10	127441,10	-93,75	0,65	9
21/09/2014 20:53	140921_20532382.Prov	859614,70	127487,50	-31,25	0,68	9
05/03/2012 01:07	120305_01070812.Cad	859869,20	127393,00	106,25	-0,32	10
01/11/2012 04:46	121101_04461279.Cad	860406,60	127630,40	106,25	-0,28	10
01/04/2012 02:08	120401_02083797.Prov	858277,10	129989,00	-193,75	1,85	11
29/05/2012 17:54	120529_17544506.Prov	857223,30	129654,70	-193,75	1,78	11
02/03/2016 00:48	160302_00484511.Prov	858797,80	129669,80	-194,27	1,9	11
14/05/2017 11:24	170514_11244232.Prov	858422,40	129872,50	-194,27	1,69	11
31/03/2022 06:11	220331_06115366.Prov	858085,60	129512,60	-1639,34	1,6	11
03/04/2012 04:59	120403_04590028.Prov	860298,40	128087,50	81,25	0,43	12
07/11/2016 07:17	161107_07174818.Prov	860159,30	128228,30	-159,90	0,52	12
09/07/2012 09:06	120709_09062919.Prov	859988,50	127935,90	11,02	0,45	13
24/05/2015 19:30	150524_19300992.Prov	859959,60	127919,80	57,81	0,65	13
26/07/2011 12:07	110726_12072226.Prov	858843,10	128471,00	-193,75	1,39	14
11/07/2012 21:55	120711_21550459.Prov	859028,60	128572,50	-162,50	1,55	14
16/07/2012 10:07	120716_10075981.Prov	859540,10	128213,00	-193,75	1,31	14
23/07/2012 11:11	120723_11113171.Prov	858749,40	128375,00	-193,75	1,5	14
21/09/2012 07:50	120921_07501137.Prov	859190,80	128284,70	-193,75	1,3	14
22/03/2014 23:17	140322_23174123.Prov	859347,60	128129,00	-18,75	1,75	14
15/01/2015 05:47	150115_05472824.Prov	858423,00	128962,50	-193,75	1,66	14
27/04/2019 20:59	190427_20590035.Prov	858487,20	128738,00	-241,56	1,8	14
20/07/2012 12:14	120720_12140094.Prov	860069,10	127068,90	81,25	0,17	15
08/11/2018 23:34	181108_23343938.Prov	860130,70	127236,10	-165,63	0,09	15
22/06/2019 12:46	190622_12462919.Prov	860096,40	127109,00	100,04	0,44	15
30/07/2021 19:03	210730_19031839.Prov	860075,90	127092,60	87,25	0,82	15
03/10/2012 18:47	121003_18475769.Prov	859041,50	128621,00	-136,90	1,17	16
14/04/2017 10:28	170414_10284317.Prov	859507,70	128201,00	-194,27	0,81	16
30/07/2020 15:58	200730_15585140.Prov	859420,40	128258,60	-830,54	0,97	16
17/10/2012 06:58	121017_06581340.Prov	859165,90	129542,80	-193,75	1,42	17
10/08/2016 00:35	160810_00353921.Prov	859349,80	129054,90	-194,27	1,49	17
17/10/2012 14:48	121017_14484768.Cad	860319,10	127817,90	131,25	-0,72	18
02/08/2014 17:23	140802_17233808.Prov	860086,90	127240,00	156,25	0,09	18
23/10/2020 04:09	201023_04090506.Cad	860344,10	127718,10	175,70	-0,41	18
16/08/2012 23:49	120816_23492001.Prov	859425,40	127865,90	-193,75	1,14	19
29/10/2012 15:04	121029_15042545.Prov	859644,30	127869,90	-6,25	1,03	19
13/07/2013 06:28	130713_06282593.Prov	859690,00	127830,40	18,75	0,88	19
11/10/2013 10:59	131011_10594509.Prov	859777,20	127817,90	-79,76	0,99	19
02/06/2022 04:28	220602_04284278.Prov	859116,80	128109,70	-537,37	1,31	19
20/11/2012 10:41	121120_10413488.Prov	860197,00	127817,00	83,50	0,14	20
04/02/2015 23:10	150204_23103124.Prov	860199,70	127825,20	93,75	-0,06	20
24/11/2019 15:01	191124_15012278.Prov	860393,30	127785,10	125,94	-0,17	20
02/12/2012 19:13	121202_19134252.Cad	859681,80	126880,80	156,25	0,54	21
06/01/2016 16:23	160106_16230554.Prov	859795,70	126684,90	69,27	1,2	21
22/11/2020 11:16	201122_11164433.Prov	859586,50	126634,40	139,74	0,76	21
31/12/2012 03:51	121231_03515190.Prov	860288,00	127955,40	84,84	-0,2	22
06/04/2018 20:39	180406_20390060.Prov	860312,10	127946,10	103,65	0,01	22
04/02/2013 05:29	130204_05290362.Prov	859440,10	127891,90	-68,75	1,59	23
16/11/2021 11:04	211116_11043251.Prov	858923,30	127841,20	-13,54	1,39	23
23/03/2013 02:21	130323_02212066.Cad	860131,70	127380,50	106,25	-0,49	24
17/01/2020 13:58	200117_13582645.Prov	860052,60	127374,20	5,65	0,24	24
21/06/2012 03:16	120621_03165870.Prov	858941,10	128950,10	-193,75	1,52	25
16/04/2013 23:02	130416_23020335.Prov	858582,00	129021,40	-193,75	1,59	25
26/07/2013 14:26	130726_14263208.Prov	859049,30	129335,80	-193,75	2	25
01/03/2014 14:21	140301_14210125.Prov	858856,80	129044,50	-193,75	1,61	25
15/03/2014 14:19	140315_14190119.Prov	859056,30	129310,60	-193,75	1,83	25
16/03/2014 01:16	140316_01165396.Prov	858831,10	128897,20	-193,75	1,62	25
27/03/2014 16:04	140327_16045141.Prov	859121,10	129159,00	-193,75	1,89	25
28/04/2014 10:04	140428_10045801.Prov	859006,20	129373,60	-193,75	1,96	25
04/05/2014 16:05	140504_16055654.Prov	859006,10	129473,60	-193,75	1,94	25
23/07/2015 19:43	150723_19433254.Prov	858965,00	129258,70	-194,27	1,66	25
23/02/2016 13:35	160223_13352952.Prov	858546,20	129291,80	-194,27	1,33	25
24/08/2018 06:04	180824_06043341.Prov	858753,30	129559,40	-194,27	1,16	25
02/02/2011 03:11	110202_03115081.Prov	859676,90	127926,10	-106,25	1,07	26

24/04/2012 08:06	120424_08062856.Prov	859319,80	127891,10	-193,75	1,06	26
30/10/2012 07:21	121030_07213958.Prov	859079,10	127976,00	-193,75	1,01	26
10/12/2012 18:52	121210_18525986.Prov	859244,40	127890,90	-193,75	1,15	26
01/03/2013 17:55	130301_17554258.Prov	859382,60	127941,40	-156,25	1,17	26
12/05/2013 12:55	130512_12553391.Prov	859402,90	128072,90	-31,25	0,97	26
08/09/2013 17:22	130908_17224014.Prov	859764,80	127867,90	6,25	1,04	26
16/09/2013 10:36	130916_10361479.Prov	859727,10	128075,80	43,75	1,33	26
07/02/2014 23:53	140207_23533891.Prov	858978,40	128015,70	-193,75	1,19	26
04/05/2014 14:27	140504_14274996.Prov	859473,90	127985,90	-181,25	1,45	26
06/05/2014 02:11	140506_02111306.Prov	859689,40	127911,00	18,75	0,92	26
03/06/2014 14:35	140603_14355804.Prov	859236,80	128484,20	-193,75	1,61	26
30/08/2014 03:22	140830_03220701.Prov	858895,60	128196,20	-193,75	1,53	26
30/05/2015 01:11	150530_01113969.Prov	859646,10	127873,30	-68,23	0,78	26
07/09/2019 20:18	190907_20181591.Prov	859482,70	127884,20	-277,37	0,92	26
13/06/2013 12:30	130613_12301099.Prov	859122,90	129916,50	-193,75	1,79	27
26/03/2014 19:47	140326_19471581.Prov	859049,30	129822,40	-193,75	1,87	27
06/04/2014 14:09	140406_14093269.Prov	858994,30	129760,60	-193,75	1,88	27
20/04/2014 22:33	140420_22330760.Prov	858640,60	129891,80	-193,75	1,86	27
18/09/2014 05:22	140918_05221374.Prov	859086,90	129919,80	-193,75	1,92	27
17/03/2015 20:24	150317_20240618.Prov	858261,50	129887,30	-193,75	1,9	27
18/03/2015 07:44	150318_07442509.Prov	859095,60	129786,80	-193,75	2,04	27
03/04/2015 13:14	150403_13142776.Prov	859049,30	129808,40	-194,27	1,91	27
20/04/2015 18:44	150420_18441460.Prov	858391,80	129824,40	-194,27	1,88	27
12/05/2015 02:43	150512_02435657.Prov	859174,00	129868,90	-194,27	1,72	27
10/02/2016 18:35	160210_18353122.Prov	859147,80	129812,20	-194,27	1,9	27
30/08/2013 18:56	130830_18560096.Prov	858803,80	129581,60	-193,75	1,93	28
05/07/2014 13:24	140705_13240491.Prov	858956,00	129673,70	-193,75	1,93	28
02/09/2014 03:24	140902_03243529.Prov	858100,90	129805,00	-193,75	1,87	28
03/09/2014 22:54	140903_22542001.Prov	858296,30	129686,30	-193,75	1,97	28
02/10/2013 19:47	131002_19470794.Cad	859981,70	127593,00	98,10	-0,38	29
16/04/2016 19:55	160416_19555186.Prov	859972,30	127588,80	57,81	0,94	29
31/03/2022 23:21	220331_23213005.Cad	860006,70	127630,60	89,74	-0,78	29
11/10/2013 19:29	131011_19291031.Prov	860163,00	127898,50	95,76	0,41	30
18/01/2014 10:37	140118_10371746.Prov	860287,60	127798,90	93,75	-0,08	30
05/11/2015 10:53	151105_10530314.Prov	860305,40	128367,30	69,27	0,64	30
02/06/2018 07:23	180602_07233478.Prov	860249,80	127812,20	80,73	-0,09	30
21/04/2019 15:29	190421_15291417.Prov	860216,60	127988,00	112,63	-0,41	30
30/10/2013 03:28	131030_03283889.Prov	859527,70	128699,30	-193,75	1,75	31
12/04/2014 11:25	140412_11255000.Prov	859054,50	129530,20	-193,75	1,88	31
28/12/2014 15:56	141228_15564509.Prov	858045,90	129579,50	-118,75	2,15	31
10/12/2015 15:52	151210_15523283.Prov	857444,80	125790,10	-56,77	2,09	31
13/12/2015 06:20	151213_06205718.Prov	857914,40	126291,10	103,65	2,1	31
06/08/2020 04:50	200806_04505006.Prov	858249,40	129596,00	-372,59	1,43	31
19/02/2014 17:00	140219_17001301.Prov	861166,00	127158,50	-193,75	1,47	32
23/02/2014 16:47	140223_16473939.Prov	861506,60	127258,40	-193,75	1,52	32
21/02/2014 08:42	140221_08421051.Prov	861156,30	127196,00	-193,75	1,46	33
23/02/2014 16:11	140223_16115801.Prov	861289,90	127245,40	-193,75	1,3	33
05/12/2019 17:00	191205_17001867.Prov	861033,20	127170,20	-291,48	0,63	33
21/02/2014 17:27	140221_17274817.Prov	861327,10	127233,00	-193,75	1,36	34
23/02/2014 16:18	140223_16181406.Prov	861351,90	127257,80	-193,75	1,31	34
04/03/2014 21:50	140304_21501882.Prov	859303,20	128396,80	-143,75	1,39	35
17/05/2014 03:44	140517_03441310.Prov	859415,30	129206,50	-143,75	1,4	35
23/03/2014 06:14	140323_06145762.Prov	859211,80	128596,30	-193,75	1,54	36
11/05/2014 11:49	140511_11492625.Prov	859577,30	127998,20	-143,75	1,11	36
22/06/2014 21:20	140622_21200450.Prov	859639,60	127973,30	18,75	0,86	36
20/04/2014 20:48	140420_20483408.Prov	860300,10	127923,50	93,75	0,13	37
14/06/2016 20:51	160614_20511501.Prov	860289,60	127919,80	92,19	0,47	37
03/05/2014 10:39	140503_10393986.Prov	859240,90	128596,10	-193,75	1,37	38
05/06/2022 16:37	220605_16374804.Prov	858992,00	128641,20	186,82	1,07	38
04/05/2014 06:50	140504_06500879.Cad	859069,40	127593,00	68,75	1,35	39
24/12/2016 02:08	161224_02081269.Cad	859045,70	127430,50	-22,40	0,93	39
05/08/2014 06:54	140805_06541286.Prov	860188,00	126042,80	-193,75	1,29	40
02/07/2020 12:59	200702_12591663.Prov	860040,20	126035,20	-278,59	1,01	40
10/07/2020 10:21	200710_10214777.Prov	860367,40	125706,20	-281,33	1,53	40
09/03/2014 00:48	140309_00482797.Cad	859156,90	127430,50	-68,75	0,99	41
16/03/2014 10:15	140316_10153878.Cad	859256,90	127505,50	-31,25	1,15	41
16/03/2014 14:58	140316_14580536.Cad	859256,90	127405,50	18,75	1,33	41
19/03/2014 00:12	140319_00123844.Cad	859181,90	127493,00	-6,25	1,25	41
17/08/2014 17:26	140817_17261618.Prov	859333,30	127140,00	-118,75	1,05	41
19/08/2014 03:55	140819_03550758.Prov	861197,30	127487,50	-81,25	0,99	41
24/03/2015 14:35	150324_14351878.Prov	859176,80	127283,40	-91,15	1,17	41
24/03/2015 19:20	150324_19205386.Cad	859192,80	127393,00	-125,52	1,19	41
29/05/2015 21:34	150529_21340055.Prov	859441,60	127391,70	-10,94	0,92	41
06/04/2017 05:21	170406_05212464.Cad	859254,10	127543,00	-22,40	0,81	41
12/10/2019 22:45	191012_22454045.Cad	859369,30	127468,10	-250,97	0,91	41
26/10/2020 05:50	201026_05504347.Prov	859764,00	127486,40	148,81	0,89	41
22/11/2014 15:49	141122_15490835.Prov	859864,80	127009,60	-31,25	0,49	42
20/12/2019 21:09	191220_21095439.Prov	859912,30	127036,50	105,70	0,14	42
07/04/2015 02:19	150407_02190382.Prov	859381,40	127716,80	-171,35	0,74	43
16/02/2017 09:02	170216_09024254.Prov	859544,20	127731,20	-194,27	0,66	43
26/09/2021 03:03	210926_03031035.Prov	859688,40	127794,10	98,73	0,48	43

22/03/2016 08:14	160322_08143832.Prov	858751,90	128147,60	-194,27	1,9	44
28/07/2020 02:16	200728_02164418.Prov	859327,80	127974,10	152,12	0,98	44
11/06/2016 14:13	160611_14132730.Prov	859414,20	127961,60	149,48	0,93	45
03/07/2020 22:07	200703_22075941.Prov	859379,80	128022,20	-113,04	0,23	45
16/09/2016 05:15	160916_05150525.Cad	860014,00	128142,70	0,52	0,58	46
25/12/2016 15:51	161225_15514155.Prov	859984,30	127958,80	-194,27	0,48	46
07/10/2016 21:39	161007_21391068.Prov	859800,90	128031,50	-194,27	0,87	47
19/12/2016 23:07	161219_23074641.Prov	859814,80	128043,00	-194,27	0,68	47
12/01/2017 14:55	170112_14550738.Prov	859312,90	127894,80	-194,27	0,82	48
14/03/2017 07:13	170314_07133572.Prov	859349,20	127938,80	-79,69	1,23	48
14/12/2018 01:56	181214_01563727.Prov	858993,50	128163,90	-194,27	1,69	48
07/05/2017 09:01	170507_09011017.Prov	859107,10	128167,30	-194,27	1,05	49
07/10/2018 07:30	181007_07301286.Prov	858961,70	128645,70	-194,27	1,16	49
19/06/2017 03:45	170619_03453234.Prov	858509,10	128164,90	-194,27	1,69	50
19/06/2017 03:45	170619_03453736.Prov	859048,70	127972,90	-194,27	1,31	50
12/08/2017 07:03	170812_07030368.Prov	859019,10	128423,60	-194,27	1,14	50
22/01/2011 13:47	110122_13475563.Prov	860175,20	128013,40	68,75	-0,21	51
08/07/2017 23:33	170708_23332074.Prov	860204,30	128019,40	-33,85	-0,29	51
21/01/2021 15:31	210121_15315342.Prov	860200,10	127961,90	64,98	0,16	51
26/09/2017 21:17	170926_21172316.Prov	858945,80	126808,40	23,44	1,12	52
27/09/2018 01:44	180927_01443201.Prov	858990,70	126766,00	-194,27	1,41	52
28/10/2017 13:53	171028_13534533.Prov	860001,00	127929,20	23,44	0,38	53
27/08/2019 08:06	190827_08065697.Prov	859988,60	127929,20	-284,97	0,51	53
13/01/2018 13:17	180113_13173137.Prov	858468,60	128949,80	-194,27	1,73	54
10/08/2018 04:27	180810_04270744.Prov	858894,30	129127,90	-194,27	1,69	54
29/08/2018 23:32	180829_23323658.Cad	859331,80	127743,00	103,65	0,73	55
05/12/2019 15:52	191205_15525645.Prov	859463,50	127401,40	-311,35	0,51	55
28/09/2018 09:02	180928_09024045.Prov	858793,50	129301,60	-194,27	1,47	56
05/10/2018 04:13	181005_04131327.Prov	858281,10	129120,30	-729,46	1,56	56
17/05/2020 11:37	200517_11372786.Cad	859937,90	127411,90	66,62	-0,34	57
12/06/2022 22:56	220612_22565135.Cad	859894,20	127343,20	76,72	-0,47	57

