



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 201216 - 2215842 - v1.0

19/05/2021

Origine de l'essai sismique de Fuveau et son lien avec l'envoyage des anciens travaux miniers du bassin de Gardanne :

Apport des analyses sismique, hydrogéologique et géomécanique

Origine de l'essai sismique de Fuveau et son lien avec l'envoyage des anciens travaux miniers

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 : KINSCHER Jannes-L - GOMBERT PHILIPPE; CONTRUCCI ISABELLE; THORAVAL ALAIN

Vérification : KLEIN EMMANUELLE; GOUZY AURELIEN

Approbation : Document approuvé le 19/05/2021 par BAROUDI HAFID

Liste des personnes ayant participé à l'étude : -

Table des matières

1	Contexte et objectifs	8
1.1	Rappel des résultats des études précédentes	8
1.2	Objectifs et cadre de cette étude	9
2	Caractérisation et réévaluation du modèle hydrogéologique	11
2.1	Données et renfort du suivi hydrogéologique	11
2.2	Rappel du fonctionnement hydrogéologique global	12
2.2.1	Rappel des dispositifs de gestion des eaux en phase d'exploitation.....	12
2.2.2	Fonctionnement hydrogéologique global de l'aquifère minier	12
2.3	Fonctionnement hydrogéologique des quartiers Gréasque-Olympe-Régagnas	14
3	Caractéristiques des sources sismiques	17
3.1	Complément à l'analyse de la sismicité sur la période 2014 -2017.....	17
3.2	Données et renforcement du suivi sismique.....	19
3.3	Evaluation de la profondeur des événements sismiques	20
3.3.1	Calibration du modèle de vitesse.....	20
3.3.2	Evaluation de l'erreur sur la profondeur des événements	21
3.4	Mécanisme au foyer	24
3.4.1	Principe de l'approche	24
3.4.2	Résultats antérieurs.....	24
3.4.3	Nouveaux résultats après le renfort du réseau sismique.....	24
3.4.4	Conclusions sur les mécanismes au foyer	29
4	Caractérisation du mécanisme déclenchant.....	30
4.1	Généralités	30
4.2	Corrélation des données hydroclimatiques et sismiques	31
4.3	Evaluation par modélisation géomécanique du scénario de déclenchement par variation de la pression interstitielle	33
4.3.1	Choix et description du code de calcul utilisé	33
4.3.2	Description du modèle de référence réalisé et données d'entrée	34
4.3.3	Résultats obtenus pour le « modèle de référence »	35
4.3.4	Conditions hydromécaniques s'opposant à un fonctionnement tel que décrit par l'hypothèse 2	36
5	Synthèse.....	37
5.1	Résumé des résultats principaux.....	37
5.2	Réévaluation des hypothèses sur l'origine de la sismicité	38
6	Conclusions et perspectives.....	40
7	Références	41
8	Annexes.....	43

GLOSSAIRE

Symbole / Acronyme	Description	Unité
ADES	Portail national d'accès aux données sur les eaux souterraines	-
CENARIS	Centre National de Surveillance des Risques du Sol et du Sous-Sol	-
f	Fréquence	Hz
f_c	Fréquence coin	Hz
E	Est	-
h	Profondeur	m
M	Magnitude de Gutenberg-Richter	-
M_L	Magnitude locale estimée par la durée	-
M_W	Magnitude du moment	-
M_0	Moment sismique	Nm
N	Nord	-
O ou W	Ouest	-
ρ	Densité de masse	kg/m ³
P	Pression de fluide	MPa
P (ondes)	Ondes (P) de compression	-
PDF	Fonction de densité de probabilité	-
PGA	Peak Ground Acceleration	g
PGV	Peak Ground Velocity	cm/s
RMS	Root Mean Square (racine carrée de la moyenne des carrés)	-
R_p	Coefficient de rayonnement des ondes P	-
R_s	Coefficient de rayonnement des ondes S	-
r	Distance hypocentrale	m
σ_{eff}	Contrainte normale effective	MPa
σ_{tot}	Contrainte normale totale	MPa
σ_h	Contrainte horizontale mineure	MPa
σ_H	Contrainte horizontale majeure	MPa
σ_v	Contrainte verticale	MPa
S (ondes)	Ondes (S) de cisaillement	-
S	Sud	-
SH (ondes)	Ondes S polarisées horizontales	-
SV (ondes)	Ondes S polarisées verticales	-
V_p	Vitesse des ondes P	m/s
V_s	Vitesse des ondes S	m/s
Z	Composante verticale d'une station sismique	-
R	Composante radiale	-
T	Composante transversale	-
TB	Travers-bancs	-

Résumé

La surveillance microsismique a été déployée en 2008 dans le bassin houiller de Gardanne, à la suite de la définition de zones d'aléa mouvement de terrain post-minier de type affaissement à caractère cassant pour lesquelles existent des enjeux en surface. L'objectif de la surveillance est de détecter et suivre les signes précurseurs d'instabilités au niveau des ouvrages miniers lors de leur ennoyage progressif.

Dès 2010, une activité microsismique soutenue s'est développée avec plus de 3000 événements microsismiques enregistrés dans et en-dehors des zones surveillées notamment au centre du bassin, au niveau du front d'ennoyage. Dans un secteur situé à 2 km à l'ouest de Fuveau, l'activité microsismique se manifeste par des crises récurrentes, avec des séquences d'événements sismiques de magnitude proche de 2, allant jusqu'à 2,5 voire 2,8 qui sont pour les plus forts ressentis par la population locale. Dès 2013 s'est posée la question de l'origine de cette microsismicité significative, au caractère répétitif, qui ne peut être totalement expliquée par les seuls travaux miniers. Des stations sismiques complémentaires ont alors été déployées dans le secteur concerné (la zone dite de l'essaim de Fuveau) situé dans le secteur minier de Regagnas (et en partie de Gréasque). Une analyse détaillée de la crise sismique de décembre 2014, réalisée en 2017, avait ensuite montré un lien avec la mise en eau des vides miniers et avec les fluctuations du niveau de la nappe induites par les changements météorologiques saisonniers.

Deux hypothèses ont alors été formulées avec des implications en termes d'aléa sismique très différentes. La première hypothèse suggère que la sismicité serait associée à des intensifications de remobilisations et dégradations des anciens travaux miniers provoqués par les venues d'eau. Dans ce contexte la sismicité devrait majoritairement se produire dans les terrains de recouvrement et le long des bordures vierges et se produire par le rejeu¹ de surfaces de rupture et/ou de failles préexistantes ainsi que par rupture des anciens piliers. Selon ce mode de fonctionnement, on attendrait a priori que la magnitude maximale des événements sismiques (M_{max}) soit du même ordre de grandeur que celle des événements historiques. Elle serait dépendante de la taille des effondrements et proportionnelle à l'étendue des travaux miniers, et devrait a priori s'éteindre avec le temps. La deuxième hypothèse suggère une origine sismique en lien avec la réactivation des failles situées sous des travaux miniers (entre 500 et 900 m de profondeur) par un effet de surcharge hydraulique au travers de grandes cassures karstiques présentes dans ces terrains. Dans ce cas de figure, l'aléa sismique et notamment la M_{max} dépendrait donc de la taille et de la localisation des segments des failles mobilisées, de leur orientation et de leur état géomécanique en regard du contexte tectonique et des conditions météorologiques et hydrogéologiques auxquelles ils sont indirectement soumis (ex : pression interstitielle, contrainte poro-élastique). Notons ici que la région de Gardanne est naturellement sismogène (ex : événement de Mimet MI 4.1 en 1984) et caractérisée par des chargements tectoniques non-négligeables. Cette seconde hypothèse impliquerait potentiellement une persistance de la sismicité au long-terme avec un taux de récurrence des événements accéléré par rapport au taux de récurrence naturelle dû à la présence d'eau dans les travaux miniers. Plus précisément, ces derniers joueraient le rôle d'un aquifère « anthropique », qui modifierait le système hydrogéologique naturel.

Pour réévaluer ces deux hypothèses et mieux comprendre le mécanisme à l'origine de l'essaim sismique de Fuveau, l'Ineris et le BRGM ont renforcé dès 2018 le suivi hydro-sismique dans le bassin de Gardanne en installant trois capteurs piézométriques et dix stations sismiques supplémentaires à l'aplomb de la zone d'étude. Sur la base du nouveau jeu de données ainsi acquis, de nombreuses analyses interdisciplinaires (hydrogéologiques, sismiques et géomécaniques), ont été réalisées et sont présentées dans ce rapport. Celui-ci décrit les données hydrogéologiques qui, ajoutées aux connaissances tirées des archives minières, et leurs analyses ont permis de réévaluer le modèle hydrogéologique du bassin et mieux comprendre les circulations d'eaux dans les anciens travaux miniers. Il présente également les résultats de l'analyse des nouvelles données sismiques dont l'objectif était à la fois de déterminer les mécanismes au foyer et de préciser les profondeurs des sources sismiques (informations essentielles pour l'évaluation des deux hypothèses). D'autres analyses, également présentées dans ce rapport ont visé à mieux caractériser l'interaction entre les battements de nappe et la sismicité en croisant l'ensemble des données sismo-hydrologiques. Finalement, des modélisations géomécaniques ont été réalisées pour tester l'hypothèse de réactivation de failles

¹ En géologie, un rejeu correspond à la reprise d'un mouvement tectonique le long d'une faille.

localisées sous les travaux par augmentation de la pression interstitielle (hypothèse 2), cela dans un espace de paramètres déterminé à partir des analyses et interprétations tirées des observations hydrogéologiques et sismiques.

Malgré certaines incertitudes liées au manque de complétude des données, manque inhérent à ce type d'étude, l'ensemble des résultats obtenus dessine une image relativement cohérente dans laquelle la sismicité tire son origine de la remobilisation d'un jeu de failles situées directement sous les travaux (en majorité, entre 50 et 200 m en dessous), hydrauliquement connectées avec ces derniers. Il s'agit donc probablement de failles affectées de circulations karstiques qui réagissent ainsi sensiblement et rapidement aux variations de pression hydrostatique dans les travaux miniers. La concentration de l'activité sismique particulièrement forte dans la zone du secteur minier de Regagnas semble notamment liée à sa configuration hydrogéologique particulière qui pourrait être assimilée à une sorte de réservoir d'eau qui subit (depuis le démarrage de l'exploitation de ce secteur) des variations de hauteur de nappe importantes (40 - 200 m), notamment dans le cas des conditions hydro climatiques extrêmes.

Cette étude montre également que depuis l'ennoyage en 2010, la signature des événements sismiques est généralement stable et répétitive (présence d'événements multiplets et clusters spatiaux persistants). Néanmoins, depuis la dernière crise d'importance (en 2017) nous notons une baisse nette du niveau de l'activité sismique avec une absence de crise et un taux de sismicité relativement constant de quelques événements par semaine (quelques fois ressentis par la population). Nos travaux suggèrent que cette baisse est en lien avec une augmentation de la capacité de pompage dans la Galerie de la Mer effectuée à partir du puits Gérard qui lui est connecté (jusqu'à 1200 m³/hr) qui a amené à une baisse importante de niveau d'eau dans le secteur Regagnas. Le taux de sismicité réduit peut donc, a priori, être expliqué par une diminution de la pression hydrostatique générale dans cette zone qui a restabilisé un certain nombre de failles. Néanmoins, nous suggérons que la quantité des eaux résiduelles dans les travaux miniers est toujours non-négligeable et que la pression interstitielle reste toujours élevée par rapport à l'état naturel de ces failles : le système demeure donc dans un état métastable. Le taux de récurrence naturelle de glissement de ces failles par chargement tectonique est donc accéléré, d'où résulte l'activité sismique de fond (quelques événements par semaine). Nous avons supposé que le moteur de déclenchement principal des crises sismiques précédentes serait lié à des fortes augmentations de la pression interstitielle (a priori possible jusqu'au 10-20 bar) résultant de la capacité de pompage limitée à cette époque (< 1000 m³/hr), insuffisante pour maintenir le niveau de nappe dans les travaux miniers, notamment pendant les périodes de fortes précipitations. Il ne peut donc être exclu qu'en cas d'un arrêt prolongé du pompage dans la Galerie de la Mer de nouvelles crises sismiques puissent apparaître notamment en période de crue.

Afin de progresser sur la problématique de l'essaim sismique de Fuveau et notamment sur l'aléa sismique, il apparaît important de se concentrer sur la réduction des incertitudes liées aux analyses présentées dans ce rapport. Ceci pourrait concrètement passer par la détermination et un suivi précis des variations de la nappe dans le secteur de Regagnas (variations qui sont à ce stade seulement connues de manière approximative due à la complexité des circulations d'eaux dans les travaux miniers et l'absence de mesures directes dans ce secteur). La connaissance exacte des variations permettrait de répondre précisément à la question du mécanisme de déclenchement (augmentation des pressions interstitielles, contraintes poro-élastiques) : ceci pourrait être abordé par l'intégration de ce paramètre crucial dans le modèle géomécanique établie à l'occasion de cette étude. Dans le même contexte, les futures analyses devraient également viser à mieux contraindre la dimension, la géométrie et le mode de rupture des failles issues de la sismicité actuelle et historique. Cette connaissance nous apparaît particulièrement importante pour l'estimation de l'aléa sismique et la génération potentielle de zones de ruptures dynamiques importantes. Pour ce faire il sera nécessaire de continuer l'investigation et la révision des mécanismes au foyer esquissés par cette étude qui sont associés à des fortes incertitudes (probablement liées à la complexité du champ d'ondes sismiques perturbé par la présence des travaux miniers). Il sera également important d'appliquer des méthodes de localisation relative et d'analyse de spectre à la source (paramètre à la source) afin de déterminer précisément l'orientation et la taille des plans de failles. Ces analyses pourront également contribuer à mettre en évidence la présence éventuelle de mouvements asismiques.

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

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Origine de l'essai sismique de Fuveau et son lien avec l'ennoyage des anciens travaux miniers, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 201216 - 2215842 - v1.0, 28/04/2021 19/05/2021.

Mots-clés :

Après-mine, sismicité anthropique, surveillance, ennoyage, charbon, risque, vibrations

1 Contexte et objectifs

1.1 Rappel des résultats des études précédentes

Les travaux miniers dans l'ancien bassin houiller de Gardanne ont été partiellement ennoyés après l'arrêt de l'exploitation et la fermeture de la mine en 2003. L'ennoyage a progressé d'ouest en est du bassin lorsque les pompages d'exhaure ont été fortement réduits (pour ramener le niveau de la nappe de la cote - 1 100 m NGF à - 14 m NGF en 2010). Par ailleurs, entre 2006 et 2007 un dispositif de surveillance microsismique permanent a été installé à la demande de l'Etat (Figure 1) pour surveiller des zones d'aléa mouvement de terrain post-minier de type « affaissement à caractère cassant » définies par GEODERIS (rapports S 2010/29DE-10PAC3200 et S 2016/004DE-16PAC22070 où la stabilité des travaux miniers souterrains était prise en considération) et pour lesquelles existaient des enjeux de surface.

Dès 2010, une activité microsismique soutenue s'est développée avec plus de 3000 événements microsismiques enregistrés dans et en-dehors des zones surveillées, notamment au centre du bassin houiller de Gardanne, au niveau du front d'ennoyage. Cette sismicité semblait être en lien avec la mise en eau des vides miniers et les fluctuations du niveau de la nappe induites par les changements météorologiques saisonniers (la pluviométrie). On notait l'existence d'une zone particulièrement active (la zone dite de l'essai de Fuveau) dans le secteur minier de Regagnas (et en partie Gréasque) où des événements sismiques apparaissaient périodiquement sous forme de « crises » (cf. Figure 2). Les événements sismiques les plus importants enregistrés durant ces crises présentaient des magnitudes (M_L) proches de 2, allant jusqu'à 2,5 voire 2,8. Ils ont été pour les plus forts ressentis localement par la population.

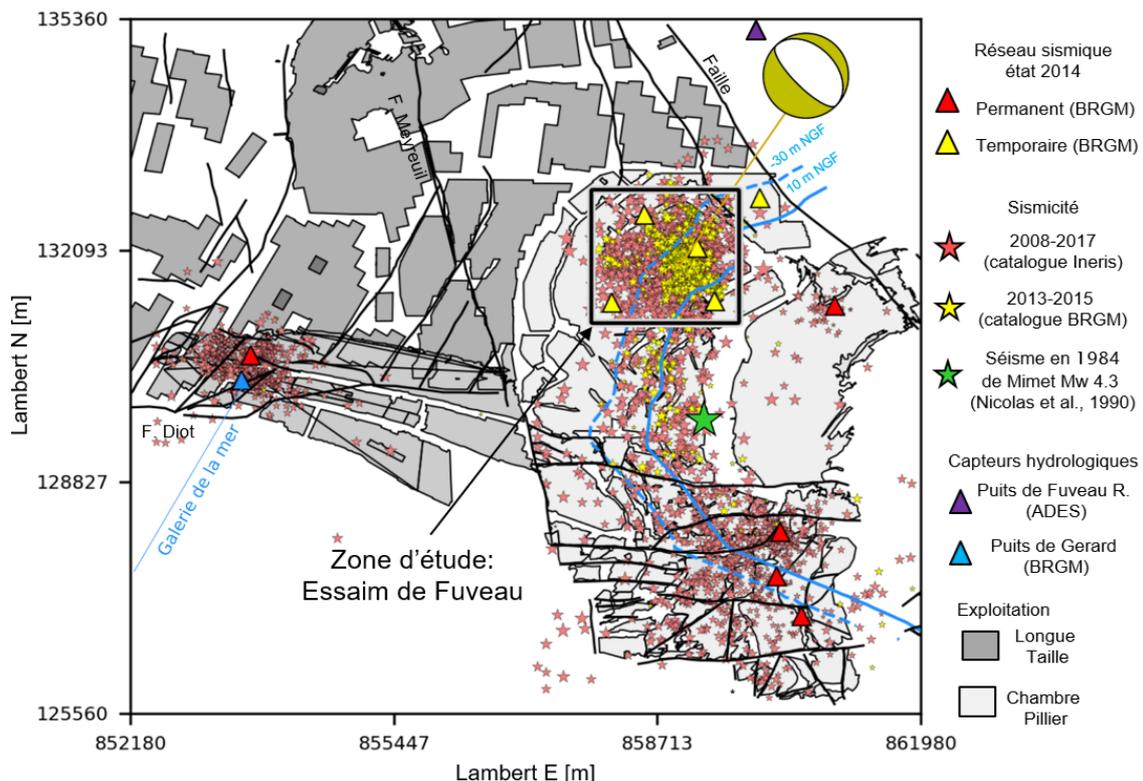


Figure 1 L'ennoyage de la mine de Gardanne et la sismicité. Le front d'ennoyage (contours bleus) a été projeté considérant le niveau minimal et maximal d'eau enregistré au puits Gérard à l'ouest de la mine.

A noter la bonne corrélation spatiale du front d'ennoyage avec la sismicité enregistrée depuis 2008 avec le réseau permanent (étoiles rouges). La sismicité de 2013-2015 (étoiles jaunes) enregistrée par les stations temporaires du BRGM dans la zone d'étude a été interprétée comme liée à un réseau de failles, de type normal (beachball jaune qui représente la projection des plans failles dans l'hémisphère inférieure de la source sismique) situé en dessous des travaux miniers (Ineris, 2017).

Cette activité sismique a conduit à l'installation d'un réseau sismologique temporaire par le BRGM-DPSM en 2013 dans le secteur de Fuveau (Figure 1). Des études préliminaires, en majorité basées sur l'analyse d'une crise sismique survenue en 2014, ont alors conduit à formuler l'hypothèse d'un lien entre l'activité sismique et les fluctuations saisonnières du niveau de la nappe dans les travaux miniers (Dominique, 2015 ; Ineris, 2017 ; Matrullo et al., 2015). Dans cette hypothèse, les travaux miniers sont assimilés à un aquifère « anthropique » avec des capacités de stockage importantes, notamment dans les parties comportant de nombreux vides miniers (zone d'exploitation dite en chambres et piliers). Durant les périodes de crue, la charge due à la colonne d'eau dans cet aquifère semble augmenter de manière importante la pression hydrostatique et interstitielle qui induirait la génération de la sismicité.

Cette hypothèse se basait notamment sur des corrélations entre le taux de sismicité, les mesures piézométriques au puits Gérard (Figure 1) et la pluie efficace (Figure 2). En effet, une des observations les plus marquantes est la coïncidence temporelle de l'arrivée du front d'envoyage (approximé à partir des mesures au puits Gérard) en 2010 avec la naissance de l'essai de Fuveau (Figure 2). Depuis l'arrivée du front, nous notons une bonne corrélation spatiale entre la zone inondée et l'activité sismique dans la partie est de la mine (Figure 1). Malheureusement, l'investigation du lien hydro-sismique et du mécanisme de déclenchement précis (pression interstitielle critique, chargement volumétrique par le poids de la colonne d'eau dit effet « poro-élastique » etc.) n'a pas pu être approfondi à cause de l'absence de mesures piézométriques directement dans la zone sismique la plus active (essai de Fuveau).

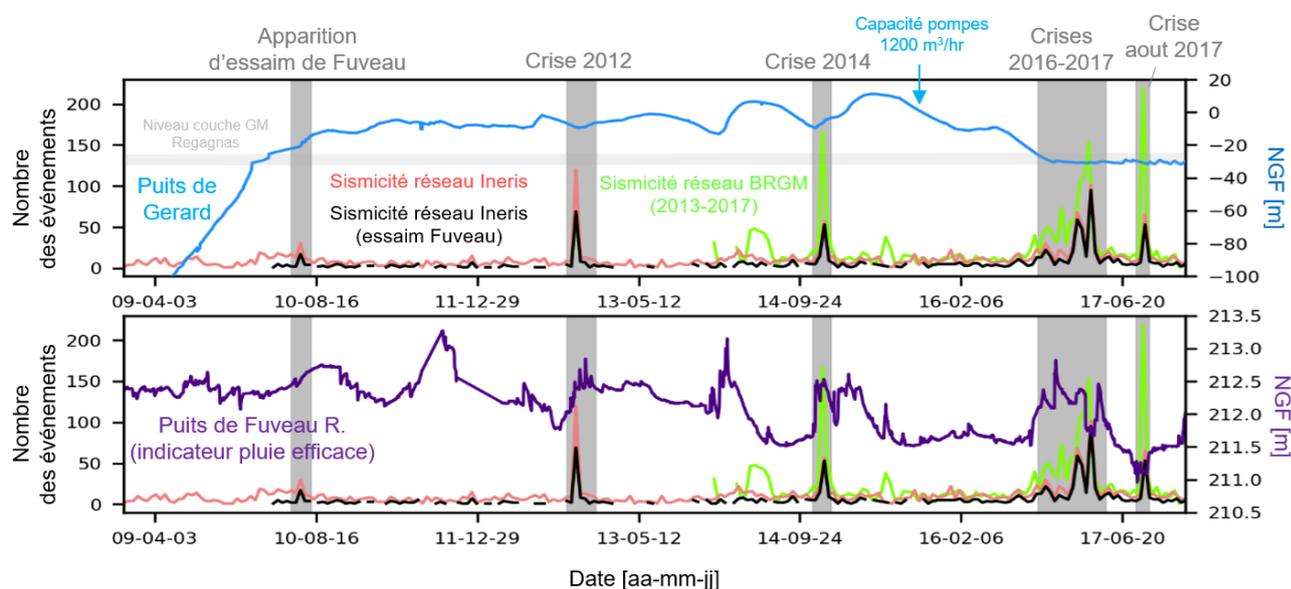


Figure 2 Représentation de la sismicité en comparaison avec les variations piézométriques. La sismicité enregistrée par le réseau permanent est représentée par le nombre d'évènements dans la totalité du bassin (courbes rouges) et dans la zone d'étude (courbes noires). La sismicité enregistrée dans la zone d'étude par le réseau BRGM temporaire (courbes vertes) a été analysée dans les travaux de thèse co-encadrée par l'Ineris et le BRGM (Namjesnik et al., soumis). Les variations de la nappe dans les travaux de la partie ouest de la mine sont représentées par le niveau piézométrique au puits Gérard (courbe bleue en haut). Les variations piézométriques au puits de Fuveau Rognacien (courbe indigo en bas), un puits superficiel à 10 m de profondeur, sont considérées comme un bon indicateur de la pluie efficace au nord-est de la mine (cf. Figure 1).

1.2 Objectifs et cadre de cette étude

Ce rapport présente une réévaluation des 2 hypothèses (remobilisations dans les travaux miniers et/ou des failles et discontinuité préexistantes ; cf. § 1.1) concernant l'origine de la sismicité dans le secteur dit de l'essai de Fuveau du bassin houiller de Gardanne (Figure 3) sur la base de nouvelles données acquises grâce au renforcement temporaire des suivis hydrogéologique et sismique réalisés dans le cadre du programme d'appui aux pouvoirs publics de l'Ineris depuis janvier 2018. L'obtention d'éléments conclusifs quant à la compréhension des mécanismes à l'origine de la sismicité est fondamentale, car cela peut entraîner des implications différentes au niveau de la définition de l'aléa ou pour la gestion du risque.

En effet, en supposant que l'origine de la sismicité est en accord avec l'hypothèse 1, cela impliquerait que :

- les instabilités dans les travaux miniers arriveront un jour à leur stade final (équilibre) ce qui coïncidera probablement avec la fin de la génération de la sismicité ;
- la magnitude maximale attendue d'un séisme (M_{max}) restera probablement du même ordre de grandeur que celle de la sismicité mesurée actuellement, car elle dépendra fortement de la taille des effondrements, qui est proportionnelle à l'étendue des travaux miniers qui peuvent encore s'effondrer et qui, a priori, diminuera avec le temps.

A contrario, si nous supposons que l'origine de la sismicité est liée à la réactivation de failles plus profondes localisées sous les travaux miniers (hypothèse 2), alors :

- l'estimation de l'aléa serait complètement différente tant au niveau de la persistance de la sismicité à long terme ainsi qu'en termes de magnitude maximale M_{max} attendue (celle-ci dépendant de la taille du segment de faille qui est réactivé) ;
- comme la région de Gardanne est une zone tectoniquement active (ex : évènement de Mimet MI 4.1 en 1984, Figure 1), la réactivation de failles majeures par la perturbation de contraintes induites par des variations de la nappe dans les travaux miniers serait un mécanisme possible à prendre en considération ;
- cette réactivation dépendrait de nombreux facteurs comme la géométrie des anciens travaux, la fluctuation locale du niveau de la nappe (qui elle-même dépend des conditions météorologiques et du taux de pompage anthropique), la présence de failles à proximité et le transfert de contraintes produit par des mouvements de failles mineures, qui sont-elles très difficiles à identifier.

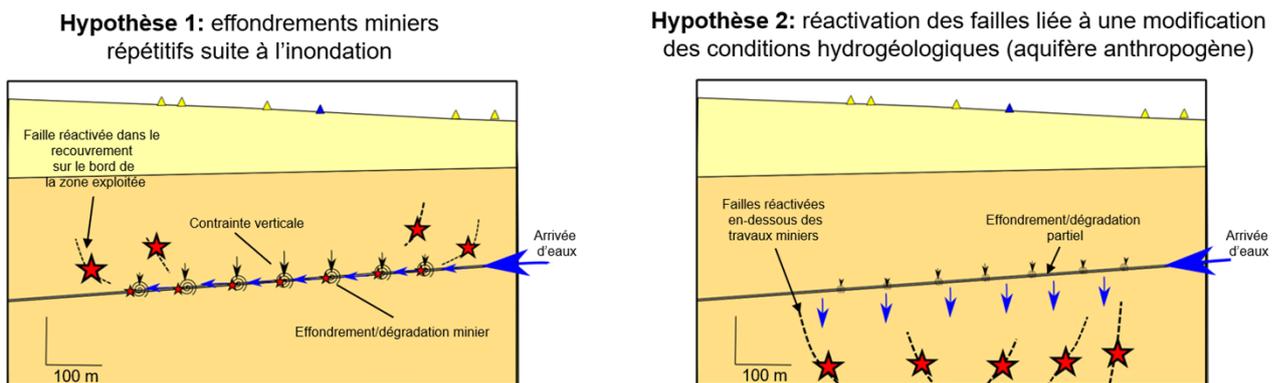


Figure 3 Schémas présentant les deux hypothèses émises pouvant expliquer l'origine de la sismicité observée à Gardanne dans la zone d'étude (l'essai de Fuveau).

Les questions abordées par cette étude se rattachent aux problématiques génériques de recherche sur la sismicité induite générée par l'exploitation des géoressources avec ou sans injection / pompage de fluides.

La réévaluation des hypothèses de l'origine de la sismicité à Gardanne est basée sur de nouvelles données acquises grâce au renfort du suivi :

- 1) hydrogéologique : avec l'installation de 3 piézomètres dont les enseignements ont permis d'améliorer le modèle hydrogéologique du bassin et de mieux comprendre les circulations d'eaux dans les anciens travaux miniers ainsi que l'interaction entre battement de nappe et sismicité (cf. § 2) ;
- 2) sismique : avec l'installation de 4 stations sismiques supplémentaires qui ont pour objet de mieux contraindre les profondeurs des sources sismiques et les mécanismes au foyer (cf. § 3).

Ces deux sources d'informations ont été complétées par des analyses complémentaires sur l'analyse du mécanisme déclenchant (cf. § 4). La synthèse de l'ensemble des résultats et leur analyse sont ensuite présentées dans la cinquième partie de ce rapport.

2 Caractérisation et réévaluation du modèle hydrogéologique

2.1 Données et renfort du suivi hydrogéologique

Le renforcement du suivi hydrogéologique a été réalisé pour suivre l'évolution de la nappe dans les travaux miniers. Ce suivi vise notamment à confirmer et améliorer le modèle hydrogéologique local, notamment dans la zone d'étude du secteur Regagnas ; la précision de ce modèle étant un impératif pour la compréhension de l'interaction entre la variation du niveau de la nappe et la sismicité.

Les seules mesures disponibles jusqu'alors étaient celles réalisées au puits Gérard situé à environ 6 km à l'ouest de cette zone, où le niveau d'eau est fortement affecté par le pompage réalisé dans la Galerie de la Mer. Ainsi, l'interprétation de ces données n'était possible qu'en faisant des hypothèses importantes sur la circulation des eaux dans les travaux miniers (circulation qui apparaît complexe dans ce secteur).

Pour améliorer le suivi et la connaissance du système hydrogéologique, notamment dans le secteur est de la mine (Figure 4), il a été envisagé d'instrumenter quatre forages existants : LHuillier², Fuveau, Champisse et Gréasque (note Ineris DRS-18-164272-01553A). Trois capteurs sur les quatre prévus ont pu être installés. Celui de Gréasque en 2018, puis ceux de LHuillier et Champisse en janvier 2020. L'installation dans le forage de Fuveau n'a pu être réalisée par crainte de vandalisme.

L'équipement piézométrique installé dans ces trois forages (note Ineris DRS-19-171497-00632A) permet de mesurer des variations du niveau d'eau en continu (échantillonnage de 10 min) avec une précision d'une dizaine de centimètres et supporte une colonne d'eau de plusieurs dizaines de mètres. Le système de mesure à chaque forage est autonome et permet une télétransmission des données vers le CENARIS. Il assure également la sauvegarde des données pendant plusieurs mois, en cas de problème éventuel de transmission de données.

Aux données ainsi acquises par l'Ineris dans le bassin de Gardanne, il a également été décidé d'intégrer d'autres données publiques pertinentes, telles que les données pluviométriques des stations météorologiques (Météo France) dans le secteur, ainsi que d'autres données disponibles sur le portail national d'accès aux données sur les eaux souterraines (ADES) (Figure 4). Toutes ces données sont rassemblées et accessibles via la plateforme de web-monitoring e.cenaris (<https://cenaris.ineris.fr>).

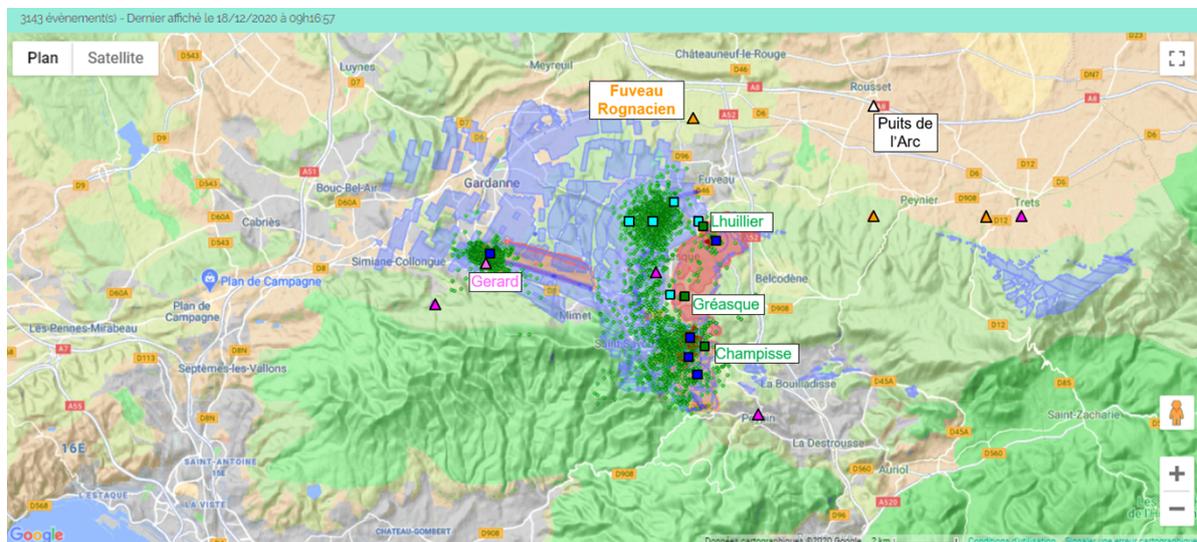


Figure 4 Localisation des capteurs piézométriques (carrés verts) et sismiques permanents (carrés bleu foncés) et temporaires (carrés bleu clairs) de l'Ineris connectés avec la base de données sur e.cenaris ainsi que des capteurs piézométriques du BRGM (triangle rose clair) et ADES (triangles orange) et des capteurs météorologique de Météo France (triangles rose foncé).

² Pour le dénomination de ce site, plusieurs orthographes apparaissent dans la littérature : L'huillier, L'huillier, LHuillier ou Lhuillier.

2.2 Rappel du fonctionnement hydrogéologique global

2.2.1 Rappel des dispositifs de gestion des eaux en phase d'exploitation

Situé au sein des calcaires fuvéliens très tectonisés, le gisement houiller de Gardanne renferme des zones en extension où les fractures sont ouvertes et aquifères, et des zones en compression où elles sont fermées ou remplies d'argile et de ce fait quasi-étanches. Ce gisement se caractérise ainsi par la présence de plusieurs venues d'eau dont certaines, de nature karstique sont très localisées et ont un fort débit (voir Annexe A.1). Lors de l'exploitation minière, la gestion de l'eau était une problématique importante avec une exhaure principale dirigée vers les puits les plus profonds par le biais de plusieurs travers-bancs (TB) et galeries. Le fonctionnement de ce dispositif d'exhaure est détaillé en Annexe A.2-A.4.

2.2.2 Fonctionnement hydrogéologique global de l'aquifère minier

Le fonctionnement hydrogéologique global de l'aquifère minier et de ses formations encaissantes peut être schématisé ainsi (Figure 5) :

- une grande partie des eaux souterraines provient de l'infiltration rapide (quelques jours) des précipitations dans les zones d'affleurement de calcaires fuvéliens, notamment au droit des quartiers du Rocher Bleu et du Lambeau Charrié ; pendant l'exploitation, il a été observé que l'impact de ces infiltrations sur les débits d'exhaure était d'autant plus fort lorsque le sous-sol et/ou les travaux du Rocher Bleu étaient déjà saturés par de précédentes précipitations ;
- une autre partie importante des eaux souterraines provient de circulations ascendantes depuis l'aquifère jurassique sous-jacent, via des fractures probablement karstifiées au vu des débits qui y transitent et des fortes mises en charge ; en bordure nord du quartier de Régagnas, hors zone exploitée, ces mises en charge atteignent jusqu'à 400 m, soit +200 m par rapport à l'altitude des travaux miniers ;
- une dernière partie, plus faible, résulte du recoupement de quelques niveaux aquifères au sein des formations du Crétacé, notamment le Bégudien.

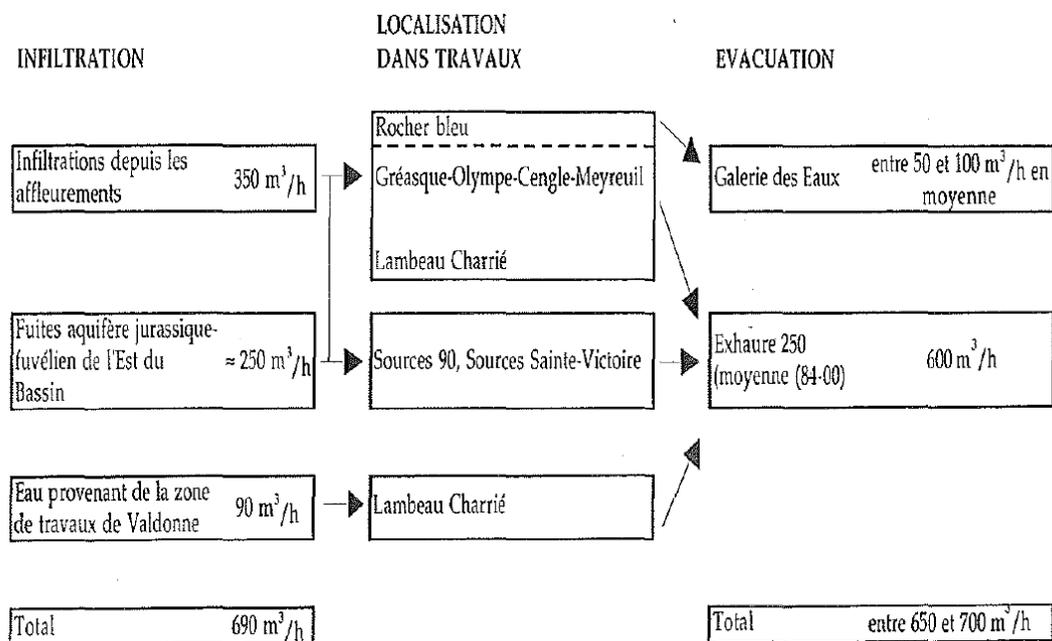


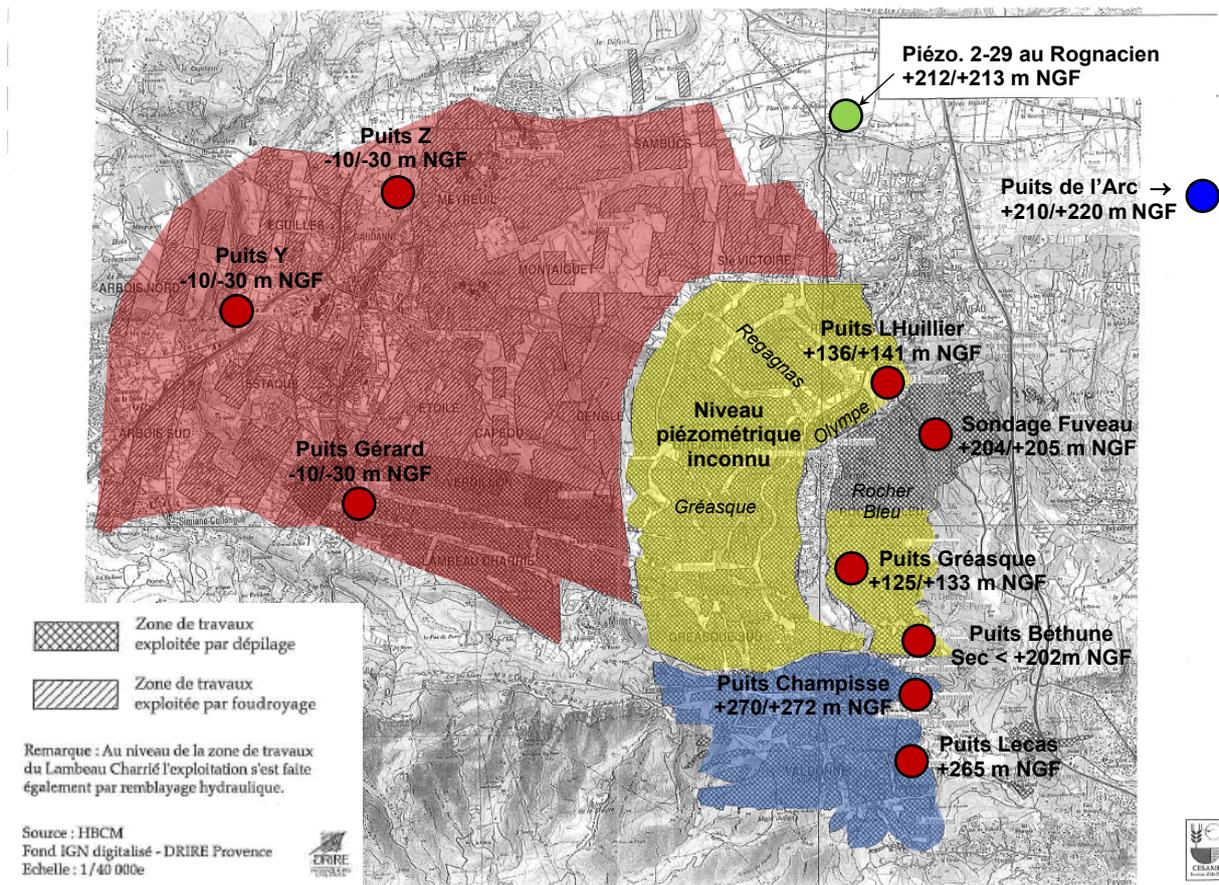
Figure 5 Origine des principales venues d'eau transitant dans les travaux miniers du secteur de Gardanne (Cesame, 2003).

Hors travaux miniers, la piézométrie moyenne du secteur de Gardanne, toutes nappes confondues, est de l'ordre de +200 à +220 m NGF (sauf au pied de l'Etoile où elle est plus haute du fait des reliefs)

comme cela est mesurable aux puits de l'Arc ou au piézomètre au Rognacien (cf. Figure 6).

Au sein des travaux miniers, la piézométrie est par contre à analyser par compartiment :

- dans le compartiment ouest, règne un niveau imposé entre +10 et -30 m NGF par le pompage au puits Gérard ; le rabattement induit se répercute quasi instantanément et avec une très faible perte de charge aux puits Y et Z situés à plusieurs kilomètres au nord (hypothèse confirmée par Dheilly, 2013) ; la piézométrie de tout ce compartiment minier est donc constamment inférieure d'environ 200 m à celle des terrains environnants non miniers ou miniers mais non directement connectés au puits Gérard.
- dans le compartiment est, le fonctionnement hydrogéologique est plus complexe :
 - o dans le quartier Valdonne, situé au sud, les venues d'eau en provenance du massif de l'Etoile et l'isolement imposé par la faille Jean-Louis se traduisent par des niveaux piézométriques élevés, compris entre 265 et 272 m NGF aux puits Lecas et Champisse (hypothèse confirmée par Dheilly, 2013) ;
 - o au sud du quartier du Rocher Bleu, de l'autre côté de la faille Jean-Louis, le niveau piézométrique est relativement bas avec 125-133 m NGF au puits Gréasque et une valeur inconnue mais inférieure à 202 m NGF au puits Béthune (puits sec) ; cela résulte probablement du drainage induit par la galerie appelée « Vannes du 113 » qui débouche non loin à la cote +113 m NGF ;
 - o au nord du quartier du Rocher Bleu, l'absence de drainage de fond (seul un débordement est possible par la galerie de Fuveau à +230 m NGF) et la forte infiltrabilité des précipitations permet à l'aquifère minier d'atteindre le niveau piézométrique environnant, soit 205 m NGF au sondage Fuveau (hypothèse confirmée par Dheilly, 2013) ; ce niveau piézométrique élevé résulterait d'un isolement de ce secteur par les barrages hydrauliques qui ont été créés dans le quartier du Rocher Bleu et par un effondrement survenu entre les forages de Fuveau et de Gréasque (voir en Annexe A.3 et A.4) ; en revanche, le puits qui se trouve à mi-chemin de ce quartier et de celui de Régagnas, montre un niveau piézométrique comparable à celui de Gréasque (avec 136-141 m NGF) mais un comportement similaire à celui du forage de Fuveau (voir en Annexe A.3). Selon Dheilly et Brigati (2015), ce niveau d'eau s'explique par le fait qu'il subsisterait un seuil de débordement à cette cote dans le puits LHuillier malgré un serrement (voir Annexe A.2 et A.4) ;
 - o les trois quartiers Gréasque-Olympe-Régagnas ne possèdent pas de piézomètre. On ne connaît donc pas leur cote d'ennoyage ni leurs fluctuations ; cependant, cette cote doit être intermédiaire entre celles du compartiment ouest en aval et celle du Rocher bleu en amont, soit entre +10 et +200 m NGF ; cette gamme de piézométrie correspond à celle du forage Gréasque et du puits LHuillier qui pourraient donc représenter la cote d'ennoyage de ces trois quartiers.



Légende :

Niveau rabattu de >200 m	Niveau rabattu de 60 à 80 m	Niveau haut imposé par l'Etoile
Puits minier	Piézomètre au Crétacé	Piézomètre au Jurassique

Figure 6 Cotes piézométriques mini/maxi mesurées en 2016 dans les travaux miniers et dans leur encaissant proche (d'après Cesame, 2003 modifié).

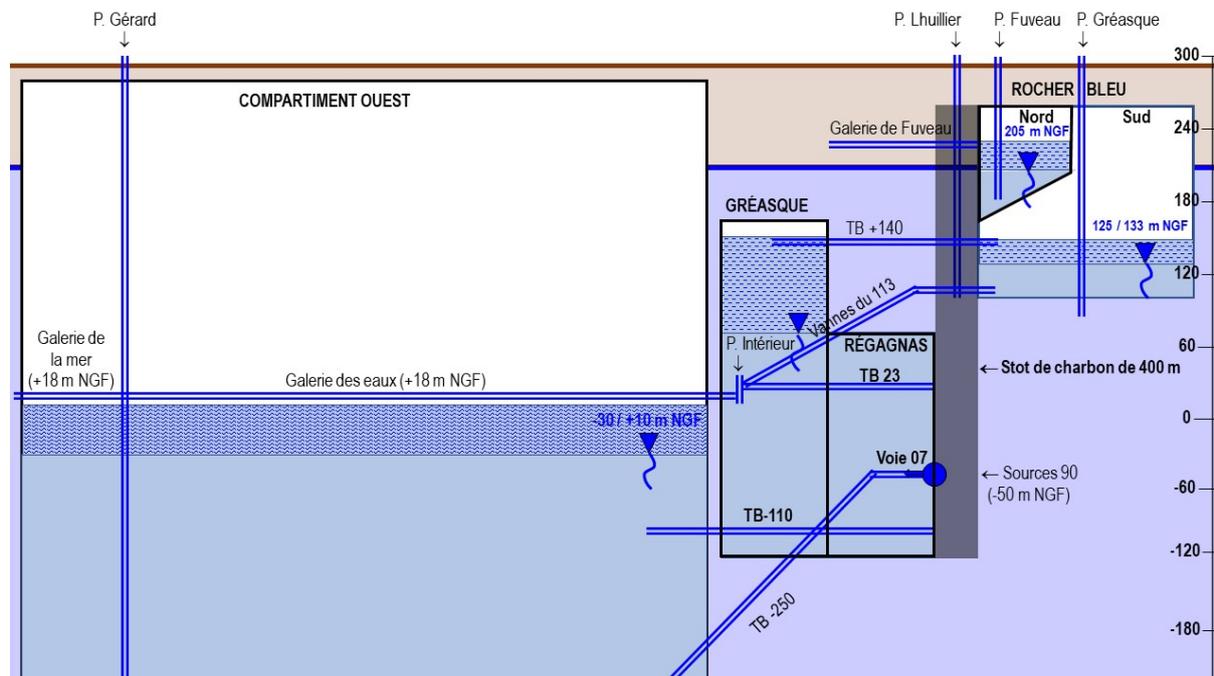
2.3 Fonctionnement hydrogéologique des quartiers Gréasque-Olympe-Régagnas

Bien qu'on ne dispose d'aucune mesure de piézométrie dans ces quartiers, où se produisent actuellement de nombreux séismes, on pense que le niveau de la nappe se situe en position intermédiaire entre (Figure 7):

- en amont, le quartier du Rocher Bleu qui réagit très fortement aux précipitations importantes puisqu'il peut déborder dans la galerie de Fuveau située à +230 m NGF ; comme le mur de ce quartier se trouve vers +100 m, cela correspond à une mise en charge potentielle de l'ordre de 130 m ;
- en aval, le compartiment ouest qui est sous l'influence du pompage du puits Gérard, avec des niveaux oscillants entre -30 et +10 m NGF.

Si les préconisations émises par Cesame (2003), Dheilly (2013) et Dheilly et Brigati (2015) pour la fermeture de la mine ont bien été respectées, le quartier du Rocher Bleu doit être resté en connexion hydraulique avec les quartiers plus profonds - dont Gréasque-Olympe-Régagnas - par le biais des Vannes du 113 au Sud et de la galerie de Fuveau au Nord (voir Annexe A.2 et A.4). Cesame avait également tracé les grandes lignes de l'ennoyage des travaux miniers après leur abandon dans l'hypothèse d'une surverse gravitaire par la galerie de la Mer (Annexe A.2). Dans ce cas, le niveau de base aurait dû être imposé par la cote de surverse de +18 m NGF de cette galerie dans le compartiment ouest et, dans le compartiment est, par la cote +23 m NGF correspondant au TB23 qui la prolonge. Comme le pompage au puits Gérard continue actuellement d'imposer un niveau inférieur de 20 à 50 m à celui de la galerie de la Mer, ce schéma n'est pas valable mais on aurait dû observer une cote

d'ennoyage autour de +23 m NGF (voire moins) dans le compartiment est. Pourtant, les mesures du BRGM-DPSM pour les années 2016-2018 (Annexe A.3) et les résultats du suivi mis en place par l'Ineris depuis août 2018 (Figure 8) montrent que le niveau d'ennoyage du compartiment « est »³ varie de +125 à +136 m NGF au puits Gréasque et de +136 à +141 m NGF au puits LHuillier, ce qui représente une charge supplémentaire d'une centaine de mètres par rapport à l'état prévu. En revanche, ces niveaux sont assez stables puisque les fluctuations les plus fortes ont atteint 5,36 m au forage Gréasque depuis le début du suivi en 2018 malgré des précipitations journalières qui ont atteint 72 mm.



Légende :

- | | |
|----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Ennoyage permanent des travaux miniers | Ennoyage temporaire des travaux miniers |
| Aquifère non minier | Travaux miniers dénoyés |
| | Stot |

Figure 7 Schéma probable de fonctionnement hydrogéologique des quartiers Régagnas-Gréasque et limitrophes.

Cette différence de niveau d'ennoyage entre l'est et l'ouest de l'exploitation minière n'est explicable que par d'importantes pertes de charge (de l'ordre de grandeur d'une centaine de mètres), tout d'abord au niveau du stot de 400 m situé en aval du quartier Rocher Bleu puis des serrements réalisés dans les galeries donnant accès aux quartiers du compartiment ouest (cf. Figure 7 proposant un schéma de fonctionnement hydrogéologique local basé sur la littérature disponible et nos observations). Il est donc probable que les quartiers Gréasque-Olympe-Régagnas qui font tampon entre la zone du Rocher Bleu et le compartiment ouest soient ennoyés à un niveau variant de +113 m NGF au minimum (valeur imposée par les Vannes du 113) à +230 m NGF au maximum (cote de la galerie de Fuveau). Compte tenu de la cote de toit du quartier Régagnas (entre -50 et +70 m NGF), celui-ci doit être ennoyé en permanence avec une charge minimale autour de 4 bars de pression qui peut augmenter à la suite de fortes précipitations survenant en période de hautes eaux piézométriques. Cela peut également être le cas des quartiers Olympe et Gréasque mais moins souvent et moins fortement compte tenu de la cote de leur toit, située autour de 150 m NGF.

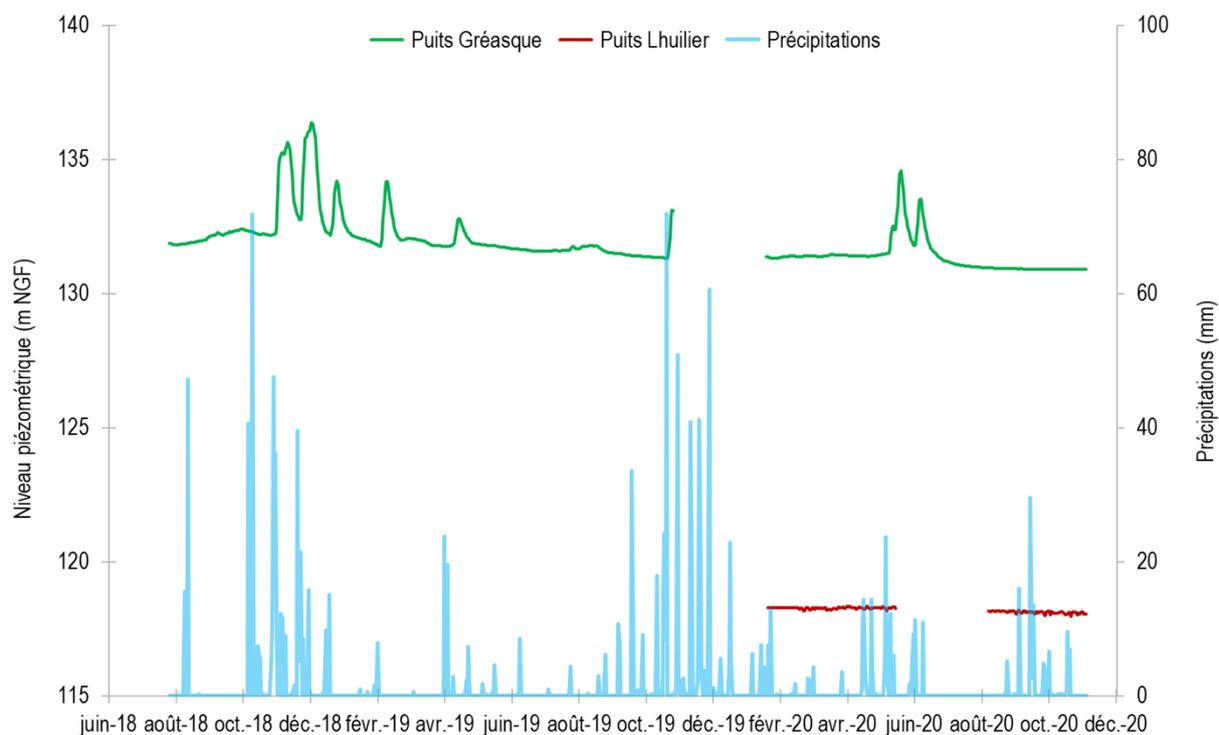
Le niveau d'ennoyage des quartiers Olympe-Régagnas-Gréasque dépend principalement de l'écart entre le débit et la charge des eaux entrant depuis le réservoir du Rocher Bleu (à travers le stot et éventuellement la galerie des Vannes du 113), et des eaux qui en sortent en direction du compartiment

³ hors zone isolée du forage de Fuveau dont la piézométrie est autour de +205 m NGF.

ouest (à travers les serremments et par le TB23 puis la Galerie des eaux). On peut ainsi émettre l'hypothèse que ce niveau d'ennoyage peut subir les fluctuations extrêmes suivantes :

- en cas de fortes précipitations, surtout si elles surviennent en période de hautes eaux piézométriques (de novembre à mars), le niveau de remplissage de ces quartiers est conditionné par les arrivées d'eau en provenance du réservoir du Rocher Bleu ; la cote piézométrique maximale mesurée depuis 2016 est de +205 m NGF au forage Fuveau mais on sait qu'elle peut exceptionnellement atteindre +230 m NGF ;
- en période d'étiage piézométrique et de déficit pluviométrique important et durable, l'ennoyage de ces quartiers pourrait descendre au niveau du TB23 et de la Galerie des eaux, soit +23 m NGF.

Du fait de leur position intermédiaire et des stots ou serremments qui les séparent de l'amont et de l'aval de la mine, les quartiers Olympe-Régagnas-Gréasque sont susceptibles de subir de fortes fluctuations piézométriques. Les mesures récentes réalisées par l'Ineris ne montrent que des variations d'ordre métrique mais l'historique des données indique qu'elles pourraient exceptionnellement atteindre 200 m.



3 Caractéristiques des sources sismiques

3.1 Complément à l'analyse de la sismicité sur la période 2014 -2017

Comme introduit dans le premier paragraphe de ce rapport, la caractérisation des sources sismiques dans l'étude précédente (Ineris, 2017) se focalisait sur les données associées à la crise microsismique de décembre 2014 enregistrées par le réseau temporaire du BRGM, installé dans la zone de l'essaim de Fuveau (cf. Figure 1). En complément à cette étude, les données de ce réseau ont été analysées sur une période plus large allant de 2014 à 2017 dans le cadre d'une thèse conduite en partenariat scientifique entre l'Ineris, le BRGM et l'Université de Lorraine. Ces travaux ont amené au développement d'une approche de détection et de localisation automatique adaptée au traitement des données acquises en continu, basée sur un principe de cohérence de l'ensemble des stations (« back-projection ») (Poiata et al., 2016 ; Namjesnik et al., soumis). Le défi de ce développement et la particularité de cette approche reposent sur sa capacité de localisation et d'identification des événements sismiques avec un faible nombre de stations (< 4).

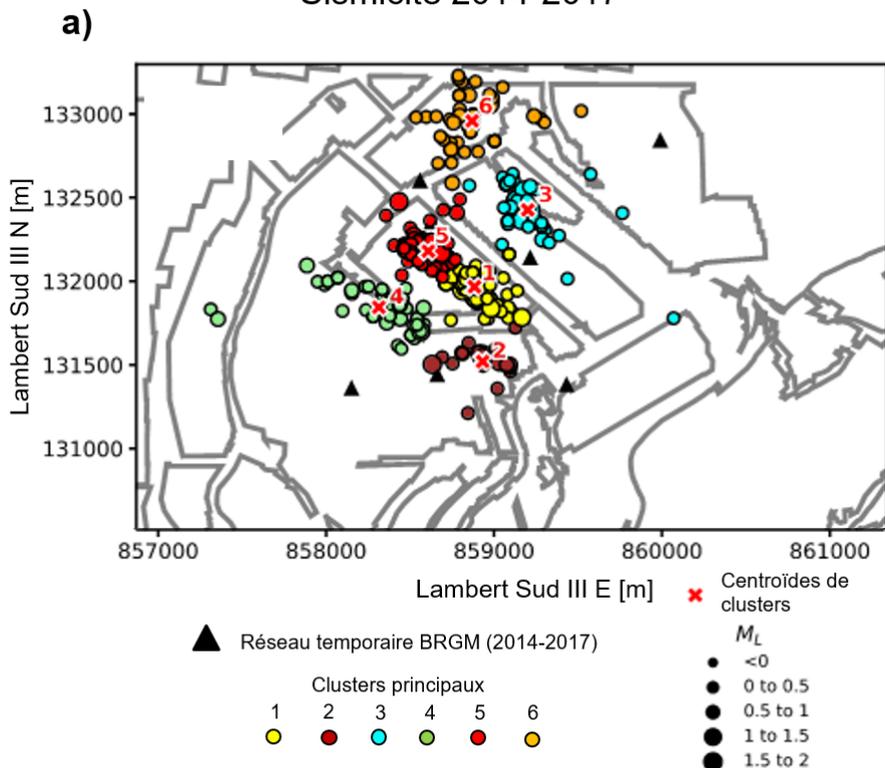
Grâce à cette approche nous disposons aujourd'hui d'un catalogue très détaillé de la sismicité durant la période 2014 - 2017 pour la zone de l'essaim de Fuveau. Ce catalogue confirme, au-delà de la crise de 2014, une forte activité sismique associée à plusieurs crises entre octobre 2016 et mars 2017 ainsi qu'une crise isolée en août 2017 (Figure 2 et Figure 9). Les résultats de localisation présentés dans la Figure 9a montrent :

- la présence de 6 clusters spatiaux principaux (un cluster correspondant à un groupement spatial d'événements) qui caractérisent des zones sismogènes répétitives et actives pendant toute la période 2014-2017 (le cluster 1 semble le plus actif d'un point de vue temporel et en nombre d'événements) ;
- que l'intensité de l'activité (ou nombre d'événements sur une fenêtre temporelle donnée) dans chacun des clusters présente une certaine corrélation avec les variations de la nappe dans les travaux miniers. En première approche, ces variations semblent conditionnées par les périodes de pluie intense et par le débit de pompage au puits Gérard mais aussi par des périodes de sécheresse (cluster 6) (Figure 9b).

Par ailleurs, ces clusters établis sur la base de la ressemblance des formes d'ondes, dont un exemple est montré sur la Figure 10 pour le cluster 1, traduisent la présence de multiplets, qui s'apparentent à des familles d'événements. Les événements d'un même multiplet sont d'origine temporelle différente et leur magnitude peut varier, mais ils sont tous très proches en termes de localisation et de mécanismes à la source car ils résultent de la libération de contrainte d'une même structure géologique. On observe que certains multiplets persistent sur des périodes variant de quelques mois à quelques années (Figure 10), ce qui confirme les observations précédentes qui portaient sur une période de temps plus réduite (Ineris, 2017).

L'interaction hydro-sismique sera discutée plus en détail dans le chapitre en lien avec le mécanisme déclenchant. A noter que cette nouvelle approche n'a pas permis d'améliorer l'incertitude sur la profondeur des sources sismiques car le nombre de stations utilisées n'était pas suffisant. L'analyse ici présentée n'apporte donc pas d'éléments nouveaux concernant ce paramètre clef quant à la compréhension de l'origine de la sismicité.

Sismicité 2014-2017



Sismicité 2014-2017 vs pluie efficace

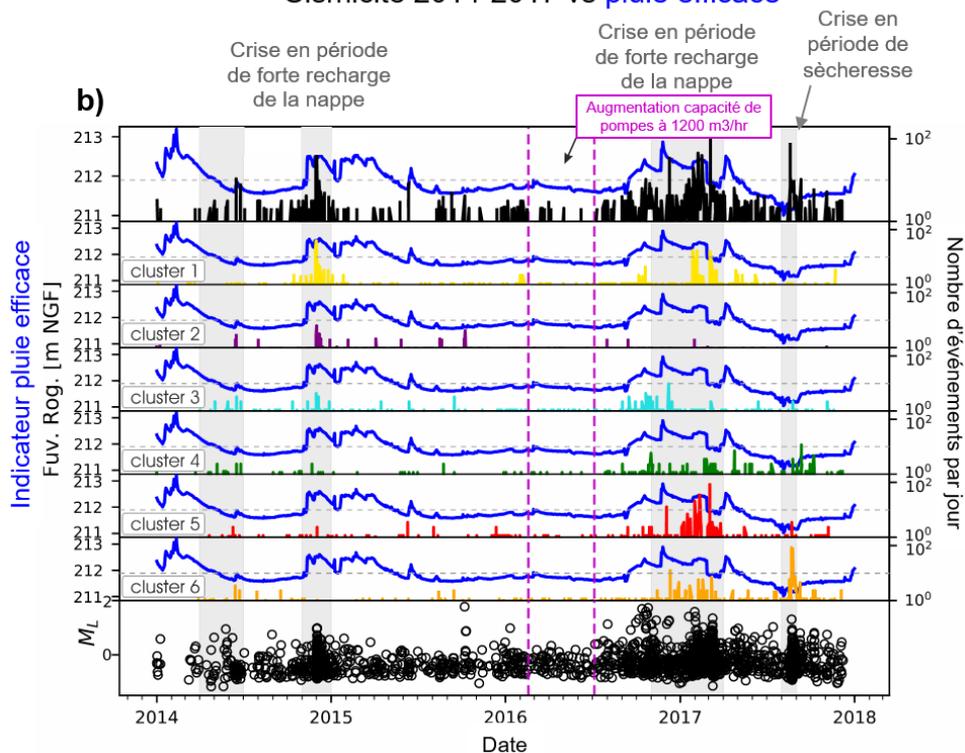


Figure 9 Catalogue de la sismicité entre 2014 à 2017 dans le secteur de Fuveau, obtenu à partir du réseau temporaire du BRGM composé de 4 stations en utilisant une approche de détection et de localisation développée dans le cadre de la thèse co-encadrée par l'Ineris et le BRGM.

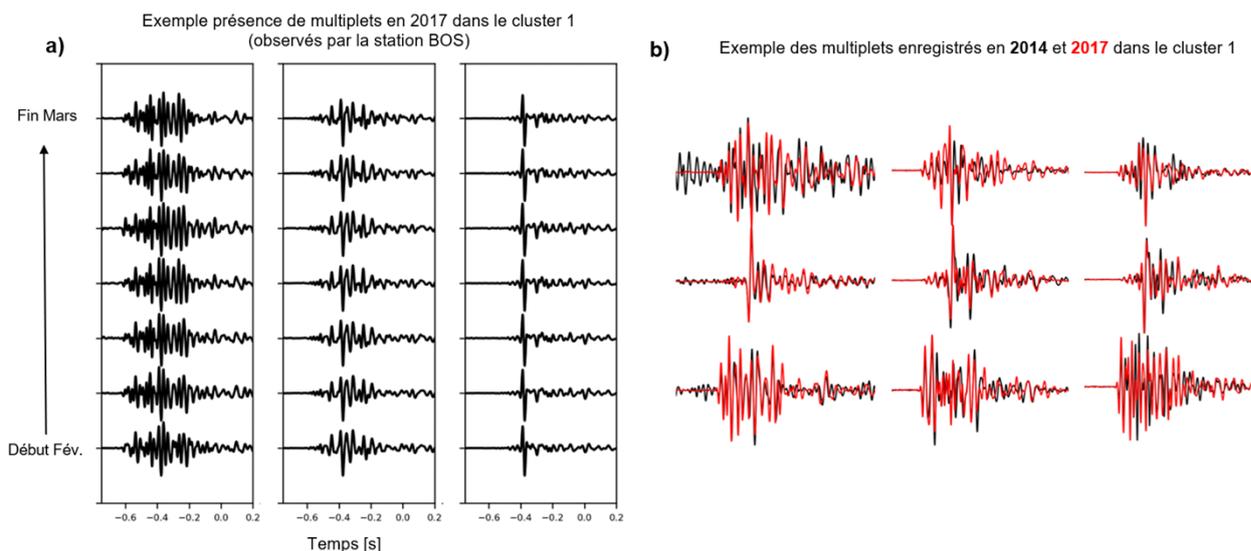


Figure 10 Illustrations de la présence de multiplets dans le cluster 1, à partir des enregistrements de la station BOS ; a) Événements « multiplets » persistants sur une période de quelques mois ; b) Trois événements « multiplets » persistants de 2014 jusqu'à 2017.

3.2 Données et renforcement du suivi sismique

En 2018, quatre stations sismiques temporaires ont été installées par l'Ineris dans la zone de l'essai de Fuveau (hors zone de surveillance, Figure 11, notes techniques Ineris-DRS-19-171497-00632A, Ineris-178729-708087, Ineris-178729-1971325). Il s'agit de deux stations équipées de géophones 2 Hz (Hib et Pig) et deux stations large bande 60 s (Gat et Lab). Rappelons que le BRGM-DPSM a également installé six stations supplémentaires, ce qui porte le nombre de stations sur cette zone à 14 depuis février 2019. Ce réseau dense couvre bien toute la zone de l'essai de Fuveau (Figure 11).

Les objectifs de ce renfort microsismique étaient d'améliorer :

- le suivi des événements dit forts dans ce secteur et en quasi-temps réel grâce à une télétransmission des données continue vers le CENARIS. Pour cela, un modèle de vitesse a été calibré à l'échelle du bassin pour assurer une bonne localisation (épicentrale) de ces événements dans le cadre de la surveillance (note technique DRS-19-171497-00632A et Ineris-178729-1971325). Il a été estimé que grâce à ces nouvelles stations, l'erreur de localisation épicentrale pour ces événements a été réduite de quelques kilomètres à moins d'un kilomètre ;
- la caractérisation des sources sismiques, notamment en termes de localisation en profondeur et de mécanisme au foyer. La connaissance précise des caractéristiques de ces sources sismiques est essentielle pour discriminer les deux hypothèses exposées au paragraphe 1.1 à savoir la remobilisation des travaux miniers, ou la réactivation de failles profondes situées sous les travaux.

A partir des 14 stations de mesure, 14 événements ont été identifiés en 2019/début 2020 et ont été détectés par la majorité des stations (au moins 11 par événement). Ces événements présentent un rapport signal sur bruit élevé et ont été initialement identifiés à partir du catalogue du réseau de surveillance permanent.

La localisation de ces 14 événements est cohérente avec la localisation des principaux clusters identifiés dans l'analyse de la sismicité historique entre 2014-2017 (Figure 11). Etant donné le caractère persistant des clusters, nous pensons que l'analyse de ces 14 événements permettra de caractériser de manière représentative chacun de ces clusters historiques en termes de profondeur et de mécanisme au foyer.

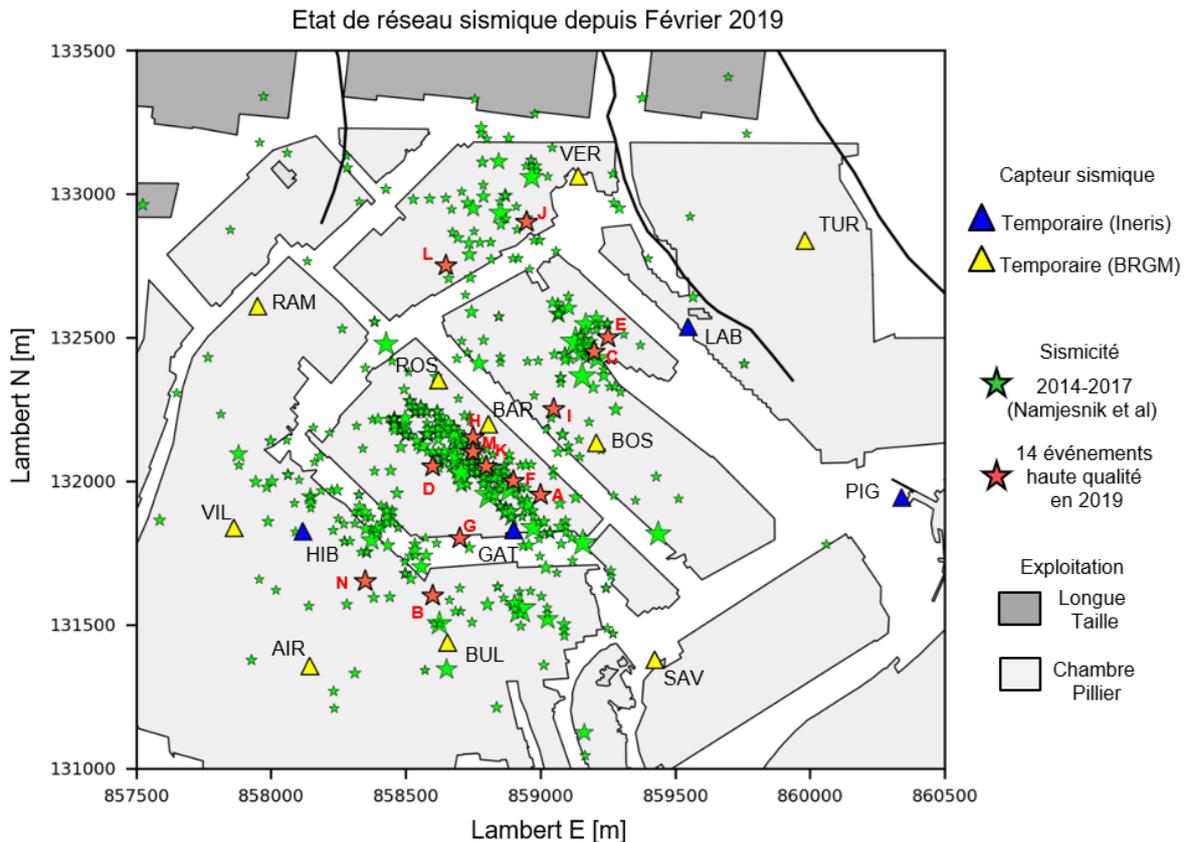


Figure 11 L'état du réseau sismique depuis Février 2019 et les 14 événements forts (étoiles rouges) enregistrés par le réseau permanent en 2019/début 2020, objets d'une analyse approfondie (§ 3.3 et 3.4). A noter que la localisation de ces événements est cohérente avec les clusters principaux marqués par la sismicité historique (étoiles vertes)

3.3 Evaluation de la profondeur des événements sismiques

Grâce au dispositif sismique renforcé, une analyse permettant d'évaluer la profondeur de ces 14 événements et l'incertitude de localisation associée a pu être réalisée. Ce paragraphe illustre le fait que cette incertitude en termes épical et en profondeur dépend fortement des erreurs de pointés sur les temps d'arrivées des ondes P et S (pointés P et S) ainsi que de la qualité du modèle de vitesse de propagation des ondes.

3.3.1 Calibration du modèle de vitesse

Dans un premier temps, nous avons calibré un modèle de vitesse en minimisant la RMS (racine carrée de la moyenne des carrés) entre les temps d'arrivées observés et théoriques pour les 14 événements (enregistrés sur au moins 11 stations). Pour cela la démarche suivante a été adoptée :

- un ensemble de 810 modèles monocouche a été testé correspondant à des vitesses d'ondes P V_p variant entre 2000 - 6500 m/s (avec un pas de 100 m/s) et un rapport V_p/V_s variant entre 1.5-2.3 (avec un pas de 0.05) ;
- la qualité de chaque modèle de vitesse testé a été évaluée par la moyenne des RMS. Les meilleurs modèles correspondent aux modèles qui présentent un minimum de la moyenne des RMS sur l'ensemble des stations pour l'ensemble des 14 événements.

Les résultats de cette inversion montrent une convergence vers un modèle monocouche avec les vitesses $V_p = 3900$ m/s et $V_s = 1950$ m/s (avec $V_p/V_s = 2$) (Figure 12). Ces résultats sont en accord avec les résultats d'études précédentes menées par l'Ineris ($V_p = 4100$ m/s et $V_s = 2050$; Ineris, 2017) et par le BRGM ($V_p 3900$ m/s et $V_s = 1950$ m/s ; Dominique 2015) dans lesquelles une approche similaire a été appliquée en utilisant les 4 stations du réseau temporaire du BRGM qui étaient en place en 2014 et les données de la crise de décembre 2014.

La qualité et l'adéquation du modèle de vitesse monocouche obtenu sont illustrées d'une part par la Figure 12b, qui montre les pointés P et S observés en fonction de la distance hypocentrale calculée à partir du résultat de la localisation. Nous observons des tendances linéaires qui indiquent la présence d'une seule phase directe P et S, ce qui signifie que la propagation des ondes dans les terrains peut être approximée avec une vitesse moyenne constante. En effet, un modèle de vitesse plus compliqué ou plus hétérogène (variant dans l'espace) se traduirait par des tendances multilinéaires (comme par exemple dans le cas d'un champ d'ondes réfractées) et/ou non-linéaires, respectivement. D'autre part, comme illustré par la Figure 12c, nous constatons que les phases des ondes P et S visibles dans les sismogrammes sont très bien reproduites par les temps d'arrivées théoriques prédits par le modèle.

Nous soulignons également que nous n'avons pas identifié de modèle bicouche plus adapté (pour approximer la propagation des ondes sismiques dans la zone d'étude) que le modèle monocouche présenté ici. En effet, parmi un ensemble d'environ 660 000 modèles testés, aucun modèle bicouche ne permet une amélioration significative de la RMS, ni qualitativement au niveau de la reproduction des phases visibles dans les sismogrammes.

Cependant, à l'échelle du bassin minier complet, un modèle bicouche devient indispensable pour des distances épacentrales > 5 km (cf. rapport Ineris-178729-1971325 ; Hervieu, 2020). En effet au-delà de cette distance, les premières arrivées aux stations sont celles des ondes qui se propagent dans les couches profondes qui présentent des vitesses plus importantes que les couches de surface.

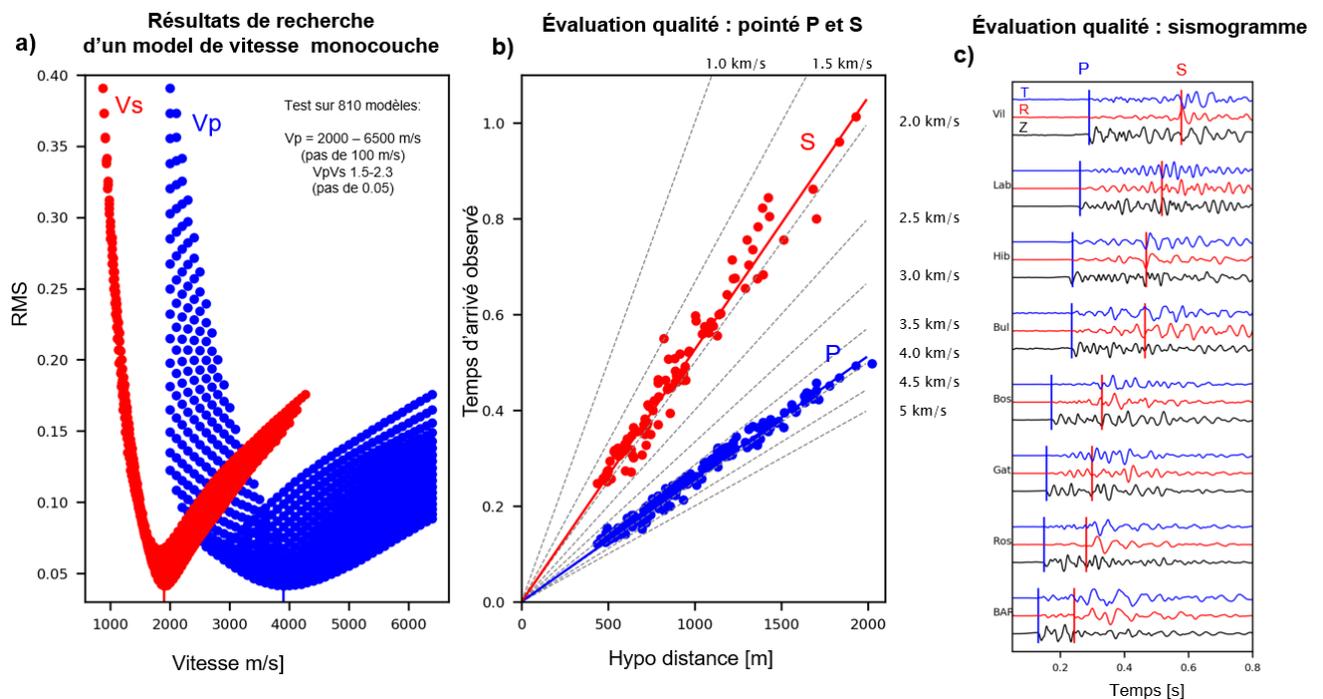


Figure 12 Résultat et évaluation de la qualité du modèle de vitesse monocouche ; a) Résultat de l'inversion sur l'ensemble des modèles testés en fonction de la RMS ; b) Qualité de reproduction des pointés P et S montrés en fonction de la distance hypocentrale calculée à partir de la localisation obtenue par le modèle final ; c) Qualité de la reproduction des phases visibles dans les sismogrammes (pour l'exemple de l'événement G, cf. Tableau 1 ci-après) pour les pointés théoriques P (barre verticale bleue) et S (barre rouge) calculée par le modèle et la localisation obtenue.

3.3.2 Évaluation de l'erreur sur la profondeur des événements

Concernant les résultats de localisation avec le modèle monocouche, nous observons que les profondeurs des 14 événements indexés dans la suite de A à N se situent en majorité entre 50 et 200 m en dessous des travaux miniers (Figure 14 et Tableau 1). Seuls quelques événements isolés semblent localisés plus proches des (ou presque dans les) travaux miniers, cependant aucun événement ne semble se situer au-dessus des travaux. La même tendance sur la profondeur a été observée en localisant avec des modèles de vitesse monocouche optimisés pour chacun des 14 événements (Annexe B.1). De plus, nous constatons qu'un forçage de la localisation des événements à 50 m au-dessus des travaux nécessiterait un modèle de vitesse associé à un rapport de V_p/V_s très élevé (> 2.3)

(Annexe B.2). Un rapport V_p/V_s de cet ordre est généralement observé pour des milieux de propagation des ondes (lithologies) peu consolidés (ex : les premiers 30 m en surface) ou saturés en eau, il n'est pas adapté à la raideur ni aux compétences des couches calcaires connues dans la zone d'étude (Ineris, 2017).

Pour analyser et prendre en compte l'incertitude liée aux pointés P et S dans les résultats de localisation et notamment en profondeur, nous avons utilisé une approche de localisation probabiliste (Contrucci et al., 2010). Dans le cas des 14 événements, les incertitudes des pointés P varient généralement entre 0,02 s et 0,075 s et celles sur les pointés S entre 0,05 s et 0,125 s en fonction du rapport signal sur bruit (qui dépend en majorité de la magnitude et de la distance de la station par rapport à l'événement). Grâce à la formulation probabiliste de l'approche, il est possible d'exprimer ces incertitudes sous forme d'une fonction de probabilité (PDF) pour chaque résultat de localisation. Ces fonctions peuvent être représentées par des iso-contours de probabilité cumulée qui représentent la probabilité pour qu'un événement soit localisé à 68 %, 95 % et 99 % de chance dans la zone délimitée par ces courbes.

Les courbes de probabilité cumulées sont représentées sur la Figure 13 dans le plan horizontal, qui représente l'incertitude de localisation épacentrale et sur la Figure 14 dans le plan vertical, qui représente l'incertitude de localisation en profondeur. Comme attendu, les courbes probabilistes montrent que les incertitudes de localisation dépendent du nombre de stations disponibles autour de la source pour les différents événements. Plus il y a de stations qui ont détecté l'événement, plus les incertitudes diminuent. Pour une probabilité de 99 %, nous estimons que l'erreur de localisation varie entre 50 et 100 m pour l'épicentre et de 100 à 200 m pour la profondeur. Nous notons que l'incertitude de localisation en profondeur est particulièrement faible lorsqu'un événement a été enregistré par une station directement localisée sur l'épicentre, comme pour les événements H et K. Dans ce cas, la différence des arrivées P et S indique directement la profondeur de l'événement et contraint donc bien cette dernière.

Pour l'ensemble des 14 événements, nous observons une dominance des contours de probabilité en dessous des travaux miniers. Autrement dit, les résultats de localisation montrent clairement des hypocentres généralement localisés dessous et/ou, dans quelques cas, proches ou dans les travaux miniers. Quantitativement, il y a 68 % de chance que la quasi-totalité des événements soient localisés en dessous des travaux miniers. Cinq événements (dont les 2 événements cités au paragraphe précédent) montrent 99 % de chance d'être localisés en dessous des travaux, c'est-à-dire que la totalité de l'iso-contour à 99 % est situé en dessous des travaux. Pour les autres événements, nous notons que la majorité de la zone couverte par l'iso-contour à 99 % se situe en dessous des travaux.

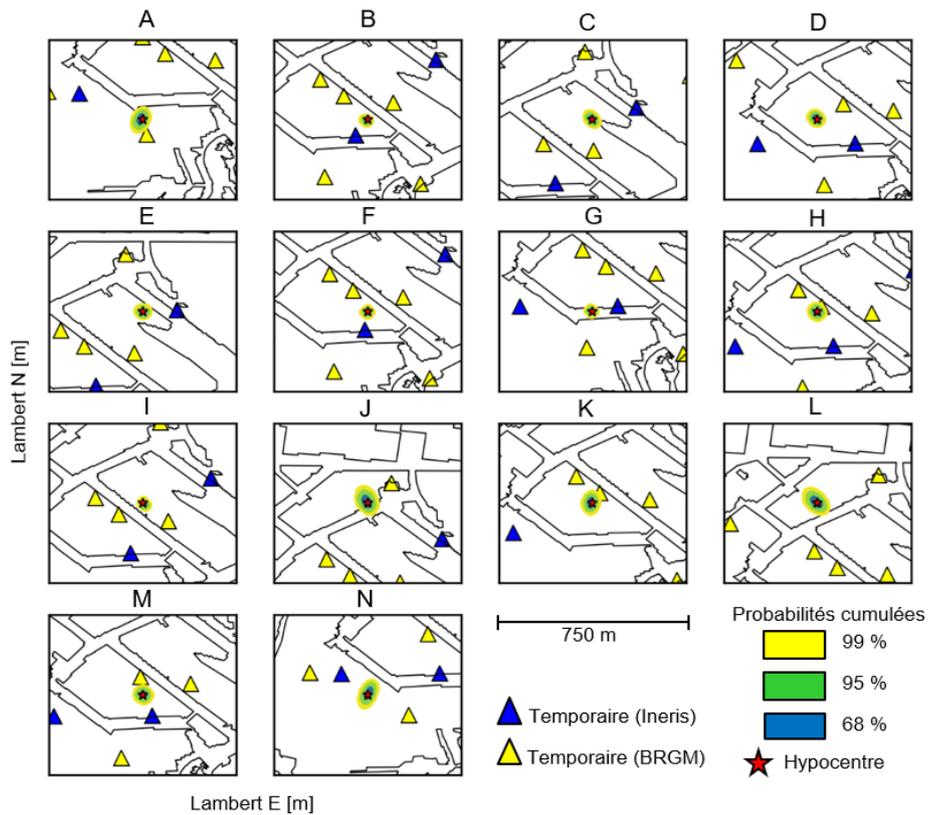


Figure 13 Incertitudes (liées aux pointés P et S) de la localisation de l'épicentre exprimées par les iso-contours de probabilité cumulée.

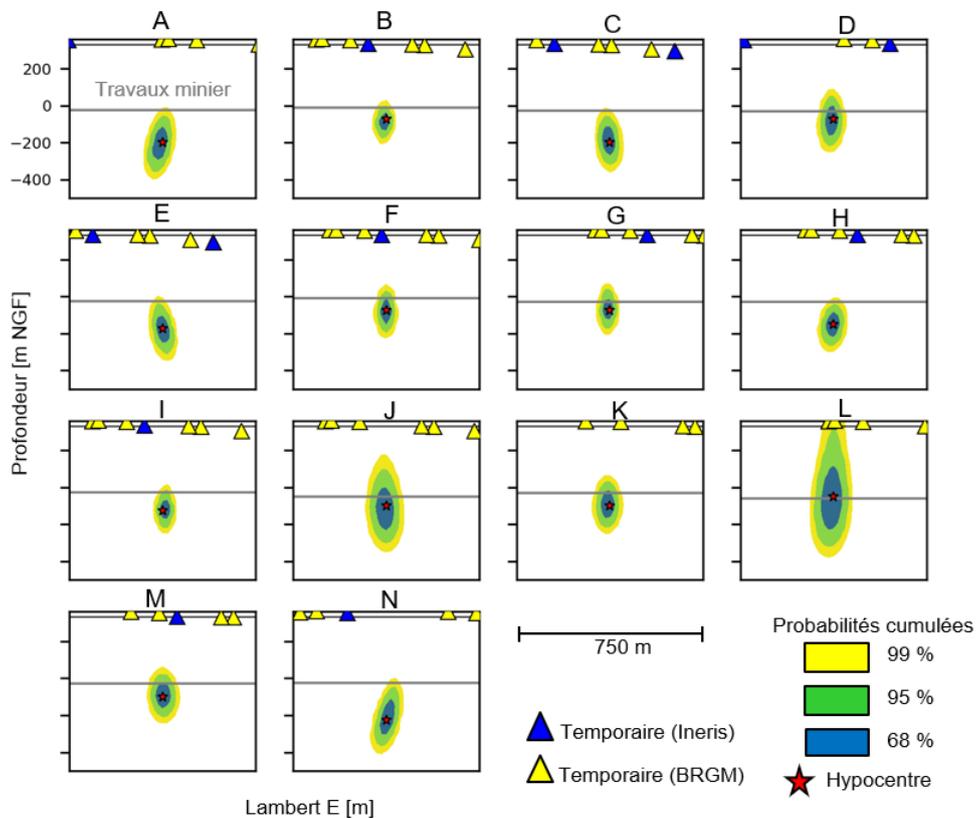


Figure 14 Incertitudes (liées aux pointés P et S) de localisation en profondeur exprimées par les iso-contours de probabilité cumulée.

Tableau 1 Localisation des 14 événements (Figure 14 et Figure 13).

ID	Date Heure	Lambert E [m]	Lambert N [m]	Prof. [m NGF]
A	19/04/2019 09:03:54	858 625	131 575	-200
B	30/03/2019 16:28:56	859 000	131 975	-75
C	16/05/2019 19:52:50	859 200	132 425	-200
D	22/05/2019 17:03:19	858 600	132 050	-75
E	18/02/2020 04:36:40	859 275	132 525	-175
F	12/06/2019 01:45:08	858 925	132 000	-75
G	07/07/2019 05:40:47	858 700	131 775	-75
H	10/07/2019 00:41:41	858 775	132 150	-150
I	30/07/2019 05:41:38	859 000	132 300	-125
J	14/08/2019 17:37:21	858 950	132 875	-100
K	17/08/2019 01:19:53	858 750	132 100	-100
L	15/09/2019 07:02:25	858 650	132 800	-50
M	23/09/2019 18:58:31	858 825	132 025	-100
N	25/09/2019 22:41:14	858 325	131 625	-225

3.4 Mécanisme au foyer

3.4.1 Principe de l'approche

L'analyse des mécanismes au foyer des événements sismiques est une approche qui permet de caractériser le mode de rupture à la source sismique et donc son origine. En sismologie, la rupture est souvent assimilée à un cisaillement le long d'un plan de faille (modèle de force « double-couple »), et à partir des données sismiques enregistrées aux stations, on peut déterminer l'orientation spatiale et le sens de mouvement relatif des compartiments de cette faille. D'autres modèles existent pour mettre en évidence des mécanismes différents de celui du cisaillement, comme par exemple celui associé à un effondrement minier (ex : rupture de pilier, chute de toit etc.). La caractérisation des sources sismiques au sein de l'essai de Fuveau via l'analyse de mécanismes au foyer a donc un fort intérêt pour étudier l'origine de la sismicité vis-à-vis des deux hypothèses en question mais aussi pour comprendre le mécanisme déclenchant (ex : estimation de l'état de contrainte sur une faille à partir de son orientation dans l'espace).

3.4.2 Résultats antérieurs

Comme déjà mentionné, une étude des mécanismes au foyer des événements sismiques les plus importants de la crise de décembre 2014 a déjà été réalisée. Cette étude, basée sur l'inversion des formes d'ondes et l'analyse des rapports d'amplitudes P et S, avait mis en évidence un mécanisme de type faille normale, cohérent avec les failles documentées dans les travaux miniers (Figure 1). Néanmoins, ces résultats, obtenus à partir des enregistrements de seulement 4 stations, sont associés à de fortes incertitudes.

3.4.3 Nouveaux résultats après le renfort du réseau sismique

L'ajout de nouvelles stations en 2019 offre a priori des conditions bien plus favorables pour déterminer les mécanismes au foyer. Cette étude se base également sur les 14 événements de 2019/début 2020 qui présentent un bon rapport signal sur bruit et qui sont distribués sur toute la zone d'étude dans chacun des clusters principaux de la sismicité historique (Figure 11).

Plusieurs approches ont été utilisées pour caractériser les mécanismes au foyer de ces 14 événements. Les étapes ont été les suivantes, allant de la plus facile à mettre en œuvre à la plus complexe :

1. analyse du sens de premier mouvement (ou polarité) des ondes P sur chacune des stations ;
2. analyse du rapport d'amplitude des ondes P et S ;
3. inversion du champ d'onde complet pour remonter au mécanisme au foyer.

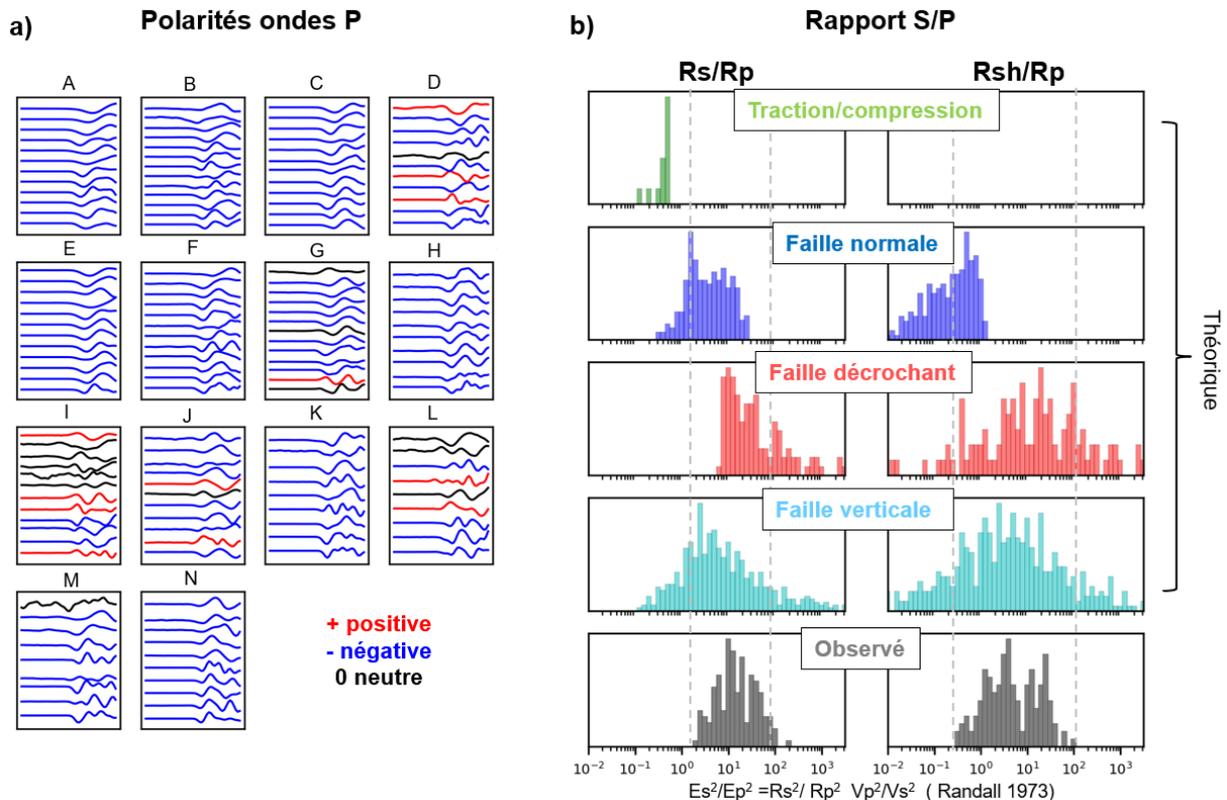


Figure 15 Analyse qualitative des mécanismes au foyer ; a) Les polarités du premier mouvement des ondes P pour les 14 événements indexés de A à N ; b) Les rapports des coefficients de rayonnement R des ondes P, S et SH théorique pour 4 mécanismes classiques comparés aux coefficients observés et déterminés à partir de l'énergie sismique enregistrée pour les 14 événements suivant l'approche de Randall (1973). Les coefficients théoriques ont été calculés sur la base du modèle de Vavryuk (2001). Les histogrammes présentent la tendance statistique des coefficients de rayonnement P, S et SH obtenus pour l'ensemble des stations et les 14 événements.

3.4.3.1 Analyse du sens de premier mouvement des ondes P

La caractérisation des mécanismes au foyer sur la base de l'analyse des sens de premier mouvement des ondes P nécessite un grand nombre d'enregistrements par événement, avec au moins 10 stations et une bonne couverture azimutale (ces conditions sont ici réunies). Comme le montre la Figure 15a, l'ensemble des polarités⁴ P pour les 14 événements présente une dominance négative, ce qui est plutôt surprenant. En effet, cette observation est en premier lieu défavorable pour expliquer un modèle de source en cisaillement car ce type de source montre un rayonnement composé en général de polarités positives et négatives. En revanche, une dominance de polarités négatives est a priori compatible avec un mécanisme de type implosion qui serait attendu dans le cas d'un effondrement minier.

Cependant, dans cette approche on suppose que le signal détecté aux sondes n'est produit que par la source et les effets de propagation des ondes à travers le recouvrement sont négligés. Des modélisations ont été réalisées pour mieux comprendre l'effet de la présence d'une couche à faible vitesse, telle que les travaux miniers et/ou la présence d'eau, sur la forme d'onde des ondes P (Annexe

⁴ La polarité est positive lorsque le sens du 1^{er} mouvement est vers le haut, elle est négative quand il est vers le bas.

B.2). Ces tests basés sur des sismogrammes synthétiques ont montré une dominance de polarités P négatives (pour la même gamme fréquentielle des signaux observés). Ainsi, le signe négatif des polarités observées serait dû, très probablement, à la présence des travaux miniers et/ou d'eau et non pas au seul signal de la source.

3.4.3.2 Analyse du rapport d'amplitude des ondes P et S

Pour compléter l'évaluation des polarités observées et discuter de la possibilité d'un mécanisme d'implosion, une analyse des rapports des ondes S et P et en particulier les rapports SH (Ondes S polarisées horizontales) et P a été réalisée. Ces rapports sont présentés sur la Figure 15-b et estimés en termes d'énergie sismique rayonnée. A noter qu'un mécanisme associé à un effondrement (ex : rupture de pilier, chute de toit etc.), est a priori caractérisé par une dominance des ondes P et SV (Ondes S polarisées verticales) (par rapport aux ondes SH), résultant de la présence importante de modes de rupture en traction et en compression caractéristiques d'une implosion (McGarr, 1992 ; Sileny et Milev 2008).

Les résultats obtenus montrent que les rapport S/P semblent bien moins cohérents avec un mode de rupture en traction comme attendu dans le modèle d'effondrement minier mais bien en accord avec un modèle de cisaillement. On observe notamment la dominance du contenu en énergie SH (par rapport à P et SV), également observé dans l'étude précédente (Ineris, 2017), qui est un marqueur fort de la présence d'un mécanisme en cisaillement. Nous constatons que les rapports S/P semblent plus compatibles avec une faille normale alors que les rapports SH/P sont plutôt en lien avec le mouvement d'une faille verticale et décrochant. Les mécanismes des événements représentent donc possiblement des cas entre ces trois types de failles avec un sens de glissement oblique.

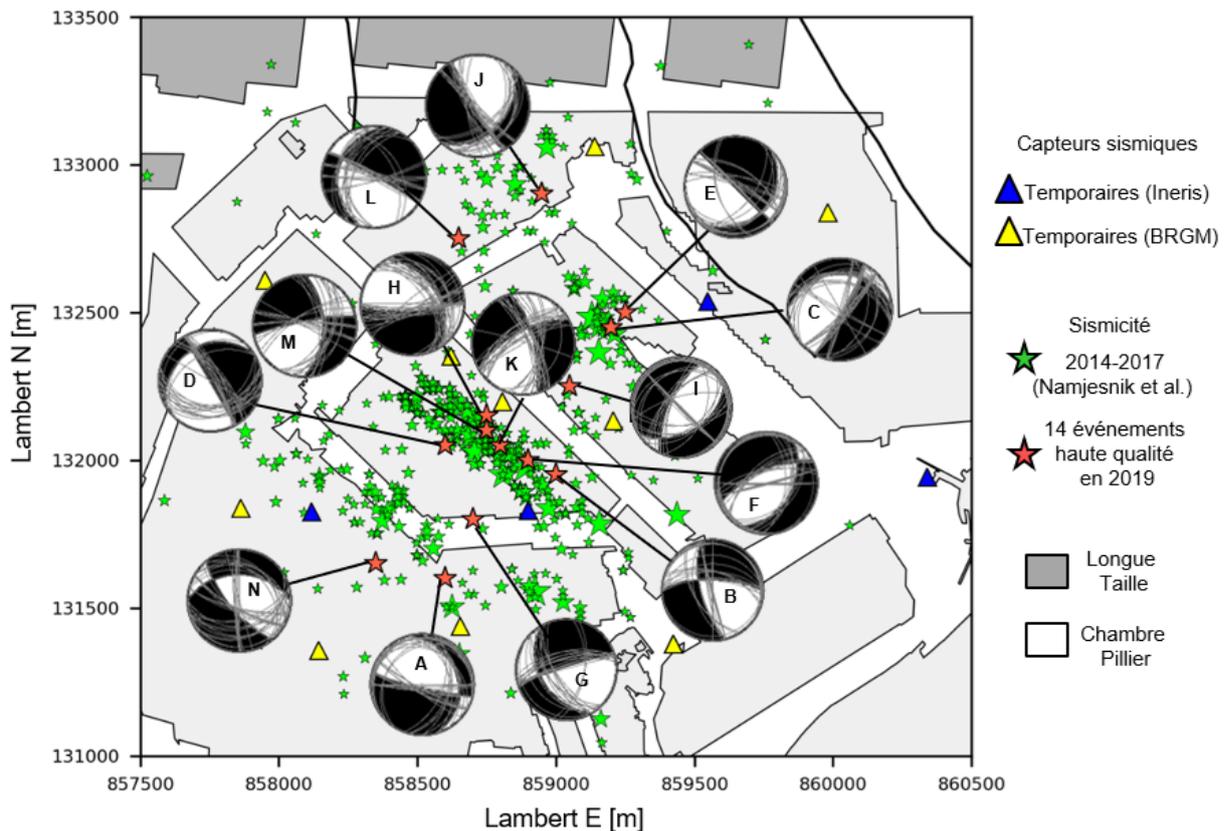


Figure 16 Résultats de mécanismes au foyer (Tableau 2) présentés sous forme de beachball (projection hémisphérique basse de la source ; voir Ineris, 2017), ainsi que les 25 meilleures solutions obtenues par inversion (cercles gris dans les beachball).

3.4.3.3 Inversion du champ d'onde complet

Dans cette 3^{ème} étape, les mécanismes au foyer sont estimés de façon quantitative via l'inversion complète du champ d'ondes par la minimisation des écarts entre les sismogrammes observés et théoriques pour les 14 événements et les trois composantes (Z = vertical, R = radiale, T = Transversal) de chaque station disponible (l'approche utilisée est similaire à celle de l'étude précédente (voir Ineris, 2017)). L'inversion repose ici sur le modèle de source théorique en double-couple (cisaillement), comme

obtenu ci-avant par les rapports d'amplitude. Elle permet de déterminer l'orientation d'un plan de faille (azimut et pendage) et son sens de glissement (angle glissement) le long de ce plan.

Le modèle de propagation pour le calcul des sismogrammes théoriques (fonction Green) est basé sur l'approche AXITRA de Coutant (1990), en utilisant le modèle de vitesse monocouche (1D) et les localisations (notamment les profondeurs) obtenues dans § 3.3. Pour minimiser les effets de propagation inexpliqués par ce modèle simplifié, l'inversion a été réalisée dans une gamme basse fréquence, entre 3 et 7 Hz (meilleur compromis en termes de rapport signal sur bruit et validité de l'approximation du champ lointain).

Les résultats des inversions sont présentés dans la Figure 16, qui montre une dominance des mécanismes en faille décrochant et normales avec une dominance de plans verticaux ($> 70^\circ$). Contrairement à nos attentes, la qualité des résultats d'inversion sur l'ensemble des événements n'est malheureusement pas satisfaisante, notamment au niveau de la convergence et de la stabilité de l'inversion et de la cohérence entre formes d'ondes observées et théoriques. L'écart (ou *misfit*), qui traduit la différence entre sismogrammes observés et théoriques exprimée par une norme de type L2, est assez élevé (Tableau 2), et même lorsque le rapport signal sur bruit est bon sur l'ensemble des enregistrements, les meilleurs résultats de l'inversion sont de qualité moyenne (*misfit* < 0.5) à mauvaise pour les résultats de qualité faible (*misfit* > 1) (à titre de comparaison un très bon résultat serait pour un *misfit* < 0.1). La Figure 17 montre un exemple de formes d'onde pour ces deux classes de qualité.

Tableau 2 Mécanismes au foyer obtenus par simulation des formes d'ondes pour les 14 événements A à N. Les mécanismes sont définis par 2 plans dont chacun est décrit par 3 angles : az : azimut ; pd : pendage ; gl : angle de glissement.

ID	Date Heure	Mw	az1 [°]	pd1 [°]	gl1 [°]	az2 [°]	pd2 [°]	gl2 [°]	Misfit
A	19/04/2019 09:03:54	0.8	150	50	-60	288	48	-121	0.59
B	30/03/2019 16:28:56	1.6	345	20	-30	103	80	-107	0.65
C	16/05/2019 19:52:50	1.0	285	65	-60	51	38	-137	0.5
D	22/05/2019 17:03:19	0.8	240	20	0	150	90	-110	0.4
E	18/02/2020 04:36:40	1.5	45	20	-180	315	90	-70	0.94
F	12/06/2019 01:45:08	0.4	30	35	-120	245	60	-71	1.22
G	07/07/2019 05:40:47	0.5	150	35	-15	252	81	-124	0.85
H	10/07/2019 00:41:41	0.3	330	35	-30	85	73	-121	0.93
I	30/07/2019 05:41:38	0.3	60	35	-60	205	60	-109	0.44
J	14/08/2019 17:37:21	0.7	150	80	-120	43	31	-19	0.7
K	17/08/2019 01:19:53	0.8	0	50	-165	260	79	-41	0.99
L	15/09/2019 07:02:25	0.7	195	20	-15	299	85	-109	0.99
M	23/09/2019 18:58:31	0.4	345	65	-150	241	63	-28	0.53
N	25/09/2019 22:41:14	0.5	-270	35	-135	321	66	-64	0.5

Sur la base de ces analyses, nous suggérons que la cause de la mauvaise qualité de l'inversion est probablement liée au fort impact des travaux miniers sur la composition du champ d'ondes sismiques. Cet effet n'est pas pris en compte dans notre modèle de propagation simplifié (modèle monocouche) dans la gamme fréquentielle utilisée. Des tests réalisés avec des données synthétiques (Annexe B.2) montrent que les composants Z et R des sismogrammes, c'est-à-dire la partie du champ d'ondes dominée par les ondes P et SV, sont fortement perturbées (amplitude, phase, conversion) en traversant une couche de quelques mètres d'épaisseur et de très faible vitesse (liée aux vides et à la présence d'eau dans les travaux miniers). Cette modélisation explique bien les polarités négatives des ondes P

déjà observées (décrites plus haut). Cette complexité des composantes Z et R a déjà été mise en évidence dans l'étude précédente. Elle est en outre probablement liée aux nombreuses phases de conversion entre les ondes P et SV transmises et réfléchies au niveau de la couche minière.

Pour trouver une solution intermédiaire, nous avons répété l'inversion en utilisant seulement les composantes T associées au champ des ondes SH qui semble le moins affecté par la présence des travaux miniers (ce type d'onde n'est pas sujet aux phénomènes de conversion). Les résultats obtenus ne montrent pas de changements significatifs au niveau des mécanismes obtenus pour les 14 événements ce qui soutient les résultats de la Figure 16. Néanmoins cette approche d'inversion implique malheureusement une diminution significative de la quantité des données d'entrée (seulement 1/3) et aucune amélioration au niveau de la qualité de l'inversion n'a pu être obtenue.

Comparaison des formes d'ondes **observées** et **théoriques**

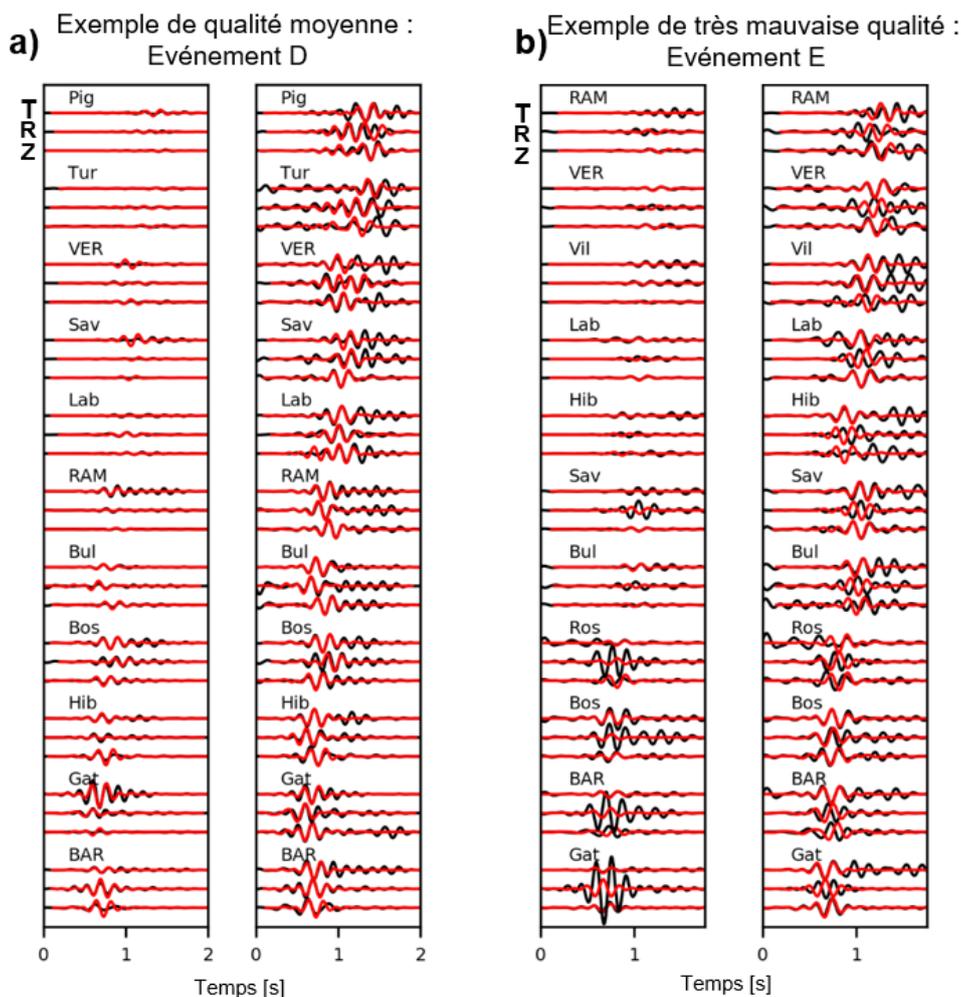


Figure 17 Cohérence entre des formes d'ondes observées (noirs) et théoriques (rouges) pour un exemple d'inversion de qualité a) moyenne (gauche) et b) mauvaise (droit). Les formes d'ondes pour chaque exemple sont normalisées par le maximum absolu sur toutes les stations (colonnes à gauche) et les maximas sur chaque trace (colonnes à droite).

3.4.4 Conclusions sur les mécanismes au foyer

En conclusion, malgré les importantes difficultés rencontrées pour la réalisation de l'ensemble des analyses et la faible fiabilité des résultats, probablement liées à la présence des travaux miniers, nous retenons deux tendances marquantes :

- premièrement, les résultats des analyses sur les polarités des ondes P et la simulation des formes d'ondes confirment de manière indirecte les résultats obtenus dans § 3.3 qui favorisent une localisation des sources sismiques en dessous des travaux miniers ;
- deuxièmement, les analyses des rapports d'amplitudes S/P indiquent une dominance des événements associés à un mécanisme en cisaillement (décrochant).

S'agissant de l'approche menée sur l'inversion des formes d'ondes, les résultats montrent une distribution plutôt aléatoire des mécanismes entre un type de faille normale et de faille décrochant sans tendance systématique visible au niveau de l'orientation ni pendage des plans de faille. Pour les raisons évoquées ci-avant, ces résultats doivent être considérés avec prudence et d'autres études complémentaires seront nécessaires à l'avenir pour les confirmer. Cela impliquera surtout des analyses de sensibilité de l'inversion (ex : en fonction du nombre de stations et composantes utilisées, gamme fréquentielle, localisation) ainsi que la prise en compte des effets de propagation adéquats (utilisation d'un modèle de vitesse 3D). Lorsque la complexité de la propagation des ondes sera mieux comprise, il sera également possible de tester un modèle à la source plus complexe (tenseur de moment complet - 6 composantes) afin de considérer d'autres modes de rupture (ex : traction, implosion) pour mieux caractériser le mécanisme de déclenchement (augmentation pression interstitielle, effondrement, etc.).

4 Caractérisation du mécanisme déclenchant

4.1 Généralités

Dans le contexte de l'après-mine, le lien apparent entre sismicité et présence d'eau dans les travaux miniers abandonnés est le plus souvent expliqué par une augmentation de la pression interstitielle modifiant le champ de contraintes (diminution de la contrainte normale effective), ce qui a pour conséquence des mouvements le long de structures de faiblesse (fissures, fractures préexistantes) lorsque celles-ci sont hydrauliquement connectées (via un milieu poreux ou des couches perméables) avec les travaux miniers (Miller, et al., 1988 ; Miller, et al., 1989 ; Ogasawara, et al., 2002 ; Goldbach, 2009 ; Srinivasan, et al., 2000 ; Senfaute, et al., 2008 ; Wetmiller, et al., 1993).

Néanmoins, comme observé dans le cas des réservoirs hydrologiques importants (ex. : barrages), il est également connu que la variation de la hauteur de colonne d'eau elle-même (et le changement de volume impliqué) peut générer des contraintes, dites poro-élastiques, suffisamment importantes pour dépasser la résistance des structures préexistantes, même lorsqu'elles semblent hydrauliquement isolées du réservoir (ex : Ineris, 2017 ; McGarr, et al., 2002 ; Grigoli et al., 2017). En outre, la présence d'eau, en particulier dans les massifs carbonatés et évaporitiques, peut mener à des altérations importantes de la composition de la roche encaissante (ex. : dissolution, karst) et accélérer le vieillissement, en augmentant la fragilité du massif par rapport aux sollicitations externes (ex. : force gravitaire). Du fait de ces processus, on pourrait supposer que le mécanisme de déclenchement de la sismicité est lié à la dégradation des travaux miniers du fait de la présence d'eau et de ses variations, qui provoquent des remobilisations de terrains déjà déstructurés au niveau des travaux miniers et dans le recouvrement. Dans le contexte de la sismicité post-minière à Gardanne, la connaissance et la quantification de chacun de ces trois mécanismes principaux (1 - augmentation pression interstitielle, 2 - contraintes poro-élastiques, 3 - dégradation et vieillissement des travaux miniers) sont ainsi fondamentales pour la gestion hydrogéologique de la mine qui elle-même semble contrôler l'aléa sismique.

Une corrélation fine entre les données sismiques et les variations de niveau de la nappe mesurées directement dans les travaux miniers aurait pu permettre d'évaluer plus précisément le rôle de ces trois mécanismes, vu leurs différences au niveau de la réponse sismique temporelle (immédiate, décalée, tardive) et leur impact géomécanique (perturbation contrainte) en fonction des conditions hydrogéologiques (pression hydrostatique absolue). Malheureusement, nous ne disposons pas aujourd'hui de mesures hydrogéologiques *in situ* dans la zone sismique de l'essaim de Fuveau-Gréasque, ce qui empêche la réalisation d'une telle analyse. En effet, comme discuté dans § 2, du fait de la complexité des circulations d'eau dans les travaux miniers, l'ensemble des mesures de suivi hydrogéologique disponible (y compris les nouvelles mesures réalisées depuis 2018) ne permet que de conclure approximativement sur l'amplitude et le temps de variation des niveaux d'eau dans la zone d'étude. Une corrélation détaillée entre fluctuation piézométrique et intensité de la sismicité a pu seulement être étudiée dans la zone de surveillance de la commune de Gardanne (voir Annexe C.1) qui est la seule zone équipée à la fois d'un suivi piézométrique (le puits Gérard mais qui est perturbé par le pompage) et sismique (station permanente de surveillance).

Malgré ces contraintes, nous discuterons dans la suite de ce rapport (§ 4.2) des observations principales en ce qui concerne les interactions entre les conditions hydrogéologiques et l'activité sismique dans la zone d'étude, ainsi que le rôle potentiel des trois mécanismes décrits plus haut. Nous avons aussi étudié ce sujet par une modélisation géomécanique qui sera présentée dans § 4.3. Le but de cette analyse est d'évaluer l'hypothèse 2 (Figure 3), dite de réactivation de failles localisées en dessous des travaux par augmentation de la pression interstitielle. L'un des objectifs principaux de cette étude était de tester cette hypothèse dans l'espace des paramètres lié aux différentes conditions hydrogéologiques et à la configuration des failles (propriétés géomécaniques, orientation, etc.), contrainte par les observations hydrogéologiques et sismiques. Ce travail présente donc une certaine analogie avec les études de modélisation précédentes (Ineris, 2003, 2017), qui visaient à déterminer les mécanismes d'effondrement des travaux miniers et leur vieillissement en lien avec l'hypothèse 1 (Figure 3).

4.2 Corrélation des données hydroclimatiques et sismiques

Sur la base de l'ensemble des données acquises depuis l'ennoyage de la mine en 2010, nous observons trois tendances plus ou moins marquantes qui caractérisent le lien entre les conditions hydroclimatiques (à savoir précipitations et piézométrie) et l'activité sismique :

- 1) L'apparition des crises sismiques dans les périodes de forte recharge de la nappe notamment entre 2010 et 2017 (Figure 2 et Figure 9) ;
- 2) L'apparition d'une crise sismique atypique en août 2017 coïncidant avec une période de sécheresse (Figure 9) ;
- 3) L'absence de crise depuis 2018, qui coïncide avec l'augmentation des capacités de pompage à la galerie de la mer (depuis 2016) en assurant une stabilisation du niveau d'eau en dessous de 0 m NGF au puits Gérard et une stabilisation du niveau d'eau dans le secteur Regagnas possiblement entre 110 m et 140 m NGF (Figure 2, Figure 9 et Figure 18).

La corrélation apparente entre la sismicité et les épisodes de forte recharge de la nappe est surtout visible lors des crises de 2010 et 2012 (Figure 2) et de 2014 et 2016-2017 (Figure 9). A noter, que l'on observe l'absence de crises sismiques dans les périodes de crue en novembre 2010 et novembre 2012, mais qui peuvent s'expliquer en partie par le manque d'un dispositif sismique local dans la zone d'étude ainsi que par un changement de configuration du seuil de détection du réseau sismique permanent (Ineris, 2017).

Nous supposons que, pendant ces crises, le niveau de la nappe dans les quartiers est de la mine (notamment Rocher Bleu, Regagnas, Gréasque) était globalement plus élevé qu'après 2017 car la capacité des pompes du puits Gérard (1000 m³/h depuis 2011) n'était alors pas suffisante pour absorber les venues d'eau venant de ces quartiers (Dheilly et Brigati 2015). Dans l'historique de l'exploitation de la mine, les secteurs de Gréasque et Regagnas ont été caractérisés comme une sorte de réservoir hydrogéologique « isolé » par des serremments à l'ouest et un stot à l'est (Rocher Bleu) (§ 2.3, Annexe A). Dans les conditions d'un pompage insuffisant, les quartiers de Gréasque et Regagnas ont été donc possiblement soumis à de fortes et rapides montées d'eau provoquées par les venues d'eau infiltrées dans le Rocher Bleu et celles issues de l'aquifère jurassique (Figure 7, § 2.3). Nous ne disposons malheureusement pas sur des mesures directes pour quantifier l'amplitude exacte des montées d'eau et donc sur l'ordre de grandeur de la pression hydrostatique dans ces secteurs miniers. Les données historiques de l'exploitation minière indiquent que dans des cas extrêmes le niveau d'eau a atteint une cote de près de 200 m NGF dans le quartier de Regagnas ce qui correspondait à une surcharge hydrostatique de l'ordre de 10 - 20 bars (en fonction de la profondeur du toit des travaux minier). Cette gamme de pression hydrostatique, même si cela reste très approximatif, est susceptible d'avoir provoqué le dépassement du seuil de rupture d'un nombre important des failles à l'origine de l'occurrence de crises sismiques. En effet, il est rapporté dans d'autres cas d'étude que des charges hydrauliques inférieures à 1 bar peuvent être suffisantes pour remobiliser des failles dans un état « sous-critique » (McGarr, et al., 2002). Plus la charge hydrostatique est élevée, plus les chances de remobiliser un nombre de failles important existeront. L'importance de cette remobilisation dépendra finalement de l'état de contrainte initial des failles lié principalement à leur orientation par rapport au champ de contraintes régional (naturel).

La dernière crise significative a eu lieu en août 2017 et a été surtout concentrée dans un cluster localisé plus au nord-est du quartier Regagnas (Figure 9). Contrairement aux crises précédentes, celle-ci est apparue pendant une période particulièrement sèche, sans précipitation, après une période de rabattement plus fort de la nappe due à l'augmentation des capacités de pompage au puits Gérard. Lors de cette crise, le niveau de la nappe a dû atteindre un minimum (possiblement +23 m NGF d'après § 2.3), impliquant cette fois une diminution significative de la pression hydrostatique (pression interstitielle) dans le secteur d'étude. La détermination précise du mécanisme de déclenchement de la sismicité dans ce cas reste très spéculative et nécessiterait des informations plus précises sur l'amplitude de variation de la nappe dans le quartier de Regagnas. Une explication possible serait *a priori* la création de contraintes poro-élastiques synchrones à la diminution de la pression interstitielle. Celles-ci résulteraient possiblement du changement de volume lié à l'extraction d'eau des quartiers, notamment la diminution de la charge verticale due à la colonne d'eau, ainsi que la compaction de la masse de roche liée à la diminution de la pression interstitielle.

Depuis 2018, malgré l'occurrence de périodes de précipitation et de forte recharge de la nappe, le lien entre l'impact du débit élevé de pompage au puits Gérard et l'absence de crise sismique, semble net (Figure 18). Il laisse entendre que le maintien à un niveau stable de la nappe dans la partie est (même pendant les périodes de crue), permet d'éviter de fortes augmentations du niveau de la nappe comme

ceux probablement apparus pendant les périodes de crises sismiques avant 2017. Le niveau actuel apparemment plus stable dans le secteur Regagnas n'est pas connu avec certitude mais est estimé entre 110 et 140 m (ex : Figure 6 et Figure 8, § 2.3) ce qui correspond à une charge hydrostatique minimale de l'ordre de 4 bar (§ 2.3). Ce niveau est a priori compatible avec l'absence de crise sismique, mais aussi d'une sismicité de fond (ex. : les 14 événements discutés dans § 3) avec l'occurrence de quelques événements sismiques, dits forts ($M_I > 1.8$), pour certains ressentis par la population locale (ex. : les événements A, C et E et plus récemment un événement en date du 22 juin 2020 proche du centre de Gréasque). Il semble donc *a priori* que la pression hydrostatique demeure toujours suffisamment élevée dans le quartier est de la mine, et que certaines structures géologiques se trouvent toujours constamment dans un état sous-critique malgré l'absence de forte augmentation du niveau de la nappe. Soulignons dans ce contexte, que la signature des événements sismiques (localisation, magnitude etc.) n'a pas changé jusqu'à aujourd'hui comme l'illustre l'étude de 14 événements récents tous localisés dans les clusters sismiques historiques. Dans cet état métastable, la remobilisation régulière de ces structures provient possiblement du chargement tectonique (contrainte régionale). Le taux de récurrence naturelle de glissement de ces failles par chargement tectonique est donc accéléré d'où l'activité sismique de fond observée (avec quelques événements par semaine). *A contrario*, il semble possible qu'un éventuel futur arrêt du pompage puisse causer des variations hydrostatiques importantes qui pourraient déclencher la survenue de futures crises sismiques (notamment en période de crue ou de fortes précipitations).

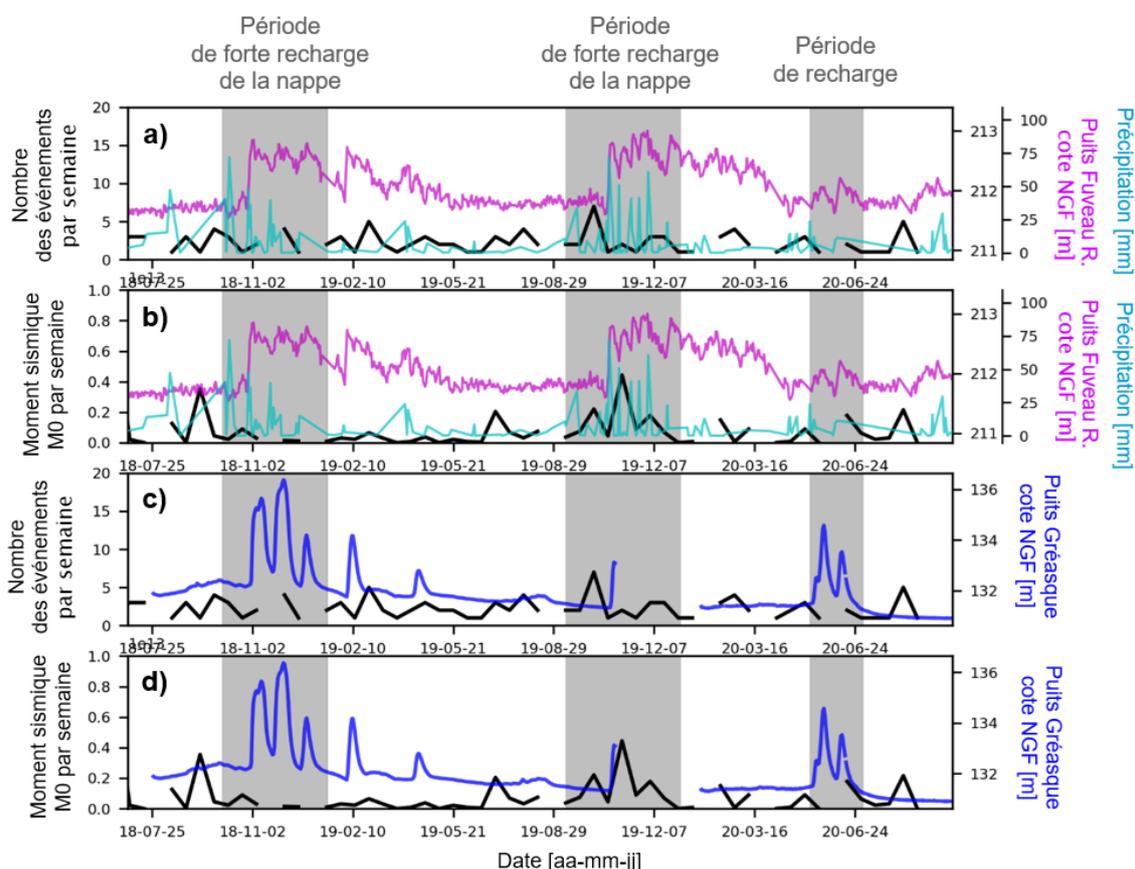


Figure 18 Comparaison entre la sismicité et les variations piézométriques depuis 2018. La sismicité (courbe noire) enregistrée par le réseau permanent (Ineris) est montrée en fonction du nombre d'événements et du moment sismique cumulé par semaine. L'infiltration de la nappe est représentée par le puits superficiel de Fuveau et les précipitations enregistrées par la station de Météo France à Gréasque. Les variations de la nappe dans les travaux miniers sont approximées par le niveau du puits de Gréasque.

La présence de clusters et multiplets sismiques (voir § 3.1) laisse penser qu'une partie de la remobilisation des structures est de nature asismique, avec des glissements lents qui eux-mêmes peuvent charger des aspérités sismogènes, à l'origine d'événements sismiques répétitifs, dits « seismic repeater » (ex : Uchida & Bürgmann, 2019). Il est connu que les variations de conditions hydrostatiques peuvent affecter la résistance au frottement d'une faille et les lois de friction, et favoriser un glissement

soit asismique, soit sismique (ex. : Scholz, 2002). La complexité du couplage hydromécanique sur les failles peut donc expliquer l'occurrence et/ou l'absence de crises sismiques difficilement explicables par un modèle hydrostatique (pressions interstitielles) simple (linéaire). De plus, le caractère répétitif de la sismicité ne semble pas compatible avec un mécanisme de déclenchement dominé par le vieillissement et la dégradation des travaux miniers consécutivement à leur enoyage. En effet, un mécanisme d'effondrement minier est plutôt en lien avec des transferts progressifs et des changements importants de l'état de contraintes local. Ce type d'instabilités devrait donc montrer des mécanismes variables en cours du temps liés aux états de contraintes successifs et aux changements volumétriques et géométriques associés à l'effondrement, et impliquer également des modifications importantes des conditions de propagation des ondes sismiques dans le milieu. La signature sismique dans ce cas serait donc *a priori* dominée par des évolutions spatio-temporelles et des formes d'ondes diverses et évolutives, ce que contredisent le caractère similaire et répétitif des observations.

4.3 Evaluation par modélisation géomécanique du scénario de déclenchement par variation de la pression interstitielle

Nous avons souhaité vérifier, par modélisation numérique, l'hypothèse 2 selon laquelle la sismicité post-minièrre pourrait être liée à un mouvement en cisaillement des failles présentes dans le quartier de Régagnas. Plus précisément, on considère :

- une modification des contraintes (σ_{eff} : contrainte normale effective, τ : contrainte en cisaillement) s'exerçant sur le plan de faille consécutivement à une variation de la pression dans la faille induite par la variation du niveau de la nappe ;
- le dépassement d'un critère de rupture en cisaillement dans certaines portions de la faille.

Compte tenu des incertitudes existantes sur les données d'entrée (variation du niveau de la nappe ; état de contrainte initial ; orientation des failles ; angle de frottement des failles), l'idée de cette analyse est uniquement d'évaluer la sensibilité de la réponse du modèle à ces données et de préciser pour quelles valeurs des différents paramètres, on peut reproduire le mécanisme attendu. Dans une première étape nous testons l'hypothèse pour un « modèle de référence » dans lequel nous considérons des conditions hydromécaniques directement indiqués par les données géophysiques et géotechniques (§ 4.3.3). Les incertitudes étant pour certaines de ces données significatives, nous testons ensuite la sensibilité du modèle à des conditions peu favorables hydromécaniquement à l'hypothèse 2 (§4.3.4).

4.3.1 Choix et description du code de calcul utilisé

Nous avons choisi de réaliser une modélisation hydromécanique couplée en 2D, à l'aide d'un code de calcul par éléments distincts, adapté à la modélisation de systèmes rocheux fracturés et permettant :

- de simuler le comportement mécanique de la matrice rocheuse (modèle élastique) et des fractures qui la traversent (modèle élasto-plastique type Mohr-Coulomb) ;
- de simuler l'écoulement d'un fluide dans ces fractures ;
- de coupler le comportement mécanique de la fracture et son comportement hydraulique en reliant les paramètres mécaniques et hydrauliques (la contrainte effective sur la faille est $\sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\text{tot}} - P$, où σ_{tot} est la contrainte normale totale et P la pression de fluide s'exerçant dans la fracture).

Le modèle comporte 2 limitations :

- il ne permet que des modélisations en 2D, ce qui revient à supposer que les failles introduites sont perpendiculaires au plan de coupe ;
- il ne permet pas de simuler les écoulements dans la matrice rocheuse. Pour contourner cette limite, nous avons introduit dans le modèle des réseaux de fractures équivalents, inactifs mécaniquement, dont les propriétés hydrauliques sont définies de sorte à reproduire la perméabilité de la matrice rocheuse (compte tenu de l'espacement considéré entre ces fractures équivalentes).

Nous avons également développé un modèle analytique (voir Annexe D.1) considérant une faille unique et un milieu environnant homogène (on ne prend pas en compte les hétérogénéités du milieu, notamment la présence de la couche de charbon Grande-Mines et son exploitation partielle). Après

avoir vérifié la cohérence de ce modèle avec le modèle numérique, nous l'avons utilisé pour réaliser quelques études de sensibilités complémentaires.

4.3.2 Description du modèle de référence réalisé et données d'entrée

La géométrie du modèle 2D correspond à une coupe sud-ouest / nord-est traversant le quartier de Régagnas. La Figure 19 montre les panneaux où la couche Grande-Mine (GM) a été exploitée par chambres et piliers à environ 380 m de profondeur (la surface est à 334 m NGF). Entre ces panneaux, des zones (stot) d'environ 100 m de large, ont été laissées inexploitées. Nous avons fait l'hypothèse que ce choix d'exploitation était lié à la présence de failles où de zones de failles (F1, F2 et F3). L'orientation de ces failles n'est malheureusement pas complètement connue. Nous avons fait l'hypothèse qu'elles étaient sub-verticales ($< 80^\circ$) et orientées perpendiculairement au plan de coupe. Ces hypothèses sont globalement en accord avec les résultats des analyses sismiques (§3), c'est-à-dire avec les localisations des événements et leurs mécanismes au foyer même si ces résultats sont également basés sur des incertitudes importantes.

L'extension latérale du modèle est de 5 km et sa hauteur est d'environ 2 km avec les 3 zones non exploitées de 100 m de large, traversées par les failles F1, F2 et F3 avec ici un pendage vers le Sud-Ouest de 70° (Figure 20). La veine de charbon GM fait 5 m d'épaisseur et s'approfondit lentement (6 m par km) vers le Sud-Ouest (gauche du modèle).

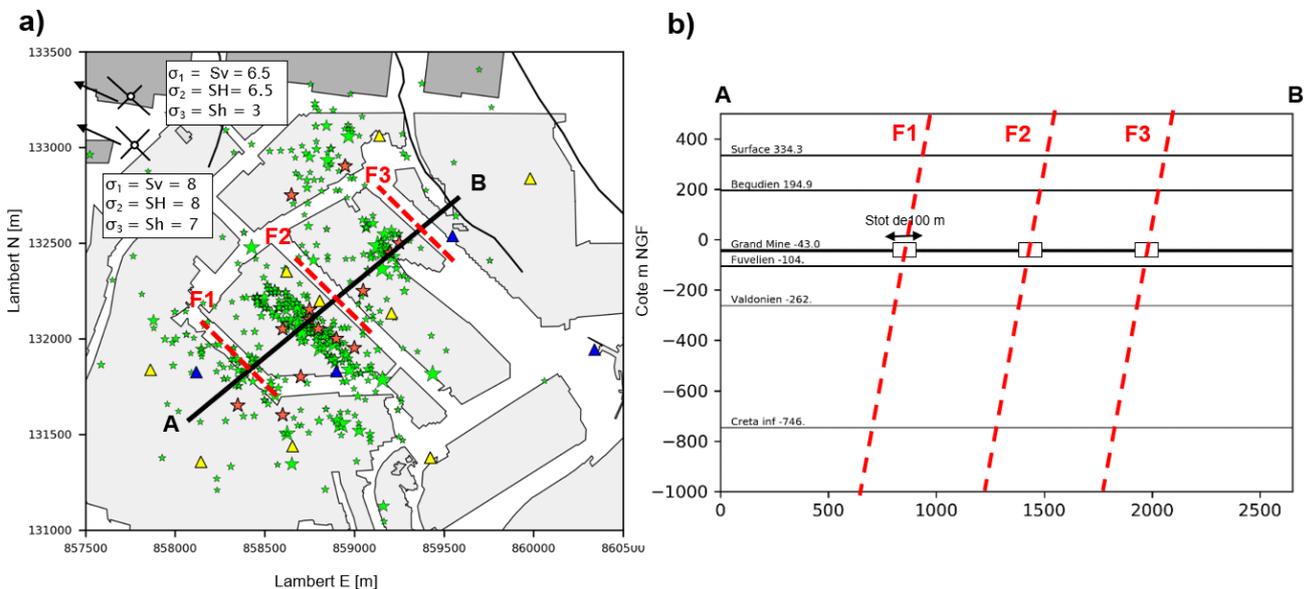


Figure 19 Localisation de la coupe utilisée pour le modèle numérique en comparaison avec la sismicité (Figure 11) et les mesures de contrainte réalisées par Gaviglio et al (1996).

Nous n'avons pas souhaité reproduire la géométrie précise des zones exploitées (de type chambres et piliers) notre objectif se limitant à restituer grossièrement les variations de contrainte attendues autour des différents panneaux après leur exploitation. A cette fin, un matériau équivalent a été considéré dans les zones exploitées dont la déformabilité est augmentée par rapport à celle du charbon. Les caractéristiques du modèle sont détaillées en Annexe D.2.

L'état de contrainte initial (avant exploitation) dans le quartier de Régagnas n'est pas connu avec précision. Il est vraisemblable qu'une des contraintes principales soit verticale et approximativement égale au poids des terrains ($\sigma_v = \rho gh$, où h est la profondeur). Les autres contraintes principales sont horizontales sachant que l'orientation et la valeur des contraintes horizontales mineure (σ_h) et majeure (σ_H) sont incertaines. Pour le cas du « modèle de référence », nous nous sommes basés sur des mesures de contraintes réalisées par Gaviglio et al (1996), localisées dans le secteur Sainte-Victoire (Figure 19) au nord-est de Régagnas qui indiquent, sur deux mesures, que $\sigma_h = k * \sigma_v$ et $\sigma_H = \sigma_v$ où k varient entre 0.5 et 0.9.

Les modélisations se déroulent de la façon suivante :

- calcul de l'état d'équilibre mécanique compte tenu des propriétés de la matrice et des failles et des conditions aux limites mécaniques ;
- calcul de l'état d'équilibre hydromécanique pour une nappe située à la cote 50 m NGF (les conditions aux limites hydrauliques sont définies en conséquence) ;
- calcul de l'état d'équilibre hydromécanique pour une nappe située à la cote 60 m NGF, puis 70 m NGF, puis 80 m NGF, puis 100 m NGF, puis 150 m NGF, puis 200 m NGF.

Les niveaux de nappes simulés correspondent donc aux variations mises en évidence par l'analyse hydrogéologique (cf. § 2.3). En effet, celle-ci montre que le niveau de la nappe varie entre 100 et 150 m environ.

4.3.3 Résultats obtenus pour le « modèle de référence »

Comme illustrés par la Figure 20, les résultats de modélisation montrent que, pour le cas du modèle de référence, l'élévation du niveau de la nappe génère une zone de cisaillement dans la partie des failles située sous les travaux miniers selon un mécanisme de faille normale (le compartiment à gauche de la faille s'affaisse alors que celui de droite remonte). Ce mouvement est *a priori* cohérent avec les résultats obtenus lors de l'analyse sismique qui met en évidence des mécanismes obliques entre faille normale et décrochante (Figure 16 et Tableau 2).

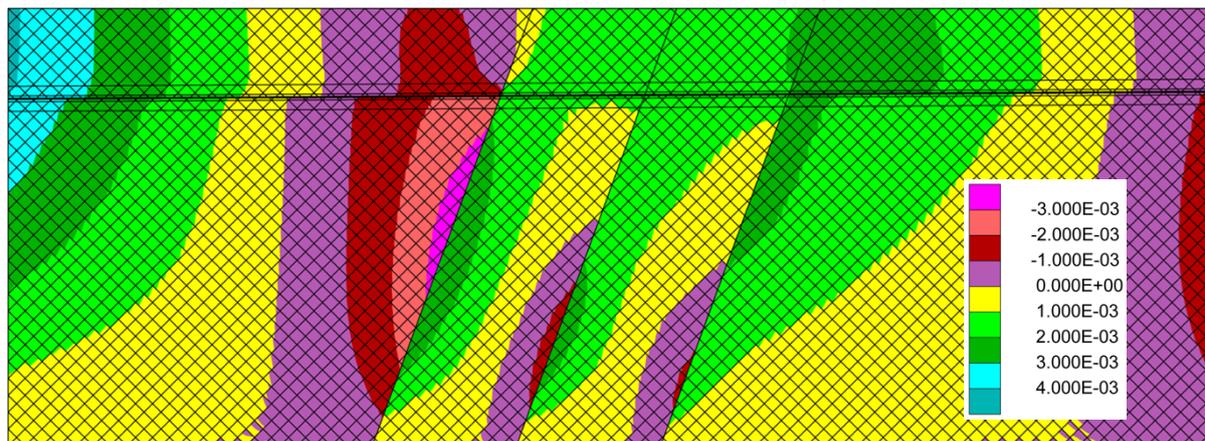


Figure 20 Iso-déplacements verticaux (mm) calculés par le modèle numérique pour une variation du niveau de la nappe (ici à titre d'exemple une variation de 50 à 60 m NGF) - Cas de référence : $\sigma_h = 0,5 * \sigma_v$; pendage = 70° ; $\Psi = 25^\circ$. Voir aussi Annexe D.3-D.4.

Une comparaison des modèles numérique et analytique est proposée à la Figure 22 pour le cas de référence $\sigma_h = 0,5 * \sigma_v$; pendage = 70° ; $\Psi = 25^\circ$. Pour chaque niveau de nappe, le profil du ratio $R = \tau / (\sigma_{n\text{eff}} \text{tg}(\Psi))$ en fonction de la cote NGF a été représenté. On constate que les 2 modèles montrent de manière cohérente l'extension de la portion en rupture des failles (la faille est en rupture lorsque $R = 1$). La cote supérieure de cette portion en rupture passe d'environ -300 m à -50 m NGF pour une variation du niveau de nappe de 50 m à 150 m NGF.

Compte tenu de ces deux résultats, nous pouvons en conclure que la remobilisation de failles avec génération de sismicité sous les travaux miniers (hypothèse 2) est un scénario tout à fait plausible de point de vue géomécanique. En effet, la profondeur des sources sismiques est située principalement entre 50 et 200 m sous les travaux miniers (soit environ entre les cotes -250 m et -100 m NGF). Ce résultat doit être nuancé par le fait qu'il repose sur une des mesures disponibles de l'état de contrainte dans le secteur minier voisin (notamment $\sigma_h = 0,5 * \sigma_v$; Figure 19). Le paragraphe suivant montre en effet que pour un état de contrainte plus isotrope, les conditions favorables pour une remobilisation des failles ne sont plus réunies.

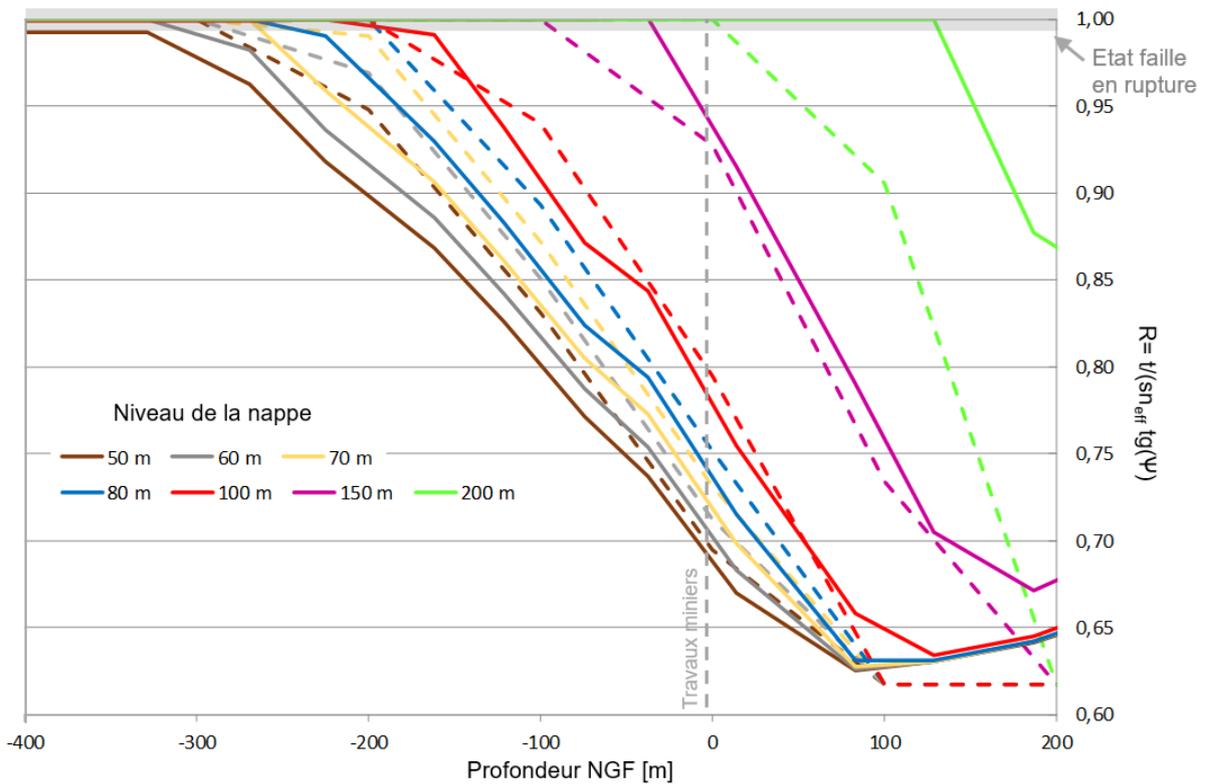


Figure 21 Evolution de $t/(\sigma_{eff} \text{tg}(\Psi))$ en fonction de la cote NGF et du niveau de la nappe
 Comparaison entre les résultats numériques (traits pleins) et l'approche analytique (traits pointillés)
 Cas de référence : $\sigma_h = 0,5 * \sigma_v$; pendage = 70° ; $\Psi = 25^\circ$.

4.3.4 Conditions hydromécaniques s'opposant à un fonctionnement tel que décrit pas l'hypothèse 2

Les résultats du § précédente sont basés sur un choix de paramètres qui se veut le plus réaliste possible compte tenu des analyses hydrogéologique, sismique et géotechnique. Néanmoins, les valeurs de ces paramètres d'entrée sont très incertaines sachant qu'une faible variation de ces paramètres est susceptible d'avoir un fort impact sur les résultats.

Afin d'évaluer cet impact, nous avons réalisé une étude de sensibilité pour identifier les conditions hydrogéologiques et géomécaniques qui s'opposent à un fonctionnement de type remobilisation des failles suivant l'hypothèse 2. On constate qu'une rupture d'une faille entre les cotes -250 m et -100 m (plage possible vis-à-vis des localisations des événements sismiques en profondeur) n'est pas possible dans les conditions suivantes (voir aussi Annexe D.5-D.7) :

- Lorsque le rapport entre la contrainte horizontale mineure et la contrainte verticale est supérieur à 0,6 (Annexe D.5). Or pour l'une des deux mesures de contraintes réalisées au nord-est de Regagnas (Figure 19) ce rapport est supérieur à 0,6. (Pour rappel un rapport de 0,5 a été utilisé pour le « modèle de référence ») ;
- Lorsque le pendage des failles devient supérieur à 80° (Annexe D.6) ;
- Lorsque l'angle de frottement est trop élevé $\Psi > 30^\circ$ (Annexe D.7).

Ces résultats suggèrent qu'il reste nécessaire de réduire les incertitudes sur les données d'entrée, et plus particulièrement sur l'état de contrainte et le pendage des failles, pour vérifier si l'hypothèse 2 reste toujours possible. Il pourrait être également utile de mieux prendre en compte la modification de l'état de contrainte par l'exploitation de la veine Grande-Mine (l'approche développée doit être davantage validée), même s'il est vraisemblable que cet aspect ne remette pas en cause les résultats obtenus à plus de 100 m de la veine exploitée.

5 Synthèse

5.1 Résumé des résultats principaux

Dans le secteur de la mine de Gardanne, plusieurs analyses interdisciplinaires ont été réalisées pour mieux comprendre l'origine de la sismicité locale observée et évaluer les deux hypothèses principales formulées quant à son origine (Figure 3 ; § 0). Les principaux résultats obtenus sont rappelés de manière synthétique dans la suite de ce paragraphe.

Premièrement, les *analyses hydrogéologiques* (§ 2 de ce rapport) montrent que :

- le quartier minier de Regagnas, qui est le siège de la plupart des séismes et dont le toit se trouve entre -50 et +70 m NGF, semble systématiquement noyé depuis l'ennoyage de la mine en 2010, et en équilibre probable avec un niveau de nappe estimé entre +113 m et +140 m NGF en conditions hydroclimatiques normales ; de ce fait, ce quartier semble toujours en pression et soumis à une charge hydrostatique minimum de 4 bar ; à noter que ces estimations intègrent des incertitudes notamment liées à la complexité de la circulation des eaux dans les travaux miniers, et à l'absence de mesures *in situ* directement dans le quartier Regagnas ;
- ce quartier est connecté au vaste réservoir du Rocher Bleu dont le niveau d'eau, dans le cas de conditions hydroclimatiques extrêmes, peut remonter jusqu'à la galerie de Fuveau située à +230 m NGF ; cela induit alors possiblement des pressions hydrostatiques significatives autour de 10-20 bar dépendant du niveau du toit des travaux miniers ;

Deuxièmement, les *analyses sismiques* (§ 3) mettent en évidence :

- une signature répétitive des événements sismiques marquée par la présence de multiplets (forte ressemblance des formes des ondes) et de clusters d'activité bien contraints spatialement. Les multiplets sont actifs sur des périodes variant de quelques mois à quelques années ;
- que les profondeurs des événements sismiques semblent en majorité concentrées entre 50 et 200 m en dessous des travaux miniers ; une localisation de certains événements dans les travaux miniers ne peut pas être exclue mais une localisation au-dessus des travaux miniers semble très peu probable ;
- que les mécanismes au foyer des événements semblent cohérents, de type faille oblique avec des plans sub-verticaux ($< 80^\circ$) associés à des glissement horizontaux (décrochants) et verticaux (normaux) ; à noter que ces résultats sont basés sur des incertitudes importantes qui sont liées à la difficulté d'interprétation du champ d'ondes sismique apparemment fortement perturbé et complexifié par la présence des travaux miniers ;

Troisièmement, une analyse couplée sismo-hydrologique (§ 4.2) suggère que :

- l'activité de la sismicité dans le secteur Regagnas semble contrôlée par des conditions hydroclimatiques, globalement dépendantes du taux de précipitations et du débit de pompage au puits Gérard ;
- la remobilisation des structures de faiblesse et la génération de la sismicité semblent en majorité être déclenchées par l'augmentation de la pression interstitielle pendant des périodes de forte recharge de la nappe ainsi que par l'apparition de contraintes poro-élastiques créées par le changement de volume du réservoir lors de son remplissage et/ou de sa vidange ;
- De surcroît, nous notons une baisse d'activité sismique (notamment une absence de crise sismique) depuis fin 2017 qui semble en lien avec le renforcement de la capacité de pompage au puits Gérard ;

Finalement, les résultats de modélisation géomécanique (§ 4.3) montrent que :

- L'augmentation du niveau de la nappe dans les travaux miniers peut générer du cisaillement, selon un mécanisme de type faille normale, avec une initialisation sous les travaux miniers ;
- Le dépassement du critère de rupture en cisaillement est atteint pour la portion de failles située à une profondeur estimée par l'analyse sismique (entre 0 et 200 m en dessous des travaux miniers) et des variations de la nappe entre 100 et 140 m estimées par les analyses hydrologiques ; à noter que ces résultats sont soumis à des incertitudes sur certains paramètres d'entrée notamment la contrainte initiale, le pendage de la faille et l'angle de frottement ; en particulier, nous soulignons que le critère de rupture des failles n'est pas atteint en supposant un état de contrainte isotrope qui représente une mesure sur deux de contrainte disponible au voisinage du secteur Regagnas ;

5.2 Réévaluation des hypothèses sur l'origine de la sismicité

Sur la base de l'ensemble de ces résultats, obtenus par différentes analyses, nous pensons que le mécanisme basé sur la remobilisation de failles sous les travaux miniers (hypothèse 2) est plus probable que celui de la dégradation des travaux miniers poursuivie par une mobilisation du recouvrement (hypothèse 1) pour expliquer l'origine de la sismicité dans le secteur de Fuveau.

Un résultat important de cette étude est la certitude que les failles sont localisées bien moins profondément que suggéré par les études précédentes qui estimaient des profondeurs entre 200 m et 500 m en dessous des travaux miniers (Ineris, 2017). Aujourd'hui on estime que la majorité des sources sismiques se trouvent entre 50 et 200 m en dessous des travaux, certains événements étant localisés à proximité immédiate des travaux (Figure 22). En effet, l'ensemble des résultats indique la présence d'un jeu de failles directement (hydrogéologiquement) connectées avec les travaux et qui réagissent ainsi sensiblement aux variations de pression hydrostatique dans ces derniers. Cette vision est bien en phase avec le témoignage téléphonique d'un ancien géologue de la mine qui confirmait la présence de failles affectées par des circulations d'eau de type karstique au bord des galeries du secteur Regagnas, atteignant même, dans certains cas, la surface.

En complément de l'argument sur la profondeur des sources sismiques, l'hypothèse d'un effondrement minier à l'origine de la sismicité (hypothèse 1) est principalement en contradiction avec :

- le caractère répétitif de la sismicité (similarité des formes d'ondes et persistance de clusters spatiaux sur la durée), car un mécanisme d'effondrement minier implique une évolution progressive des propriétés du milieu au voisinage des travaux miniers, en lien notamment avec l'impact sur l'état de contrainte local (changement du medium de propagation) (§ 3.1 et § 4.2) ;
- la persistance de la sismicité depuis 2010, ce qui semble long pour un processus d'ajustement des travaux miniers et du recouvrement suite à l'ennoyage ;
- l'absence de signaux sismiques correspondant à la signature d'un mécanisme d'effondrement (ex : mode de rupture en traction) et la complexité des signaux sismiques qui semblent être en lien avec le passage des ondes sismiques à travers les travaux miniers (§ 3.4) ;
- la taille des événements sismiques dans certains cas proches d'une magnitude 2 (correspondant à une faille de plusieurs dizaines à quelques centaines de mètres) ce qui semble trop important vis-à-vis de l'épaisseur de la couche exploitée de seulement quelques mètres ;
- l'initialisation du cisaillement préférentiellement en dessous des travaux miniers suivant le résultat de la modélisation géomécanique (§ 4.3).

D'un autre côté, il faut noter que la présence de quelques effondrements partiels de travaux miniers ne peut être complètement exclue. En effet, la rupture de certaines portions de failles très proches des travaux miniers est susceptible de remobiliser en partie les travaux miniers, même si cela ne semble pas générer de sismicité significative et détectable par les dispositifs sismiques présents⁵.

Parmi les questions qui restent ouvertes après la réalisation de cette étude, il semble particulièrement important de mieux connaître la géométrie, la taille et le mode de rupture des failles générant la sismicité actuelle et historique. Les résultats de l'analyse de mécanismes au foyer et de la modélisation géomécanique suggèrent de manière cohérente une dominance de failles sub-verticales (< 80°) de type normale et décrochante (§ 3.4 et § 4.3). L'analyse des mécanismes au foyer n'a malheureusement pas permis de dessiner un modèle de faille précis (azimut, pendage, angle glissement etc.) vu les incertitudes importantes sur les données. En tous cas, les clusters de sismicité correspondent à la présence de plusieurs familles de failles mineures qui redistribuent dans leur ensemble les contraintes exercées par les variations hydrostatiques et le chargement tectonique (§ 4.2).

Dans le même contexte, une question importante à aborder dans l'avenir par les études portant sur l'aléa sismique sera de clarifier l'impact du débit de pompage à la galerie de la mer sur les conditions hydrologiques dans la partie est de la mine et ainsi la génération de futures crises sismiques dans ce secteur. Plus concrètement, il s'agit de mieux comprendre si un hypothétique arrêt de pompage serait poursuivi par une augmentation de l'activité sismique notamment en période de crue comme suggéré par cette étude. La réponse à cette question nécessitera certainement un nouveau renfort du suivi

⁵ Un autre mécanisme envisageable (mais non avéré à ce jour) en lien avec un effondrement partiel peut être lié aux phases d'étiage et de vidanges des travaux miniers (réservoir) qui pourrait avoir pour conséquence une décompression du volume qui pourrait à son tour potentiellement créer de fortes contraintes notamment au toit des travaux miniers ainsi qu'au niveau des piliers.

hydrologique notamment dans la zone sismique la plus active dans le secteur de Regagnas. Ces données apporteront également des éléments importants afin de mieux quantifier et modéliser le mécanisme de déclenchement de la sismicité comme notamment l'augmentation de la pression interstitielle dans les interfaces des failles ainsi que la génération des contraintes pro-élastiques (§ 4.2). Aussi, la redistribution de contrainte et le chargement par des glissements aismiques jouent un rôle qui est potentiellement en lien avec la signature répétitive des certains événements sismiques et qui doivent être abordés par les futures études.

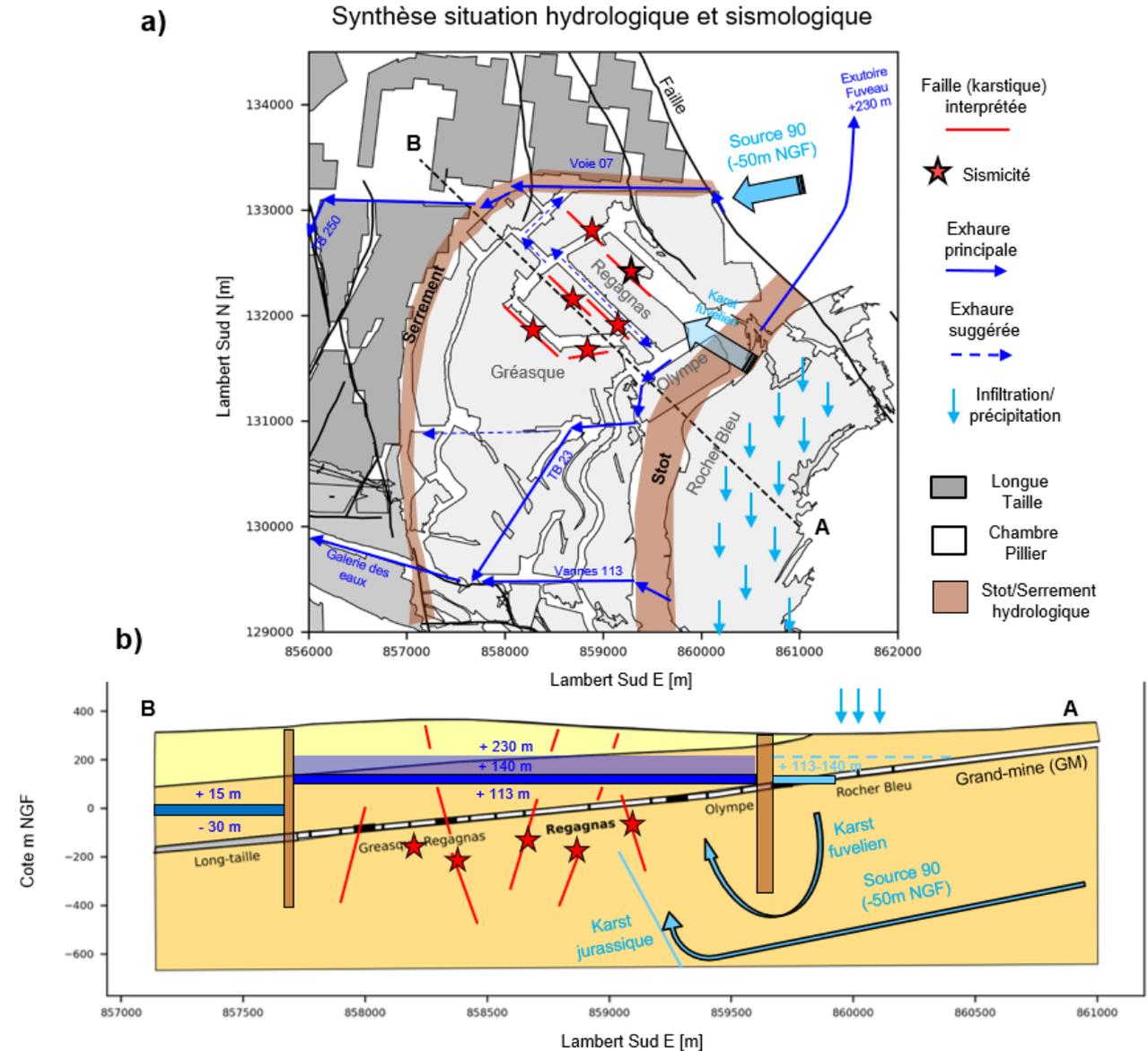


Figure 22 Synthèse des résultats réalisés illustrant le régime hydrogéologique actuel et l'origine de l'essai de Fuveau par la remobilisation de failles sub-verticales (karstifiées) sous les travaux miniers.

6 Conclusions et perspectives

Pour mieux comprendre l'origine de la sismicité induite dans le secteur de Regagnas, de nombreuses analyses interdisciplinaires ont été réalisées, notamment des analyses hydrogéologiques et sismiques basées sur un suivi instrumental temporairement renforcé ainsi que des modélisations hydro-géomécaniques. L'objectif principal de cette étude était d'évaluer la pertinence de deux hypothèses sur l'origine de cette sismicité liée soit à des instabilités dans les travaux à la suite de leur ennoyage, soit à la remobilisation de failles situées en dessous des ouvrages miniers.

Malgré le manque de complétude des données analysées et des incertitudes intrinsèques à ce type d'étude, l'ensemble des résultats obtenus dessine une image assez cohérente selon laquelle la sismicité tirerait son origine de la remobilisation d'un jeu de failles situées directement sous les travaux (en majorité, entre 50 et 200 m en dessous), hydrauliquement connectées avec ces derniers. La présence de quelques instabilités partielles des travaux miniers ne peut pas non plus être complètement exclue mais ne semble pas générer une sismicité significative. Il s'agit donc probablement de failles affectées de circulations karstiques qui réagissent sensiblement et rapidement aux variations de pression hydrostatique dans les travaux miniers.

La concentration de l'activité sismique, particulièrement forte dans la zone du secteur minier de Regagnas, semble notamment liée à sa configuration hydrogéologique particulière. Ce secteur s'apparente en profondeur à un réservoir qui subit, depuis l'exploitation minière, des variations piézométriques importantes (40 – 200 m), notamment en conditions hydroclimatiques extrêmes. Un des mécanismes de déclenchement de la sismicité semble donc lié à l'augmentation de la pression interstitielle dans les interfaces de failles. Néanmoins, cette étude met en évidence la présence possible d'autres mécanismes, notamment la variation des contraintes poro-élastiques du fait de l'extraction de l'eau (en période de sécheresse et en phase de pompage intensifié) et la redistribution de contrainte par des glissements asismiques.

Afin de progresser sur la problématique de l'essai sismique de Fuveau et notamment sur l'aléa sismique, il apparaît important de se concentrer sur la réduction des incertitudes liées aux analyses présentées dans ce rapport. Ceci pourrait concrètement passer par la détermination et un suivi précis des variations de la nappe dans le secteur de Regagnas (variations qui sont à ce stade seulement connues de manière approximative due à la complexité des circulations d'eaux dans les travaux miniers et l'absence de mesures directes dans ce secteur). La connaissance exacte des variations permettrait de répondre précisément à la question du mécanisme de déclenchement (augmentation des pressions interstitielles, contraintes poro-élastiques) : ceci pourrait être abordé par l'intégration de ce paramètre crucial dans le modèle géomécanique établie à l'occasion de cette étude.

Il serait également important de mieux connaître la géométrie, la dimension et le mode de rupture précis des failles en jeu pour identifier de potentielles zones de ruptures dynamiques importantes. Il s'agit ainsi d'appréhender l'évolution de la sismicité. Une approche prometteuse serait de poursuivre les investigations et d'appliquer par exemple des méthodes sismiques avancées (ex. : localisation relative, analyse du spectre à la source) basées sur les données du réseau sismique dense toujours en cours d'acquisition. Ces analyses pourraient également contribuer à mettre en évidence la présence éventuelle de mouvements asismiques. La conjonction de ces éléments, c'est-à-dire la connaissance des conditions hydromécaniques favorables à la génération de la sismicité ainsi que la connaissance du type de faille réactivé (géométrie, dimension, nature géologique), contribueront à l'évaluation de l'aléa sismique et notamment à l'estimation de la magnitude maximale M_{max} avec le recours à la modélisation géomécanique par exemple. Une partie de ces travaux sur l'estimation d'aléa sismique à Gardanne est envisagé dans le cadre du projet européen RFCS PostMineQuake dont Ineris est partenaire. L'objectif du projet sera également d'évaluer l'aléa sismique grâce à un retour d'expérience sur la même problématique d'autres sites post-miniers en Pologne et Allemagne.

7 Références

- Autran J, Lochard T, Monteau R, 2014. L'exploitation dans le bassin minier de Provence : quartiers, puits et galeries. Aix-en-Provence, CNRS – OHM Bassin Minier de Provence, TOHM.
- Cesame 2003. Rapport. Etude hydrologique. Concessions minières de la région de Gardanne (13).
- Contrucci, I., Klein, E., Bigarre, P., Lizeur, A., Lomax, A., & Bennani, M. 2010. Management of post-mining large-scale ground failures: blast swarms field experiment for calibration of permanent microseismic early-warning systems. *Pure and applied geophysics*, 167(1-2), 43-62.
- Contrucci et Klein, 2017, Etat des connaissances concernant les aléas et les risques liés à la sismicité anthropique. Rapport Ineris-DRS-17-149681-07390D.
- Coutant, O. 1990, Programme de Simulation numérique AXITRA, Rapport LGIT, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- Dheilly A, 2013. Compréhension des circulations d'eau souterraine dans l'ancienne mine de Gardanne (13) - Argumentaire pour l'implantation de 2 à 3 piézomètres dans le réservoir minier - Rapport final. BRGM/RP-62412-FR.
- Dheilly A, Brigati B, 2015. Gestion du réservoir minier de Gardanne, Bouches du Rhône : Approches environnementales et hydrauliques du pompage et de son rejet dans la Mer Méditerranée. Exploitations minières passées et présentes : Impacts environnementaux et sociétaux, Collection EDYTEM : 71-84.
- Dominique, P., 2015. Bassin houiller de Provence (13) La crise sismique de Fuveau de décembre 2014, Orleans, France : Rapport final BRGM/RP-65050-FR.
- Geoderis rapport 2010 S-2010/29DE-10PAC3200 Procédure de surveillance microsismique des anciennes exploitations de houille en chambres piliers.
- Geoderis rapport 2016 S 2016/004DE-16PAC22070 Bassin de lignite de Provence (13) Révision et mise à jour des aléas liés à l'ancienne activité minière.
- Gaviglio, P., Bigarre, P., Baroudi, H., Pigué, J. P., & Monteau, R. 1996. Measurement of natural stresses in a Provence mine (Southern France). *Engineering geology*, 44(1-4), 77-92.
- Goldbach, O. D., 2009. Seismic risks posed by mine flooding. s.l., The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 149-174.
- Grigoli, F., Cesca, S., Priolo, E., Rinaldi, A. P., Clinton, J. F., Stabile, T. A. & Dahm, T. 2017. Current challenges in monitoring, discrimination, and management of induced seismicity related to underground industrial activities: A European perspective. *Reviews of Geophysics*, 55(2), 310-340.
- Hervieu, L 2020, rapport stage master. Surveillance de l'ancien bassin houiller de Provence : amélioration des outils de surveillance microsismique. Rapport de stage pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de l'Université de Strasbourg.
- Ineris, 1995. Synthèse hydrogéologique du bassin minier de Gardanne-Fuveau. Etude préliminaire. SSE-YPa/CS 26MA08/R01.
- Ineris, 2003. DRS-03-36460/R01. Rapport. Bassin houiller de Provence. Etude des effets sur les terrains de surface des travaux miniers souterrains et de leur évolution prévisible dans le temps.
- Ineris, 2017 DRS-17-164272-00556A rapport technique. Origine de la sismicité de l'ancien bassin houiller de Gardanne : apport de l'analyse des mécanismes à la source.
- Ineris, 2018 DRS-18-164272-01553A note technique. Mesures hydrologiques dans le bassin Houllier de Provence et son lien avec la sismicité observée.
- Ineris, 2019 DRS-19-171497-00632A note technique. Renforcement temporaire du suivi microsismique et hydrologique du bassin houiller de Gardanne de Provence et lien avec la sismicité observé.
- Ineris, 2019 178729-708087 note d'installation. Caractéristiques des station temporaires installé en Provence.
- Ineris, 2020 178729-1971325 note technique d'avancement de l'opération 1 du programme 181 EAT-DRS03 2019 relative au suivi couplé microsismique et hydrogéologique de l'ennoyage du bassin houiller de Gardanne.

- Matrullo, E., 2015. Induced micro-seismicity by flooding of the abandoned Gardanne coal field (Provence, France): analysis and interpretation. EAGE conference Madrid.
- McGarr, A., 1992. An implosive component in the seismic moment tensor of a mining-Induced tremor. *Geophysical Research Letters*, Volume 19, pp. 1579-1582.
- McGarr, A., Simpson, D. & Seeber, L., 2002. 40 case histories of induced and triggered seismicity. Volume 81.
- Miller, A., Richards, J. & McCann, D., 1988. Microseismic monitoring of the infill trial at castlefields mine, dudley. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, p. 319–324.
- Miller, A. et al., 1989. Microseismic techniques for monitoring incipient hazardous collapse conditions above abandoned limestone mines. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, p. 1–18.
- Moulin M, 2003. Etude hydrogéologique des ressources en eau souterraines profondes du bassin d'Aix-Gardanne. Synthèse des résultats de la dernière phase : bilan et conclusions. Rapport BRGM RP-57641-FR.
- Namjesnik D. Kinscher J. Gunzburger Y. Poiata N. Dominique P. Bernard, P. Contrucci I. Automatic detection and location of microseismic events from sparse network and its application to post-mining monitoring. *Pure and applied Geophysics*. soumis.
- Ogasawara, H. et al., 2002. Microseismicity induced by heavy rainfall around flooded vertical ore veins. *Pure and Applied Geophysics*, p. 91–109.
- 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(3), 1548-1573.
- Randall, M. J. 1973, The spectral theory of seismic sources, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 63(3), 1133–1144.
- Scholz, C. H. 2002, *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
- Senfaute, G., Wassermann, J. & Homand, F., 2008. Induced micro-seismicity and mechanical response during the experimental flooding of an iron ore mine. Nancy, France, ASGA.
- Šílený, J. & Milev, A., 2008. Source mechanism of mining induced seismic events—resolution of double couple and non double couple models. *Tectonophysics*, Volume 456, pp. 3-15.
- Srinivasan, C., Benady, S. & Sivakumar, C., 2000. Fluid induced seismicity in Kolar Mining Region orkshop on Dam Safety Including Instrumentation of Dams. s.l., s.n., pp. 15-17.
- Uchida, N., & Bürgmann, R. 2019. Repeating earthquakes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47, 305-332.
- Vavryčuk, V. 2001, Inversion for parameters of tensile earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 106(B8), 16,339–16,355, doi:10.1029/2001JB000372.
- Wetmiller, R. J., Galley, C. A. & Plouffe, M., 1993. Post-closure seismicity at a hard rock mine. *Rockbursts and Seismicity in Mines*, Volume 93, pp. 445-448.

8 Annexes

Liste des annexes :

Référence	Description	Nombre de pages
Annexe A – Données hydrogéologiques	A.1 Principaux aquifères karstiques recoupés par l'exploitation	2
	A.2 Rappel du schéma d'exhaure des eaux en phase d'exploitation	5
	A.3 Fonctionnement hydraulique du quartier du Rocher Bleu	4
	A.4 Détail des connexions probables entre les travaux du Rocher Bleu et de Gréasque-Olympe-Régagnas	2
Annexe B : caractérisation des sources sismiques	B.1 Tests complémentaires sur la robustesse du modèle de vitesse et de la profondeur	2
	B.2 Evaluation d'influence des travaux miniers sur les champs d'ondes sismique	2
Annexe C : Mécanisme de déclenchement	C.1 Corrélation sismo-hydrologique dans les zones de surveillance	1
Annexe D : Modélisation géomécanique	D.1 Modèle analytique	1
	D.2 Caractéristiques mécaniques	1
	D.3 Variations maximales de l'ouverture normale des failles	1
	D.4 Variations maximales du cisaillement maximal des failles	1
	D.5 Impact de l'état de contrainte initiale	1
	D.6 Impact pendage failles	2
	D.7 Impact de l'angle de frottement des failles	2

Annexe A – Données hydrogéologiques

A.1 Principaux aquifères karstiques recoupés par l'exploitation

Le karst fuvélien

Dans le centre de la zone exploitée (Lambeau Charrié) et surtout à l'est (Rocher Bleu), les calcaires fuvéliens affleurent, ce qui permet aux eaux d'infiltration météorique de rejoindre rapidement les zones profondes. Cette configuration explique la survenue de plusieurs événements au cours du creusement des travaux miniers, notamment dans le quartier du Rocher Bleu (Cesame, 2003) :

- ennoyage total du quartier de l'automne 1886 à l'été 1889 à la suite de fortes précipitations (avec des débits de vidange de 1200 à 6000 m³/h) ;
- ennoyage partiel du quartier après une semaine de fortes précipitations en janvier 1978 jusqu'à la recette située à la cote +140 m NGF, puis débordement vers les quartiers de Régagnas, Ste-Victoire et l'Etoile ; c'est à la suite de cet événement que sera aménagée une vidange basse au niveau de la cote +113 m NGF.

Lorsque l'exploitation minière s'est poursuivie dans les quartiers Régagnas et Gréasque, c'est-à-dire plus profondément et en aval hydrogéologique des quartiers du Rocher Bleu, un stot de charbon de 400 m de largeur a été laissé afin de tenter d'isoler ces nouveaux quartiers de celui qui était ennoyé et qui formait un vaste réservoir d'eau. Malgré cela, l'approfondissement de l'exploitation dans le quartier de Gréasque a fini par recouper des fractures aquifères apparemment en liaison avec le réservoir amont du Rocher Bleu, notamment une fracture recoupée par le TB-110 qui a noyé une partie de ce quartier en 1920 avec un débit de 180 m³/h. En 1934, une autre fracture aquifère recoupée dans ce même quartier a contraint de limiter son extension vers le nord, d'autant plus qu'on se rapprochait des puits de l'Arc, de Peynier et du forage de Fuveau qui étaient artésiens (voir chapitre suivant).

Plusieurs opérations ont été entreprises pour tenter de vidanger gravitairement les vieux travaux du Rocher Bleu, du fait du risque que ce stock d'eau faisait peser sur les quartiers situés plus en profondeur et ce, malgré l'existence d'un stot de 400 m de largeur. Il s'agit notamment du creusement du TB23 et de la poursuite de la galerie des eaux vers la base du réservoir +113 via un ouvrage appelé « Vannes du 113 ». Cela a permis de vider pendant un certain temps le réservoir des vieux travaux du Rocher Bleu jusqu'à la cote +140 correspondants à un travers-banc relié à une recette du puits Lhuillier. Cependant, en 1978, après une semaine très pluvieuse, ce réservoir s'est remis en charge et a déversé de l'eau via la recette +140 du puits Lhuillier vers les quartiers de Régagnas et de Ste-Victoire. Il a alors été décidé de créer des serrements sur cette recette et dans le puits Lhuillier afin de ré-isoler ces vieux travaux et de leur redonner un rôle de réservoir tampon des eaux infiltrées.

D'autres connexions sont apparues entre le réservoir du Rocher Bleu et des quartiers situés en aval hydrogéologique après les fortes pluies de l'automne 1994. Il a alors été constaté que lorsque ces vieux travaux étaient vides ou leur niveau d'eau suffisamment bas, l'impact des fortes précipitations ne se faisait pas sentir sur le débit du TB-250 (qui relie le quartier du Lambeau charrié aux travaux amont) alors que lorsqu'ils étaient pleins (comme ce fut le cas en 1994) « la moindre précipitation entraînait de fortes amplitudes du volume exhauré » (Cesame, 2003).

En revanche, plus à l'ouest, les travaux miniers du Lambeau charrié sont restés protégés de ces venues d'eau par la faille inverse de la Diote qui est en compression et qui met en contact le Fuvélien du compartiment est avec le Rognacien inférieur argileux, donc imperméable, du compartiment ouest. Le quartier de Valdonne, plus haut et également situé dans une zone en compression, n'a pas non plus montré de fortes venues d'eau. Enfin le quartier de Meyreuil, isolé des autres travaux et protégé de la surface par une épaisse couverture argileuse (Bégudien + Rognacien), a été qualifié de « mine sèche ».

Le karst jurassique

Outre les niveaux aquifères du Fuvélien, qui véhiculent des eaux descendantes issues de l'infiltration rapide, il existe également un vaste aquifère karstique hébergé par les formations calcaires sous-jacentes du Jurassique. Par le biais de circulations profondes, celui-ci est en relation avec le massif de la Sainte-Victoire dont l'altitude lui confère un fort degré d'artésianisme. De ce fait, il crée des arrivées d'eau ascendantes lorsqu'il est capté (en puits ou en forage) ou lorsque sont recoupées des fractures en relation avec lui (via les galeries). C'est ce qui s'est produit dans plusieurs ouvrages miniers : les puits de l'Arc, le puits Peynier, le forage de Fuveau, ainsi que des galeries du quartier de Régagnas (sources 90) et de Sainte-Victoire (sources Sainte-Victoire).

En 1879, le sondage de Peynier s'était déjà ennoyé à la suite du recoupement d'une fracture aquifère vers 300 m de profondeur, et avait produit un débit artésien d'environ 50 m³/h. On s'était alors posé la question de savoir s'il s'agissait d'eau de l'aquifère fuvélien ou jurassique, bien que l'importance de la mise en charge ne laissât que peu de doutes. Mais l'évènement le plus important relié à cet aquifère profond concerne les deux puits de l'Arc. Les travaux réalisés à leur base en 1918 ont recoupé une importante fracture aquifère et artésienne dont le débit a été estimé à 2200 m³/h. Cela a provoqué leur ennoyage intégral en quelques heures, faisant remonter l'eau jusqu'en surface, 400 m plus haut. De nos jours, ces deux puits sont toujours artésiens avec un débit de l'ordre de 300 m³/h. Des analyses isotopiques et chimiques des eaux ont prouvé depuis lors qu'il s'agissait bien de la remontée d'eau profondes issues de l'aquifère jurassique⁶. Plus tard, ce sera également le cas du forage de Fuveau, implanté à 2 km au nord du quartier Regagnas, qui a rencontré une venue d'eau en charge au niveau des couches de la Grande Mine, à 300 m de profondeur : le niveau d'eau est alors remonté jusqu'à rendre ce forage artésien au débit de 100 m³/h, puis il s'est finalement stabilisé vers 192 m NGF, cote voisine de celle des puits de l'Arc

Dans les années 1960-1970, le creusement de nouvelles galeries minières vers le nord-est recoupe des fractures aquifères qui donnent naissance aux sources 90 et Sainte-Victoire, avec un débit cumulé d'environ 250 m³/h. Les premières ont été recoupées dans le quartier du Régagnas vers -50 m NGF, les secondes dans le quartiers Sainte-Victoire vers -220 m NGF mais sur des fractures de même direction. Là encore, leur faciès chimique et isotopique ainsi que des résultats de traçages par colorations montrent qu'il s'agit d'eaux issues de l'aquifère jurassique avec, pour les sources 90, un mélange d'eaux du Fuvélien et d'infiltrations directes depuis des pertes en surface. Il a également été observé que depuis l'apparition de ces sources, les mises en charges du réservoir du Rocher Bleu étaient moins régulières, ce qui implique qu'elles le drainent partiellement.

A.2 Rappel du schéma d'exhaure des eaux en phase d'exploitation

Le schéma d'exhaure des eaux en phase d'exploitation est synthétisé en page suivante :

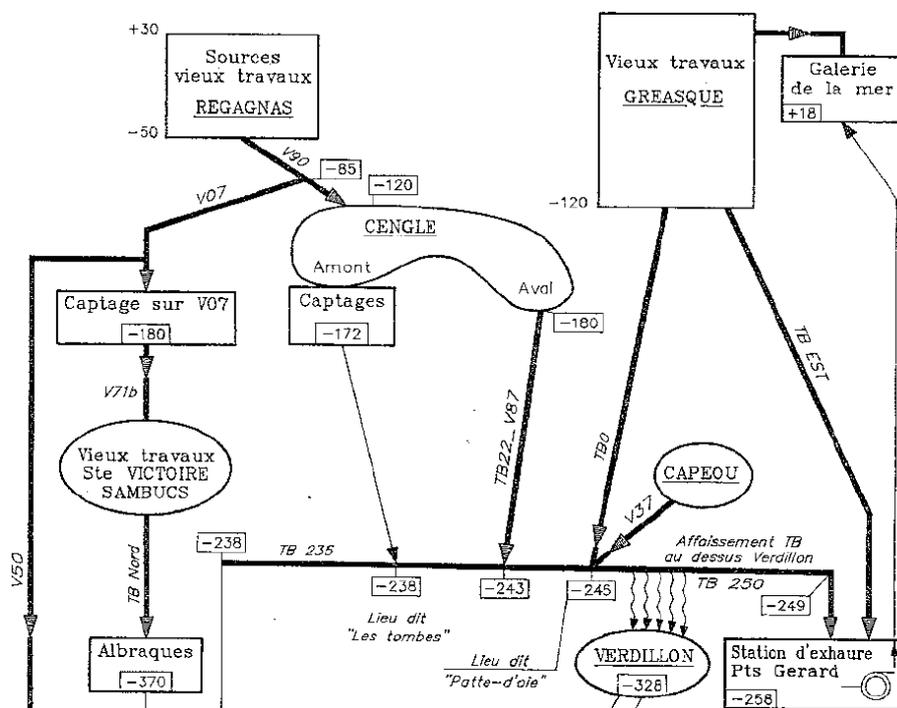
- pompage au débit de 200 à 800 m³/h au puits Gérard, profond de 723 m, avec des pointes à 1800 m³/h ; ce puits draine pratiquement toute la mine à l'exception des quartiers les plus profonds ; l'eau est rejetée dans la Galerie de la mer à +18 m NGF ;
- pompage au débit de 2000 à 4000 m³/h au puits Y, profond de 1109 m, avec des pointes à 8000 m³/h ; ce puits draine uniquement les quartiers les plus profonds (Eguilles et Estaque) ; l'eau est rejetée dans un thalweg en surface à +237 m NGF.

Par ailleurs, le schéma de circulation des eaux en amont du puits Gérard, assez complexe, est résumé ci-dessous :

- dans ce puits, une colonne d'exhaure remonte l'eau qui arrive des quartiers est via le TB-250 jusqu'à la recette +18, connectée à la Galerie de la mer ;
- la Galerie de la mer récupère aussi les eaux descendant gravitairement des quartiers est via la Galerie des eaux ;
- la Galerie des eaux, à son arrivée dans le quartier de Gréasque, récupère à la fois :
 - o directement les eaux du TB23 qui draine les quartiers Gréasque et Olympe à +23 m NGF ;
 - o par le biais du puits Hély d'Oissel (PHO), les eaux issues des Vannes du 113 qui drainent le quartier du Rocher Bleu à +113 m NGF.
- le TB-250, connecté au puits Gérard à -250 m NGF, remonte à l'est jusqu'à -110 m NGF dans le quartier Cengle où il récupère les eaux des sources 90 (située à -50 m NGF) via la Voie 07.

⁶ Il s'agit en effet d'eaux bicarbonatées calciques, moyennement minéralisées (~500 mg/L), contrairement aux eaux de mine qui sont très minéralisées (> 2000 mg/L) et de faciès sulfaté calcique. Cette origine distincte a été confirmée par des analyses isotopiques qui ont montré que ces eaux proviennent d'une zone d'infiltration située en altitude, probablement sur le massif de la Sainte-Victoire. Enfin, des expériences de traçage par coloration ont mis en évidence des circulations depuis la surface (notamment depuis les pertes de certains thalwegs) vers les travaux miniers, et confirmé que les vitesses observées traduisent bien des écoulements karstiques.

Les relations entre les vieux travaux miniers de Régagnas et de Gréasque et les travaux sous-jacents en phase d'exploitation sont représentés sur la figure ci-après (Dheilly, 2013). On constate que les venues d'eau issues de ces vieux travaux sont drainées par les voies 07 et 90 pour Régagnas et par des travers-bancs mentionnés « TB EST » et « TB O » (probablement « TB Ouest ») pour Gréasque. Si les deux premiers sont connus, ce n'est pas le cas des deux derniers dont l'un devrait normalement correspondre au TB-110 (probablement le TBO car le rapport Ineris de 1995 mentionne que ce travers-banc a été creusé depuis le puits Hély-d'Oissel en direction de l'ouest, au mur de la Grande Mine).



Circulations d'eau depuis les vieux travaux en 1994 (extrait d'après Dheilly, 2013)

Il est également important de rappeler le schéma de circulation des eaux entre le quartier du Rocher Bleu et les quartiers plus profonds situés à l'ouest via le puits LHuillier (Césame, 2003). Pour s'affranchir des problèmes d'ennoyage du quartier du Rocher Bleu, on réalisa deux types de travaux au 19^e siècle :

- un cloisonnement des chantiers « en créant plusieurs lignes de barrages dans les quartiers amont (barrages maçonnés, stots protecteurs de charbon vierge) afin de retenir les eaux d'infiltration » ; cela a ainsi créé plusieurs réservoirs tampons, non précisément localisés, qui étaient vidés pendant les étiages estivaux ;
- le creusement de la galerie de Fuveau à la cote +230 m NGF qui évacuait gravitairement l'eau vers un point bas situé à Fuveau.

Parmi les quinze « lunettes d'aéragage » qui avaient permis le creusement de cette galerie, quatre furent prolongées vers le bas jusqu'à atteindre la couche Grande Mine : il s'agit des puits 10, 12, 14 et 15⁷. Alors que le puits 10 atteignait initialement la cote +234 m NGF, correspondant à la Galerie de Fuveau, il fut approfondi en 1885 jusqu'à la cote +114 m NGF et devint le puits LHuillier (voir description en page suivante).

⁷ Entre le puits 15 et le puits 14, on a creusé en 2018 le forage dit « de Fuveau » (référéncé BSS003ETLI sur Infoterre), profond de 146 m, pour le suivi du gaz de mine.

DE	A	Désignation	Géologie	Observations
0		180 Calcaire gris	Fuvellien	
		42 Mine de Gréasque		
		106 Mine des Deux Pans		
		113 Mine de l'Eau		Pendage :6°
		131 Mine du Gros Rocher		
		139 Mine de Quatre Pans		
		166 Mauvaise Mine		
		172 Grande Mine		

Puits LHUILLIER
Commune de Fuveau
x : 860540 - y : 131915 - z : 294
Profondeur : 180 m.
Section : 4,25x3,55m.
Fonçage : 1842 à 1846 (60m) - 1885 (180m)

Description du puits LHuillier d'après Infoterre

Ce puits a ensuite subi plusieurs transformations dont les résultats sont schématisés en page suivante. A la cote +140 m NGF (soit vers 154 m de profondeur), on creuse une recette à partir de ce puits, laquelle se prolonge par un travers banc qui rejoint apparemment le quartier du Rocher Bleu. Près d'un siècle plus tard, en 1972, le fond du puits LHuillier « est complètement vidé à partir d'un trou de sonde réalisé à partir des travaux du quartier du Régagnas » jusqu'à ce que, en 1978, les travaux du Rocher Bleu se mettent une nouvelle fois en charge à la suite d'une semaine très pluvieuse : l'eau se déverse alors par la recette +140 et traverse tout d'abord les quartiers Régagnas et Ste-Victoire, puis ceux du Cengle pour finalement atteindre le quartier de l'Etoile où elle provoque un arrêt d'exploitation pendant 3 jours. On décidera alors de redonner au quartier du Rocher Bleu son rôle de réservoir tampon en réalisant les travaux suivants :

- construction d'un serrement « dans le TB +140 près de la recette du puits LHuillier » ; ce serrement est toutefois « traversé par 2 tuyaux Ø600 mm munis de vannes » (dont on ne sait pas si, de nos jours, elles sont restées ouvertes ou fermées, ni si elles sont encore étanches) ;
- « construction d'un serrement dans le puits LHuillier sous la recette +140 » ;
- « aménagement d'un nouveau point de soutirage du réservoir 113 à partir du TB +90 dont l'extrémité est située près de l'aplomb de la grande descenderie du puits LHuillier » par la réalisation de deux forages inclinés fermés par des vannes (Chalumeau, 2000) ;
- « construction de barrages à la recette +230 du puits LHuillier pour éviter un reflux éventuel des eaux dans le puits en cas de montée des eaux dans la galerie de Fuveau ».

A la suite de ces opérations, des mesures de pression ont été réalisées entre 1950 et 1961 à l'exutoire du réservoir 113 (Ineris, 1995) : ils ont montré des mises en charge qui ont atteint 9 kg (soit 90 m) à 8 reprises avec un maximum de 10,5 kg (soit 105 m) ce qui correspond à une remontée de l'eau jusqu'à +218 m NGF.

Le puits LHuillier est donc normalement déconnecté des travaux de Régagnas ainsi que de ceux du Rocher bleu, sauf si, pour ces derniers, les vannes posées sur les deux tuyaux de 600 mm qui traversent le serrement du TB 140 sont restées ouvertes ou ne sont plus étanches. C'est ce que note Dheilly (2013) pour qui « la cote de l'eau au puits LHuillier est toujours proche de +140 m NGF car il y a un seuil de débordement à cette cote dans l'ouvrage ».

En 1886, à la suite d'un automne très pluvieux, le quartier du Rocher Bleu est inondé jusqu'au-dessus de la cote +230 m NGF : l'eau s'engouffre dans la Galerie de Fuveau et noie au passage le puits LHuillier (et probablement les travaux de la Grande Mine recoupés au fond). Cette inondation provoque l'arrêt de l'exploitation⁸ pendant plusieurs années et montre que « la fracturation naturelle et notamment les moulières recoupées par les travaux de défilage court-circuitent les barrages édifiés dans les quartiers amont ». Le volume du réservoir ainsi constitué dans le quartier du Rocher Bleu entre son mur à +113 m NGF et la cote de débordement de la Galerie de Fuveau à +330 m NGF est estimé entre 2,5 et 3 Mm³.

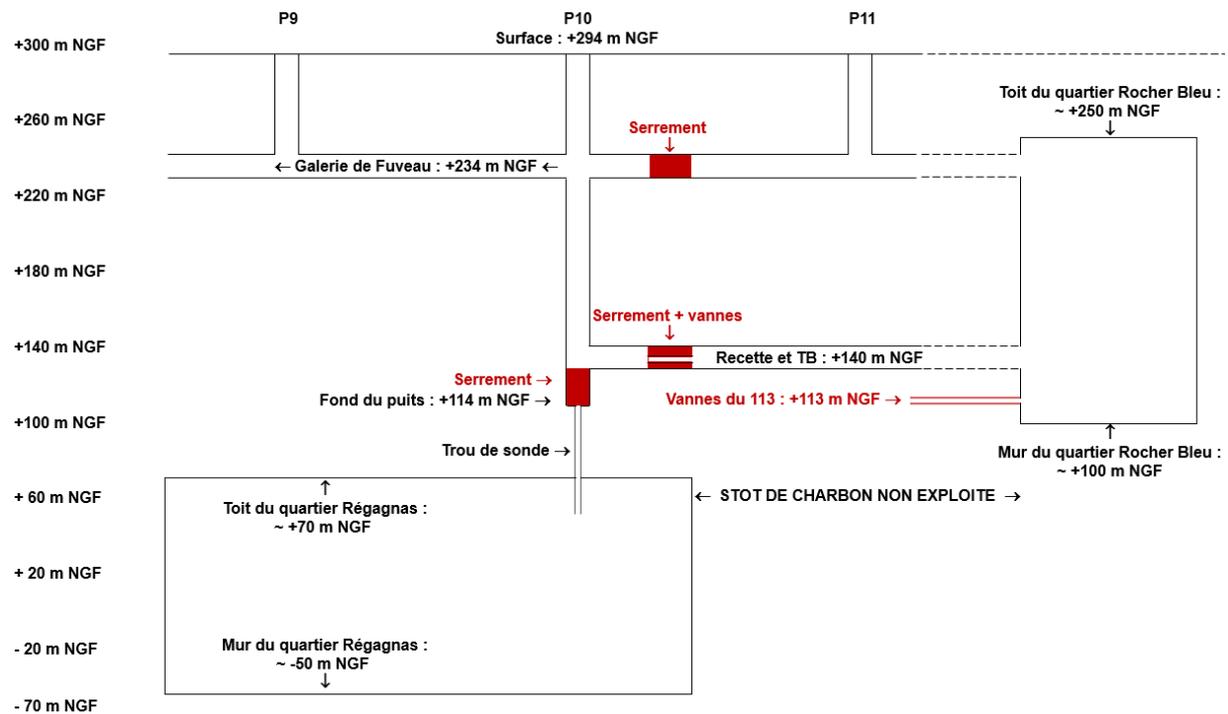
⁸ Sans qu'il ne soit précisé dans quel(s) quartier(s).

Entre 1890 et 1905 est creusée la Galerie de la mer puis, ensuite, la Galerie des eaux qui la prolonge vers l'est afin d'assurer le drainage gravitaire des travaux du Rocher Bleu à l'amont de la cote +20 m NGF. Cette nouvelle galerie permet de ce fait le développement de la zone de travaux de Gréasque et rend caduque celle de Fuveau, située à 210 m au-dessus mais pas celle située au sud de la faille Jean-Louis qui ne fut jamais raccordée à la Galerie des eaux.

Les travaux du quartier de Gréasque, réalisés à partir du puits PHO (puits Hély d'Oissel) ont été limités vers l'amont à la cote +70 m NGF car on a laissé un stot de charbon non exploité de 400 m de largeur entre ces travaux et ceux du Rocher Bleu « qui surversait toujours à l'époque par la galerie de Fuveau » ! On a ensuite relié « la base du réservoir +113 » du Rocher Bleu à la Galerie des eaux par le creusement des « vannes du 113 » mais, « malgré ces travaux, la vidange définitive ne fut pas possible » car, pour éviter l'excès d'eau dans la Galerie de la mer (également utilisée à l'époque pour le roulage du charbon), le débit de vidange du réservoir +113 était limité. Puis l'exploitation de Gréasque s'est développée sous la cote +113 m NGF et a recoupé de nombreuses fractures aquifères, tout comme le creusement du puits Gérard. Ce n'est qu'après l'abandon du roulage du charbon par la Galerie de la mer qu'on put ouvrir à fond les vannes du 113 et vidanger ainsi ce réservoir jusqu'à la cote +140 m NGF qui correspond à un travers-banc relié au puits LHuillier : ce TB 140 ayant ensuite été fermé depuis par un serrement, on peut supposer que la cote de vidange du réservoir du Rocher Bleu correspond aux vannes du 113, soit +113 m NGF.

Dans les années 1960-1970, l'exploitation se développe fortement vers le nord-est (Régagnas, Ste-Victoire et le Cengle) et recoupe des cassures aquifères qui donneront naissance aux sources 90 : on constate alors que la mise en charge des travaux du Rocher Bleu est de moins en moins régulière.

Enfin, les eaux des sources Sainte-Victoire, situées dans le quartier éponyme, suivent un circuit différent du fait de leur profondeur (-220 m NGF) qui ne permettait pas de les raccorder au dispositif susmentionné : leurs eaux sont envoyées vers le puits Boyer, lequel dispose d'une colonne d'exhaure qui les renvoie ensuite dans le TB-250 d'où elles rejoignent finalement le puits Gérard.



Synthèse des travaux réalisés dans le puits LHuillier et à proximité

Légende : les travaux tracés en rouge sont ultérieurs au creusement du puits et des recettes

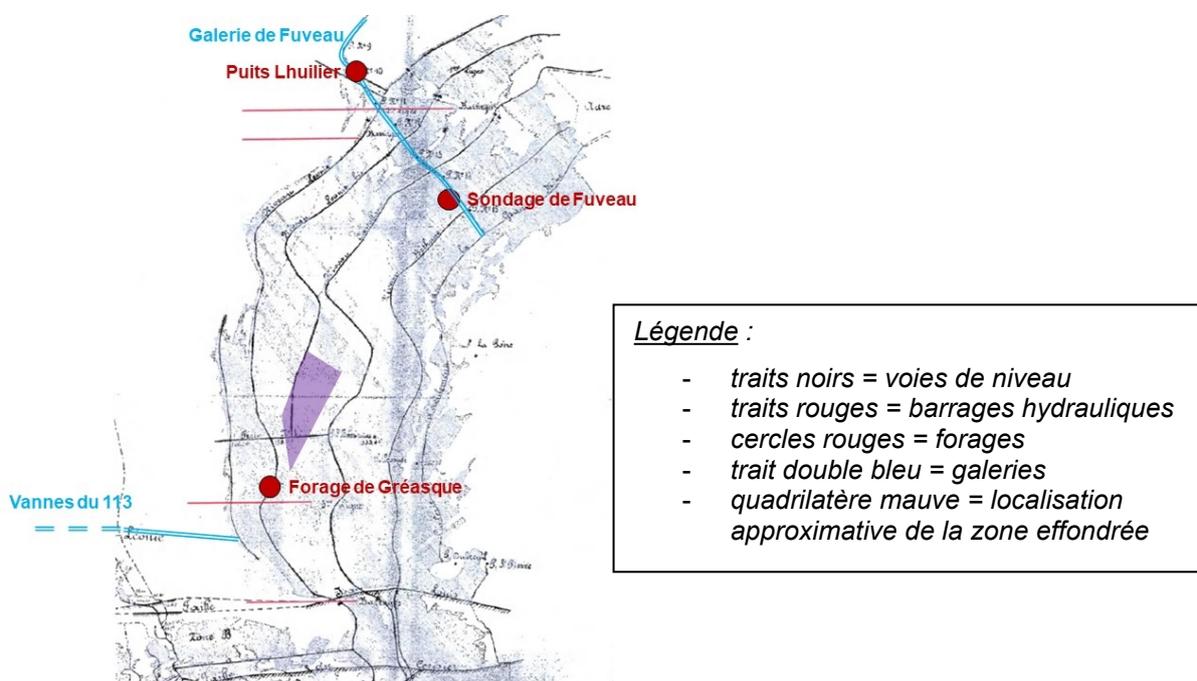
A.3 Fonctionnement hydraulique du quartier du Rocher Bleu

On a vu précédemment que, pour tenter de limiter les intrusions d'eau à partir des vieux travaux du Rocher Bleu, ce quartier avait été cloisonné par la création de plusieurs lignes de barrages maçonnés, accompagnés de stots de charbon vierge. Cela a permis de créer des réservoirs tampons qui pouvaient être vidés pendant les étiages estivaux en phase d'exploitation. Cesame (2003) précise ainsi que la

partie des eaux des vieux travaux du Rocher Bleu qui n'est pas collectée par les vannes du 113 parvient à s'infiltrer dans les quartiers de Gréasque, du Cengle et du Montaiguet, sous forme de venues d'eau.

La figure suivante permet de visualiser ces « lignes de barrages hydrauliques ». On peut expliquer la différence de cote piézométrique d'une centaine de mètres entre les forages Fuveau et Gréasque sur la base des observations suivantes :

- le forage de Fuveau se trouve à proximité de la galerie éponyme qui draine le nord du quartier du Rocher Bleu à une altitude élevée (+230 m NGF), alors que le forage Gréasque se trouve non loin des vannes du 113 qui drainent le sud de ce même quartier à la cote +113 m NGF ;
- le forage de Gréasque se trouve, aux incertitudes de localisation près, juste derrière la 3^e ligne de barrages hydrauliques, au sud du quartier ;
- le forage de Gréasque se trouve sur l'une des voies de niveau les plus basse alors que le forage de Fuveau se trouve une à deux voies de niveau au-dessus ;
- enfin, une zone d'effondrement a affecté le quartier du Rocher Bleu juste au nord du forage de Gréasque, ce qui a pu contribuer à isoler davantage ce secteur de celui situé plus au nord.



Localisation des forages, des voies de niveau et des lignes de barrages hydrauliques dans le quartier du Rocher Bleu (d'après Ineris 2003)

En outre, un plan des HBCM réalisé après les inondations catastrophiques de 1978 est présenté en page suivante : il permet de retracer le circuit des eaux entre les vieux travaux du Rocher bleu (appelés ici « anciens travaux du XIX^e siècle ») et les travaux des quartiers Régagnas-Olympe puis, plus en aval, Cengle et Ste-Victoire. On y voit une scission du quartier du Rocher Bleu entre une zone superficielle drainée par la galerie de Fuveau à -232 m NGF et une zone profonde drainée à la fois par le TB 140 à +140 m NGF, par les vannes du 113 à +113 m NGF et par des sondages inclinés rejoignant la galerie des Eaux à +30 m NGF. Les quartiers Régagnas et Olympe sont quant à eux drainés par une connexion au TB140 (à une cote non mentionnée située entre +30 et +140 m NGF), par une galerie rejoignant les puits Hély d'Oissel à -100 m NGF et par une connexion au quartier Ste-Victoire.

Les travaux du Rocher Bleu étaient donc scindés en deux unités :

- une zone superficielle drainée par la galerie de Fuveau à -232 m NGF, qui semble correspondre à la partie nord en relation hydraulique avec le sondage Fuveau ;
- une zone profonde drainée à la fois par le TB 140 à +140 m NGF, par les vannes du 113 à +113 m NGF et par des sondages inclinés rejoignant la galerie des Eaux à +30 m NGF ; cette zone plus profonde correspond à la partie sud en relation hydraulique avec le sondage Gréasque.

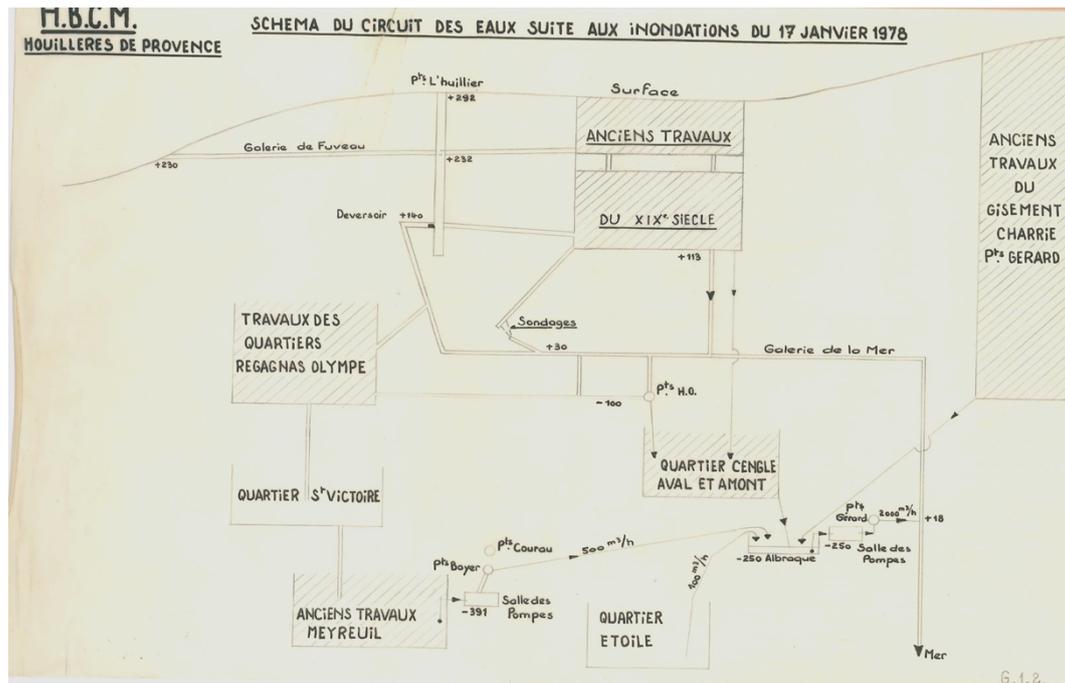
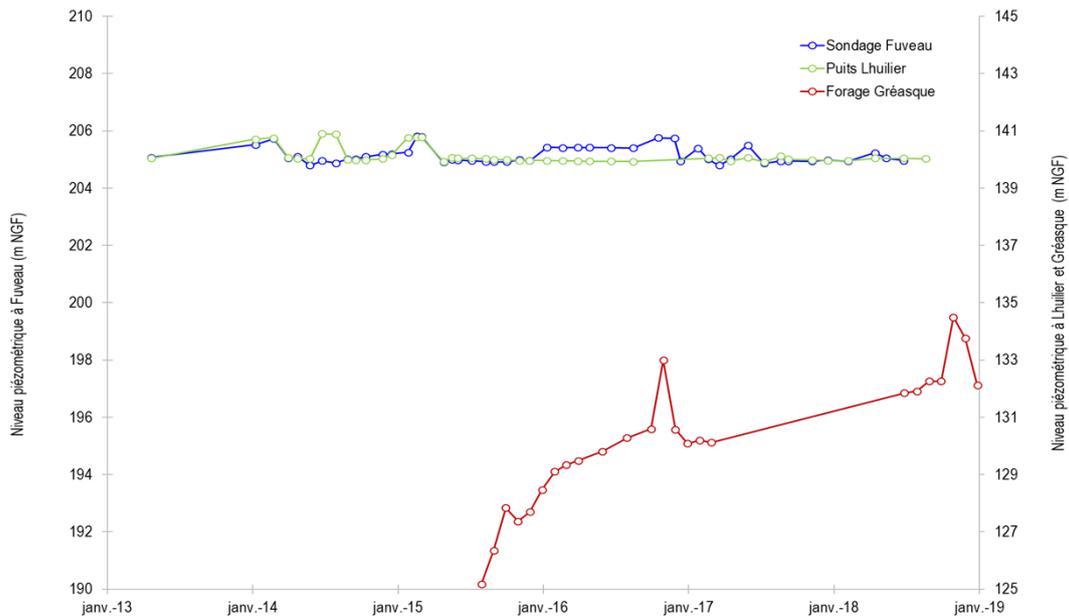


Schéma du circuit des eaux depuis les vieux travaux du Rocher bleu suite aux inondations de 1978 (document HBCM)

En prenant en compte toutes ces observations, il y a une certaine logique à ce que le niveau piézométrique moyen se trouve légèrement au-dessus de +113 m NGF au forage de Gréasque (avec un maximum probable à +140 m NGF) alors qu'il se trouve plus haut au forage de Fuveau où il peut monter jusqu'à +230 m NGF. Le comportement piézométrique des trois forages localisés dans ou à proximité immédiate du quartier du Rocher Bleu est présenté sur la figure suivante pour la période 2013-2018 où l'on dispose de quelques mesures manuelles. On constate la similitude des tracés au puits LHuillier et au forage Fuveau, tous deux situés au nord du quartier, où la piézométrie est stable (malgré un écart altimétrique de 65 m) avec des fluctuations piézométriques qui n'atteignent qu'une amplitude de ± 1 m. En revanche, le comportement au forage Gréasque, situé dans la partie sud, diffère significativement avec une remontée piézométrique d'une dizaine de mètres. Cela ne peut traduire qu'un compartimentage de ces deux secteurs, l'un (au nord) relié à la galerie de Fuveau ou au TB 140 et l'autre (au sud) drainé par les vannes du 113 voire par les sondages inclinés débouchant dans la galerie des Eaux.



Comportement piézométrique des ouvrages localisés dans le quartier du Rocher Bleu

A.4 Détail des connexions probables entre les travaux du Rocher Bleu et de Gréasque-Olympe-Régagnas

Les préconisations émises par Cesame (2003) pour la fermeture de la mine, si elles ont été respectées, permettent d'entrer dans le détail des relations hydrauliques potentielles entre les vieux travaux du Rocher Bleu et les quartiers Gréasque-Olympe-Régagnas. Ces préconisations stipulent que le fonctionnement hydrogéologique des quartiers supérieurs (Rocher Bleu) doit rester le même qu'en période d'exploitation, à savoir une évacuation gravitaire par la galerie des Eaux vers la galerie de la Mer par l'intermédiaire des Vannes du 113. Si ces préconisations ont bien été respectées, alors le réservoir du Rocher Bleu est bien en connexion hydraulique avec les travaux plus profonds comme le mentionnent les informations suivantes :

- page 70 : « afin de garantir la bonne communication hydraulique entre les travaux superficiels (= travaux du Rocher Bleu) et les niveaux inférieurs de l'exploitation et ainsi limiter les éventuels battements de nappe, on veillera au moment de la fermeture de la mine à laisser ouvert :
 - o les vannes du 113,
 - o les vannes de la recette +140 du puits LHuillier,
 - o les forages de soutirage reliant la base des travaux du Rocher Bleu au TB 90. » ;
- page 34 : une partie des eaux des vieux travaux du Rocher Bleu n'est pas collectée par les barrages du 113 et par la Galerie des eaux mais elle « parvient à s'infiltrer dans les niveaux sous-jacents de l'exploitation (= venues d'eau dans les quartiers de Gréasque, du Cengle et du Montaiguët) » ;
- page 54 : alors qu'un débit faible (inférieur à 10 m³/h) transite normalement par la Galerie des eaux, « en hautes eaux et plus particulièrement après un fort orage », son débit peut augmenter très rapidement jusqu'à plusieurs centaines de m³/h ; cela se fait en réponse à des arrivées massives d'eau provenant « des zones d'affleurement des calcaires fuvéliens sur les flancs du massif du Régagnas », zones correspondant notamment aux vieux travaux du rocher Bleu ;
- page 79 : il est fait mention d'une « zone préférentielle pour l'évacuation du trop-plein de l'exploitation du gisement en place⁹ (surverse se faisant dans les travaux de Gréasque par le TB29, le TB23 et la galerie des eaux) ».

De ce fait, si la fermeture de la mine a bien respecté ces préconisations, le réservoir du rocher Bleu doit être en connexion hydraulique au sud avec le quartier Gréasque par le biais des Vannes du 113 et au nord avec le quartier Régagnas grâce au TB140 du puits LHuillier. D'après Dheilly et Brigatti (2015), ce réservoir serait en charge par rapport au compartiment ouest (qu'il alimenterait au débit minimum de

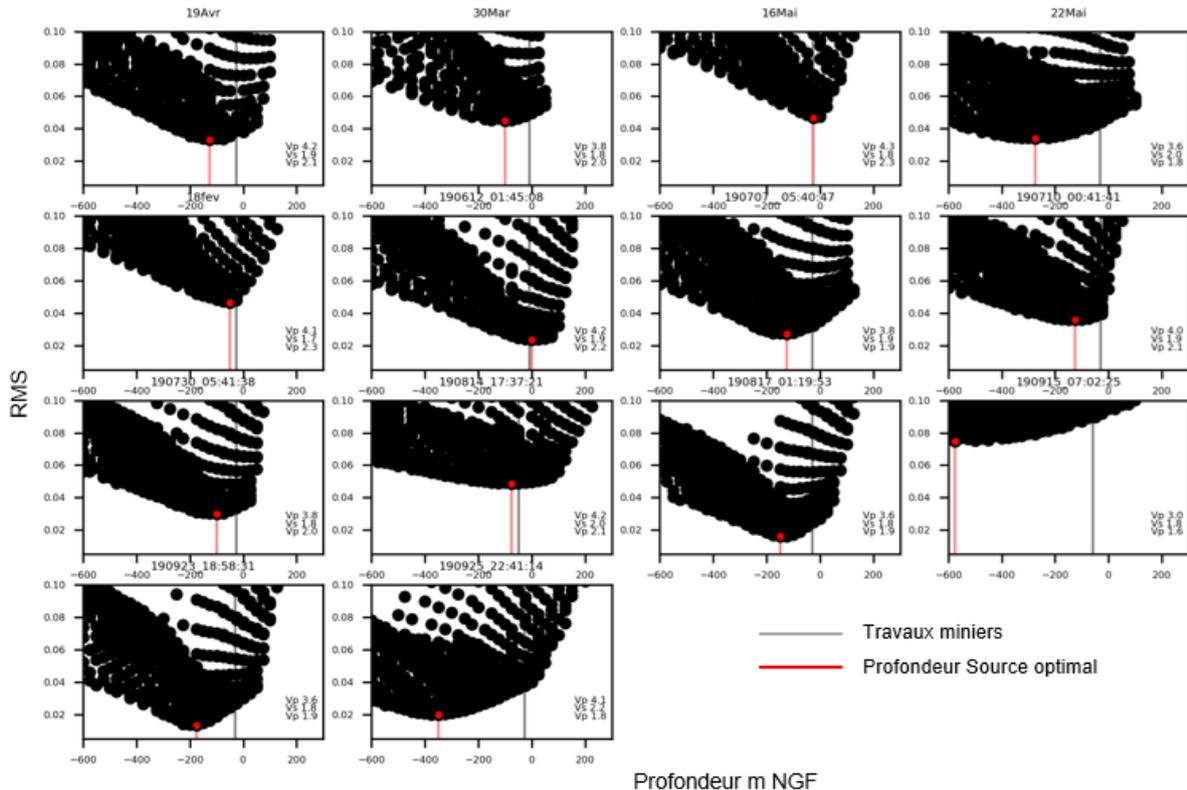
⁹ Il s'agit des vieux travaux du Rocher Bleu qui sont à l'affleurement.

200 m³/h) et son volume d'eau serait évalué à 18 Mm³. De bas en haut, les quartiers Olympe-Régagnas-Gréasque doivent quant à eux être drainés par le TB-110 (-110 m NGF), par la Voie 07 qui rejoint le TB-250 après avoir capté les sources 90 (-50 m NGF), et par le TB23 (+23 m NGF) qui rejoint ensuite la Galerie de la mer.

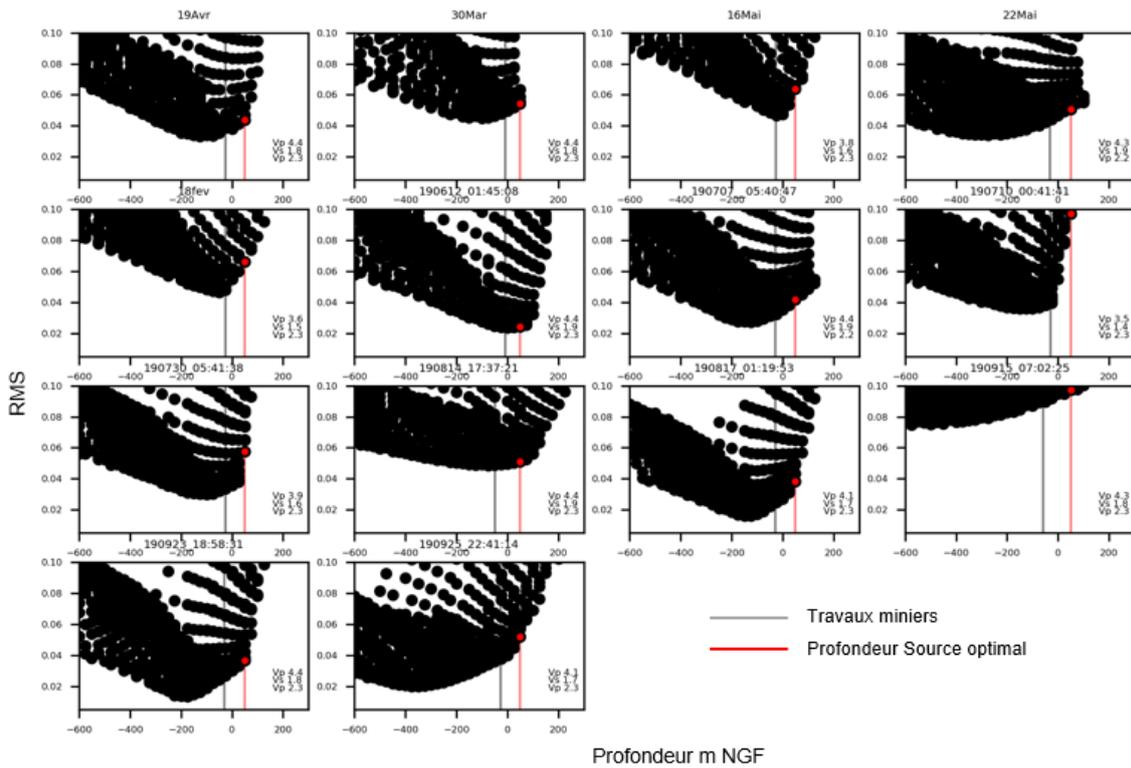
Annexe B : caractérisation des sources sismiques

B.1 Tests complémentaires sur la robustesse du modèle de vitesse et de la profondeur

Le modèle vitesse obtenue dans la § 3.3 représente le meilleur modèle de vitesse expliquant l'ensemble des 14 événements. Il est donc possible que ce modèle soit peut-être plus représentatif pour certains de ces événements, notamment les événements localisés dans le cluster central qui sont statistiquement les plus nombreux. Pour tester une possible variations du modèle de vitesse en fonction de la position épacentrique, nous avons donc calculé le meilleur modèle de vitesse pour chaque événement comme illustré sur la figure ci-dessous. Dans les résultats nous observons que, malgré cet ajustement du modèle vitesse individuellement, la profondeur pour chaque événement reste clairement en dessous des travaux miniers.

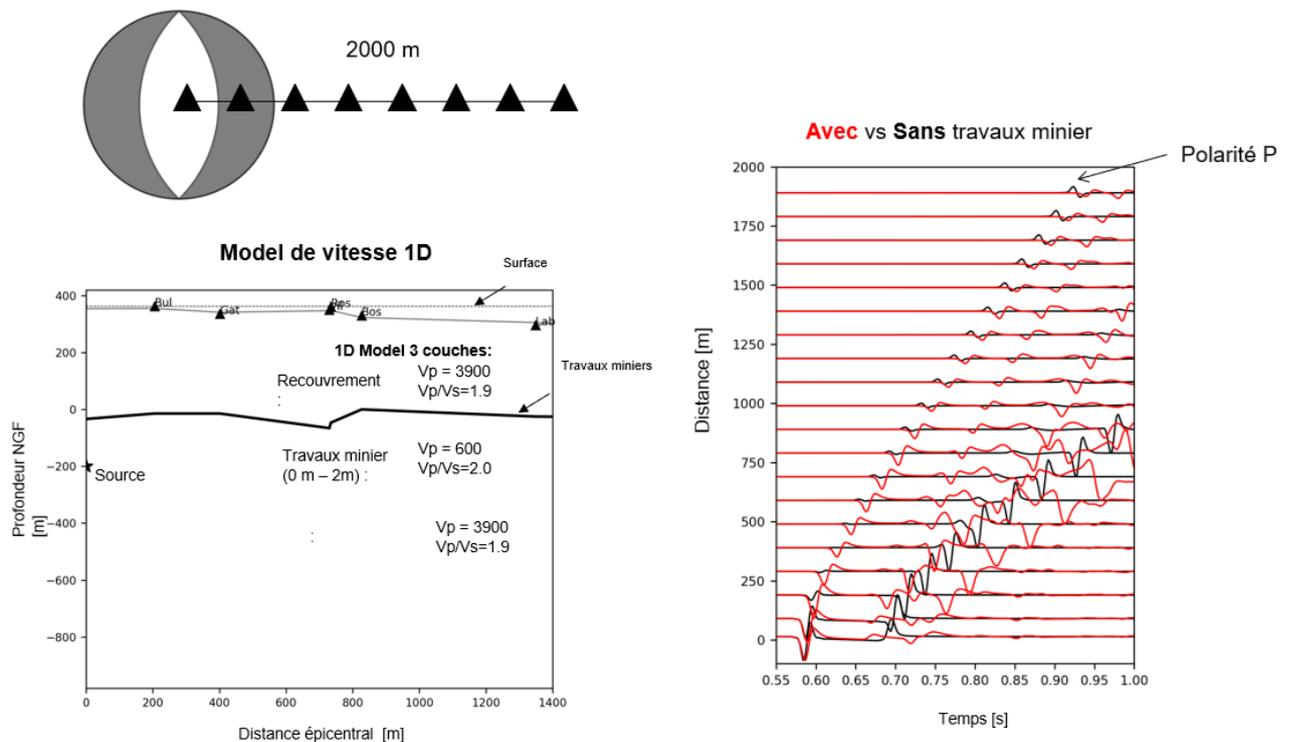


Nous avons également calculé le modèle de vitesse favorisant une localisation à 50 m au-dessus des travaux miniers pour chaque événement, comme illustré par la figure ci-dessous. Nous observons que ces modèles sont systématiquement liés à un rapport Vp/Vs anormalement fort élevé de 2.3 qui représente la limite supérieure de notre espace de paramètres exploré pour déterminer le modèle de vitesse. Cela implique généralement l'incapacité d'expliquer les pointes P et S observées pour ces profondeurs des événements avec un modèle de vitesse physiquement raisonnable.



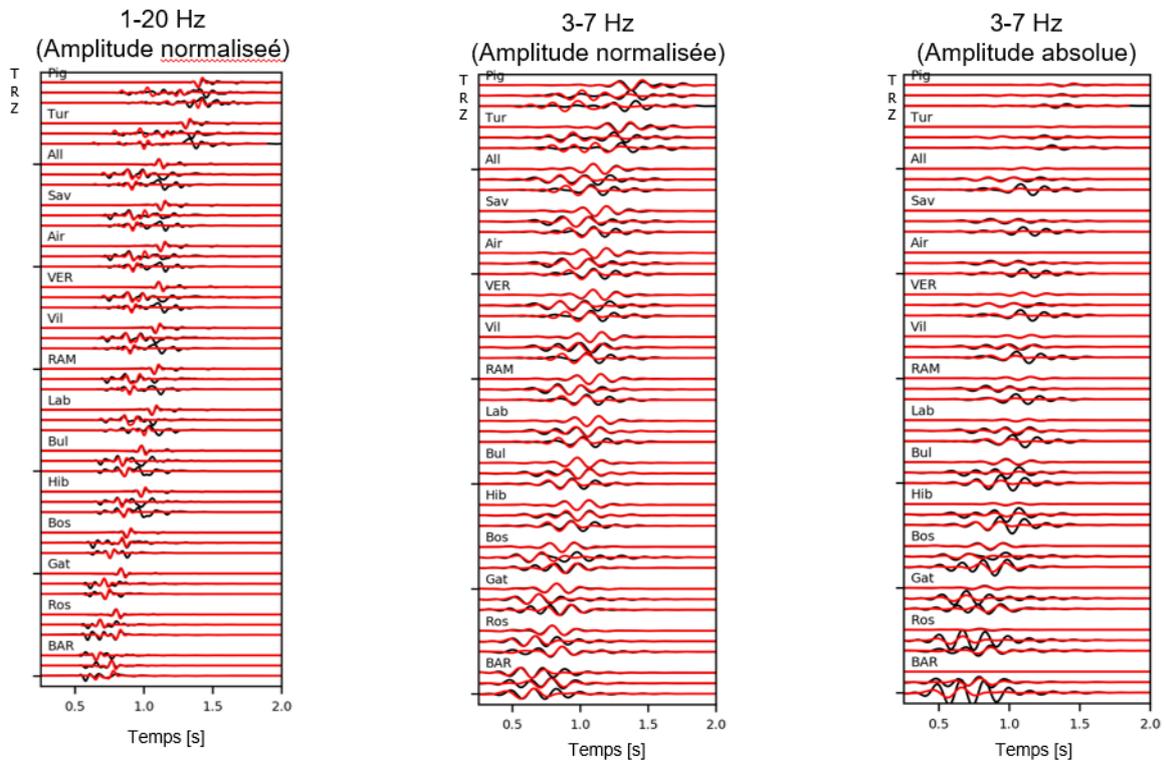
B.2 Evaluation d'influence des travaux miniers sur les champs d'ondes sismique

La figure ci-dessous montre l'influence de la couche des travaux miniers sur les polarités des ondes P basée sur une approche des sismogrammes synthétiques. Pour tester l'influence de la couche minière nous comparons les formes d'ondes pour un modèle de vitesse homogène (sans travaux) avec un modèle composé par une couche de faible vitesse à la profondeur des travaux miniers. Nous utilisons un mécanisme de failles normales à plusieurs hypocentres différents. Dans les résultats nous observons une claire conversion des polarités positives (visibles dans les modèles homogènes) en négatives avec le modèle avec couche de faible vitesse, documentant sa forte influence sur la propagation des ondes.



Une analyse similaire basée sur des sismogrammes théoriques a été réalisée pour tester la capacité de déterminer le mécanisme au foyer en utilisant un modèle de vitesse homogène malgré la présence d'une couche de travaux miniers. Les résultats dans la figure ci-dessous montrent une forte perturbation des composants ZR (forte différence en amplitude et forme d'ondes entre le modèle de vitesse homogène et avec la couche de faible vitesse pour le même mécanisme et la même localisation) issue des conversions complexes entre des ondes P et SV.

Séismogrammes synthétiques pour modèle 1D **avec** et sans travaux **minier**

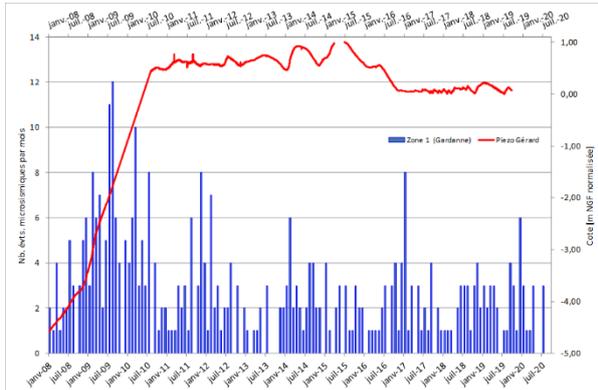


Annexe C : Mécanisme de déclenchement

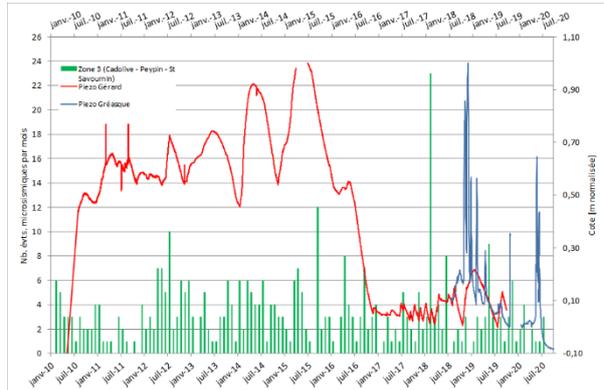
C.1 Corrélation sismo-hydrologique dans les zones de surveillance

Une analyse plus fine par zone sismique a en outre permis de constater que :

- dans la zone 1, située dans le compartiment Ouest, l'influence des fluctuations de niveau d'eau au puits Gérard se fait fortement sentir sur la sismicité;
- dans les zones 2 et 3, situées dans le compartiment Est, le comportement sismique n'est corrélable ni aux variations de niveau piézométriques induites par les pompages aux puits de l'Arc ou au puits Gérard, ni aux variations naturelles mesurées aux différents forages.



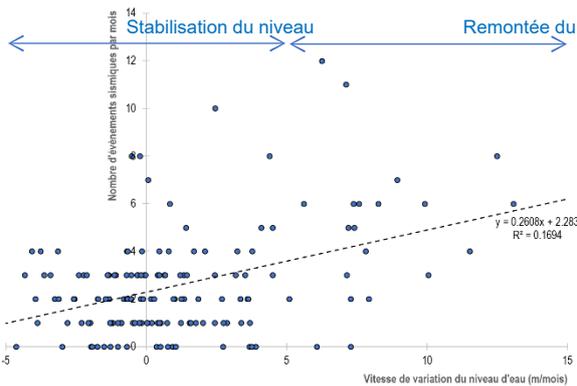
a) Zone 1 et puits Gérard



b) Zone 2 et puits Gérard et Gréasque

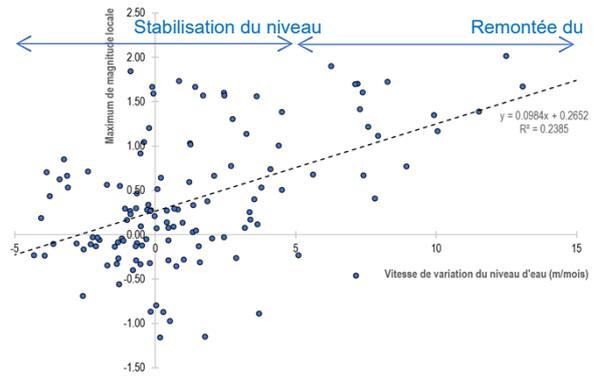
Evolution conjointe du nombre d'évènements sismiques et de la piézométrie

L'influence du pompage au puits Gérard sur la sismicité de la zone 1 semble liée à la vitesse moyenne de variation piézométrique d'un mois sur l'autre, tant en ce qui concerne le nombre d'évènements sismiques que le maximum de leur magnitude locale. En période de quasi-stabilisation du niveau d'eau, c'est-à-dire lorsque sa vitesse de variation est inférieure à 5 m/mois (en valeur absolue), on observe un bruit de fond sismique d'environ 2 évènements/mois avec une magnitude locale moyenne d'environ 0,7. En revanche, en période de remontée rapide du niveau d'eau induite par de fortes précipitations, les valeurs de ces paramètres augmentent significativement : ainsi, lors du maximum mesuré de +13 m/mois en mars 2009, il s'est produit 16 évènements/mois d'une magnitude maximale de 1,68. Par ailleurs, aucune corrélation significative de ce type n'apparaît avec les autres puits ou piézomètres situés hors du compartiment ouest (puits de l'Arc et puits de Gréasque).



a) Nombre d'évènements sismiques qualifiés

Comportement sismique de la zone 1 en fonction de la vitesse de variation du niveau d'eau au puits Gérard au pas de temps mensuel¹⁰



b) Maximum de magnitude locale

¹⁰ Compte tenu du nombre de données prises en compte (>100), les coefficients de corrélation (qui correspondent à la racine carrée des R² affichés) sont statistiquement significatifs au seuil de confiance de 99 %.

Annexe D : Modélisation géomécanique

D.1 Modèle analytique

Les contraintes σ_n et τ s'expriment en fonction des contraintes σ_v et σ_h et de l'angle β ($=90^\circ - \alpha$) que fait la faille avec la verticale de la façon suivante :

$$\sigma_n = \frac{1}{2} (\sigma_v + \sigma_h) - \frac{1}{2} (\sigma_v - \sigma_h) \cos(2\beta) \quad \tau = \frac{1}{2} (\sigma_v - \sigma_h) \sin(2\beta)$$

$$\tau / (\sigma_{n,eff} \operatorname{tg}(\Psi)) = \frac{1}{2} (\sigma_v - \sigma_h) \sin(2\alpha) / [(\frac{1}{2} (\sigma_v + \sigma_h) - \frac{1}{2} (\sigma_v - \sigma_h) \cos(2\alpha) - P) * \operatorname{tg}(\Psi)]$$

avec :

- $\sigma_v = \rho R^* g^* (CS - y)$, où y est la cote NGF du point considéré et CS la cote NGF de la surface ;
- $\sigma_h = k^* \sigma_v$, où k est le rapport des contraintes horizontales et verticales ;
- $P = \rho R^* g^* (CN - y)$, où CN est la cote NGF de la nappe.

D.2 Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques choisies pour la matrice rocheuse sont les suivantes :

- calcaire : densité (d_{calcaire}) = 2,4 ; module d'Young (E_{calcaire}) = 28733 MPa ; coefficient de Poisson (ν_{calcaire}) = 0,25 ;
- charbon (zone non exploitée) : $d_{\text{charbon_ZNE}}$ = 1,4 ; $E_{\text{charbon_ZNE}}$ = 3484 MPa ; $\nu_{\text{charbon_ZNE}}$ = 0,29 ;
- charbon (zone exploitée) : $d_{\text{charbon_ZE}}$ = 1,4 ; $E_{\text{charbon_ZE}}$ = 3484/4 = 871 MPa ; $\nu_{\text{charbon_ZE}}$ = 0,29.

Les caractéristiques mécaniques des failles (F1, F2 et F3) sont les suivantes : raideur normale (k_n) = 1000 MPa/m ; raideur tangentielle (k_s) = 100 MPa/m ; angle de frottement (Ψ) = 25° ; cohésion (c) = 0 MPa ; résistance à la traction (R_t) = 0 MPa.

Les paramètres qui impactent le plus les résultats sont ceux définissant le critère de rupture de la faille, à savoir ici l'angle de frottement (Ψ), puisque la cohésion et la résistance à la traction sont supposés nulles. Les valeurs des caractéristiques mécaniques choisies pour la matrice rocheuse n'ont qu'un faible impact sur les résultats. La valeur du module d'Young du matériau équivalent ($E_{\text{charbon_ZE}}$) modifie toutefois localement l'état de contrainte initiale au voisinage des zones exploitées, ce qui pourra modifier légèrement l'extension de la portion de faille en rupture.

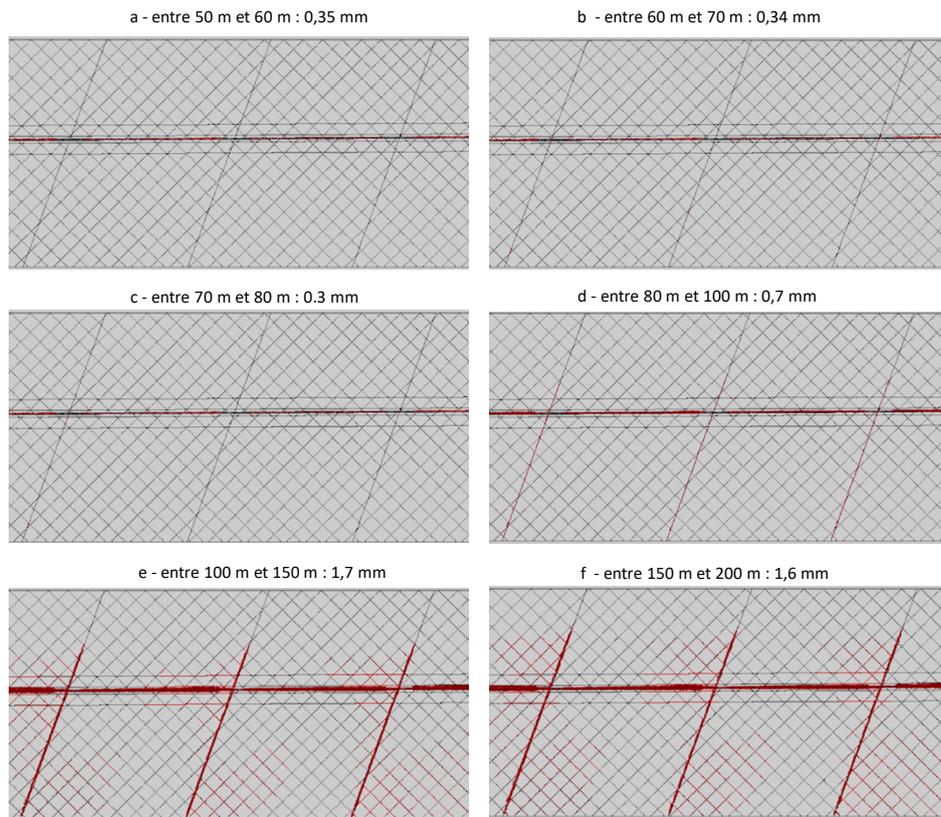
Les caractéristiques hydrauliques choisies pour la matrice rocheuse sont les suivantes:

- calcaire : perméabilité intrinsèque ($k_{i,\text{calcaire}}$) = $10^{-13} \text{ m}^2 \Rightarrow a_{0,\text{calcaire}} = 1,83 \text{ } \mu\text{m}$ (avec $s_{\text{calcaire}} = 50 \text{ m}$) ;
- charbon (zone non exploitée) : $k_{i,\text{charbon_ZNE}} = 10^{-12} \text{ m}^2 \Rightarrow a_{0,\text{charbon_ZNE}} = 1,83 \text{ } \mu\text{m}$ (avec $s_{\text{charbon}} = 5 \text{ m}$) ;
- charbon (zone exploitée) : $k_{i,\text{charbon_ZE}} = 10^{-9} \text{ m}^2 \Rightarrow a_{0,\text{charbon_ZE}} = 18,3 \text{ } \mu\text{m}$ (avec $s_{\text{charbon}} = 5 \text{ m}$).

Les caractéristiques hydrauliques des failles (F1, F2 et F3) sont les suivantes : $a_{0,\text{faille}} = 100 \text{ } \mu\text{m}$.

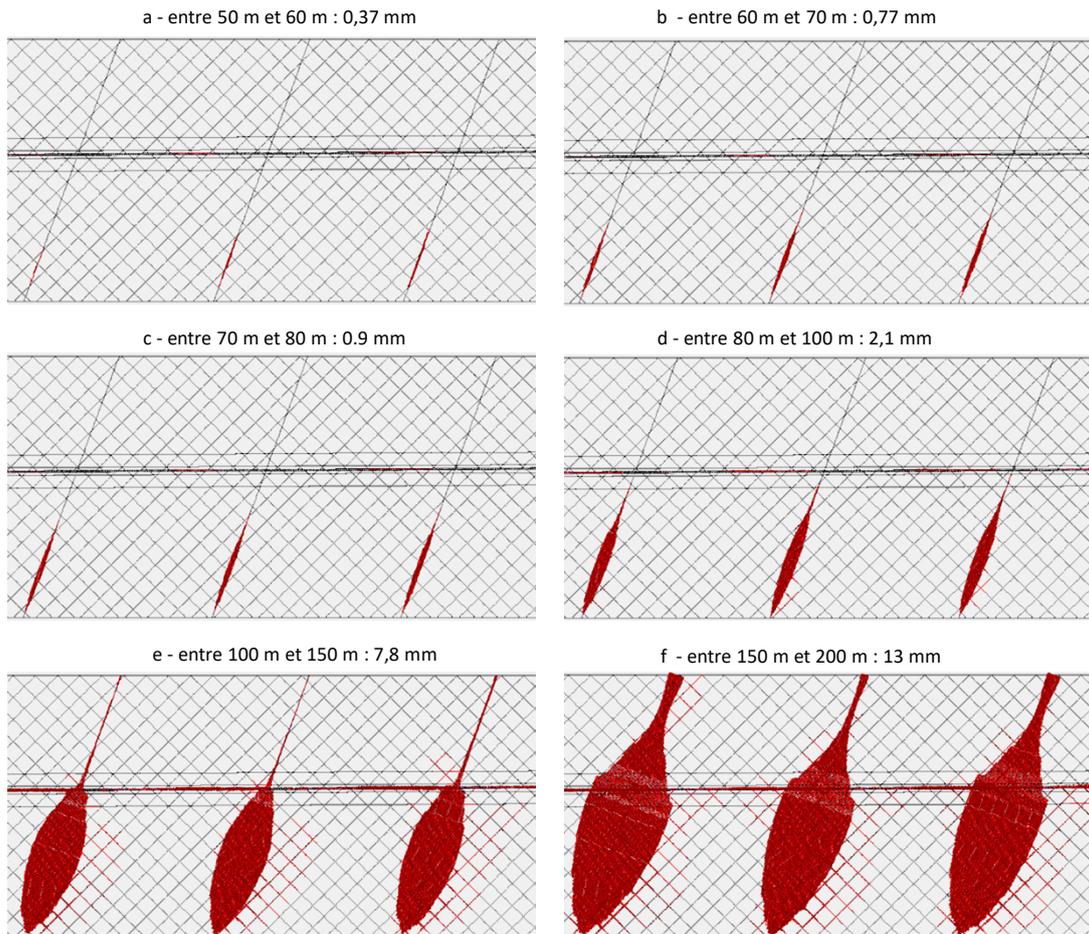
Les valeurs choisies sont très incertaines (notamment pour les caractéristiques hydrauliques). Cela n'aura toutefois que peu de conséquences sur les résultats dans la mesure où le modèle n'a pas vocation à prédire des évolutions temporelles. Compte tenu des objectifs fixés, la modélisation a davantage consisté à réaliser successivement une série de calcul quasi-statique (en modifiant progressivement le niveau de la nappe) qu'à réaliser un véritable calcul en régime transitoire. Dans ce cadre, l'impact des caractéristiques hydrauliques de la matrice rocheuse est très faible.

D.3 Variations maximales de l'ouverture normale des failles



Cas de référence : $\sigma_h = 0,5 * \sigma_v$; pendage = 70° ; $\Psi = 25^\circ$ La Figure montre l'évolution de l'ouverture normale des 3 failles F1, F2 et F3 entre 2 positions successive de la nappe. L'épaisseur du trait est proportionnelle à l'ouverture. La variation d'ouverture maximale cumulé depuis l'état d'équilibre avec une nappe à la cote 50 m NGF est : 0,35 mm à 60 m ; 0,7 mm à 70 m ; 1 mm à 80 m ; 1,7 mm à 100 m ; 3,4 mm à 150 m ; 5 mm à 200 m.

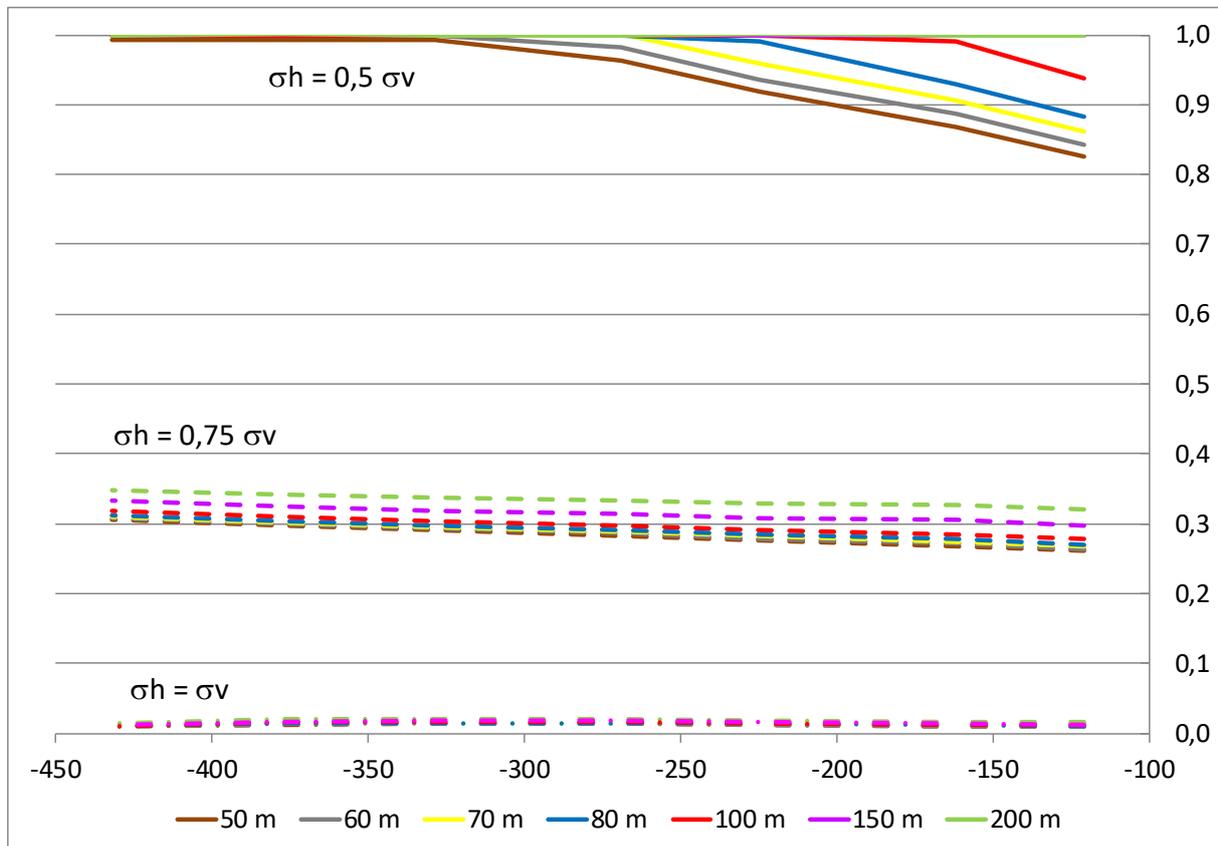
D.4 Variations maximales du cisaillement maximal des failles



Cas de référence : $sh = 0,5 * sv$; pendage = 70° ; $\Psi = 25^\circ$ La variation du cisaillement maximal cumulé depuis l'état d'équilibre avec une nappe à la cote 50 m NGF est : 0,4 mm à 60 m ; 1,1 mm à 70 m ; 2 mm à 80 m ; 4,1 mm à 100 m ; 11,9 mm à 150 m ; 24,9 mm à 200 m.

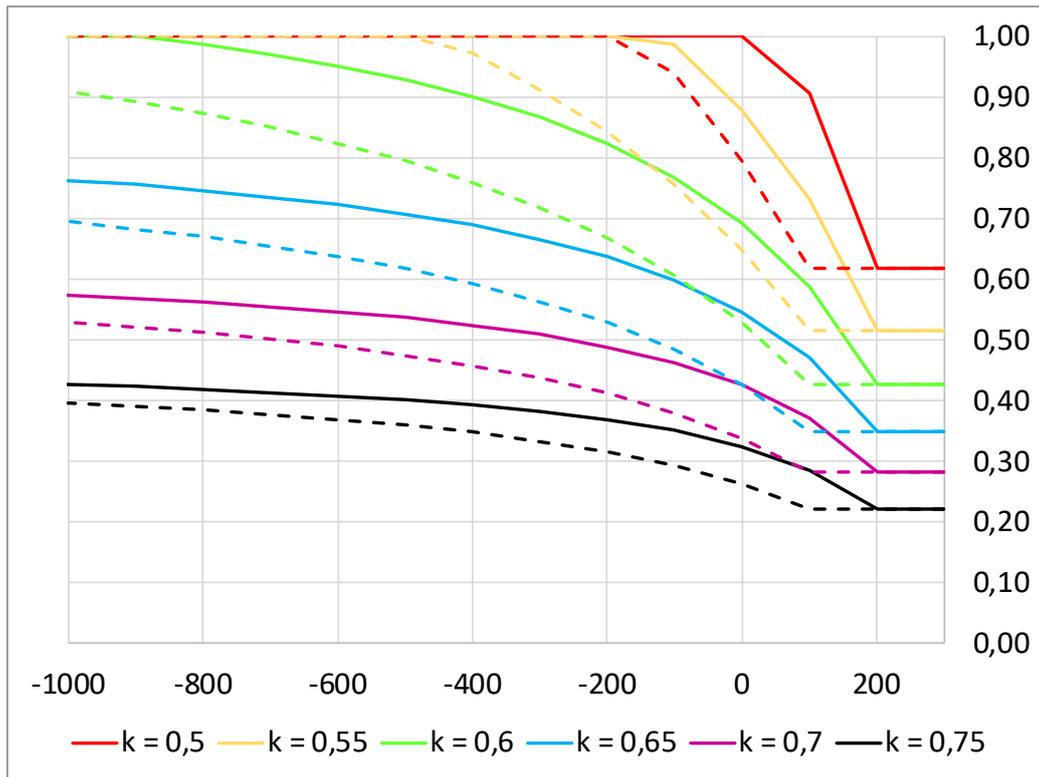
D.5 Impact de l'état de contrainte initiale

Les profils précédents ont été tracés à partir des résultats des modèles numériques pour 2 autres valeurs du ratio k (0,75 et 1) entre la contrainte horizontale mineure et la contrainte verticale. Pour cette comparaison (Figure 8) et les suivantes) nous nous sommes focalisés sur une portion de la faille F2 comprise entre les cotes -450 m NGF et -100 m NGF. On constate que pour les 2 modalités, les valeurs $\tau/(\sigma_{\text{eff}} \text{tg}(\Psi))$ reste très inférieures à 1 ($< 0,4$ pour $k = 0,75$; $< 0,02$ pour $k = 1$), ce qui signifie qu'il n'y a pas de zone en rupture sur la faille F2, même en supposant une nappe à la cote 200 m NGF.



Evolution de $\tau/(\sigma_{\text{eff}} \text{tg}(\Psi))$ en fonction de la cote NGF et du niveau de la nappe (modèle numérique) - Impact de la contrainte horizontal mineure initiale : $\sigma_h = 0,5 \sigma_v$ (trait plein) ; $\sigma_h = 0,75 \sigma_v$ (trait avec grands pointillés) ; $\sigma_h = \sigma_v$ (trait alternant points et pointillés) (autres paramètres : pendage = 70° ; $\Psi = 25^\circ$)

Nous avons raffiné un peu l'analyse à partir du modèle analytique présenté précédemment. La ci-dessous montre le profil pour k variant de 0,5 à 0,75 et pour une nappe à la cote 100 m et 200 NGF (les résultats sont à nouveau proches de ceux du modèle numérique pour $k=0,75$). Il apparait que, pour un pendage de 70° et un angle de frottement de 25° , le risque de rupture de la faille n'est possible (au-dessus de la cote -800 m NGF) que si $\sigma_h < 0,6 \sigma_v$.



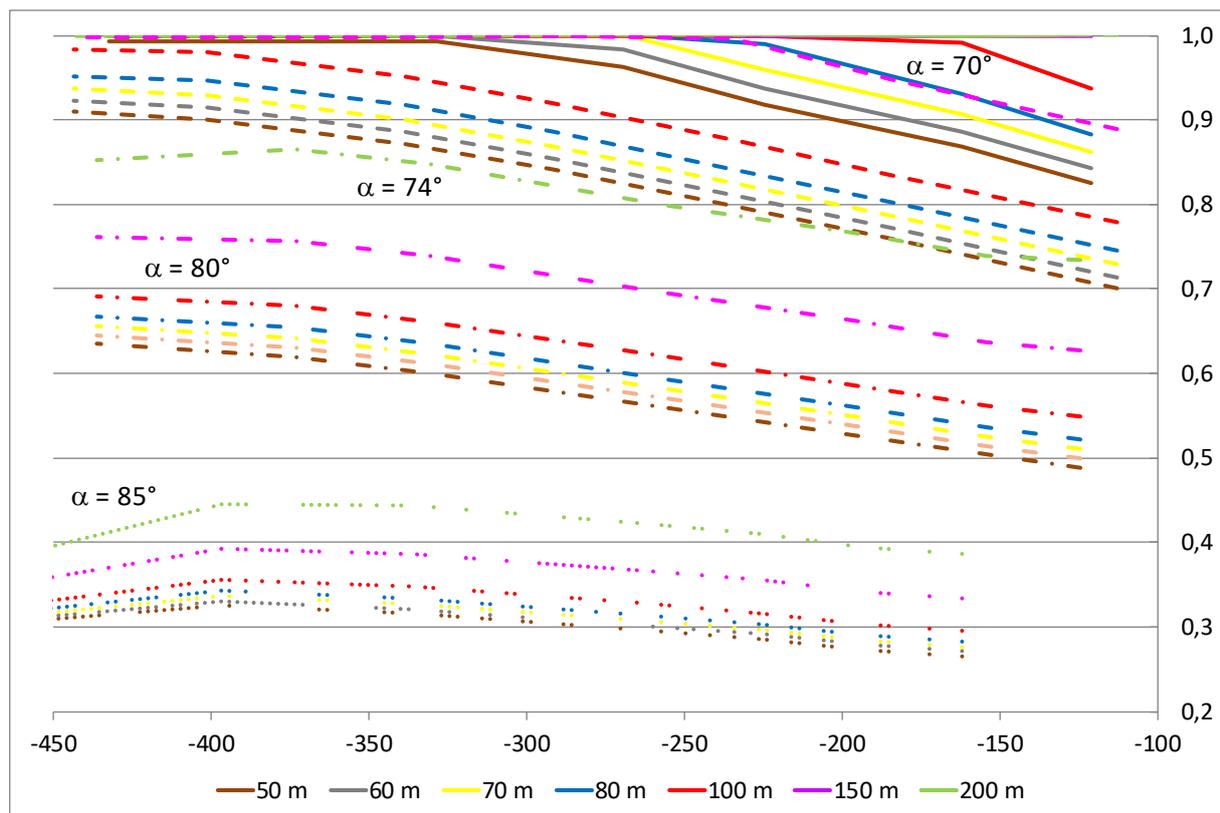
Evolution de $\sigma/\sigma_{eff} \cdot \tan(\Psi)$ à partir du modèle analytique pour une nappe à la cote 100 m NGF (trait pointillé) et 200 m NGF (trait plein) - Impact de la contrainte horizontale mineure initiale : $k = \sigma_h/\sigma_v = 0,5 ; 0,55 ; 0,6 ; 0,65 ; 0,7$ et $0,75$ (autres paramètres : pendage = 70° ; $\Psi = 25^\circ$)

D.6 Impact pendage failles

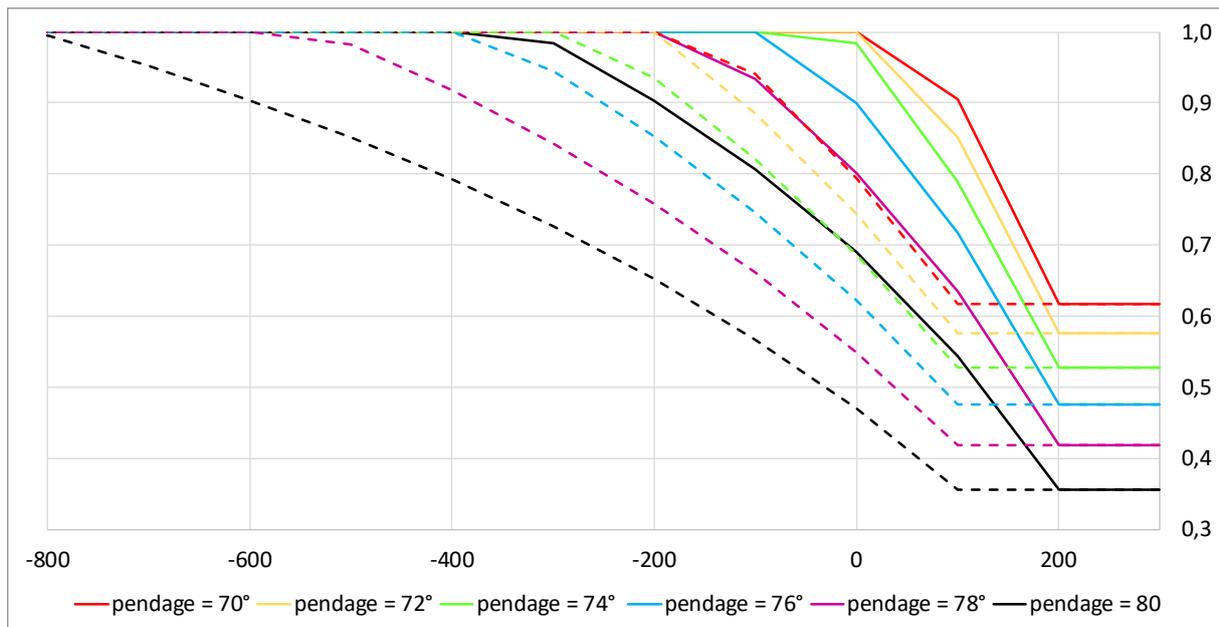
La figure 10 montre les profils établis pour la faille F2 à partir des modélisations numériques pour $\alpha = 70^\circ$; $\alpha = 74^\circ$; $\alpha = 80^\circ$; $\alpha = 85^\circ$. On constate que le risque de rupture n'est plus possible (même pour une nappe à 200 m NGF) pour $\alpha > 80^\circ$.

Nous avons à nouveau repris l'analyse à partir du modèle analytique pour un pendage α variant de 70° à 80° et pour une nappe à la cote 100 m et 200 m NGF. Il apparait un seuil de profondeur à partir de laquelle le critère de rupture peut être atteint (pour $\sigma_h = 0,5 \sigma_v$; $\Psi = 25^\circ$) :

- dans le cas d'une nappe à la cote 200 m NGF : en dessous de la coté 0 pour $\alpha = 70^\circ$ et en dessous de la coté -400 pour $\alpha = 80^\circ$;
- dans le cas d'une nappe à la cote 100 m NGF : en dessous de la coté -200 pour $\alpha = 70^\circ$ et en dessous de la coté -800 pour $\alpha = 80^\circ$.



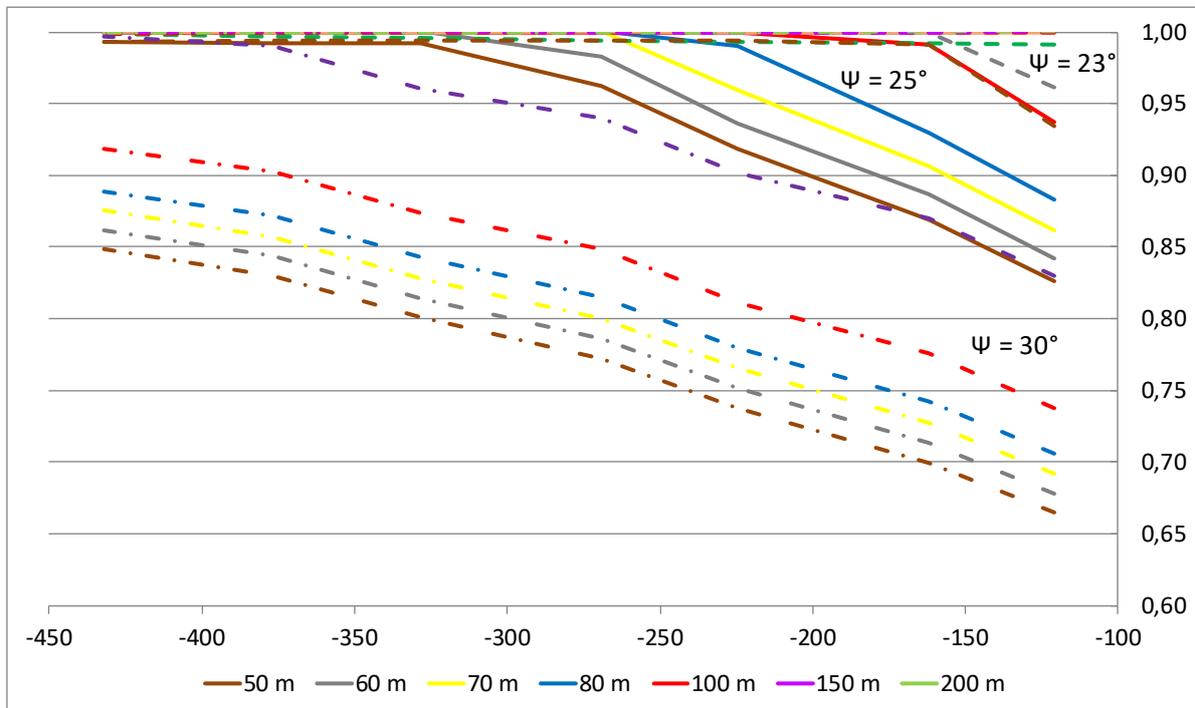
Evolution de $\sigma(\sigma_{\text{eff}} \text{tg}(\Psi))$ en fonction de la cote NGF et du niveau de la nappe (modèle numérique) - Impact du pendage de la faille F2 : $\alpha = 70^\circ$ (trait plein) ; $\alpha = 74^\circ$ (trait avec grands pointillés) ; $\alpha = 80^\circ$ (trait alternant points et pointillés) ; $\alpha = 85^\circ$ (trait avec petits points) (autres paramètres : $\sigma_h = 0,5 \sigma_v$; $\Psi = 25^\circ$)



Evolution de $\tau/(\sigma_{eff} \cdot \tan(\Psi))$ à partir du modèle analytique pour une nappe à la cote 100 m NGF (trait pointillé) et 200 m NGF (trait plein) - Impact du pendage de la faille F2 : $\alpha = 70^\circ$; $\alpha = 72^\circ$; $\alpha = 74^\circ$; $\alpha = 76^\circ$; $\alpha = 78^\circ$; $\alpha = 80^\circ$ (autres paramètres : $\sigma_h = 0,5 \sigma_v$; $\Psi = 25^\circ$)

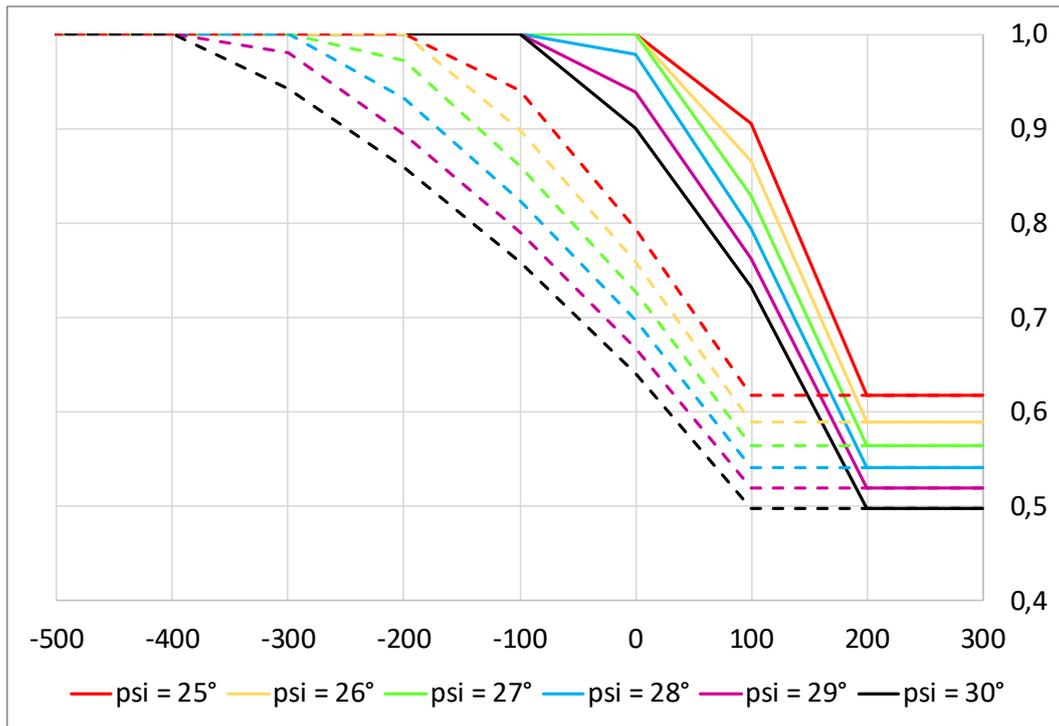
D.7 Impact de l'angle de frottement des failles

La figure 12 montre les profils établis pour la faille F2 à partir des modélisations numériques pour $\Psi = 23^\circ$; $\Psi = 25^\circ$; $\Psi = 30^\circ$ (pour $\sigma_h = 0,5 \sigma_v$ et pendage = 70°). On constate logiquement que le risque de rupture en cisaillement diminue lorsque l'angle de frottement augmente.



*Evolution de $\tau/(\sigma_{eff} \text{tg}(\Psi))$ en fonction de la cote NGF et du niveau de la nappe
Impact de l'angle de frottement de la faille F2 : $\Psi = 23^\circ$ (trait avec grands pointillés) ; $\Psi = 25^\circ$ (trait plein) ; $\Psi = 30^\circ$ (trait alternant points et pointillés) (autres paramètres : $\sigma_h = 0,5 \sigma_v$; pendage = 70°)*

La figure ci-dessous montre les profils obtenus à partir de l'approche analytique pour un angle de frottement Ψ variant de 25° à 30° et pour une nappe à la cote 100 m et 200 m NGF. Pour une nappe à 100 m NGF, et avec $\sigma_h = 0,5 \sigma_v$ et un pendage de $\alpha = 70^\circ$, on observe que les ruptures apparaissent au-dessous de la cote -400 m NGF lorsque l'angle de frottement $\Psi = 30^\circ$ alors qu'elles apparaissent déjà à la cote -200 m NGF pour $\Psi = 25^\circ$.



Evolution de $\tau / (\sigma_{eff} \cdot \tan(\Psi))$ à partir du modèle analytique pour une nappe à la cote 100 m NGF (trait pointillé) et 200 m NGF (trait plein) - Impact de l'angle de frottement de la faille F2 : $\Psi = 25^\circ ; 26^\circ ; 27^\circ ; 28^\circ ; 29^\circ ; 30^\circ$ (autres paramètres : $\sigma_h = 0,5 \sigma_v$; pendage = 70°)

