



HAL
open science

Apport de la surveillance microsismique en champ proche pour la détection de mécanismes et signes précurseurs aux instabilités gravitaires : surveillance expérimentale d'une cavité saline en exploitation : cas du site de Cerville-Buissoncourt

Ngoc-Tuyen Cao

► **To cite this version:**

Ngoc-Tuyen Cao. Apport de la surveillance microsismique en champ proche pour la détection de mécanismes et signes précurseurs aux instabilités gravitaires : surveillance expérimentale d'une cavité saline en exploitation : cas du site de Cerville-Buissoncourt. Sciences de la Terre. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2011. Français. NNT : 2011INPL107N . tel-01749444

HAL Id: tel-01749444

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749444v1>

Submitted on 29 Mar 2018

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

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



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



Nancy-Université
INPL



INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

NANCY UNIVERSITÉ - INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE
École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy
Laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages
ÉCOLE DOCTORALE : RP2E

THÈSE

présentée en vue de l'obtention du grade de :

Docteur de l'I.N.P.L
en Mécanique - Génie Civil

par :

Ngoc-Tuyen CAO

Apport de la Surveillance Microsismique en Champ Proche pour la détection de Mécanismes et Signes Précurseurs aux Instabilités Gravitaires

Surveillance expérimentale d'une Cavité Saline en exploitation :
Cas du site de Cerville-Buissoncourt

Soutenue publiquement le : 13 Décembre 2011

Membres du Jury :

Hafid BAROUDI
Pascal BERNARD
Isabelle CONTRUCCI
Jean-Luc GOT
Hélène LYON-CAEN
Jack-Pierre PIGUET
Marc PIRSON
Claudio SCAVIA

Ingénieur, GEODERIS
Professeur, IPGP Paris
Ingénieur, INERIS
Professeur, Université de Savoie
Directrice de recherche, CNRS
Professeur, ENSM Nancy
Ingénieur, SOLVAY
Professeur, Politecnico di Torino

Invité
Co-Directeur de thèse
Co-Directeur de thèse
Président du jury
Rapporteur
Directeur de thèse
Invité
Rapporteur

Remerciements

Pour commencer, je tiens à remercier mes directeurs de thèse, Jack-Pierre Piguët, professeur à l'École des mines de Nancy, Pascal Bernard, professeur à l'IPG de Paris et Isabelle Contrucci, ingénieur à l'INERIS, pour m'avoir guidée tout au long de ma thèse, pour le temps consacré et leur conseil judicieux.

Merci à Claudio Scavia, professeur à Politecnico di Torino et Hélène Lyon-Caen, directrice de recherche, CNRS, d'avoir accepté de porter un jugement sur ce travail.

Merci également à Jean-Luc Got, professeur à l'Université de Savoie, ainsi qu'à Hafid Baroudi et Marc Pirson de m'avoir fait l'honneur de participer au jury de thèse.

Merci aux membres de l'équipe de l'INERIS et du LAEGO, notamment aux informaticiens Armand Lizeur et Régis Toussaint de m'avoir "dépannée" plus d'une fois.

Merci aux thésards du labo et aux stagiaires, que j'ai eu la chance de rencontrer et sont devenus de véritables amis. Merci aussi à tous les autres étudiants et thésards rencontrés au détour d'un module ou d'une sortie rando/spéléo avec Bubu.

Enfin, merci à mes parents, mes sœurs et mes amis pour leur soutien indéfectible de tous les instants.

Table des matières

Remerciements	3
Table des figures	14
Liste des tableaux	16
Liste des abréviations	17
Contexte général et Objectifs de la thèse	18
1 Surveillance d'instabilités gravitaires	20
1.1 Instabilités gravitaires en contexte minier	21
1.1.1 Typologie	21
1.1.2 L'Après-mine dans le Bassin ferrifère Lorrain	23
1.2 Signes précurseurs à une instabilité gravitaire	24
1.2.1 Généralités	24
1.2.2 Exemples d'effondrements miniers et précurseurs associés	24
1.3 Surveillance microsismique	27
1.3.1 Définitions : Microsismicité et Surveillance Microsismique	27
1.3.2 Qualification et validation de la méthode microsismique dans l'Après-Mine du Bassin ferrifère Lorrain	27
1.3.3 Surveillance microsismique des mines dans le monde	29
1.3.4 Surveillance microsismique dans d'autres contextes	29
1.4 Autres méthodes géophysiques de surveillance	32
1.5 Conclusions	32
2 Site Pilote de Cerville-Buissoncourt	34
2.1 Contexte général et objectifs de l'expérimentation	34
2.2 Méthode d'exploitation	35
2.3 Géologie	36
2.3.1 Lithologie	36
2.3.2 Modèles Rhéologiques des différents faciès déterminés à partir des essais de laboratoire	38
2.4 Systèmes de surveillance multi-paramètres	38
2.4.1 Instrumentation Géophysique	39
2.4.2 Instrumentation Géotechnique	44
2.4.3 Instrumentation Hydro-Chimique	44
3 Historique de l'expérimentation	46
3.1 2003 : Arrêt de l'exploitation dans la cavité	47
3.1.1 État initial	47
3.1.2 Essais de pression contrôlés	48

3.1.3	2005-2007 : Dissolution partielle en aval de la cavité	50
3.2	2008-2009 : Reprise de la dissolution dans la cavité	55
3.2.1	Écoute Microsismique	55
3.3	2009 : Pompage intensif & Effondrement provoqué de la cavité	60
3.3.1	Protocole et scénarios envisagés	60
3.3.2	Historique des données enregistrées	60
3.3.3	Modélisations numériques prédictives	66
4	Signature des événements microsismiques	72
4.1	Discrimination des événements de type Isolés / Rafales	73
4.2	Amplitude	76
4.2.1	Estimation de l'amplitude maximale par tranche horaire	76
4.2.2	Comparaison entre les Crises et l'Effondrement	76
4.2.3	Rapports d'amplitude	81
4.2.4	Comparaison entre les ondes P et S	83
4.2.5	Conclusions sur l'évolution en amplitude	83
4.3	Énergie au capteur	84
4.3.1	Estimation de l'énergie enregistrée au capteur	84
4.3.2	Comparaison entre les Crises et l'Effondrement	84
4.3.3	Rapports d'énergie au capteur	91
4.3.4	Comparaison entre les ondes P et S	92
4.3.5	Conclusions sur l'évolution en énergie au capteur	93
4.4	Fréquence Fondamentale apparente	94
4.4.1	Détermination de la fréquence fondamentale des signaux	94
4.4.2	Comparaison entre les Crises et l'Effondrement	95
4.4.3	Causes des différences de fréquences calculées entre les voies des sondes 3D ?	100
4.4.4	Conclusions sur l'évolution de la fréquence fondamentale apparente	102
4.5	Comparaison entre l'évolution des Amplitudes, Énergies au capteur et Fréquences des Événements	103
4.6	Paramètre β	104
4.6.1	Estimation du paramètre β	104
4.6.2	Comparaison entre les périodes de Crises, Inter-Crises et l'Effondrement	105
4.6.3	Détermination de la taille de la fenêtre glissante optimale	107
4.6.4	Conclusions sur l'évolution du paramètre β	108
4.7	Conclusions sur la signature des événements microsismiques	108
5	Localisation absolue des événements microsismiques	110
5.1	Méthode de localisation absolue	111
5.1.1	Rappels sur la notion de problème direct / problème inverse	111
5.1.2	Problème direct : Calcul des trajets et temps de propagation des ondes	112
5.1.3	Problème inverse : Recherche globale 8-Tree	113
5.1.4	Estimation de la qualité de la localisation	115
5.2	Calibrage de la localisation	115
5.2.1	Définition d'un nouveau modèle de vitesse	116
5.2.2	Paramétrage & Sensibilité de la localisation des événements microsismiques	130
5.3	Description des événements à localiser	131
5.3.1	Sélection et pointé des fichiers	131
5.3.2	Répartition temporelle des événements à localiser	132
5.3.3	Caractéristiques des événements à localiser	133
5.4	Influence des données d'entrée pour la localisation 2D	136
5.4.1	Différentes localisations effectuées	136
5.4.2	Résultats	137

5.4.3	Tests supplémentaires avec la sonde M6.2	146
5.4.4	Choix des données d'entrée utilisées pour la localisation 2D	148
5.4.5	Synthèse sur l'influence des données d'entrée pour la localisation 2D	150
5.5	Analyse de l'évolution spatio-temporelle des foyers microsismiques	150
5.5.1	Crises de Mars-Avril 2008	150
5.5.2	Période d'effondrement	153
5.5.3	Synthèse sur l'analyse de l'évolution spatio-temporelle des foyers microsismiques	167
5.6	Conclusions sur la localisation absolue des événements	170
6	Scénario d'évolution de la cavité : Apport des différentes mesures	171
6.1	Premiers stades d'évolution de la cavité : Crises microsismiques	171
6.2	Effondrement	173
	Conclusions Générales et Perspectives	179
	Bibliographie	191
	Annexes	193
A	Site Pilote de Cerville-Buissoncourt	194
B	Signature des événements microsismiques	196
C	Localisation des événements microsismiques	233
	Résumé	309

Table des figures

1.1	<i>Représentation schématique des 6 manières possibles de générer une sismicité induite dans une mine souterraine. A) Rockburst ; B) Effondrement de vides souterrains ; C) Faille en tension ; D) Faille Normale ; E) Faille inverse ; F) Chevauchement peu profond (proche de l'horizontale). Les flèches pleines indiquent la direction des forces appliquées sur la roche, celles en pointillés, les contraintes tectoniques ambiantes (d'après [58]).</i>	21
1.2	<i>Illustration de gauche à droite : d'un affaissement, d'un effondrement et d'un fontis.</i>	22
1.3	<i>Évolution schématique de l'affaissement maximal en surface en fonction du temps, dans le cas d'un affaissement progressif ou d'un effondrement brutal [53].</i>	22
1.4	<i>Exemple de dégâts sur le bâti observés dans le Bassin ferrifère Lorrain Sud, après l'occurrence d'un effondrement minier dans les années 90.</i>	23
1.5	<i>Surveillance d'un effondrement à partir du fond, exemple de la mine de fer de Rochonvillers (57) : (a) localisation des cannes de convergence, (b) évolution temporelle des mesures de convergence [71].</i>	25
1.6	<i>Distance de l'effondrement aux villages avoisinants (Villot, 1889).</i>	25
1.7	<i>Toit et pilier situé à proximité de la zone effondrée [22].</i>	26
1.8	<i>Effondrement de la mine de Vicat à Saint Martin le Vinoux le 9 Janvier 2011 à 23 :07 (TU). Exemple de désordres observés en surface (source OMIV).</i>	26
1.9	<i>Stot de Nondkeil (Ottange) - Exemple de dégradations observées suite à la chute d'un intercalaire (source : GEODERIS).</i>	28
1.10	<i>Exemple d'un signal microsismique enregistré pendant une crise microsismique en 2002 sur le site de Nondkeil.</i>	28
1.11	<i>Instrumentation sismique de la falaise de craie de Mesnil-Val, Normandie, et cicatrice de l'effondrement du 23 juin 2002.</i>	29
1.12	<i>Photographie du site d'Åknes (à gauche) et positions des instruments (à droite), [119].</i>	30
1.13	<i>Localisation des stations sismologiques des réseaux IPGS (1974-1997) et LGIT (1991-1997), [14].</i>	31
2.1	<i>Schémas illustrant la méthode d'exploitation par pistes et sondages : (a) création d'un chenal de communication à la base du gisement ; (b) création puis extension de la cavité ; (c) effondrement des terrains de recouvrement avec formation d'un cratère en surface.</i>	36
2.2	<i>Coupe géologique du bassin salifère nancéen. D'après SOLVAY S.A. (1998)</i>	37
2.3	<i>Organigramme de l'instrumentation de la cavité saline de Cerville-Buissoncourt.</i>	39
2.4	<i>Localisation des instruments mis en place sur le site de Cerville-Buissoncourt, par l'INERIS (a) et le BRGM (c) et profil montrant la position en profondeur des sondes microsismiques (b). Notons que l'une d'elle est située dans le banc de Dolomie de Beaumont.</i>	40
2.5	<i>Synopsis de la chaîne d'acquisition.</i>	40
3.1	<i>Coupe géologique simplifiée des terrains de recouvrement au niveau de Cerville-Buissoncourt et configuration de la cavité telle qu'elle était en 2003-2004.</i>	47
3.2	<i>Protocoles des essais contrôlés de pression en 2005 (vert) et 2007 (rouge) dans la cavité de Cerville-Buissoncourt (d'après le Rapport du GiSOS 2007, modifié).</i>	48

3.3	<i>Évolution de l'activité microsismique journalière et de la pression de saumure mesurée au niveau de la piste 2100, lors des essais d'Octobre 2005, à gauche et d'Avril 2007, à droite (d'après le Rapport du GiSOS 2007).</i>	49
3.4	<i>Déplacements mesurés en forage mesurés pendant les essais de pression en 2005 (à gauche) et 2007 (à droite, d'après le Rapport annuel du GISOS 2008, modifié).</i>	49
3.5	<i>a) Position des sondages d'alimentation (flèches) et b) évolution du volume d'eau douce injectée aux niveaux des pistes 2100 (en haut) et 2200 (en bas) entre Janvier 2005 et Septembre 2007 (d'après [41], modifié).</i>	51
3.6	<i>Évolution de l'activité microsismique entre Janvier 2005 et Décembre 2007. Les périodes de panne sont indiquées par les bandes grisées.</i>	51
3.7	<i>Volume d'eau injectée en pistes 2100 et 2200 et activité microsismique cumulée par mois entre Janvier 2005 et Septembre 2007 (d'après [41], modifié).</i>	52
3.8	<i>Évolution de l'activité microsismique et de l'énergie au capteur enregistrées au mois de Mai 2007.</i>	52
3.9	<i>Localisation des événements microsismiques enregistrés entre Avril et Octobre 2005, en haut et entre les 8 et 31 Mai 2007, en bas [98]. Les foyers et les sondes sont respectivement représentés par des étoiles et triangles.</i>	53
3.10	<i>Mesures de déformation en forage entre les 1er et 20 Janvier 2005.</i>	54
3.11	<i>Mesures de déformation en forage entre le 1er Juin 2006 et le 15 Septembre 2008.</i>	54
3.12	<i>Extrait des relevés diagraphiques réalisés en Janvier et Mai 2007 par la société SOLVAY le long des pistes 2200.</i>	54
3.13	<i>Histogramme du nombre d'enregistrements microsismiques par jour et courbe de l'énergie cumulée aux sondes 3D entre Janvier 2005 et 2009. Trois épisodes majeurs ressortent nettement, en Mai 2007, Mars-Avril 2008 et Janvier 2009.</i>	56
3.14	<i>Localisation des foyers microsismiques en plan (à gauche) et en coupe (à droite) entre Mars et Avril 2008. L'alignement apparent des événements est lié à la taille des mailles utilisée dans l'outil de localisation et fixée à $10 \times 10 \times 10 \text{ m}^3$.</i>	57
3.15	<i>En haut : variation relative du niveau de la surface estimée aux points de cible n°9 (en gris) et de mesure GPS (en noir) du 16/03/08 au 15/05/08 (à gauche) et évolution de la cuvette d'affaissement entre le 1er Avril et le 1er Décembre 2008 (à droite). En bas : affaissement de la surface à l'aplomb de la cavité en Janvier 2009.</i>	58
3.16	<i>Extrait des relevés diagraphiques réalisés entre 2007 et 2008 par la société SOLVAY le long des pistes 2100 (en haut) et 2200 (en bas).</i>	59
3.17	<i>Évolution par tranche horaire du niveau de saumure mesuré en aval de la piste 2100 durant la période d'effondrement.</i>	61
3.18	<i>Histogramme du nombre d'enregistrements microsismiques par jour et courbe de l'énergie cumulée aux sondes 3D entre Février 2008 et 2009.</i>	61
3.19	<i>Évolution du nombre d'événements microsismiques enregistrés par tranche horaire durant la période d'effondrement.</i>	62
3.20	<i>Courbes de cumul RMS des Emissions Acoustiques dans les basses et hautes fréquences durant l'effondrement (d'après Rapport annuel du GISOS 2009, modifié).</i>	63
3.21	<i>Évolution des RMScont durant l'effondrement (d'après le Rapport annuel du GISOS 2009, modifié).</i>	63
3.22	<i>Variations de la pesanteur observée au moment de l'effondrement de la cavité de Cerville (d'après le Rapport annuel du GISOS 2009). La courbe bleue est l'enregistrement (1 donnée par 15 secondes) après élimination de la dérive instrumentale et de la marée terrestre. La courbe rouge est une interpolation (méthode Savitsky-Golay) permettant de quantifier les variations.</i>	64
3.23	<i>Évolution des mesures extensométriques durant la période d'effondrement (d'après le Rapport annuel du GISOS 2009, modifié).</i>	65
3.24	<i>Évolution de l'altitude mesurée par GPS et tachéomètre durant la période d'effondrement.</i>	66
3.25	<i>(a) Sollicitations aux parois de la cavité et (b) maillage utilisé (d'après [96]).</i>	67
3.26	<i>a) Représentations schématiques en coupe et b) en plan des cavités des pistes 2100 et 2200. Situation en 2002-2003 et évolutions possibles. (d'après [96]).</i>	69

3.27	<i>Évolution de la plasticité dans les Marnes à anhydrite (a) ainsi que de l'affaissement en surface (a) et du déplacement vertical du banc (en flexion, b) en fonction du rayon et de la pression de saumure dans la cavité (λ allant de 0.7 à 0.1) (d'après [96]).</i>	69
3.28	<i>Modèle hybride FLAC-PFC^{2D} du site de Cerville-Buissoncourt. Détail de l'inclusion PFC^{2D} et maillage FLAC avec les forces appliquées aux segments de la frontière (d'après [97]).</i>	70
3.29	<i>a) Évolution du nombre de microfissures en traction/cisaillement pour la modalité Mohr-Coulomb ; les lignes verticales représentent les différentes étapes de la vidange de la cavité. b) Inclusion PFC^{2D} à différentes étapes de la vidange (niveaux de saumure entre -100 et -170 m, d'après [97]).</i>	71
4.1	<i>Exemples d'événements dits "isolé" et "en rafale".</i>	74
4.2	<i>Évolution du nombre d'événements microsismiques enregistrés entre les 03 et 06/04/08. Les événements dits "isolés" sont figurés en vert, et ceux en "rafale" en bleu.</i>	74
4.3	<i>Évolution du nombre d'événements microsismiques enregistrés entre les 10 et 13/02/09. Les événements dits "isolés" sont figurés en vert, et ceux en "rafale" en bleu.</i>	75
4.4	<i>Pourcentage de rafales par rapport au nombre total d'événements enregistrés par heure, entre les 03 et 06 Avril 2008 (à gauche) et pendant l'effondrement (à droite). Les figures du bas représentent un agrandissement de celles du haut.</i>	75
4.5	<i>Paramètre d'Amplitude observé.</i>	76
4.6	<i>Évolution des amplitudes minimales, moyennes et maximales aux niveaux des voies verticales des sondes M3 (en haut) et M6.3 (en bas), entre les 03 et 06/04/08 (à gauche) et du 10 au 13/02/09 (à droite).</i>	78
4.7	<i>Évolution de l'amplitude maximale enregistrée au niveau des sondes M3 et M6.3 entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).</i>	78
4.8	<i>Évolution de l'amplitude maximale enregistrée, au niveau des sondes M3 et M6.3 entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas), pour des événements isolés (à gauche) et "en rafale" (à droite).</i>	81
4.9	<i>Évolution des rapports d'amplitude, à la sonde M6.3, entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).</i>	82
4.10	<i>Évolution des rapports d'amplitude des ondes P et S déterminés au niveau des sondes 3D, entre les 10 et 13/02/09.</i>	83
4.11	<i>Évolution de l'énergie cumulée au capteur entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).</i>	86
4.12	<i>Évolution des énergies minimales, moyennes et maximales enregistrées au niveau des voies verticales des sondes M3 (en haut) et M6.3 (en bas), entre les 03 et 06/04/08 (à gauche) et du 10 au 13/02/09 (à droite). Notons que l'échelle en énergie a été multipliée par 100 entre les périodes de crise et d'effondrement pour la sonde M6.3.</i>	88
4.13	<i>Évolution de l'énergie au capteur maximale enregistrée au niveau des sondes M3 et M6.3 entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).</i>	89
4.14	<i>Évolution de l'énergie au capteur maximale enregistrée, au niveau des sondes M3 et M6.3 entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas), pour des événements isolés (à gauche) et "en rafale" (à droite). Notons que l'échelle en énergie a été multipliée par 100 entre les périodes de crise et d'effondrement.</i>	91
4.15	<i>Évolution des rapports d'énergie, à la sonde M6.3, entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).</i>	92
4.16	<i>Évolution des rapports en énergie au capteur des ondes P et S déterminés au niveau des sondes 3D, entre les 10 et 13/02/09. Notons que l'échelle des figures est logarithmique.</i>	93
4.17	<i>Fréquence fondamentale apparente</i>	94
4.18	<i>Évolution des fréquences apparentes minimales, moyennes et maximales au niveau des voies verticales des sondes M3 (en haut) et M6.3 (en bas), entre les 03 et 06/04/08 (à gauche) et du 10 au 13/02/09 (à droite). Notons que l'échelle en fréquence a été multipliée par un peu plus de 8 entre les graphes des deux sondes.</i>	96

4.19	<i>Évolution des fréquences apparentes maximales enregistrées, au niveau des sondes M3 et M6.3 entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).</i>	97
4.20	<i>Évolution des fréquences fondamentales maximales observées au niveau des trois voies des sondes 3D, durant l'effondrement. Notons que l'échelle a été multipliée par 4 pour la sonde M6.3.</i>	97
4.21	<i>Évolution des fréquences apparentes maximales enregistrées au niveau des sondes M3 et M6.3, entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas), pour des événements isolés, (à gauche) et "en rafale" (à droite).</i>	98
4.22	<i>Écarts entre les fréquences dominantes de tout l'événement et celles déterminées : entre les points P et S (à gauche) et entre l'arrivée de l'onde S et la fin de l'événement (à droite), au niveau des trois voies de la sonde M6.2.</i>	101
4.23	<i>Écarts entre les fréquences dominantes déterminées sur les voies horizontales et verticales de la sonde M6.2, en considérant tout l'événement (à gauche) et uniquement l'onde P (à droite).</i>	101
4.24	<i>Comparaison entre les écarts mesurés en amplitude et en fréquence des signaux sur les différentes voies de la sonde M6.2.</i>	102
4.25	<i>Comparaison entre les variations en amplitudes, énergies et fréquences maximales, au niveau de la voie verticale de la sonde M6.3, du 03 au 06 Avril 2008 (à gauche) et pendant l'effondrement (à droite). Notons que l'échelle a été multipliée par plus de 6 entre les deux périodes et que les figures du bas correspondent à un agrandissement de la fenêtre de temps.</i>	103
4.26	<i>Distribution cumulée entre les 10 et 11 Février 2009 des énergies moyennées sur les sondes M3 et M5, en considérant une fenêtre glissante de 100 événements, décalée tous les 10 événements. Deux groupes se distinguent : celui formé par les 190 premiers événements (pointillés) et celui incluant les 100 à 430 événements suivants (trait plein), ces variations s'expliquant par l'arrivée des premières rafales de la période d'effondrement. Le paramètre β recherché correspond aux pentes des différentes courbes.</i>	105
4.27	<i>Variations du paramètre β calculé sur des fenêtres de 100 événements, comparées à l'altitude mesurée par le GPS (à gauche) et à l'énergie moyennée (à droite) sur les sondes M3 et M5, en période "stable".</i>	105
4.28	<i>Variations du paramètre β calculé sur des fenêtres de 100 événements, comparées à l'altitude mesurée par le GPS (à gauche) et à l'énergie moyennée (à droite) sur les sondes M3 et M5, du 03 au 06 Avril 2008 (en haut) et du 10 au 13 Février 2009 (en bas).</i>	106
4.29	<i>Variations du paramètre β calculé sur des fenêtres de 100 événements, comparées au niveau de saumure déterminé en aval de la cavité (a), à l'altitude mesurée par le GPS (b) et à l'énergie moyennée sur les sondes M3 et M5 (c), durant les premières heures de pompage, avant le premier pic d'activité.</i>	107
4.30	<i>Comparaison entre l'évolution du paramètre β calculé du 03 au 06 Avril 2008 (à gauche) et du 10 au 13 Février 2009 (à droite) en fonction de la taille de la fenêtre d'événements et du pas considérés.</i>	108
5.1	<i>a) Onde directe dans un modèle monocouche ; b) différents types d'ondes dans un modèle à trois couches.</i>	112
5.2	<i>Illustration du processus de recherche du maximum de vraisemblance utilisé dans la méthode 8-Tree. (Source : http://alomax.free.fr/, modifié)</i>	114
5.3	<i>Représentation de la PDF et de l'ellipsoïde d'erreur pour un événement microsismique donné. Cet exemple illustre bien la complexité de la PDF ; les 2000 points de la grille ayant les probabilités de localisation les plus élevées n'étant pas répartis de manière homogène.</i>	115
5.4	<i>Position des tirs de calage.</i>	116
5.5	<i>Position des tirs ne présentant pas d'"anomalie de polarisation" (à gauche) et ceux présentant une "anomalie" (à droite) au niveau des sondes M3, M5 et M6.3.</i>	118
5.6	<i>Localisation des zones pouvant contenir des hétérogénéités, à partir des tirs de calage, présentant ou non une anomalie de polarisation.</i>	118

5.7	<i>Évolution des formes d'onde enregistrées au niveau de la voie Z de la sonde M3 en fonction de la position des tirs. De haut en bas et de gauche à droite, tirs : 041014_11354918, 041014_11313766, 041013_172938 et 041013_17020421.</i>	119
5.8	<i>Évolution des formes d'onde enregistrées au niveau de la voie Z de la sonde M6.3 en fonction de la position des tirs. De haut en bas et de gauche à droite, tirs : 041014_14084251, 041013_14113350, 041013_11500919 et 041013_11482898.</i>	120
5.9	<i>Évolution des formes d'onde enregistrées au niveau de la voie Z de la sonde M5 en fonction de la position des tirs. De haut en bas et de gauche à droite, tirs : 041013_15090948, 041013_14450856, 041013_14273223 et 041013_11500919.</i>	121
5.10	<i>Localisations des tirs sans (en haut) et avec anomalies de polarisation (en bas) effectuées avec le nouveau modèle de vitesse. La position des tirs de calage, des sondes microsismiques ainsi que le contour relatif de la cavité sont indiqués.</i>	128
5.11	<i>Répartition des enregistrements entre les 03 et 06 Avril 2008 (en haut) et pendant la période d'effondrement (en bas). Les événements déclenchés sur d'autres sondes que celles de la colonne M6 suivent à peu près les tendances générales. Les événements de type isolé, et donc ceux sélectionnés pour la localisation, ne rendent pas compte des pics d'activité.</i>	133
5.12	<i>Évolution de l'amplitude maximale des événements localisés enregistrée au niveau des sondes M3 et M6.3 entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).</i>	134
5.13	<i>Évolution de l'énergie au capteur maximale des événements à localiser enregistrée au niveau des sondes M3 et M6.3 entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).</i>	134
5.14	<i>Évolution de la fréquence fondamentale maximale des événements localisés enregistrée au niveau des sondes M3 et M6.3 entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).</i>	135
5.15	<i>Exemple de variations entre les positions des foyers calculées en fonction des données d'entrée prises en compte. La position de la cavité telle quelle était définie en 2004 est indiquée.</i>	140
5.16	<i>Comparaison entre l'évolution du nombre d'événements détectés et les variations de position des foyers microsismiques suivant les directions X (Est), Y (Nord) et Z (verticale) entre Mars et Avril 2008. La confiance relative sur les localisations est indiquée : les événements avec les résidus les plus faibles sont figurés en rouge, tandis que les plus élevés sont représentés en jaune et les intermédiaires en orange.</i>	151
5.17	<i>Localisation des événements microsismiques entre Mars et Avril 2008, en profil (en haut) et en plan (en bas). La confiance relative sur la position des foyers est figurée selon un code couleur, fonction des résidus moyens par événement. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.</i>	152
5.18	<i>Localisation des événements microsismiques, pendant les crises de Mars-Avril 2008, sur une tranche verticale de 50 m ~ perpendiculaire à l'axe des pistes, au niveau du centre de la cavité. La confiance relative sur la position des foyers est figurée. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.</i>	152
5.19	<i>Localisation des événements microsismiques, pendant les crises de Mars-Avril 2008, sur une tranche verticale de 50 m ~ parallèle à l'axe des pistes, au niveau du centre de la cavité. La confiance relative sur la position des foyers est figurée. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.</i>	153
5.20	<i>Différents modèles de vitesse testés, selon l'activité microsismique enregistrée, pendant la période d'effondrement.</i>	154
5.21	<i>Évolution de la position des foyers microsismiques, avant le premier pic d'activité, suivant les directions X (Est), Y (Nord) et Z (verticale). À gauche le toit de la cavité est considéré dans les Marnes à anhydrites, tandis qu'à droite, ce dernier se situe directement sous le banc de Dolomie de Beaumont. La confiance relative sur les localisations est indiquée : les événements avec les résidus les plus faibles sont figurés en rouge, tandis que les plus élevés sont représentés en jaune et les intermédiaires en orange.</i>	155

5.22	<i>Localisation des événements microsismiques jusqu'au premier pic d'activité, en profil (en haut) et en plan (en bas). Une couche de saumure est considérée sous le toit de la cavité, envisagé ici dans les Marnes à anhydrites, à environ 23 m sous le banc de Dolomie de Beaumont. La confiance relative sur la position des foyers est figurée selon un code couleur, fonction des résidus moyens par événement. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.</i>	156
5.23	<i>Localisation des événements microsismiques jusqu'au premier pic d'activité, en profil (en haut) et en plan (en bas). Une couche de saumure est considérée sous le toit de la cavité, envisagé ici directement sous le banc de Dolomie de Beaumont. La confiance relative sur la position des foyers est figurée selon un code couleur, fonction des résidus moyens par événement. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.</i>	156
5.24	<i>Localisation des événements microsismiques, avant le 1er pic d'activité, sur une tranche verticale de 50 m ~ perpendiculaire à l'axe des pistes, au niveau du centre de la cavité, pour les deux modèles de vitesse testés. Les directions préférentielles de rupture observées sont figurées, de même que la confiance relative sur la position des foyers. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.</i>	157
5.25	<i>Localisation des événements microsismiques, avant le 1er pic d'activité, sur une tranche verticale de 50 m ~ parallèle à l'axe des pistes, au niveau du centre de la cavité, pour les deux modèles de vitesse testés. Les directions préférentielles de rupture observées sont figurées, de même que la confiance relative sur la position des foyers. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.</i>	157
5.26	<i>Évolution de la position des foyers microsismiques, entre les deux premiers pics d'activité, suivant les directions X (Est), Y (Nord) et Z (verticale). Le toit de la cavité est supposé se situer directement sous le banc de Dolomie. La confiance relative sur les localisations est indiquée : les événements avec les résidus les plus faibles sont figurés en rouge, tandis que les plus élevés sont représentés en jaune et les intermédiaires en orange.</i>	158
5.27	<i>Localisation des événements microsismiques entre les deux premiers pics d'activité, en profil (en haut) et en plan (en bas). Une couche de saumure est considérée sous le toit de la cavité, envisagé ici directement sous le banc de Dolomie de Beaumont. La confiance relative sur la position des foyers est figurée selon un code couleur, fonction des résidus moyens par événement. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.</i>	159
5.28	<i>Localisation des événements microsismiques, entre les deux premiers pics d'activité, sur une tranche verticale de 50 m ~ perpendiculaire à l'axe des pistes, au niveau du centre de la cavité. Les directions préférentielles de rupture observées sont figurées, de même que la confiance relative sur la position des foyers. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.</i>	160
5.29	<i>Localisation des événements microsismiques, entre les deux premiers pics d'activité, sur une tranche verticale de 50 m ~ parallèle à l'axe des pistes, au niveau du centre de la cavité. Les directions préférentielles de rupture observées sont figurées, de même que la confiance relative sur la position des foyers. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.</i>	160
5.30	<i>Évolution de la position des foyers microsismiques, entre les deuxième et troisième pics d'activité, suivant les directions X (Est), Y (Nord) et Z (verticale). À gauche, la saumure est supposée atteindre le mur de la Dolomie de Beaumont, tandis qu'à droite, cette dernière remplace complètement le banc. La confiance relative sur les localisations est indiquée : les événements avec les résidus les plus faibles sont figurés en rouge, tandis que les plus élevés sont représentés en jaune et les intermédiaires en orange.</i>	162
5.31	<i>Localisation des événements microsismiques entre les 2ème et le 3ème pics d'activité, en profil (en haut) et en plan (en bas). Une couche de saumure est considérée sous le toit de la cavité, ici directement sous le banc de Dolomie de Beaumont. La confiance relative sur la position des foyers est figurée selon un code couleur, fonction des résidus moyens par événement. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.</i>	163

5.32	<i>Localisation des événements microsismiques entre les 2ème et le 3ème pics d'activité, en profil (en haut) et en plan (en bas). Une couche de saumure est considérée à partir et à la place du banc de Dolomie de Beaumont. La confiance relative sur la position des foyers est figurée selon un code couleur, fonction des résidus moyens par événement. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.</i>	163
5.33	<i>Localisation des événements microsismiques, entre les deuxième et troisième pics d'activité, sur une tranche verticale de 50 m ~ perpendiculaire à l'axe des pistes et au niveau du centre de la cavité, pour les deux modèles de vitesse testés. Les directions préférentielles de rupture observées sont figurées, de même que la confiance relative sur la position des foyers. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.</i>	164
5.34	<i>Localisation des événements microsismiques, entre les deuxième et troisième pics d'activité, sur une tranche verticale de 50 m ~ parallèle à l'axe des pistes et au niveau du centre de la cavité, pour les deux modèles de vitesse testés. Les directions préférentielles de rupture observées sont figurées, de même que la confiance relative sur la position des foyers. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.</i>	164
5.35	<i>Évolution de la position des foyers microsismiques, à partir du troisième d'activité, suivant les directions X (Est), Y (Nord) et Z (verticale). Le toit de la cavité est supposé se situer à la profondeur théorique du banc de Dolomie de Beaumont. La confiance relative sur les localisations est indiquée : les événements avec les résidus les plus faibles sont figurés en rouge, tandis que les plus élevés sont représentés en jaune et les intermédiaires en orange.</i>	165
5.36	<i>Localisation des événements microsismiques à partir du troisième pic d'activité, en profil (en haut) et en plan (en bas). Une couche de saumure est considérée à partir de la profondeur théorique du banc de Dolomie de Beaumont qui a ici disparu. La confiance relative sur la position des foyers est figurée selon un code couleur, fonction des résidus moyens par événement. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.</i>	166
5.37	<i>Positions des foyers microsismiques, à partir du troisième pic d'activité, sur une tranche verticale de 50 m, ~ perpendiculaire à l'axe des pistes, au niveau du centre de la cavité. Les directions préférentielles de rupture observées sont figurées, de même que la confiance relative sur la position des foyers. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.</i>	166
5.38	<i>Positions des foyers microsismiques, à partir du troisième pic d'activité, sur une tranche verticale de 50 m, ~ parallèle à l'axe des pistes, au niveau du centre de la cavité. Les directions préférentielles de rupture observées sont figurées, de même que la confiance relative sur la position des foyers. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.</i>	167
5.39	<i>Comparaison entre la localisation des événements pendant les crises de Mars-Avril 2008 (à gauche) et pour la période d'effondrement (à droite), selon une direction ~ parallèle à l'axe des pistes (en haut) et en plan (en bas). La confiance relative sur la position des foyers est figurée. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.</i>	168
5.40	<i>Comparaison entre l'évolution du nombre d'événements détectés et les variations de position des foyers microsismiques suivant les directions X (Est), Y (Nord) et Z (verticale) et modèles de vitesse retenus associés durant la période d'effondrement. La confiance relative sur les localisations est indiquée : les événements avec les résidus les plus faibles sont figurés en rouge, tandis que les plus élevés sont représentés en jaune et les intermédiaires en orange.</i>	169
6.1	<i>Évolution de l'activité microsismique en termes de nombre d'événements, amplitude, énergie au capteur, fréquence apparente, paramètre β et localisation dans les directions X, Y et Z, ainsi que de l'affaissement mesuré en surface, entre les crises de Mars-Avril 2008 et l'effondrement. Des schémas des configurations successives de la cavité sont représentées.</i>	172
6.2	<i>Représentation synchrone du suivi multi-paramètres de la cavité de Cerville lors des opérations de rabattement.</i>	173
6.3	<i>Représentation schématique des processus et mécanismes en jeu durant les premières heures de pompage.</i>	174

6.4	<i>Représentation schématique des processus et mécanismes en jeu au moment du premier pic d'activité, d'après Daupley, 2011.</i>	174
6.5	<i>De haut en bas : comparaison entre les variations du niveau de saumure et de l'affaissement en surface mesurée par le GPS, des déplacements déterminés par les extensomètres et du nombre cumulé d'événements microsismiques, autour du premier pic d'activité.</i>	175
6.6	<i>Représentation schématique des processus et mécanismes en jeu au moment du second pic d'activité, d'après Daupley, 2011.</i>	176
6.7	<i>De haut en bas : comparaison entre les variations du niveau de saumure et de l'affaissement en surface mesurée par le GPS, des déplacements déterminés par les extensomètres et du nombre cumulé d'événements microsismiques, autour du second pic d'activité.</i>	176
6.8	<i>Représentation schématique du mécanisme d'évolution en piston après rupture du banc de Dolomie, d'après Daupley, 2011.</i>	177
6.9	<i>Vues aériennes du cratère d'effondrement, au printemps 2009. (Sources : www.geoportail.fr et Solvay S.A.)</i>	178

Liste des tableaux

2.1	<i>Formations rencontrées au sondage 3129.</i>	37
2.2	<i>Identification et Position des stations de mesure. Les coordonnées sont exprimées en Lambert I en X, Y et côte NGF en Z. Les orientations des capteurs installés dans le plan horizontal sont données par rapport au Nord et ceux placés dans le plan vertical sont orientés positivement s'ils pointent vers la surface. Le centre du réseau a été choisi juste en-dessous des sondes M6, à X = 893314; Y = 116217 et Z = 43.</i>	42
3.1	<i>Données dimensionnelles de la cavité en amont des pistes 2100 et 2200, déduites des mesures SONAR en Avril 2003 (d'après [96], modifié).</i>	48
3.2	<i>Évolution du nombre d'événements microsismiques durant toute la période d'acquisition.</i>	51
3.3	<i>Caractéristiques des principaux épisodes de crise microsismique recensés sur le site de Cerville-Buissoncourt entre 2008 et 2009.</i>	56
3.4	<i>Données dimensionnelles de rétro-analyse des effondrements survenus à l'aplomb des cavités à Haraucourt et à Gellenoncourt (d'après [96], modifié).</i>	67
4.1	<i>Comparaison entre les amplitudes minimales, moyennes et maximales observées sur les diverses voies du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement. Notons que l'amplitude moyenne du bruit est estimée à 40 μm/s.</i>	77
4.2	<i>Comparaison entre les amplitudes minimales, moyennes et maximales observées pour les événements isolés, du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.</i>	79
4.3	<i>Comparaison entre les amplitudes minimales, moyennes et maximales observées pour les événements en rafale, du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.</i>	80
4.4	<i>Comparaison entre les rapports d'amplitude à la sonde M6.3 du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.</i>	81
4.5	<i>Énergie totale cumulée au capteur, du 03 au 06 Avril 08 et pendant la période d'effondrement. La période précédant la perte de la M6.3 a été distinguée, afin de pouvoir comparer les énergies cumulées par cette dernière avec celles des autres sondes.</i>	85
4.6	<i>Énergie totale cumulée au capteur pour les événements isolés et en rafales, du 03 au 06 Avril 08 et pendant l'effondrement. La période précédant la perte de la M6.3 a été distinguée, afin de pouvoir comparer les énergies cumulées par cette dernière avec celles des autres sondes.</i>	87
4.7	<i>Comparaison entre les énergies au capteur minimales, moyennes, maximales et leur écarts-types, observées sur les diverses voies du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.</i>	88
4.8	<i>Comparaison entre les énergies minimales, moyennes et maximales observées pour les événements isolés, du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.</i>	90
4.9	<i>Comparaison entre les énergies minimales, moyennes et maximales observées pour les événements en rafale, du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.</i>	90
4.10	<i>Comparaison entre les rapports d'énergie à la sonde M6.3 du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.</i>	92
4.11	<i>Comparaison entre les fréquences minimales, moyennes et maximales observées sur les diverses voies du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.</i>	95

4.12	<i>Comparaison entre les fréquences minimales, moyennes et maximales des événements isolés observés du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.</i>	99
4.13	<i>Comparaison entre les fréquences minimales, moyennes et maximales des événements "en rafale" observés du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.</i>	99
5.1	<i>Écart moyen entre azimuts et pendages calculés et mesurés pour l'expérimentation de tir.</i>	117
5.2	<i>Écart moyen entre azimuts et pendages calculés et mesurés pour l'expérimentation de tir (ne tenant pas compte des tirs présentant des "anomalies" de polarisation de 180°).</i>	117
5.3	<i>Identification des différents modèles de vitesse testés. Les formations géologiques sont tour à tour rassemblées en une seule couche ou dissociées.</i>	123
5.4	<i>Vitesses définies en prenant en compte 115 tirs, avec angle de polarisation.</i>	124
5.5	<i>Résidus sur les temps d'arrivée des ondes P pour les divers modèles de vitesse.</i>	125
5.6	<i>Résidus sur les angles de polarisation pour les divers modèles de vitesse.</i>	125
5.7	<i>Écart moyen entre positions réelles et calculées sans les angles de polarisation.</i>	127
5.8	<i>Écart moyen entre positions réelles et calculées avec les angles de polarisation mesurés au niveau des sondes M3, M6.3 et M6.2.</i>	127
5.9	<i>Résultats de localisation obtenus avec les tirs présentant ou non des "anomalies de polarisation"</i>	127
5.10	<i>Comparaison entre les différents modèles déterminés.</i>	129
5.11	<i>Caractéristiques du modèle de vitesse retenu.</i>	130
5.12	<i>Pourcentages d'onde P, S et angles de polarisation pointés sur les événements à localiser de la période d'effondrement.</i>	132
5.13	<i>Répartition des événements avant et pendant l'effondrement.</i>	132
5.14	<i>Comparaisons avec les positions des foyers déterminées en utilisant les temps d'arrivée des ondes P pointés manuellement.</i>	138
5.15	<i>Comparaisons avec les positions des foyers déterminées en utilisant les temps d'arrivée des ondes P et les angles de polarisation pointés manuellement.</i>	139
5.16	<i>Nombre d'événements localisés, mal contraints et comparés pour les divers tests.</i>	141
5.17	<i>Résidus de localisation sur les temps d'arrivée des ondes P.</i>	142
5.18	<i>Résidus de localisation sur les angles de polarisation.</i>	143
5.19	<i>Résidus de localisation sur les temps d'arrivée des ondes S.</i>	144
5.20	<i>Volume et orientation des ellipsoïdes d'erreur et dispersion des foyers par rapport au centre du réseau.</i>	145
5.21	<i>Comparaisons avec les positions des foyers déterminées avec ou sans la sonde M6.2.</i>	146
5.22	<i>Nombre d'événements localisés, mal contraints et comparés pour les tests sans la sonde M6.2.</i>	146
5.23	<i>Résidus de localisation sans la M6.2 sur les temps d'arrivée des ondes P.</i>	147
5.24	<i>Résidus de localisation sans la sonde M6.2 sur les angles de polarisation.</i>	147
5.25	<i>Volume des ellipsoïdes d'erreur de localisation sans la sonde M6.2 et dispersion des foyers par rapport au centre du réseau.</i>	148
5.26	<i>Écart entre les angles mesurés et ceux calculés à partir des positions des foyers déterminées en utilisant uniquement les pointés P ou P + azimuts.</i>	149

Liste des abréviations

ARBED	=	Aciéries Réunies de Burbach-Eich-Dudelange
AS2G	=	Auscultation et Surveillance Géotechnique et Géophysique
BRGM	=	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CENARIS	=	CEntre NATional de surveillance des RISques du Sol et du sous-sol
CHEAP	=	Calcul Hypocentral avec Établissement Automatique de Probabilité
CSME	=	Compagnie des Salins du Midi et des salines de l'Est
DRIRE	=	Directions Régionales de L'Industrie de la Recherche et de l'Environnement
DRS	=	Direction des Risques du Sol et du sous-sol
EMR	=	Electro-Magnetic Radiation
FLAC	=	Fast Lagrangian Analysis of Continua
FMM	=	Fast Marching Method
GISOS	=	Groupeement d'Intérêt Scientifique sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains
GPR	=	Ground Penetrating Radar
GPS	=	Global Positioning System
INERIS	=	Institut National de l'EnviRonnement industriel et des rISques
INPL	=	Institut National Polytechnique de Lorraine
IPG	=	Institut de Physique du Globe
ITC	=	International Transducer Corporation
LAEGO	=	LABoratoire Environnement, Géomécanique et Ouvrages
LP	=	Long Period
NGF	=	Nivellement Général de la France
NonLinLoc	=	Non-Linear Location
PDF	=	Probability Density Function
PFC	=	Particle Flow Code
PPRM	=	Plan de Prévention des Risques Miniers
RTK	=	Real Time Kinematic
RQD	=	Rock Quality Designation
SONAR	=	SOund Navigation And Ranging
SNR	=	Signal to Noise Ratio
SYTMIS	=	SYstème de Télésurveillance MIcroSismique
VIPLEF	=	VIscO-PLasticité par Éléments Finis
VLP	=	Very Long Period

Contexte général et Objectifs de la thèse

Les instabilités géologiques gravitaires telles que les effondrements miniers ou de cavités souterraines peuvent être à l'origine de catastrophes aux conséquences dramatiques sur les populations, les biens et l'environnement. Si la surveillance opérationnelle peut s'imposer comme une solution de gestion des risques liés à ces phénomènes, il n'existe actuellement pas de méthode fiable et reproductible pour en garantir la prédiction à court terme. La détection et la reconnaissance efficace de mécanismes précurseurs dans des délais rapides reste donc un champ de recherche ouvert pour améliorer les "systèmes d'alerte précoces" (= "early warning systems") dits multi-paramètres.

Des travaux scientifiques ont montré l'intérêt d'intégrer à ces systèmes la technique d'écoute microsismique pour la caractérisation des mécanismes précurseurs aux instabilités gravitaires. Cette dernière, employée dans de multiples contextes d'application de surveillance de structures géologiques, présente en effet l'avantage d'assurer une auscultation volumétrique des sites à partir d'un nombre limité de sondes de mesure. La détection puis la localisation et la caractérisation des ruptures fragiles dans le massif rocheux permettent de suivre le régime d'endommagement et de contrôler son évolution dans le temps.

En Lorraine, l'extraction du gisement de fer, entre 1850 et 1997, nécessita le creusement de plus de 40000 km de galeries et créa des vides résiduels estimés à plusieurs centaines de millions de m³, à proximité ou sous les zones urbanisées. Après l'arrêt de l'exploitation, une série d'effondrements se sont produits dans la partie Sud du bassin ferrifère. Ces événements ont conduit à la mise en place, à la demande de l'État et des administrations locales, d'une stratégie de gestion des risques liés à la présence de concessions minières et cavités abandonnées. Cette dernière s'appuie notamment sur la trentaine de réseaux de surveillance microsismique déployés par l'INERIS.

C'est dans ce contexte que s'inscrit l'expérimentation de Cerville-Buissoncourt. Cette dernière, menée par les partenaires du GISOS, en collaboration avec la société minière SOLVAY et l'IPG de Paris, concernait le suivi *in situ* d'une cavité saline, créée par dissolution, depuis les signes précurseurs à son instabilité jusqu'à son effondrement provoqué par pompage de saumure. Elle avait pour objectif d'améliorer nos capacités d'expertise, notamment en cas de crise majeure. De plus, il s'agissait également de réaliser la surveillance en temps réel d'une instabilité gravitaire à grande échelle, allant jusqu'à l'effondrement final, ce qui n'avait encore jamais été effectué auparavant.

Cette thèse fait suite aux travaux de D. Mercerat (2007). Elle vise à mettre à profit l'ensemble des données collectées lors de l'expérimentation depuis l'instrumentation en 2004 jusqu'à l'effondrement généralisé en Février 2009. En particulier, il s'agissait de traiter et analyser l'activité microsismique induite par l'évolution de la cavité, afin de :

- progresser dans l'identification des signes précurseurs de l'effondrement ;
- caractériser les mécanismes d'effondrement et leur dynamique ;
- émettre des recommandations pour la gestion de la surveillance opérationnelle des risques liés à la présence de cavités et ouvrages souterrains ;
- évaluer les possibilités de transposition des techniques instrumentales déployées à d'autres contextes d'instabilités gravitaires.

Le manuscrit de cette thèse s'organise comme suit :

- le Chapitre 1 une synthèse bibliographique donnant un aperçu des risques d'instabilités gravitaires dans le contexte minier et de quelques cas de surveillance avec la méthode microsismique ;
- le Chapitre 2 consiste en une présentation générale de l'expérimentation de Cerville-Buissoncourt, englobant la méthode d'exploitation mise en place par l'exploitant, le contexte géologique et une description succincte des différentes techniques instrumentales déployées ;
- le Chapitre 3 fait un résumé de l'ensemble des données collectées, ainsi que des travaux réalisés antérieurement par les différents partenaires du projet sur ces dernières, sur la modélisation prévisionnelle de l'effondrement et sur l'analyse préliminaire de la microsismicité induite de 2004 à 2008 ;
- le Chapitre 4 décrit l'analyse de la signature des enregistrements microsismiques, en termes de type d'événements (isolé ou rafale), amplitudes, énergies au capteur, fréquences fondamentales et "paramètre β " ;
- le Chapitre 5 expose les diverses étapes ayant permis de calibrer correctement la localisation spatio-temporelle initiale, l'échantillon d'événements sélectionnés et les résultats obtenus en faisant varier les paramètres d'entrée pris en compte, ainsi que leur évolution au cours du temps ;
- le Chapitre 6 discute du scénario d'évolution de la cavité déduite de l'analyse croisée ;
- le dernier chapitre propose les conclusions et perspectives à ce travail.

Chapitre 1

Surveillance d'instabilités gravitaires

1.1	Instabilités gravitaires en contexte minier	21
1.1.1	Typologie	21
1.1.2	L'Après-mine dans le Bassin ferrifère Lorrain	23
1.2	Signes précurseurs à une instabilité gravitaire	24
1.2.1	Généralités	24
1.2.2	Exemples d'effondrements miniers et précurseurs associés	24
1.3	Surveillance microsismique	27
1.3.1	Définitions : Microsismicité et Surveillance Microsismique	27
1.3.2	Qualification et validation de la méthode microsismique dans l'Après-Mine du Bassin ferrifère Lorrain	27
1.3.3	Surveillance microsismique des mines dans le monde	29
1.3.4	Surveillance microsismique dans d'autres contextes	29
1.4	Autres méthodes géophysiques de surveillance	32
1.5	Conclusions	32

Les mouvements de terrain sont les manifestations du déplacement gravitaire de masses rocheuses déstabilisées sous l'effet de sollicitations naturelles ou anthropiques. Ils recouvrent des formes très diverses qui résultent de la multiplicité des mécanismes initiateurs (érosion, dissolution, déformation et rupture sous charge statique ou dynamique), eux-mêmes liés à la complexité des comportements des matériaux sollicités et des conditions de gisement (structure géologique, géométrie des réseaux de fractures, caractéristiques des nappes aquifères, etc.).

En particulier, la présence de cavités souterraines, tels que les vides laissés suite à l'exploitation minière, peut être à l'origine d'effondrements localisés ou généralisés.

Aussi, la nécessité de protéger les individus dans les zones susceptibles d'être touchées par les conséquences de ces mouvements, implique qu'une évacuation puisse être anticipée suffisamment tôt lorsque la menace devient critique. Or, ceci constitue un défi majeur puisqu'il est pour l'instant impossible de prévoir avec exactitude quand ils vont se produire.

Une des solutions, pour diminuer la vulnérabilité des zones, est la gestion du risque par la surveillance géotechnique et/ou géophysique, permettant de connaître l'évolution en temps réel et le suivi permanent d'un certain nombre d'indices (précurseurs) dont les variations pourraient annoncer l'accélération du phénomène et l'imminence d'un effondrement. Cependant, le retour d'expérience sur ce type de surveillance, permettant notamment la caractérisation des signes précurseurs, est encore limité.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les phénomènes d'instabilités gravitaires ainsi que les enjeux de la surveillance dans le contexte de l'Après-Mine et de donner des exemples de résultats des diverses expériences microsismiques déjà accomplies dans le passé ou en cours de réalisation.

1.1 Instabilités gravitaires en contexte minier

1.1.1 Typologie

Six modèles de causes d'évolution possible des mines souterraines ont été proposés (Figure 1.1). Trois d'entre eux correspondent à des mécanismes au foyer non double-couple (i.e. rupture en tension ; A, B et C), tandis que les autres (D,E et F) impliquent des glissements en cisaillement.

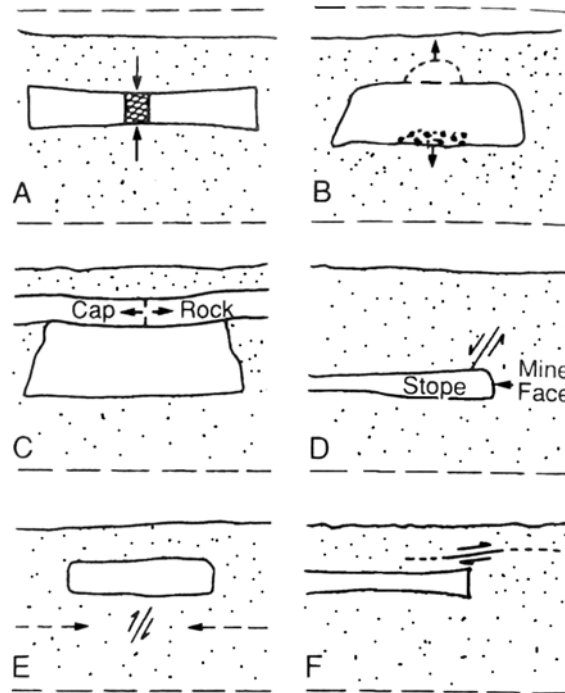


FIGURE 1.1 – Représentation schématique des 6 manières possibles de générer une sismicité induite dans une mine souterraine. A) Rockburst ; B) Effondrement de vides souterrains ; C) Faille en tension ; D) Faille Normale ; E) Faille inverse ; F) Chevauchement peu profond (proche de l'horizontale). Les flèches pleines indiquent la direction des forces appliquées sur la roche, celles en pointillés, les contraintes tectoniques ambiantes (d'après [58]).

Aussi, les phénomènes d'instabilité A et B peuvent se produire sans l'intervention de la tectonique régionale :

- les **Rockbursts ou Coups de toit** sont des ruptures soudaines et ponctuelles des murs ou des piliers dans une mine, liées à un rajustement des contraintes, accompagnées d'un dégagement violent d'énergie. Leur occurrence dépend essentiellement des propriétés mécaniques des roches, de la taille et de la profondeur des excavations ;
- l'effondrement de vides souterrains provoquent des mouvements de trois types, pouvant survenir au-dessus des mines abandonnées, anciennement exploitées par la méthode des chambres et piliers (Figure 1.2 et 1.3) :
 - les **Affaissements** résultent du tassement des terrains suite à la ruine d'une cavité souterraine. Ils se traduisent par la formation en surface d'une cuvette de plusieurs dizaines à centaines de mètres de diamètre (selon l'épaisseur et la profondeur de la cavité) se mettant en place sur quelques heures voire quelques mois. Ces phénomènes provoquent des fissurations dans les bâtiments en zones d'extension et des mises en pente sur les bords de la cuvette ;
 - les **Effondrements** se définissent comme la dislocation rapide et la chute du recouvrement d'une cavité relativement peu profonde (jusqu'à 200 m) et de grande dimension. L'effondrement brutal est souvent destructeur et nécessite l'existence dans le recouvrement d'un ou plusieurs bancs résistants et rigides cédant soudainement après avoir été mis en flexion [139]. Une grande quantité d'énergie est ainsi libérée en un court laps de temps, s'accompagnant d'une secousse sismique.

En surface, ces effondrements se traduisent par une brusque descente d'ensemble des terrains à l'aplomb du secteur affecté, laissant place à une cuvette avec des bords abrupts en gradins. Les terrains éboulés sont toujours divisés en blocs de taille et de forme variables qui s'entassent en remplissant un volume plus grand que celui qu'ils occupaient à l'état initial (foisonnement) ;

- les **Fontis** correspondent à l'apparition soudaine en surface d'un entonnoir de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de diamètre et de profondeur, dans des terrains de faible tenue mécanique. Ces phénomènes font suite à la dégradation progressive de la voûte d'une cavité remontant peu à peu dans le recouvrement. Ils se situent en général aux croisements des galeries minières. Leur occurrence dépend principalement du volume des vides ainsi que de l'épaisseur et de la nature des terrains de recouvrement. Ainsi, le risque de fontis peut être écarté lorsque le foisonnement des blocs du toit est suffisant pour combler la cavité avant qu'elle n'atteigne la surface ou si un banc résistant arrête la dégradation progressive.

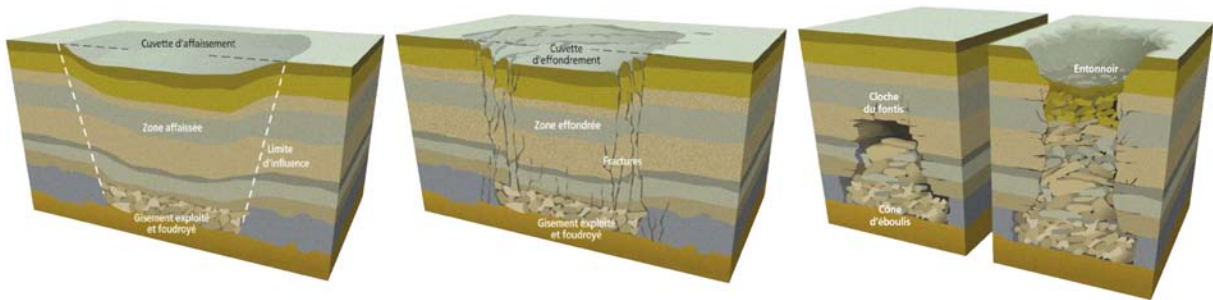


FIGURE 1.2 – Illustration de gauche à droite : d'un affaissement, d'un effondrement et d'un fontis.

En outre, une distinction peut être faite entre les affaissements dits *progressifs* et les effondrements qualifiés de *brutaux*, du fait que leurs implications, en termes de sécurité des personnes et des biens, diffèrent (Figure 1.3). Ainsi, les premiers :

- ne sont précédés d'aucun phénomène sismique ;
- se produisent sur une durée d'au moins plusieurs heures ;
- engendrent une surface avec un profil en pente douce au bord de la cuvette.

Tandis que les seconds :

- sont accompagnés d'un séisme d'une magnitude suffisante ou ressenti par la population en surface ;
- provoquent un souffle d'air à l'intérieur de la mine ;
- surviennent dans un laps de temps très court (moins d'une heure) ;
- entraînent une surface avec un profil en pente très raide.

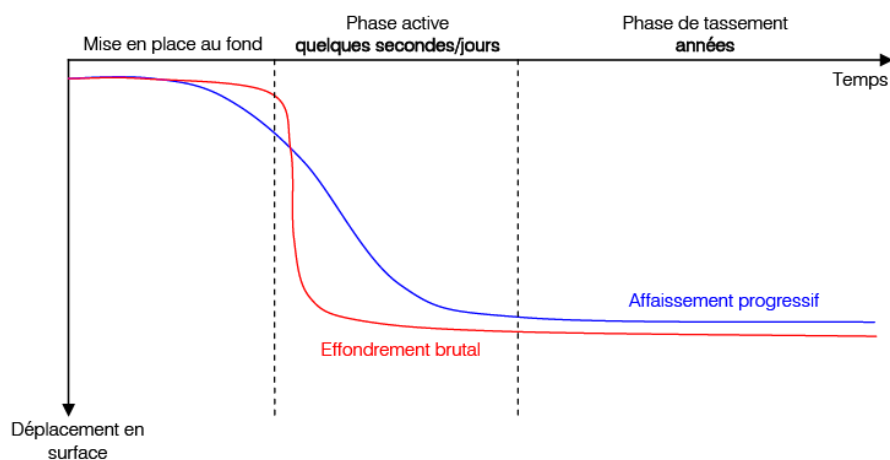


FIGURE 1.3 – Évolution schématique de l'affaissement maximal en surface en fonction du temps, dans le cas d'un affaissement progressif ou d'un effondrement brutal [53].

1.1.2 L'Après-mine dans le Bassin ferrifère Lorrain

Depuis quelques décennies, l'épuisement progressif des gisements des grands bassins miniers nés à la fin du XVIIIe siècle durant la révolution industrielle, ainsi que la diminution de leur rentabilité a entraîné la cessation voire l'abandon des exploitations minières sans qu'une attention suffisante n'ait été systématiquement portée sur les éventuelles conséquences techniques et environnementales à moyen et long termes, inhérentes à cette cessation d'activité. C'est ainsi que de nombreuses régions et des centaines de communes sont aujourd'hui exposées aux risques dits de "l'après-mine".

Plus spécifiquement, dans la région Lorraine, l'extraction du minerai de fer, entre 1850 et 1997 nécessita le creusement de plus de 40000 km de galeries et créa des vides résiduels estimés à plusieurs centaines de millions de m³, à proximité ou sous les zones urbanisées.

Des mouvements de terrains ont pu être constatés suite à l'arrêt de ces exploitations, concomitants à l'envoyage progressif des travaux miniers par interruption du pompage des eaux d'exhaure. Ainsi, le 4 Octobre 1996, un affaissement rapide de la surface, atteignant jusqu'à 2 m par endroit, affectait la ville d'Auboué (54), entraînant d'importants dégâts au niveau de plusieurs habitations et infrastructures. Dans les mois qui suivirent, d'autres désordres analogues se développèrent au sein des villages voisins de Moutiers, Moyeuvre-Grande et Roncourt, notamment (Figure 1.4, [42] et [43]).



FIGURE 1.4 – Exemple de dégâts sur le bâti observés dans le Bassin ferrifère Lorrain Sud, après l'occurrence d'un effondrement minier dans les années 90.

Ces événements ont servi de prétexte à l'évolution du code minier (loi n°99-245 du 30 Mars 1999) et à la mise en place d'une nouvelle stratégie de gestion des risques. Cette dernière s'appuie sur l'évaluation précise des zones d'aléa par le groupement d'intérêt public GEODERIS, puis leur mise en sécurité éventuelle.

Aussi, la mise en œuvre d'une démarche de traitement systématique (élimination) des risques, appliquée à grande échelle s'est avérée impossible. En effet, elle aurait exigé de recourir à plusieurs dizaines de millions de mètres cubes de matériau de remblai afin de combler des vides, la plupart du temps inaccessibles dans des conditions de sécurité satisfaisantes, ou un déplacement massif des populations, inimaginable à une échelle régionale.

La surveillance est alors apparue comme étant le meilleur compromis pour la gestion des risques post-miniers [15]. Les méthodes utilisées pour comprendre et prévoir ces derniers sont classées suivant deux catégories :

- les mesures directes (déformation, nivellement de surface, inclinométrie, mesure de contrainte in-situ, variation de contrainte), permettant une meilleure compréhension des mécanismes de dé-

formation et d'endommagement affectant le massif rocheux. Elles constituent un important complément d'information pour qualifier les autres méthodes, mais sont difficilement exploitables dans le cadre de la surveillance de zones étendues et/ou inaccessibles ;

- les mesures indirectes, comprenant les techniques géophysiques (microsismique, hydro-acoustique, télédétection, tomographie, etc.), destinées à détecter et suivre à distance l'évolution du phénomène redouté.

1.2 Signes précurseurs à une instabilité gravitaire

1.2.1 Généralités

Les instabilités géologiques d'origine naturelle ou anthropique (séismes, éruptions volcaniques, éboulements rocheux, affaissements ou effondrements en grand d'ouvrages souterrains...), sont des désordres imprévisibles et destructeurs. Malgré les efforts constants de la communauté scientifique internationale, il n'existe pas aujourd'hui de méthode fiable et reproductible pour prévoir précisément leur occurrence. Il a cependant été observé certains indices à partir desquels peuvent être définis des systèmes d'alerte précoce ("early warning systems") pour l'évacuation et la mise en sécurité des personnes.

Par exemple, des travaux de recherche proposent d'associer l'imminence d'un tremblement de terre à un certain nombre de précurseurs potentiels tels que les variations :

- de l'activité sismique [105] ;
- du champ électromagnétique ([32] ou [102]) ;
- des conditions atmosphériques ;
- de la concentration anormale de radon ou d'hydrogène dans le sous-sol ou dans les eaux souterraines [155] ;
- des changements du niveau d'eau dans les puits [152] ;
- des déformations du sol [95] ;
- des changements dans le comportement animal [49] ;
- dans l'ionisation de l'ionosphère, dues à la génération d'ondes électromagnétiques pré-sismiques très basses fréquences se propageant dans l'atmosphère [118].

Néanmoins, toutes ces observations sont peu nombreuses au regard du nombre de séismes et ne sont pas confirmées statistiquement.

1.2.2 Exemples d'effondrements miniers et précurseurs associés

La littérature relative aux affaissements ou effondrements d'ouvrages souterrains et plus particulièrement, aux mines et carrières exploitées par la technique des chambres et piliers, montre que ces instabilités ne se produisent pas sans émettre un certain nombre de signes précurseurs.

Ainsi, la formation de fissures, l'écaillage de piliers, des chutes de blocs, des déformations en surface ou dans les galeries ([109], [135], [133] et [134]), ont pu être observés parfois bien avant l'effondrement (Driad et al. 2005 et [135]). L'accélération des mouvements verticaux, l'augmentation des craquements et de l'activité microsismique, ont pu, quant à eux, accompagner son imminence ([47], [122]).

Cas d'un effondrement minier dans le Bassin ferrifère Lorrain :

La mine de Rochonvillers, dont le taux de défrètement moyen était de l'ordre de 65%, s'est écroulée le 1er Juillet 1974, alors qu'elle était encore en activité [71]. L'effondrement, affectant une zone d'environ 20 hectares, a été très brutal. Une onde sismique a été enregistrée par l'IPG de Strasbourg.

Aussi, la mesure de l'accélération des déformations des piliers, à l'aide des cannes de convergence positionnées au fond de la mine (Figure 1.5 a et b), a permis d'être alerté de l'imminence de l'effondrement, quelques jours avant celui-ci.

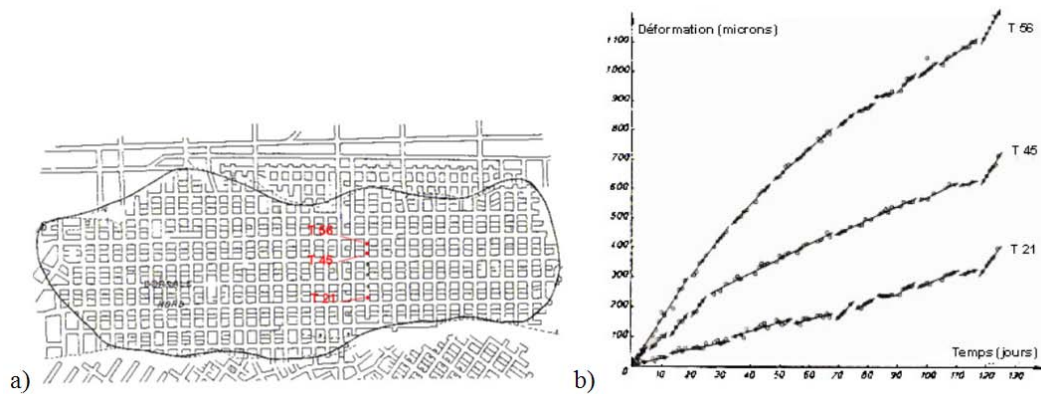


FIGURE 1.5 – Surveillance d’un effondrement à partir du fond, exemple de la mine de fer de Rochonvillers (57) : (a) localisation des cannes de convergence, (b) évolution temporelle des mesures de convergence [71].

Cas d’un effondrement minier dans le Bassin houiller de Provence :

Dans le Bassin houiller de Provence, aujourd’hui surveillé par l’INERIS, un effondrement soudain s’est produit dans la nuit du 29 au 30 Avril 1879 dans la mine des Rochers Bleus. La secousse a nettement été ressentie dans les villages voisins et en particulier à Gréasque, où une maison s’est écroulée. D’autres secousses, moins fortes, ont eu lieu les deux jours suivants.

Le taux de défrèvement du secteur affecté a été évalué à 75%. Avant l’effondrement, les piliers les plus faibles travaillaient fortement, ils s’écaillaient, les plus chargés se fissaient et des craquements étaient perçus. Les distances indiquées par M. Villot (1889) entre les différents villages et le centre de l’effondrement ont permis de localiser approximativement celui-ci (Figure 1.6).

L’étendue des dommages a été estimée à environ 40 hectares, le mur et de toit de la mine se rejoignant en de nombreux points. Cependant, aucune fissure importante n’a été constatée en surface.

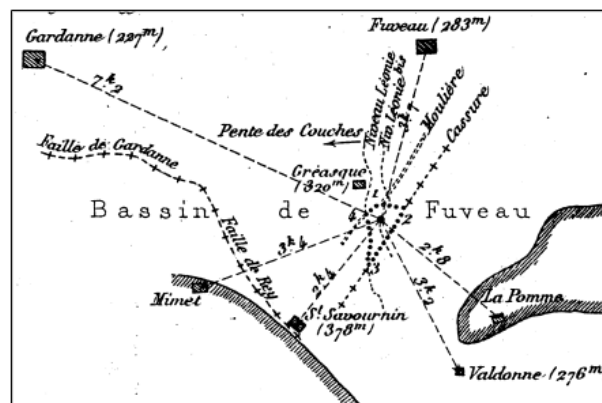


FIGURE 1.6 – Distance de l’effondrement aux villages avoisinants (Villot, 1889).

Cas d’un effondrement minier dans le Bassin salifère de Lorraine :

Dans le contexte salifère, un des accidents les plus importants jamais produit en France, est celui de la mine de Varangéville, le 31 Octobre 1873 ([22]). Un effondrement, ne durant que quelques secondes, a provoqué un séisme ressenti jusqu’à Nancy, située à une dizaine kilomètres de distance.

Cette mine, en chambre et pilier, montrait un taux de défrèvement de 82 %. Elle était exploitée par une méthode d’abatage par jets d’eau, creusant des saignées dans les parois et fragilisant progressivement les couches marneuses du mur ([22]).

Certains signes précurseurs avaient été observés. Ainsi :

- des fissures étaient apparues dans les piliers ;

1.2. SIGNES PRÉCURSEURS À UNE INSTABILITÉ GRAVITAIRE

- des fractures verticales, larges de 5 cm, avaient affecté toute la hauteur de certains piliers ;
- des rigoles ménagées au mur s'étaient refermées ;
- le mur s'était soulevé de 80 cm dans une galerie ;
- une subsidence s'était développée en surface.

Le 31 octobre, à 5h du matin, une fissure est apparue dans un bâtiment de la saline. La zone est alors évacuée avant l'occurrence de l'effondrement.



FIGURE 1.7 – Toit et pilier situé à proximité de la zone effondrée [22].

Cas d'un effondrement récent dans une carrière de pierre à ciment dans la région de Grenoble :

La mine de VICAT, à Saint Martin le Vinoux, s'est effondrée le 9 Janvier 2011 à 23 :07 (TU). La secousse produite, enregistrée à plus de 300 km de distance, correspond à l'énergie libérée par un séisme de magnitude 1.6 (SISMALP) ou 2.3 (LDG) (source : OMIV).

Une galerie de mine située à 400 m d'altitude, encore utilisée, a été endommagée sur 200 m de long et s'est totalement écroulée sur plus de 80 m. Plusieurs maisons ont été endommagées, dont deux ont été évacuées (Figure 1.8). Des fractures et des mouvements de terrain superficiels ont été observés, dans le hameau du Mas caché et plus haut vers le sommet du Mont Rachais (à l'Est), où une fracture plus ou moins continue s'est ouverte sur plus de 200 m (Figure 1.8).

VICAT a mesuré d'importants pics d'émanation de radon dans les jours qui ont précédé cet effondrement. Un réseau sismologique temporaire a été installé après le choc principal par l'ISTerre. Entre



FIGURE 1.8 – Effondrement de la mine de Vicat à Saint Martin le Vinoux le 9 Janvier 2011 à 23 :07 (TU). Exemple de désordres observés en surface (source OMIV).

les 21 et 24 Janvier, plus de 900 événements ont été décelés. Cette activité, bien qu'en diminution, a été enregistrée au moins jusqu'au 21 Juin 2011. Notons que ce site est en cours d'instrumentation par l'INERIS.

1.3 Surveillance microsismique

1.3.1 Définitions : Microsismicité et Surveillance Microsismique

La sismicité correspond à la réponse du milieu à une rupture ou une extension de fractures. Elle se caractérise par l'émission d'ondes élastiques due à un relâchement de contraintes et une libération brutale de l'énergie emmagasinée. Cette réponse est connue à différentes échelles, la fréquence des émissions dépendant du volume de roche affecté. Ainsi, la microsismicité est définie comme une activité sismique de faible amplitude, inférieure à 3-4.

La surveillance microsismique consiste à enregistrer et analyser l'ensemble de ces émissions acoustiques induites dans le sous-sol. Les méthodes et moyens mis en œuvre visent à étudier et à caractériser le comportement dynamique de la masse rocheuse soumise à des modifications de régime de contrainte.

1.3.2 Qualification et validation de la méthode microsismique dans l'Après-Mine du Bassin ferrifère Lorrain

Dans le cas des mines encore en activité, soumises à des risques d'effondrements brutaux, les méthodes en usage reposaient avant tout sur des mesures ponctuelles de déformation et la détection de leurs accélérations comme précurseur d'un risque. Ainsi, en 1974, l'effondrement de Rochonvillers, a été suivi au moyen de cannes de convergences, estimant la dégradation de piliers, en utilisant un critère d'alerte fondé sur l'accélération des déformations au fond.

Or, pour des zones à risque étendues et, qui plus est, non entretenues et souvent inaccessibles dans le contexte de l'après-mine, ces mesures ponctuelles se révèlent insuffisantes. On a alors fréquemment recours à des méthodes volumétriques, telle que la microsismique, dont les dispositifs peuvent être installés en sub-surface et permettent un suivi à distance.

Aussi, afin de qualifier et valider la méthode microsismique dans le contexte du Bassin ferrifère Lorrain, plusieurs approches ont été abordées :

1. expérimentale, concernant des essais *in situ* à grande échelle ;
2. ponctuelle et limitée dans le temps ;
3. de longue durée sur des réseaux permanents.

→ La première expérimentation de surveillance à grande échelle a été effectuée en 1997, dans la dernière mine de fer en activité, celle des Terres Rouges de l'ARBED (Aciéries Réunies de Burbach-Eich-Dudelange). Cette expérimentation consistait à détecter et enregistrer, à l'aide d'une station placée en surface, les signaux microsismiques concomitants aux ruptures et effondrements locaux, provoqués volontairement par la destruction de certains piliers à l'explosif (torpillage). Elle a permis de montrer les capacités de la méthode pour la détection de signes plus au moins précurseurs d'un processus d'effondrement [120], les ruptures du foudroyage du toit ayant été corrélées à une série caractéristique de micro-séismes, ainsi que de déterminer les paramètres principaux d'un dispositif d'écoute adapté au contexte des mines de fer et le rayon de sensibilité du système de surveillance (~ 300 m pour une station 3D).

Ces premiers résultats ont guidé l'installation de réseaux permanents de surveillance microsismique en temps-réel, visant à étudier les phénomènes sur le long terme ; plus d'une trentaine ayant été déployés dans le Bassin ferrifère Lorrain, depuis 1998.

→ Le site pilote de Tressange (57) a été choisi pour étudier les conséquences d'un ennoyage (de courte durée et sous faible pression) sur la stabilité et le comportement hydro-géo-chimique du massif

rocheux. Pour ce faire, un système de surveillance hydro-acoustique, composé de trois sondes tridirectionnelles de type géophone (ayant une bande passante entre 30 Hz et 1.0 kHz) et de 14 sondes unidirectionnelles de type accéléromètre (de bande passante entre 20 Hz et 2.5 kHz), a été mis en place au niveau même des piliers de la mine.

Le système a permis d'enregistrer des signaux très énergétiques liés à des ruptures au cours de la phase transitoire de l'ennoyage, ainsi que de nombreux événements, moins énergétiques, lors de la stabilisation de l'eau dans la cavité et pendant le dénoyage [124].

→ Un réseau de surveillance microsismique permanent a été installé dès Décembre 2000, au niveau du village de Nondkeil (54), où l'analyse du risque avait montré l'existence d'une zone d'effondrement potentielle. Ce dernier est composé de deux stations : deux capteurs 1D et quatre capteurs 3D, implantés entre la surface et les travaux miniers à 150 m de profondeur et dont les rayons d'écoute couvrent la majeure partie du stot à surveiller.

Plusieurs crises microsismiques ont été enregistrées entre 2001 et 2002 [15], la plus importante, comptabilisant plus de 2500 événements microsismiques ayant eu lieu entre les 31 Septembre et 17 Octobre 2002. Ces crises ont été corrélées à la dégradation progressive du stot sous-jacent (Figure 1.9), consistant principalement en des chutes d'intercalaires, en un début de soufflage du mur et plus rarement en dégradations de piliers. Ces dommages n'ont pas entraîné aucun effet en surface.

Ces signaux enregistrés en champ proche (Figure 1.10) ont montré la nécessité de développer des outils adaptés au traitement des données détectés par une seule station. Notons que l'instrumentation du site a été renforcée par la suite par l'installation de capteurs supplémentaires au fond et que des tirs de calage ont été réalisés pour calibrer les paramètres géophysiques du site.



FIGURE 1.9 – Stot de Nondkeil (Ottange) - Exemple de dégradations observées suite à la chute d'un intercalaire (source : GEODERIS).

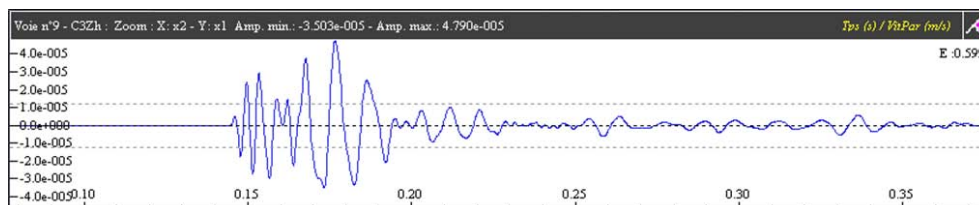


FIGURE 1.10 – Exemple d'un signal microsismique enregistré pendant une crise microsismique en 2002 sur le site de Nondkeil.

→ À l'automne 2009, un affaissement local de quelques centimètres a été observé sur la commune d'Angevillers (57) au niveau de la bordure Sud-Ouest du stot surveillé, en limite de zone dépilée et ennoyée [2]. Ce dernier, d'une vitesse de quelques centimètres par mois, n'a pas été détecté par la station

de mesure microsismique située à proximité. La vérification de l'ensemble de la chaîne de mesure n'a montré aucune défaillance technique du système.

Des investigations géophysiques complémentaires, à l'aide de tirs de calage, depuis la partie encore accessible du stot, ont alors été réalisées pour apporter des éléments de réponse sur les propriétés géophysiques et géomécaniques du recouvrement. Ceci a mis en évidence la forte atténuation des terrains probablement liée à l'important réseau de failles qui intersecte le stot, conduisant à une mauvaise transmission des ondes microsismiques. Par ailleurs, le mécanisme d'affaissement de cinétique lente (~ 2 cm/mois) semble très peu "émissif" en termes d'activité microsismique [13].

Le réseau de surveillance en place, conçu pour la détection de mécanismes d'affaissements/effondrements relativement "rapides", n'est donc pas adapté à ce contexte.

1.3.3 Surveillance microsismique des mines dans le monde

Les applications de la méthode microsismique dans les mines souterraines, principalement encore en activité, sont très nombreuses à travers le monde. Ainsi, elles se distinguent autant par la distance couverte (de quelques mètres à quelques kilomètres), le type de capteurs utilisés, le taux ou l'énergie des événements, etc.

C'est dans les mines de charbon en cours d'exploitation que les expérimentations et les applications opérationnelles ont été les plus nombreuses (par exemple, en Allemagne [56] ou au Royaume-Uni [18]). Ces études ont permis d'associer les événements à l'activité d'exploitation et de cartographier la progression des ruptures dans la masse rocheuse.

De même, les réseaux dans les mines d'or d'Afrique du Sud ([111]), du Canada ([153] et [154]) ou encore en Inde [130] ont aussi mis en évidence les capacités de la méthode microsismique pour la détection des zones à risque d'instabilités.

1.3.4 Surveillance microsismique dans d'autres contextes

En dehors du contexte minier, diverses expériences microsismiques ont déjà accomplies dans le passé ou sont en cours de réalisation ; ces dernières diffèrent par leurs domaines d'études, leurs contextes géologiques, la répartition, le nombre et le type de capteurs mis en place et les types de traitements appliqués aux données.

→ Dans le cadre des mouvements de versants rocheux instables, on peut citer le projet européen PROTECT (PRotection Of The Erosion of Cliffed Terrains) où se sont notamment illustrés le BRGM et

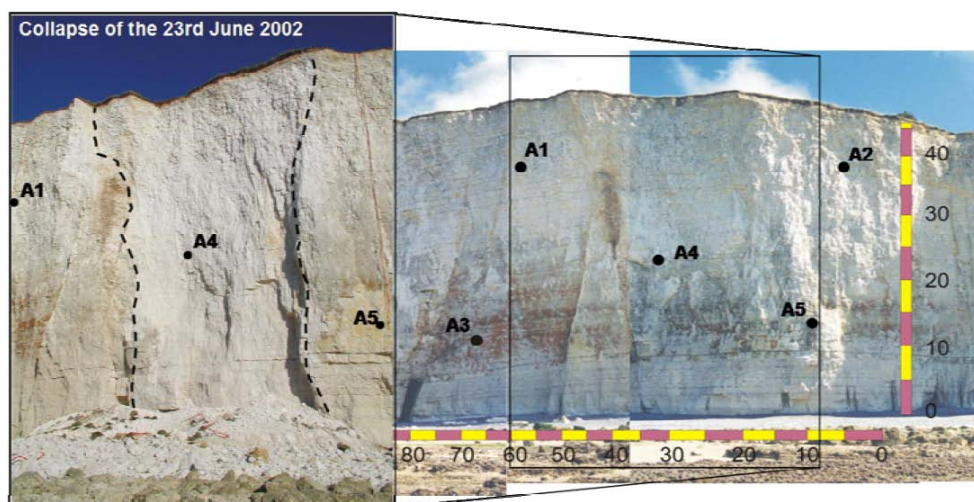


FIGURE 1.11 – Instrumentation sismique de la falaise de craie de Mesnil-Val, Normandie, et cicatrice de l'effondrement du 23 juin 2002.

l'INERIS ([24] et [123]). Ce projet qui visait à examiner les fréquents éboulements de falaises côtières, ainsi que le recul des côtes qu'ils engendrent, fut mené sur les falaises crayeuses de Haute-Normandie sur le site pilote de Mesnil-Val. Un système d'écoute microsismique a alors été développé et déployé par l'INERIS (Figure 1.11). Celui-ci comporte cinq stations constituées chacune d'un accéléromètre (de bande passante de 2Hz à 10kHz) et d'un géophone (possédant une bande passante de 40 Hz à 1.5 kHz).

Ce dispositif a démontré qu'un éboulement majeur était précédé par un accroissement de l'activité microsismique : des craquements pouvant être entendus plusieurs heures (ici, une quinzaine) avant l'événement.

→ Le site Åknes est situé à l'Ouest de la Norvège dans une zone de fjord sujette à de grandes avalanches rocheuses. Il s'agit d'un important glissement de terrain actif, suivant des plans définis par la foliation du gneiss qui le compose, avec un volume estimé à 30-45 millions de m^3 et un déplacement d'environ 4 cm/an.

Un réseau permanent a été mis en place afin de surveiller l'activité microsismique du glissement à long terme [119]. Le dispositif se compose de huit sondes tridirectionnelles de type géophone (4.5 Hz, la fréquence d'échantillonnage étant de 125 Hz), et a été installé dans la partie supérieure de la pente, couvrant environ $250 \times 120 m^2$. Ces capteurs sont affectés par les conditions météorologiques du fait qu'ils sont directement posés à la surface ; ce qui entraîne une forte pollution des enregistrements par des bruits extérieurs. Aussi, les événements enregistrés ne sont étudiés que si le rapport signal sur bruit dépasse un certain seuil (> 2), et si le signal est observable dans une fenêtre de temps donnée (1 s) sur un nombre minimum de (9) géophones.

Typiquement, 50-100 événements par jour satisfont ces critères.

À long terme, l'étude des corrélations entre l'activité microsismique et les saisons, les conditions climatiques et les mesures directes du processus de glissement devraient permettre de définir le bruit de fond, et par-là même de détecter toute augmentation de sismicité liée à l'accélération du glissement. De plus, les événements microsismiques devraient être classifiés (chutes de blocs, glissements de petite échelle, événements directement reliés au glissement) et localisés.

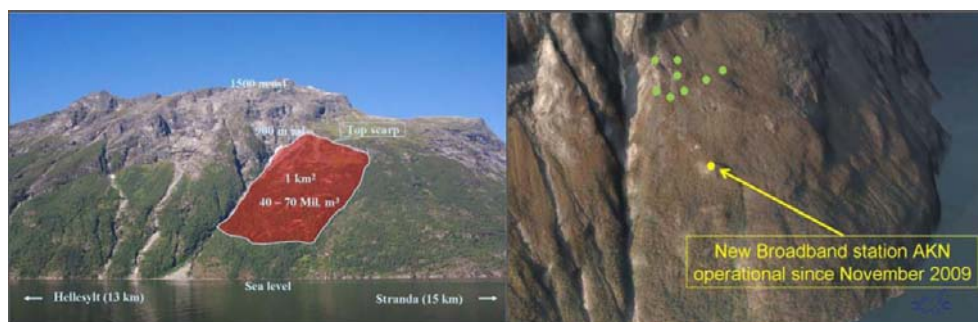


FIGURE 1.12 – Photographie du site d'Åknes (à gauche) et positions des instruments (à droite), [119].

→ L'apport de la surveillance microsismique à la connaissance des mécanismes de glissements de terrains argileux a aussi été étudié dans le Sud-Est des Alpes françaises, sur la coulée de boue active de "Super-Sauze" [10]. Un sismomètre large bande Streckeisen STS2 (la vitesse du sol étant mesurée dans une gamme de fréquence de 1/120 à 50 Hz) a été installé dans une crête stable, près de la partie la plus active de la coulée.

Les résultats montrent qu'une sismicité enregistrable existe dans la gamme de fréquence de 0.01 Hz à 10 Hz, et qu'elle serait associée à la déformation du versant, elle-même corrélée à la pluviométrie et l'activité sismique. L'origine de cette sismicité peut être attribuée au cisaillement de la masse en mouvement sur le substratum rocheux stable. L'analyse spectrale des ondes sismiques montre également que la gamme de fréquence 0.1-1 Hz est la plus sensible aux variations de vitesse du glissement.

→ L'exploitation de gaz naturel, comme celui du gisement de Lacq (Pyrénées-Atlantiques), engendre une sismicité induite par l'extraction des fluides. Le site était équipé de deux réseaux de surveillance. Le premier, installé par l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS), entre 1974 et 1997, comprenait cinq stations 1D, de fréquence propre à 1 Hz, pour un échantillonnage des signaux à 150 Hz. L'autre, mis en place entre 1991 et 1997 par le Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique (LGIT) de Grenoble, comportait neuf stations 1D, de fréquence propre à 1 Hz, pour un échantillonnage à 100 Hz (Figure 1.13). Notons que d'autres réseaux ont été implantés depuis lors.

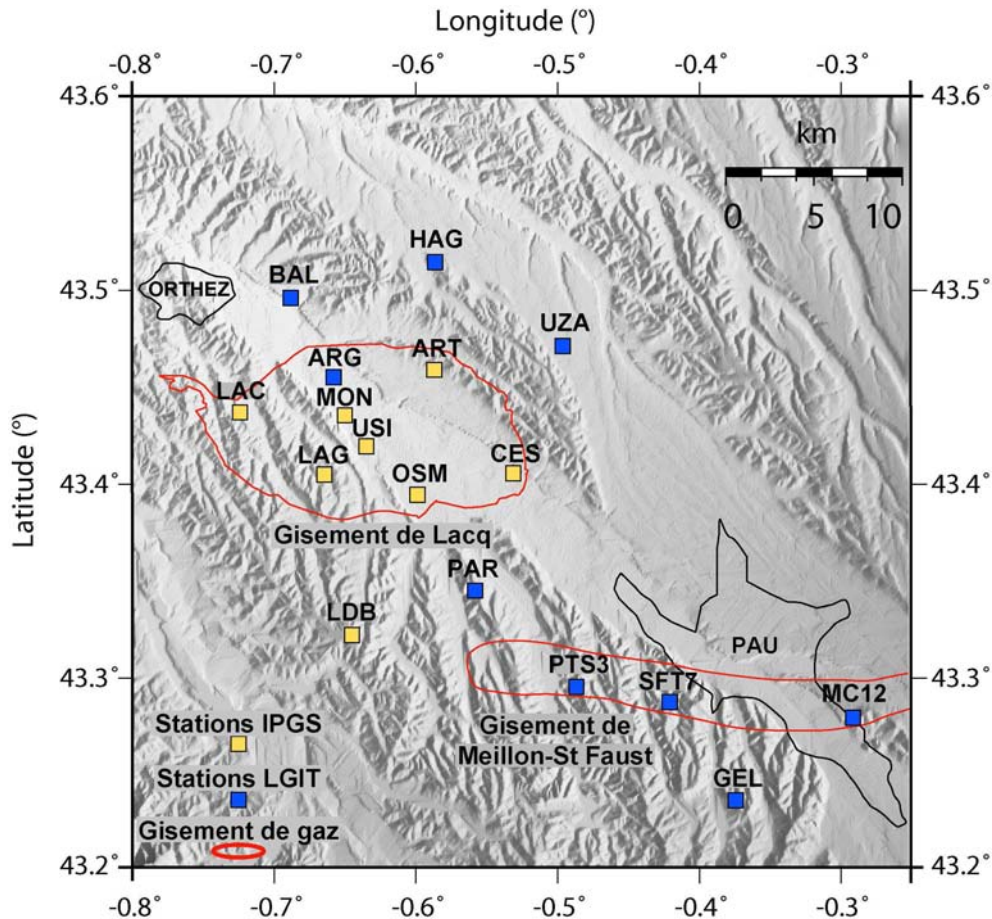


FIGURE 1.13 – Localisation des stations sismologiques des réseaux IPGS (1974-1997) et LGIT (1991-1997), [14].

Aussi, la confrontation de la sismicité enregistrée avec l'historique et le modèle de réservoir a permis de mettre en avant [14] : (1) un essai d'événements déclenchés par une injection d'eau involontaire, (2) une connexion importante entre le centre du réservoir et les réserves de gaz et la déplétion associée, (3) une réinterprétation du modèle de réservoir dans certaines zones mal connues.

→ Dans le cadre d'un projet EGS (Enhanced Geothermal System), le site de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin) a notamment été équipé de trois accéléromètres et deux géophones (avec un échantillonnage des signaux à 2 kHz). La réponse sismique du réservoir géothermique a été étudiée lors d'essais hydrauliques de courte à longue durées, réalisés entre 2005 et 2010, à partir de trois forages profonds du site [37].

Les résultats montrent l'enregistrement de plusieurs centaines d'événements microsismiques, parmi lesquels des microséismes de magnitude variant entre 2 et 2.3, susceptibles d'être ressentis par la population. Les localisations indiquent que les mêmes zones du réservoir étaient sismiquement actives durant tous les essais.

Ces quelques exemples mettent en évidence l'importance et l'utilité de l'écoute microsismique dans l'étude des mouvements de terrain.

1.4 Autres méthodes géophysiques de surveillance

D'autres méthodes géophysiques, moins répandues que la microsismique, ont pu être utilisées pour le suivi volumétrique des instabilités gravitaires, certaines d'entre elles, fournissant des résultats intéressants.

—> Des tomographies électrique et sismique [64] ont été menées simultanément le long de 2 profils, longs de 400 m et 300 m respectivement perpendiculaire et suivant la direction du glissement de La Valette (Sud des Alpes Françaises) pour estimer les propriétés mécaniques des matériaux déplacés et remaniés. Les résultats ont été interprétés pour déterminer les couches potentiellement remobilisables du glissement. Plus particulièrement, les données sismiques ont permis de déceler les variations de densité de fissure (i.e. l'état de compaction des couches et la porosité des matériaux) et la présence de matériaux pliés/cisaillés, tandis que les données de résistivité électrique donnent des indications importantes concernant les fluctuations dans le contenu en eau des matériaux.

—> Les émissions hydroacoustiques, hautes fréquences, ont été étudiées sur le site de Tressange (57) [16]. L'expérience consistait à enregistrer, pendant 18 mois, tous les événements dans une large bande de fréquence (entre 30 Hz et 180 kHz), afin de comprendre les phénomènes physiques qui ont lieu dans les galeries de l'ancienne mine et de prédire leur évolution. Une activité hydroacoustique significative a été mise en évidence, pouvant être associée à la micro-rupture de la masse rocheuse près du toit, avant le détachement de blocs, générée par l'évolution de la pression de l'eau au sein du site.

—> Les radiations électromagnétiques (EMR), hautes fréquences (échantillonnage jusqu'à 50 kHz), émises par les microfissures, ont été enregistrées dans la mine de Moonee Colliery, en Australie [55]. Ces dernières étaient combinées à un système de surveillance d'émission acoustique, plus basse fréquence. Ainsi, un taux d'EMR anormalement élevé a été détecté plus d'une heure avant des chutes de toit, largement avant les émissions acoustiques. Ces EMR seraient générées durant la phase de nucléation des fissures (d'environ 1-2 cm).

—> La méthode GPR (Ground Penetrating Radar) a permis d'étudier les matériaux évaporitiques d'une cavité au Sud-Est de l'Espagne [91], afin d'évaluer le risque d'effondrement. Les profils à 200 MHz obtenus ont montré des réflecteurs bien définis et continus sur les trois premiers mètres de profondeur puis la présence de failles subverticales, avec seulement quelques centimètres de décalage, pouvant être générées par l'accommodation des couches évaporitiques à des effondrements locaux qui affectent des matériaux plus profonds.

1.5 Conclusions

L'occurrence d'une instabilité, dans les mines exploitées en chambre et pilier, est souvent précédée de dégradations du toit et/ou du mur et/ou des piliers. Or, pour les zones à risque étendues et souvent inaccessibles du Bassin ferrifère Lorrain, de simples mesures de déformations ponctuelles se révèlent insuffisantes pour juger de la stabilité des édifices. D'autres observables physiques ont été ainsi instrumentées dans l'espoir de détecter la mise en place de ces instabilités au plus tôt et sans intervention humaine. Cette surveillance est basée sur la détection des phases d'accélération dans les variations de ces observables au fur et à mesure du développement du phénomène.

Aussi, les exemples cités montrent que l'écoute microsismique permet de suivre, de façon volumétrique, les phases d'évolution des cavités très en aval de l'apparition des effets en surface.

1.5. CONCLUSIONS

Notons cependant que le retour d'expérience reste encore limité, peu d'effondrements miniers ayant été instrumentés.

L'effondrement de la cavité saline, sujet d'étude de cette thèse, a été suivi à l'aide d'un système multi-paramètre dont un réseau microsismique (cf. Chapitre 2). Le dispositif mis en place s'inspire de ceux installés dans le Bassin ferrifère Lorrain. Aussi, le phénomène attendu est censé être rapide, avec notamment la présence d'un banc raide, accumulant les déformations et pouvant céder soudainement sous flexion. Il s'agissait également pour la première fois de réaliser la surveillance en temps réel, d'une instabilité gravitaire à grande échelle allant jusqu'à l'effondrement généralisé.

Chapitre 2

Site Pilote de Cerville-Buissoncourt

2.1	Contexte général et objectifs de l'expérimentation	34
2.2	Méthode d'exploitation	35
2.3	Géologie	36
2.3.1	Lithologie	36
2.3.2	Modèles Rhéologiques des différents faciès déterminés à partir des essais de laboratoire	38
2.4	Systèmes de surveillance multi-paramètres	38
2.4.1	Instrumentation Géophysique	39
2.4.1.1	Écoute Microsismique (INERIS)	39
2.4.1.2	Autres systèmes mis en place	43
2.4.2	Instrumentation Géotechnique	44
2.4.3	Instrumentation Hydro-Chimique	44

Cette thèse s'inscrit dans un vaste programme de recherche sur l'Après-mine mené dans le cadre du GISOS (Groupement d'Intérêt Scientifique sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains). Elle vise à traiter et analyser les données provenant du suivi in situ d'une cavité saline, au niveau du site de Cerville-Buissoncourt (54), en exploitation intensive jusqu'à son effondrement. Dans ce chapitre, nous décrirons dans quel contexte cette expérimentation a été mise en place et la problématique associée, ainsi que le site étudié, sa géologie, la méthode d'exploitation utilisée et l'instrumentation déployée.

2.1 Contexte général et objectifs de l'expérimentation

La demande sociétale d'une meilleure gestion des désordres susceptibles d'être générés par les cavités artificielles abandonnées a conduit à la création du GISOS, le 05 Juillet 1999, par le BRGM, l'INERIS, l'INPL et MINES ParisTech. Financé par l'État et la Région Lorraine, ce groupement a pour vocation de mieux comprendre les différents processus et mécanismes mis en jeu lors de l'évolution de ces cavités, pour essayer d'en prédire et prévenir les conséquences technico-socio-économiques (impact sur la stabilité en surface et pollution des eaux souterraines).

Pour ce faire, une des solutions employées est le suivi du comportement des masses rocheuses à l'aide de méthodes non-intrusives, par l'observation de variations dans des paramètres quantifiables, comme par exemple dans les déplacements ou les émissions acoustiques.

Ainsi, en 2004, les partenaires du GISOS, en collaboration avec la société SOLVAY Carbonate France, ont saisi l'opportunité d'instrumenter une cavité saline de grande dimension, en cours d'exploitation, jusqu'à son effondrement provoqué. La mise en place d'un dispositif pluridisciplinaire, à la fois géophysique, géotechnique et hydro-chimique (cf. paragraphes suivants), devait permettre d'acquérir des données utiles et indispensables, afin de faire progresser l'état de l'art sur :

1. le comportement et l'évolution des cavités au sens large ainsi que leur influence sur la stabilité du recouvrement, par :
 - l'identification des précurseurs caractérisant la phase précédant l'effondrement ;
 - la compréhension de la dynamique de rupture et des mécanismes associés ;
2. la conception et l'exploitation des systèmes de surveillance opérationnelle des risques liés à la présence de telles cavités, par :
 - l'évaluation, en conditions contrôlées, de l'apport de chacune des méthodes dans la détection et/ou la prévision du phénomène redouté et la connaissance de leurs limites d'application ;
 - la définition d'un protocole de mesure adapté à une cavité saline et l'estimation des possibilités de transposition des techniques instrumentales à d'autres contextes miniers.

2.2 Méthode d'exploitation

Le site d'expérimentation se situe au cœur du bassin salifère nancéen (54), dans la concession minière de Cerville-Buissoncourt. Il est exploité depuis 1997 par une méthode propre à SOLVAY, dite des *pistes et sondages* (ou *intensive par piste*). Celle-ci consiste à exploiter l'intégrité du gisement de sel par dissolution le long d'une piste de forages (sondages), jusqu'à provoquer volontairement l'effondrement des terrains de recouvrement. Le schéma utilisé est le suivant (Figure 2.1) :

1. **Création des pistes** : une vingtaine de puits verticaux, disposés tous les 50 m selon la ligne de plus grande pente de la formation salifère, sont forés jusqu'à la base de cette dernière et équipés d'un tubage cimenté aux terrains traversés.
 - Ici, deux pistes parallèles orientées Nord-Sud, séparées de 80 m et mises en place simultanément, les pistes 2100 et 2200, sont étudiées. Elles sont composées respectivement de 25 et 26 sondages, atteignant ~ 260 m de profondeur, répartis sur une longueur de 1300 et 1350 m ;
2. **Création du chenal de dissolution** : de l'eau douce et de l'air comprimé sont injectés dans chacun des forages. De petites cavités de dissolution se développent ainsi latéralement à leur pied, la couverture d'air empêchant toute remontée verticale d'eau vers la surface. Elles s'étalent et se rejoignent de proche en proche, formant un chenal. Lorsque tous les sondages de la piste sont en communication, l'air comprimé est évacué et l'extraction industrielle intensive peut commencer ;
3. **Exploitation de la piste** : l'eau douce n'est alors introduite qu'à une extrémité de la piste, dans un ou deux puits en amont. Elle se charge en sel à proximité de ceux-ci et est récupérée sous forme de saumure à l'autre extrémité par le dernier sondage en aval. Il en résulte un lessivage complet du gisement du bas vers le haut et donc la formation d'une cavité, de forme ellipsoïdale, au droit des forages d'injection. Dès que le toit du gisement est atteint, le point d'injection est transféré vers le puits contigu suivant et ainsi de suite ;
4. **Foudroyage des terrains de couverture** : les terrains de recouvrement qui ne sont plus maintenus par le sel dissout sont instables et rompent progressivement. Ils finissent par s'écrouler et un cratère circulaire aux bords raides apparaît au niveau du sol. De fait, le processus d'effondrement se développe vers l'aval de la piste au fur et à mesure de l'avancement de l'exploitation. Lorsque la cavité arrive au sondage d'extraction, la piste est considérée comme épuisée et le domaine peut être réaménagé.

Cette méthode permet d'obtenir un taux de récupération quasi total du gisement avec un minimum de coûts opératoires. De plus, en initiant volontairement la rupture du recouvrement, on obtient une stabilité ultime du terrain et les risques de mouvement à long terme sont fortement diminués.

Cependant, elle nécessite un contrôle total sur l'évolution de l'effondrement. Or, la rupture du massif peut libérer des aquifères, provoquant une dissolution incontrôlée de la formation salifère et des problèmes de stabilité à son voisinage ; à l'inverse, une pollution de ces derniers par la saumure peut aussi se répandre.

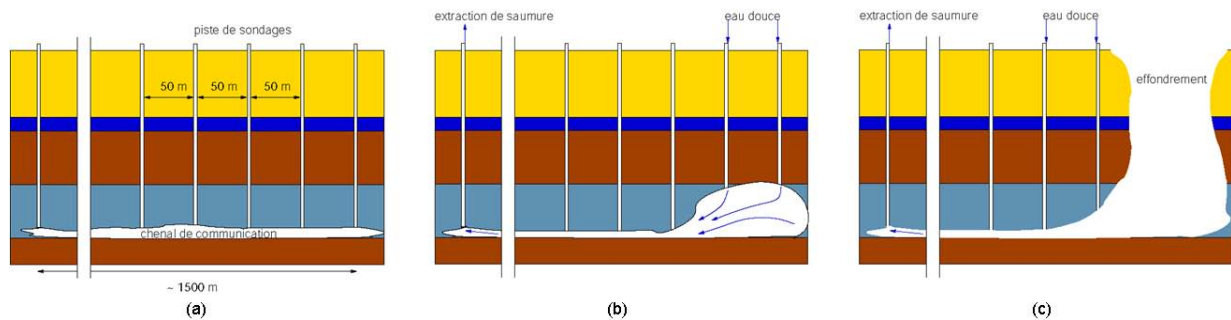


FIGURE 2.1 – Schémas illustrant la méthode d'exploitation par pistes et sondages : (a) création d'un chenal de communication à la base du gisement ; (b) création puis extension de la cavité ; (c) effondrement des terrains de recouvrement avec formation d'un cratère en surface.

Notons que l'objectif de l'instrumentation n'était pas de se prononcer sur les conséquences, en termes d'impact ou de sécurité, ni de valider la méthode d'exploitation, mais d'émettre des recommandations pour la gestion des risques liés à la présence de telles cavités.

2.3 Géologie

Le gisement salifère exploité s'inscrit dans une série sédimentaire triasique et liasique. Il se situe dans une zone synclinale dont l'axe, orienté Est-Ouest, traverse approximativement le centre des pistes. Des failles sont également rencontrées, les plus importantes, localisées à environ 1000-1500 m du site étant celles d'Haracourt et de Seichamps (Figure 2.2).

Aussi, la géologie générale a pu être précisée grâce à l'acquisition de données *in situ*. En particulier, les investigations mises en œuvre par le LAEGO sur une carotte prélevée au niveau d'un sondage (3129) situé à 140 m de la piste 2200 ont permis d'identifier et de caractériser la série lithostratigraphique locale. Les travaux réalisés ont consisté en :

- un levé lithologique détaillé des faciès traversés (nature et épaisseur des bancs, plans de décollement potentiels, état de fracturation) et son calage avec les diagraphies γ -ray effectuées par l'exploitant depuis les années 1980 ;
- des essais pétrophysiques et géomécaniques en laboratoire, permettant de déterminer les propriétés élastiques et de résistance des terrains traversés.

Notons que les résultats ont pu être extrapolés à l'ensemble de la zone d'étude en raison de l'excellente continuité latérale des formations rencontrées à l'échelle de la concession.

2.3.1 Lithologie

De la surface du sol jusqu'au gisement de sel, les couches successives rencontrées sont sub-horizontales (pendages $< 1^\circ$), et quatre principaux faciès ont pu être distingués :

1. le **Recouvrement au-dessus de la Dolomie de Beaumont** (0 m \mapsto -119.0 m), englobant des :
 - Argiles à Promicrocéras, constituées de matériaux fins, peu indurés à franchement plastiques ;
 - Calcaires à Gryphées, où alternent des bancs calcaires et marneux, décimétriques, peu fracturés ;
 - Argiles de Levallois, fortement plastiques ;
 - Grès infraliasiques, montrant au sommet un faciès argilo-gréseux finement lité et à la base, un ensemble fracturé essentiellement gréseux. Un aquifère local y est présent ;
 - Marnes irisées supérieures, souvent fracturées, où se succèdent des marnes indurées d'abord entrecoupées par des niveaux dolomitiques, puis renfermant de l'anhydrite sous forme de lits ou nodules pluri-centimétriques ;

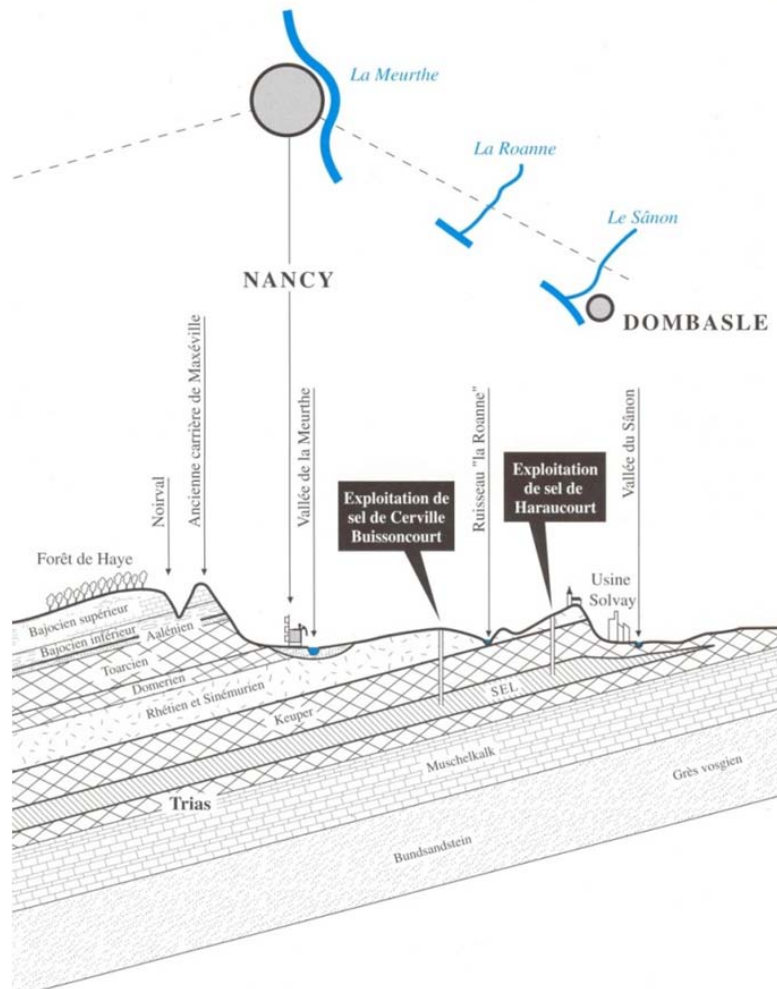


FIGURE 2.2 – Coupe géologique du bassin salifère nancéen. D'après SOLVAY S.A. (1998)

TABLE 2.1 – Formations rencontrées au sondage 3129.

Lithologie	Stratigraphie	Épaisseur (m)	Côte NGF (m) au niveau de la zone surveillée	RQD (%)*	
Argiles à Promicrocéras	Lias	25.9	~ 226	/	
Calcaires à Gryphées		12.5	~ 200	95	
Argiles de Levallois	Rhétien	6.9	~ 188	/	
Grès infraliasiques		16.9	~ 181	71	
Marnes irisées supérieures	Keuper	57	~ 164	88	
Dolomie de Beaumont		Anhydrite Dolomie	4.3	~ 107	100
			4	~ 102	100
Formation argilo-gréseuse		11.7	~ 98	/	
Marnes à anhydrite		44.3	~ 87	94	
Sel		84.3	~ 43	94-100	

*Le paramètre *RQD* (Rock Quality Designation) donne une estimation quantitative de l'état de fracturation d'une masse rocheuse, à partir de l'examen de carottes obtenues en forage. Il s'agit du pourcentage de morceaux intacts de longueur supérieure à 10 cm, sur la longueur totale de la masse considérée.

2. la **Dolomie de Beaumont** (-119.0 m \mapsto -127.5 m) : cette couche, caractérisée par une extrême régularité à l'échelle des concessions salifères de la région [103], se décompose en deux niveaux massifs, non fracturés et finement lités, d'Anhydrite et de Dolomie. Le passage entre ces bancs, d'épaisseur sensiblement équivalente s'effectue sur 50 cm, où se distinguent notamment des plans de décollement potentiels.
3. les **Unités entre la Dolomie de Beaumont et le toit du Sel** (-127.5 m \mapsto -183.5 m) : très hétérogènes et assez peu fracturées, elles se composent d'une formation intermédiaire argilo-gréseuse, très plastique avec quelques traces d'anhydrites et d'un épais banc de Marnes à anhydrites, plus ou moins indurées, où l'anhydrite peut apparaître sous forme noduleuse ou en lits millimétriques à métriques ;
4. le **Gisement de Sel** (-183.5 m \mapsto -348.0 m) : dans l'ensemble très peu fracturé, il est constitué de trois faisceaux (P, O et N), avec du sel plus ou moins pur où s'intercalent quelques dépôts marneux.

2.3.2 Modèles Rhéologiques des différents faciès déterminés à partir des essais de laboratoire

À partir de l'analyse lithologique et de l'état de fracturation des différentes couches, il a été établi que le recouvrement au-dessus du banc Dolomie de Beaumont ne joue pas un rôle significatif sur la stabilité globale du massif, au-delà de son propre poids ; sa résistance mécanique étant inférieure à celles de chaque ensemble situé en-dessous.

Les essais réalisés en laboratoire se sont donc concentrés sur les formations supposées conditionner le comportement de la cavité à court ou moyen termes, à savoir : la série salifère, les Marnes à anhydrites et la Dolomie de Beaumont. Leurs propriétés physiques (densités, teneur en eau), acoustiques (vitesses des ondes ultrasonores), les critères d'initiation à la rupture (fracturation) et l'endommagement (fissuration), ainsi que l'influence de la saumure sur leurs caractéristiques mécaniques ont été précisés.

Les résultats obtenus ne mettent pas en évidence d'anisotropie marquée pour les différents faciès étudiés (à l'échelle de l'échantillon de laboratoire), à l'exception des Marnes à anhydrites, présentant localement des niveaux plus ou moins indurés.

Par ailleurs, à l'exception du sel gemme, qui se déforme nettement avant de se rompre, les autres faciès étudiés se caractérisent par un comportement globalement raide accompagné d'une rupture fragile. De fait, dans un domaine de faible pression de confinement ($\sim 0-5$ Mpa) tel que celui régnant autour de la cavité de Cerville-Buissoncourt, ces derniers se fissurent après une déformation élastique de faible intensité, perdant brutalement l'essentiel de leur résistance mécanique.

En particulier, la Dolomie de Beaumont manifeste des résistances extrêmement élevées, pouvant jusqu'à dépasser 200 MPa, faisant de cet ensemble le plus compétent des terrains de recouvrement du gisement. Ces valeurs diminuent d'au moins un ordre de grandeur pour les Marnes à anhydrites ; cette couche se dégradant rapidement au contact de la saumure.

\Rightarrow La Dolomie de Beaumont conditionne fortement la stabilité du site lors de la création et l'élargissement de la cavité. Elle constitue le seul véritable banc raide dans le recouvrement.

2.4 Systèmes de surveillance multi-paramètres

La connaissance *a priori* de l'évolution de la cavité a conduit les différents partenaires du GISOS à l'installation d'un réseau de surveillance en amont des deux pistes, fin 2004. Plusieurs dispositifs, à la fois géophysique, géotechnique et hydro-chimique ont été déployés (Figure 2.3).

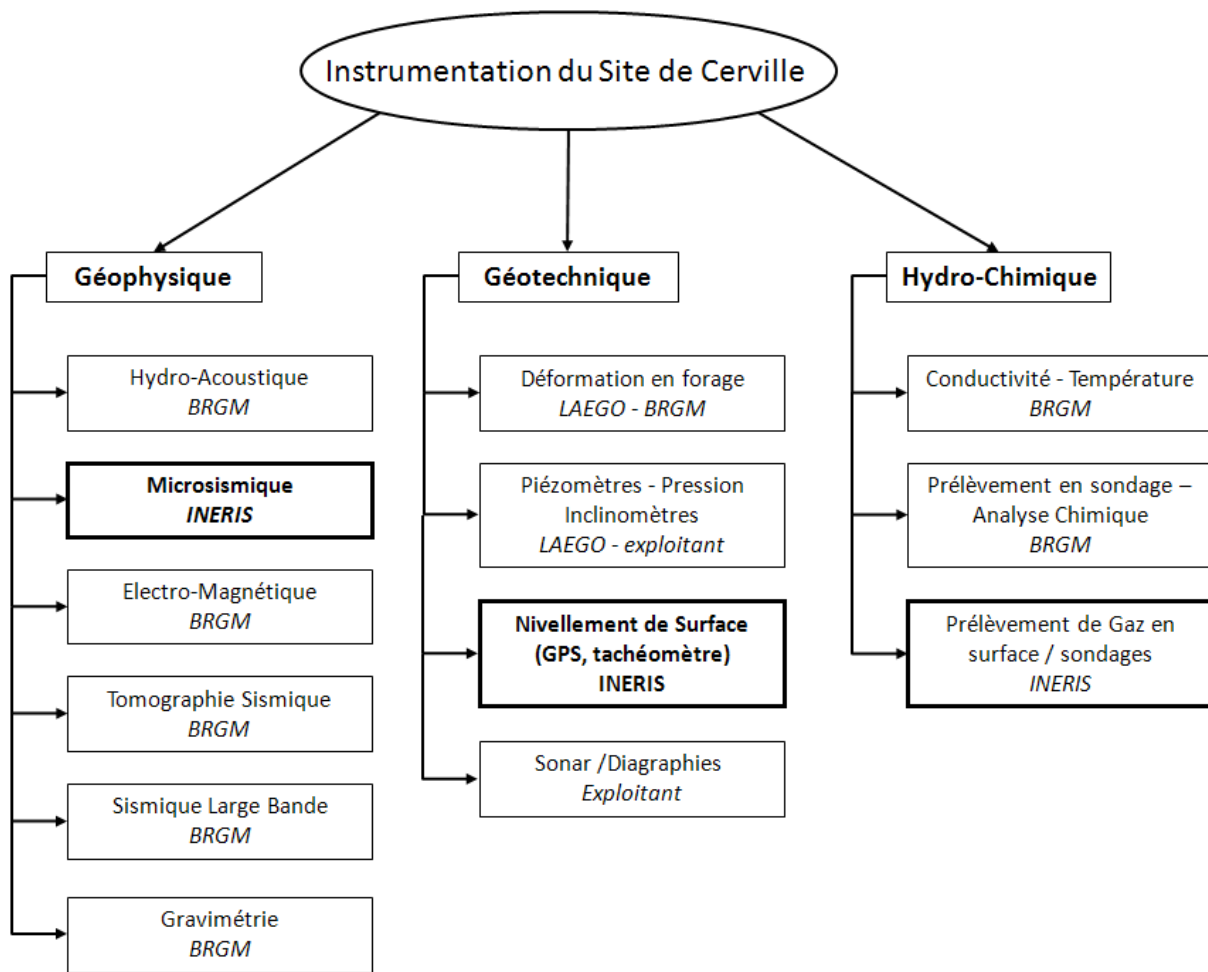


FIGURE 2.3 – Organigramme de l'instrumentation de la cavité saline de Cerville-Buissoncourt.

2.4.1 Instrumentation Géophysique

2.4.1.1 Écoute Microsismique (INERIS)

L'enregistrement des ondes élastiques générées par les ruptures dans le massif rocheux avait pour objectif de détecter des signes précurseurs de l'initiation et de la progression de la dégradation du toit de la cavité, ainsi que de la fracturation du banc raide de Dolomie avant que l'effondrement n'apparaisse en surface.

Description de la chaîne de mesure :

Le système, en écoute permanente depuis Janvier 2005, était géré par la plate-forme SYTMIS® (SYstème de Télésurveillance MicroSismique). Conçue et développée par l'INERIS, elle intègre des équipements et logiciels qui prenaient en charge les fonctionnalités d'acquisition, de traitement et de visualisation des sismogrammes enregistrés.

La chaîne de mesures était composée (Figure 2.5) :

- d'une série de logiciels, consacrés à l'acquisition des données et leur bon transfert ;
- d'une centrale d'acquisition, située dans un local mis à disposition par la société SOLVAY sur la digue en bordure de la zone expérimentale (Figure 2.4). Elle assurait l'enregistrement et la télétransmission des données, en quasi-temps réel vers l'INERIS-Nancy ;
- de deux coffrets de jonction, permettant l'alimentation électrique des sondes et leur raccordement avec la centrale d'acquisition ;
- de sondes, équipées de géophones 40 Hz miniatures, chacune possédant une carte d'acquisition

2.4. SYSTÈMES DE SURVEILLANCE MULTI-PARAMÈTRES

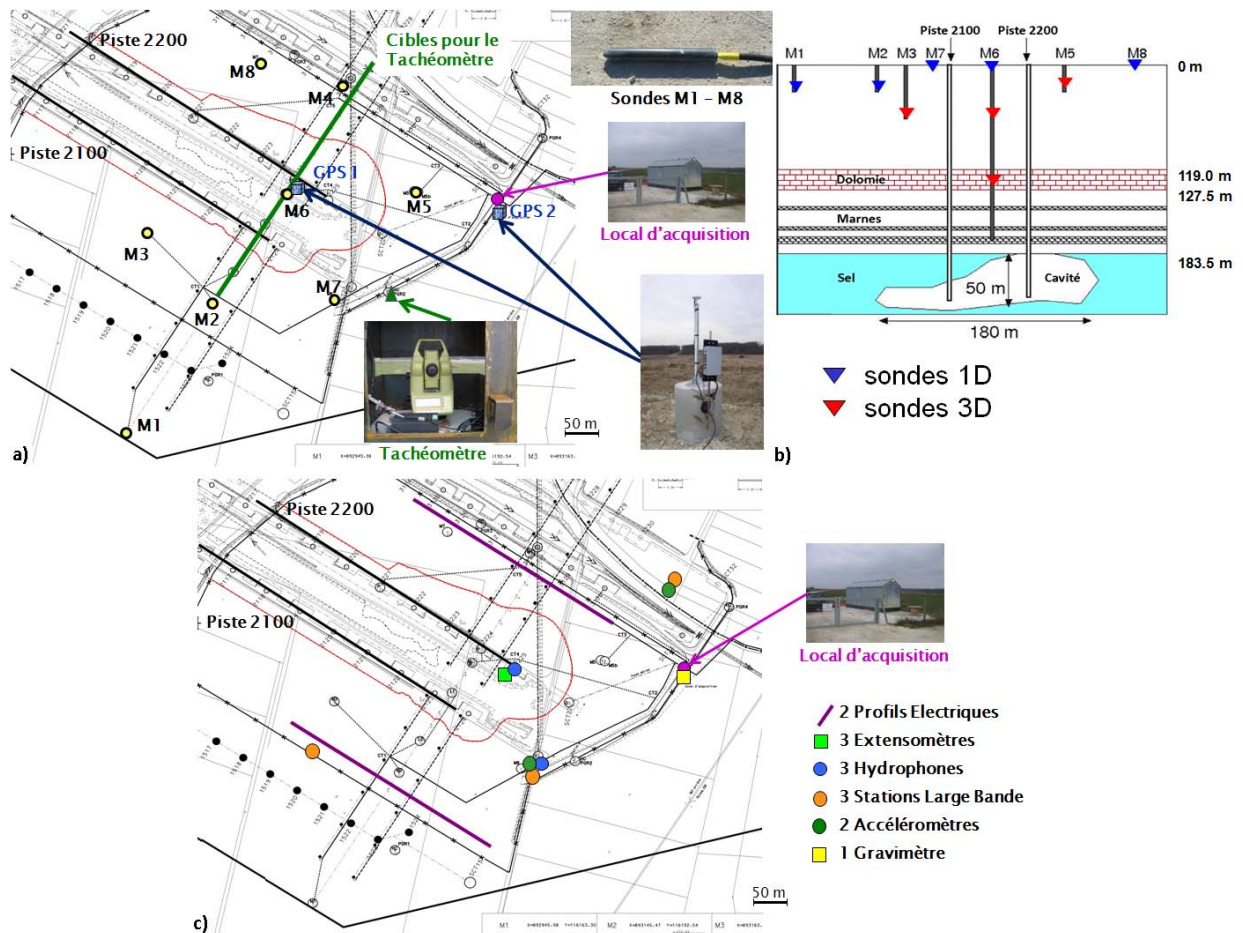


FIGURE 2.4 – Localisation des instruments mis en place sur le site de Cerville-Buissoncourt, par l'INERIS (a) et le BRGM (c) et profil montrant la position en profondeur des sondes microsismiques (b). Notons que l'une d'elle est située dans le banc de Dolomie de Beaumont.

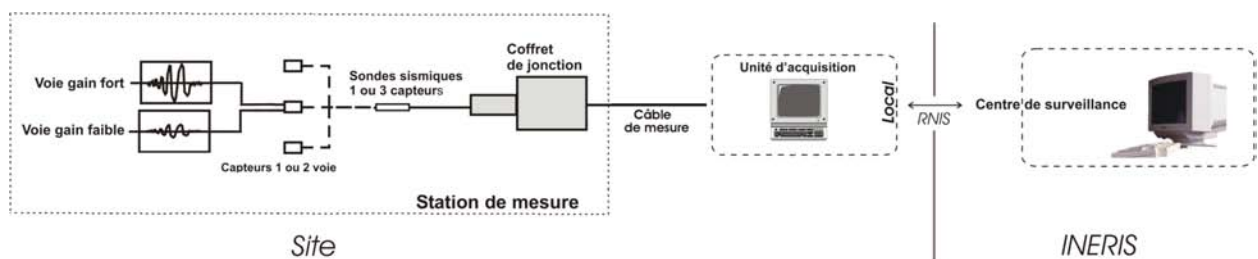


FIGURE 2.5 – Synopsis de la chaîne d'acquisition.

(AMPSOND alimentée en 12V), pouvant donner deux sorties : l'une à gain fort, l'autre à gain faible (pour éviter, si besoin, la saturation des signaux).

Géométrie du réseau :

Le réseau était composé de dix sondes microsismiques (Figure 2.4 a, b et Tableau 2.2) :

- six unidirectionnelles (orientées verticalement) : M1, M2, M4, M6.1, M7 et M8 ;
- quatre tridirectionnelles : M3, M5, M6.3 et M6.2.

Ces dernières étaient cimentées, entre la surface et 125 m de profondeur, dans des forages verticaux déployés de manière pseudo-circulaire autour et à l'aplomb de la cavité, afin d'assurer une bonne couverture azimutale du secteur.

La station M6, au centre du réseau, était constituée de trois sondes localisées à différents niveaux ; la plus profonde, M6.3, étant dans le banc de Dolomie de Beaumont. La sonde la plus lointaine, M1, quant à elle, était positionnée à environ 400 m de la zone d'effondrement et devait servir à évaluer l'atténuation des phénomènes dynamiques avec la distance.

Notons que les sondes les plus éloignées du local d'acquisition, M1, M2, M3 et M8 étaient raccordées sur le même coffret de jonction, tandis que les plus proches, M4, M5, M6, M7 étaient reliées sur un autre.

Remarques :

- une sonde 1D, M6.4, était initialement placée dans les Marnes à anhydrites, à 167 m de profondeur. Cependant, celle-ci a été endommagée lors de son installation et n'a jamais fonctionné ;
- la sonde M4, située à l'Est de la cavité, n'a plus été opérationnelle à partir du 12 Mai 2007 ;
- les sondes de surface M6.1, M7 et M8 complétant le réseau microsismique n'ont respectivement été mises en place qu'en Mars 2005 et Mars 2008.

Configuration de l'acquisition :

Les enregistrements étaient effectués sur 28 voies : celles à gain fort pour les sondes unidirectionnelles et les capteurs horizontaux de la sonde M5 ; avec les deux gains pour tous les autres.

Aussi, bien que le système scrutait en permanence les signaux envoyés par les capteurs, ceux-ci n'étaient transmis que si certains critères étaient vérifiés. Ces paramètres, permettant de garder uniquement les événements les plus significatifs, étaient les suivants :

- un *seuil de déclenchement en amplitude*, paramétré en "unité digitale", fixé à : ± 200 digits ($\sim 4.0e - 6$ m/s), soit ~ 10 fois le niveau de bruit moyen pour les sondes implantées en profondeur ; et ± 32767 digits, i.e. la valeur maximale pouvant être enregistrée, pour ne pas prendre en compte les capteurs en subsurface et les voies à gain faible ;
- un nombre minimum de deux voies "déclenchées" dans un laps de temps, appelé *durée du test de déclenchement*, de 0.01 s ;
- une durée dite de *dépassement de seuil*, i.e. un intervalle de temps minimum où l'amplitude du signal est supérieure au seuil, imposée à 0.001 s, pour éviter le déclenchement intempestif d'enregistrements dus à des parasites électriques (caractérisés par de grandes amplitudes et très courtes périodes).

En outre, la durée totale des enregistrements a varié au cours de l'expérimentation : initialement imposée à 1 s, pour un échantillonnage à 10 kHz, elle a été modifiée plusieurs fois avant d'être finalement fixée (le 12 Février 2008) à 1.5 s, avec un pas d'échantillonnage de 5 kHz. Un intervalle dit de *pré-événement*, de 0.35 s, avant que le seuil en amplitude ne soit atteint, était conservé, afin de garantir la détection du début de l'événement.

Par ailleurs, des tests journaliers ou *autotests* étaient réalisés automatiquement (aux alentours de 08h TU) ou manuellement lors des diverses interventions techniques afin de contrôler le bon fonctionnement de la chaîne d'acquisition.

NB : Dans la suite (sauf spécification contraire), le terme d'"événement microsismique" sera employé pour désigner un fichier individuel enregistré.

TABLE 2.2 – Identification et Position des stations de mesure. Les coordonnées sont exprimées en Lambert I en X, Y et côte NGF en Z. Les orientations des capteurs installés dans le plan horizontal sont données par rapport au Nord et ceux placés dans le plan vertical sont orientés positivement s'ils pointent vers la surface. Le centre du réseau a été choisi juste en-dessous des sondes M6, à X = 893314; Y = 116217 et Z = 43.

Station	M1	M2	M3	M4	M5	M6.3	M6.2	M6.1	M7	M8
Type	1D	1D	3D	1D	3D	3D	3D	1D	1D	1D
Voies	C1Z	C2Z	C3X, C3x C3Y, C3y C3Z, C3z	C4Z	C5X C5Y C5Z, C5z	C63X, C63x C63Y, C63y C63Z, C63z	C62X, C62x C62Y, C62y C62Z, C62z	C61Z	C7Z	C8Z
Position (m)	X Y Z	893146 116192 201.2	893163 116315 164.1	893470 116256 195.5	893423 116095 205.5	893314 116217 104.6	893314 116217 169.6	893314 116217 229.1	893424 116352 223.72	893250 116080 231.74
Distance au centre du réseau (m)	X Y Z Totale	368 54 158.4 404.3	151 98 121.1 217	156 39 25.9 162.9	109 122 162.5 230.6	0 0 61.6 61.6	0 0 126.6 126.6	0 0 186.1 186.1	110 135 180.7 251	64 137 188.7 241.8
Z surface (m)	232.4	232.2	229.1	226.5	229.5	229.6	229.6	229.6	225.4	233.6
Profondeur (m)	31	31	65	31	29	125	60	0.5	1.7	1.9
Lithologie	Argiles P	Argiles P	Grès / Marnes	Calcaires	Argiles P	Dolomie	Grès	Argiles P	Argiles P	Argiles P
Orientation (°)	OX OY OZ	- - -	256 166 0	- - -	202 112 0	308 218 0	348 258 0	- - -	- - -	- - -
1er enregistrement	18/01/05									
Dernier enregistrement	26/5/09		12/05/07		26/05/09	12/02/09	13/02/09	13/02/09	10/04/09	26/05/09

2.4.1.2 Autres systèmes mis en place

Tomographie Sismique (BRGM) :

La réalisation d'images tomographiques ponctuelles, à différents stades pendant l'exploitation et après l'effondrement de la cavité, avait pour objectif d'observer l'évolution du champ de vitesse dans le massif ausculté et d'en déduire son état de fracturation.

Une campagne de tomographie sismique a été mise en œuvre en Octobre 2004. L'acquisition comprenait alors deux dispositifs :

- l'un en forage, avec 2×24 hydrophones, placés dans des puits à l'extérieur de la zone d'effondrement, espacés tous les 2 m, entre 87 et 181 m de profondeur ;
- l'autre en surface, comprenant 3×24 géophones, disposés tous les 5 m, le long d'un profil de 500 m passant par ces deux puits.

En outre, deux types de sources ont été employés : des explosifs (50 g) enfouis dans des trous de 50 cm de profondeur ou des "chutes de poids" à l'aide d'un marteau hydraulique. Les 210 tirs de surface résultants ont été utilisés pour le calage du réseau microsismique (cf. Chapitre 5).

Écoute Hydro-Acoustique (BRGM) :

Complémentaire à la microsismique, cette technique permettait de suivre en continu l'évolution des signaux acoustiques, en milieu liquide, dans des gammes de fréquences plus larges, allant de 30 Hz à 3 kHz (Basses Fréquences) et de 30 kHz à 180 kHz (Hautes Fréquences). Pour cela, 3 hydrophones ITC ont été placés dans des puits en 2005 (Figure 2.4 c), l'un dans la cavité, au toit du gisement de sel, à -185 m, et les deux autres au niveau de la Dolomie, à -125 m.

Suivi Électromagnétique (BRGM) :

Venant en appui aux suivis sismiques, cette méthode visait à étudier les variations de courant "électrocinétique", en termes de potentiels électriques et champs magnétiques, générées par la migration des fluides dans le milieu. En particulier, les chutes de blocs devaient provoquer l'apparition de courants transitoires, mesurables en surface, permettant d'imager la migration de la cavité vers la surface.

Aussi, en utilisant une trentaine d'électrodes (Figure 2.4 c), deux types de surveillance électromagnétique étaient effectuées :

- passive, destinée à enregistrer les signaux naturels, à la fois :
 - magnétotelluriques, d'origine lointaine, diffractés par la cavité ;
 - transitoires spontanés, émis par exemple lors des effondrements partiels du toit ;
- active, par l'injection d'un courant électrique à horaire fixe, sur des électrodes spécifiques, pour étudier les variations de résistivité dans le recouvrement.

Suivi sismologique Large Bande (BRGM) :

Un réseau de trois sismomètres large bande (Güralp CMG-40TD - 3 composantes, ayant une bande passante allant de 0.016 à 100 Hz) a été installé de Juin 2008 à Mars 2009, en vue de détecter les mouvements longues et très longues périodes (LP et VLP), associés aux processus de rupture précédant et durant l'effondrement de la cavité, ainsi qu'à la relaxation postérieure des terrains de recouvrement. Les stations étaient suffisamment éloignées de la zone à risque pour éviter de perdre les instruments et de saturer les signaux (Figure 2.4 c).

Notons que deux accéléromètres avaient été placés à côté des sismomètres afin de valider leurs enregistrements et qu'un autre sismomètre (de bande passante 0.2 - 50 Hz) a été également positionné à environ 1.5 km de la cavité, afin d'analyser l'impact de l'effondrement à grande distance.

Suivi gravimétrique (BRGM) :

Cette méthode repose sur la mesure des valeurs relatives de gravité en surface ; celles-ci étant influencées par la répartition des densités dans le proche sous-sol. De fait, un gravimètre CG3-M, positionné au niveau du local d'acquisition (Figure 2.4 c) et en acquisition continue entre les 09 et 16 Février 2009 (1

mesure toutes les 15 secondes), a permis d'évaluer les variations de pesanteur liées aux déplacements de masses associés à l'effondrement.

2.4.2 Instrumentation Géotechnique

Mesures de Nivellement de Surface (INERIS) :

L'évolution des déplacements en surface était suivie grâce à un tachéomètre motorisé à visée laser (TCA 2003, Leica) relevant automatiquement, toutes les 2h, la position de dix-sept réflecteurs. Les cibles, situées 150 à 270 m plus loin, étaient alignées perpendiculairement à l'axe des pistes, dans et en dehors de la zone d'effondrement de manière à pouvoir estimer son extension (Figure 2.4 a). Ce dispositif, bien que sensible aux variations météorologiques, détectait, après corrections ou moyenne mobile sur plusieurs cycles de mesure, des mouvements de surface avec une précision de ± 3 mm.

Il a été complété en Mars 2008 par un système GPS fonctionnant selon le principe de la mesure différentielle RTK (Real Time Kinematic). Pour ce faire, deux balises avaient été installées : l'une, utilisée comme référence, était placée dans une zone réputée stable, à proximité de l'unité d'acquisition ; l'autre positionnée à l'aplomb de la cavité, servait à évaluer la subsidence relative au centre de la zone auscultée (Figure 2.4 a). Les mesures étaient effectuées toutes les demi-heures, la durée d'acquisition étant fixée à 20 minutes, avec une précision estimée à ± 5 mm.

Ces données étaient transférées, en quasi-temps réel, à l'INERIS (Nancy et Verneuil).

Mesures de Déformation en forage (LAEGO-BRGM) :

Ce dispositif avait pour but de préciser l'amplitude des mouvements des terrains de recouvrement jusqu'à leur rupture, tels que la cinétique d'évolution des Marnes à anhydrites et leur comportement au contact avec la saumure ou le fléchissement consécutif du banc de Dolomie de Beaumont.

Le système était constitué d'un extensomètre multipoint placé dans un forage de 168 m de profondeur à l'aplomb de la cavité (Figure 2.4 c). Cinq ancrages métalliques (dont trois couplés à une sonde de température), mis en place entre 113 et 162 m de profondeur étaient reliés par des tiges en acier à un capteur de déplacement situé en surface. Les mesures étaient acquises en continu, avec une étendue de 250 mm et une précision de ± 0.1 mm.

Piézométrie - Pression - Inclinométrie (LAEGO-SOLVAY) :

Des relevés du niveau de saumure, déduit à partir de mesures de pression dans les sondages en aval de la cavité, étaient réalisés régulièrement par SOLVAY, afin d'observer les variations de charge hydraulique dans la cavité engendrées par des événements liés à son évolution ou par l'activité normale d'exploitation des pistes.

En outre, deux chaînes inclinométriques avaient été implantées dans deux forages de 20 m de profondeur. Elles étaient constituées de sondes uniaxiale et biaxiale $\pm 10^\circ$, de précision ± 0.1 mm/m et acquéraient des données en continu.

Campagnes SONAR & Diagraphies γ -ray (SOLVAY) :

Il s'agissait d'estimer la géométrie de la cavité par la technique des ultrasons. Cette dernière consiste à insérer une sonde dans un puits et, connaissant sa position, mesurer le temps entre l'émission d'une onde acoustique et la réception de son écho, pour pouvoir localiser chaque point de la paroi. Deux campagnes ont été réalisées, l'une en 2001 et la dernière en 2003.

Par ailleurs, il convient de préciser que l'exploitant réalisait à intervalles réguliers (de l'ordre de quelques mois) des diagraphies gamma-ray pour évaluer l'extension verticale de la cavité au droit des forages d'exploitation.

2.4.3 Instrumentation Hydro-Chimique

Observation des émissions gazeuses (INERIS) :

Il s'agissait d'identifier, qualifier et quantifier les dégagements gazeux au-dessus du toit du sel au cours des opérations de dissolution, au moyen d'un sondage instrumenté, en amont de la piste 2200. En parallèle, des mesures périodiques manuelles étaient réalisées dans les sondages voisins, à proximité de la zone susceptible de s'effondrer.

Suivi hydro-chimique (BRGM) :

L'objectif était d'observer l'éventuelle propagation et dilution progressive de saumure éjectée dans les aquifères, notamment suite à l'effondrement.

Le dispositif était constitué par six piézomètres crépinés au niveau des Grès du Rhétien, disposés autour et en aval de la cavité. Chacun était équipé de sondes multi-paramètres permettant de suivre au pas horaire le niveau piézométrique par capteur de pression, la conductivité et la température de l'eau. De plus, des prélèvements étaient pratiqués pour les analyses chimiques, à l'aide de préleveurs à déplacements.

Ainsi, l'ensemble de cette instrumentation a permis de suivre la remontée progressive de la cavité saline de Cerville-Buissoncourt, formée en amont des pistes 2100 et 2200, depuis le toit du gisement de sel, et les phases de rupture successives du recouvrement jusqu'au premier effondrement provoqué des pistes, en Février 2009.

Chapitre 3

Historique de l'expérimentation

3.1	2003 : Arrêt de l'exploitation dans la cavité	47
3.1.1	État initial	47
3.1.2	Essais de pression contrôlés	48
3.1.2.1	Écoute Microsismique	48
3.1.2.2	Mesures de déformation en forage	49
3.1.2.3	Autres mesures	50
3.1.3	2005-2007 : Dissolution partielle en aval de la cavité	50
3.1.3.1	Écoute Microsismique	50
3.1.3.2	Mesures de déformation en forage	53
3.1.3.3	Mesures de diagraphies	54
3.1.3.4	Mesures de pression dans la cavité	55
3.1.3.5	Autres mesures	55
3.2	2008-2009 : Reprise de la dissolution dans la cavité	55
3.2.1	Écoute Microsismique	55
3.2.1.1	Mesures de déformation en forage	58
3.2.1.2	Mesures de l'affaissement en surface	58
3.2.1.3	Mesures de diagraphies	58
3.2.1.4	Mesures de pression	59
3.3	2009 : Pompage intensif & Effondrement provoqué de la cavité	60
3.3.1	Protocole et scénarios envisagés	60
3.3.2	Historique des données enregistrées	60
3.3.2.1	Mesures de pression	60
3.3.2.2	Écoute Microsismique	61
3.3.2.3	Écoute Hydro-Acoustique	62
3.3.2.4	Suivi sismologique Large-Bande	63
3.3.2.5	Suivi gravimétrique	64
3.3.2.6	Mesures de déformation en forage	64
3.3.2.7	Mesures de l'affaissement en surface	65
3.3.3	Modélisations numériques prédictives	66
3.3.3.1	Daupley et Laouafa (2003)	66
3.3.3.2	Mercerat (2007)	69

Dans ce chapitre, il s'agira de faire une synthèse de l'ensemble des données collectées, ainsi que des travaux réalisés antérieurement en termes de modélisation prévisionnelle du premier effondrement et d'analyse préliminaire de la microsismicité induite.

3.1 2003 : Arrêt de l'exploitation dans la cavité

En 2003, les dimensions de la cavité, créée en amont des pistes 2100 et 2200, étaient devenues telles qu'une poursuite de la dissolution aurait pu conduire assez rapidement à son effondrement. Or, cet événement, entraînant la pollution de la saumure par des matériaux insolubles durant plusieurs semaines, voire plusieurs mois, arrivait prématurément pour l'exploitant, ce dernier ne disposant pas d'autre moyen durable d'approvisionnement.

SOLVAY a donc interrompu l'injection d'eau douce dans la cavité même, de manière à ce qu'elle n'évolue plus, et entreprit la réalisation d'une nouvelle piste (3100), parallèle aux deux précédentes, pour prendre le relai de la production de saumure lors de l'effondrement.

Ce temps imparti a permis aux différents partenaires du GISOS de mettre en place leurs dispositifs de surveillance, de procéder à la caractérisation et à la qualification de l'état initial du site, en dehors de toutes perturbations liées à l'exploitation (ce qui, nous le verrons dans les paragraphes suivants, n'est pas tout à fait le cas), ainsi que de réaliser diverses modélisations numériques afin de définir les conditions d'apparition du premier effondrement.

3.1.1 État initial

Les sondages jusqu'alors exploités, respectivement 2122 à 2124 et 2222 à 2225 pour les pistes 2100 et 2200, sont indiqués sur la Figure 3.5.

Aussi, la géométrie des deux cavités, créées durant la période 2000-2003, a été évaluée à partir de mesures SONAR réalisées par l'exploitant. En Juin 2003, ces dernières étaient dissymétriques et connectées sur toute la zone amont (Figure 3.1 et Tableau 3.1) :

- le toit de la cavité tangeait à la base des Marnes à anhydrites, à l'aplomb des sondages 2224 et 2225 de la piste 2200, sur une surface de dimension 50×80 m ;
- en direction de la piste 2100, celui-ci plongeait sensiblement et ~ 25 m de sel étaient encore présents.

Cette différence de profondeur pourrait s'expliquer par un différentiel de charge entre les pistes et/ou par la présence hétérogène d'insolubles dans la couche de sel.

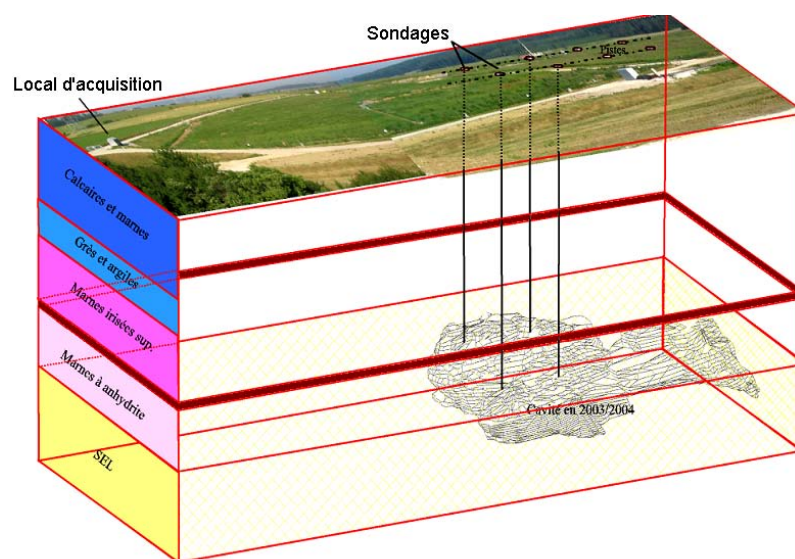


FIGURE 3.1 – Coupe géologique simplifiée des terrains de recouvrement au niveau de Cerville-Buissoncourt et configuration de la cavité telle qu'elle était en 2003-2004.

TABLE 3.1 – Données dimensionnelles de la cavité en amont des pistes 2100 et 2200, déduites des mesures SONAR en Avril 2003 (d'après [96], modifié).

Profondeur du Toit (m)	Gisement	~ 190 (⇔ 43 NGF)
	Dolomie	~ 124 (⇔ 107 NGF)
	Cavité	~ 190 (⇔ 43 NGF)
Dimension du toit de la cavité (centrée sur la piste 2200)		surface où le banc de sel a disparu ~ 50 × 80 m, rayon équivalent : 35 m coupe à 10-12 m sous le toit du sel : (80-100 m) × (130-140 m), rayon équivalent : 57-67 m
Affaissement		Quelques millimètres
Conditions hydrauliques		Cavité remplie de saumure

Enfin, notons qu'entre 2002 et 2003, un affaissement total de quelques millimètres a été mesuré en surface.

3.1.2 Essais de pression contrôlés

Afin d'étudier les effets de diminution du niveau de saumure sur la stabilité du site, le GISOS a procédé à deux essais de dépressurisation partielle contrôlés, en Octobre 2005 et Avril 2007. Le mode opératoire consistait à (Figure 3.2) :

1. descendre la pression de saumure, pour déclencher une relaxation des terrains de recouvrement ;
2. maintenir cette dernière à un niveau bas pendant quelques temps de manière à permettre le développement des déformations. Pour ce faire, deux paliers ont été considérés : ~ -1.8 et ~ -3.6 bars (soit un rabattement de saumure de 15 et 36 m respectivement) ;
3. remonter progressivement la pression jusqu'à sa valeur d'origine.

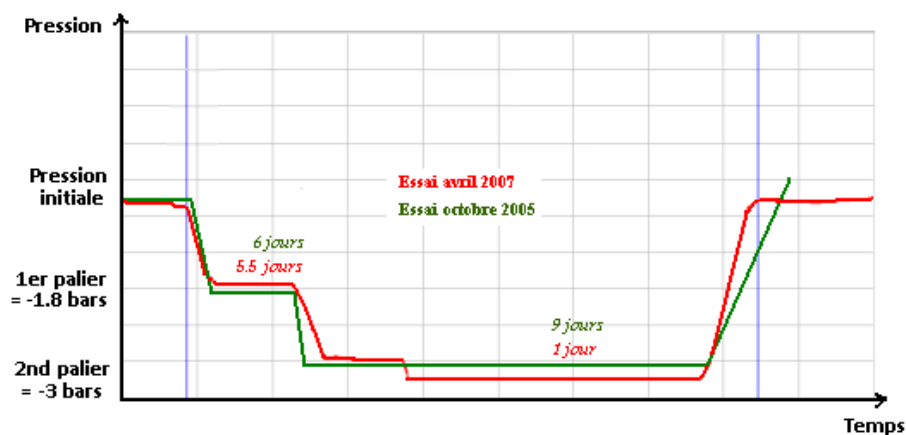


FIGURE 3.2 – Protocoles des essais contrôlés de pression en 2005 (vert) et 2007 (rouge) dans la cavité de Cerville-Buissoncourt (d'après le Rapport du GiSOS 2007, modifié).

Notons cependant que les protocoles entre les deux essais ont légèrement varié :

- la durée totale de l'essai de 2005 est de trois semaines contre une en 2007 ;
- celle du premier palier de stabilité est d'environ 12 heures plus courte en 2007 ;
- la vitesse de descente et de remontée de la pression est moins importante en 2007.

3.1.2.1 Écoute Microsismique

L'activité microsismique générée lors des deux essais est globalement comparable mais non répétitive (Figure 3.3). En effet, bien qu'il soit légèrement plus important avant les essais, le nombre total

d'événements détectés en Avril 2007 est inférieur à celui d'Octobre 2005. Cette différence peut s'expliquer par le fait que les deux protocoles n'étaient pas strictement identiques (vitesse du cycle et durée du palier de stabilité) et que la cavité avait probablement évolué "naturellement" entre les deux périodes.

Par ailleurs, la réponse du recouvrement semble s'effectuer avec un certain décalage, l'activité microsismique se produisant principalement pendant les phases de repos, quelle que soit leur durée, et à la remontée de pression. Néanmoins, dans les deux cas, elle reste faible et relativement semblable à celle enregistrée en phase de "stabilité"; il n'existe donc pas de relation claire entre la dépressurisation et la génération de microsismicité.

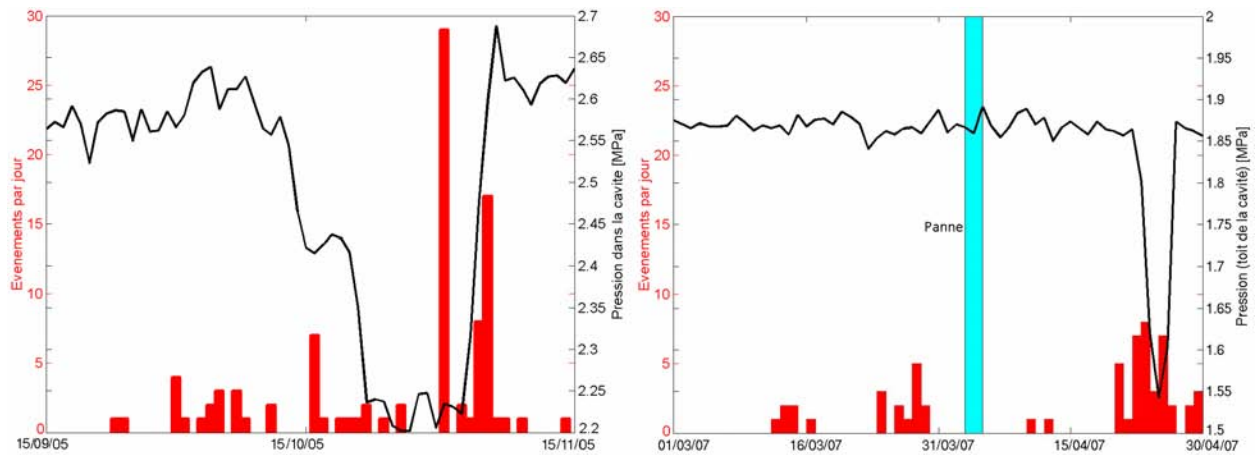


FIGURE 3.3 – Évolution de l'activité microsismique journalière et de la pression de saumure mesurée au niveau de la piste 2100, lors des essais d'Octobre 2005, à gauche et d'Avril 2007, à droite (d'après le Rapport du GiSOS 2007).

3.1.2.2 Mesures de déformation en forage

Les mesures en forage effectuées durant ces opérations mettent en évidence un comportement irréversible, peu élastique du recouvrement (Figure 3.4). En 2005, les déplacements se sont manifestés principalement à partir de la seconde baisse de pression et se sont stabilisés au palier suivant, à ~1-1.2 mm. En 2007, ceux-ci ont continué d'augmenter progressivement, et ce, même après la remontée de pression à son niveau initial. En outre, bien que la diminution de pression soit inférieure à l'essai précédent la flexion maximale enregistrée, elle, était supérieure, atteignant une amplitude de ~1.9 mm. Notons néanmoins que ces valeurs restaient insuffisantes pour susciter la rupture du banc raide.

Par ailleurs, la distance entre l'ancrage positionné dans les Marnes irisées supérieures (-113 m) et ceux dans la Dolomie de Beaumont s'est elle-aussi accentuée, de l'ordre de 0.2 mm en 2005 et de 0.5

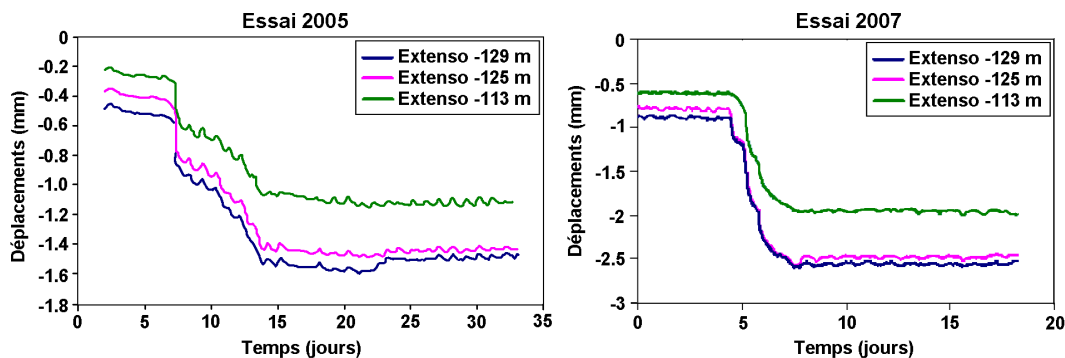


FIGURE 3.4 – Déplacements mesurés en forage pendant les essais de pression en 2005 (à gauche) et 2007 (à droite, d'après le Rapport annuel du GISOS 2008, modifié)

mm en 2007, ceci pouvant être lié à des décollements de bancs.

3.1.2.3 Autres mesures

Les mesures tachéométriques n'ont présenté aucune variation significative pouvant être associée à l'essai de pression. De même, aucun changement ou anomalie n'ont été observés au niveau des émissions gazeuses, des mesures piézométriques et de conductivité.

Ces deux essais n'ont pas permis de détecter de variations de mesure significatives, démontrant ainsi une relative stabilité hydro-mécanique du système.

3.1.3 2005-2007 : Dissolution partielle en aval de la cavité

À partir de Janvier 2005, l'exploitant avait repris une dissolution partielle à environ 200 m en aval du centre de la cavité (Figure 3.5). Sur la piste 2100, les injections d'eau douce se sont étendues entre Janvier 2005 et 2006 et ont repris en Juin 2007 ; tandis que pour la piste 2200, elles ont débuté en Novembre 2005 et se sont interrompues en Mai 2007.

Ces opérations devaient permettre de produire de la saumure en maintenant une pression à peu près constante dans la cavité même, et donc sa stabilité.

3.1.3.1 Écoute Microsismique

L'activité microsismique enregistrée entre Janvier 2005 et Décembre 2007 est illustrée sur la Figure 3.6. On observe qu'au-delà d'une hausse succincte de la microsismicité générée lors de l'essai de pression en Octobre 2005, cette dernière était plutôt faible jusqu'en Mai 2007 ; moins d'un événement par jour étant détecté en moyenne. De plus, celle-ci était plutôt irrégulière, ne présentant pas de tendance marquée.

Aussi, un effet de saisonnalité avait été avancé ; le nombre d'événements relevés étant un peu plus élevé entre Mai et Août 2006 que durant les mois précédents et suivants (Tableau 3.2). Néanmoins les pannes répétées du réseau, en particulier pendant l'été 2005, ainsi que les changements dans l'alimentation en eau douce ne permettent pas de présumer d'un tel phénomène.

Par ailleurs, les corrélations entre les volumes injectés et l'apparition de la microsismicité ne sont pas forcément triviales (Figure 3.7). De fait, pour une même quantité d'eau introduite en aval de la cavité, le nombre d'événements détectés peut diverger. En comparant l'activité microsismique mensuelle entre 2005 et 2006, on observe que celle-ci est plus importante pour la seconde année ; la permutation entre les pistes d'injection pourrait être à l'origine de ceci.

Crises de Mai 2007 :

Dans les soirées du 08 et 31 Mai 2007, une activité microsismique soutenue a été détectée par le réseau d'écoute.

Durant ces périodes, un total de 810 événements (584 + 226) ont été déclenchés de manière quasi continue, dépassant largement le nombre d'enregistrements effectués jusqu'alors. De même, l'énergie libérée était environ 20 fois supérieure à celle cumulée par tous les événements précédents. En outre, cette dernière était de même ampleur pour les deux jours (Figure 3.8), bien que le nombre d'événements soit moins important le 31 Mai.

Notons que le volume total d'eau douce injectée en aval de la cavité, sur la piste 2200, avait atteint son maximum à ce moment-là, cumulant une dizaine de milliers de mètres cubes déversés de plus que les mois précédents (Figure 3.7).

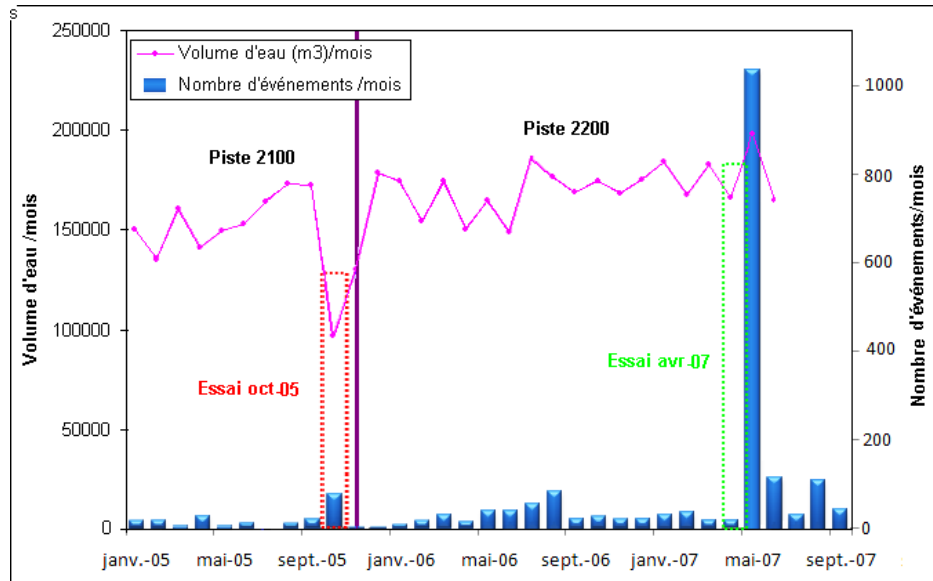


FIGURE 3.7 – Volume d'eau injectée en pistes 2100 et 2200 et activité microsismique cumulée par mois entre Janvier 2005 et Septembre 2007 (d'après [41], modifié).

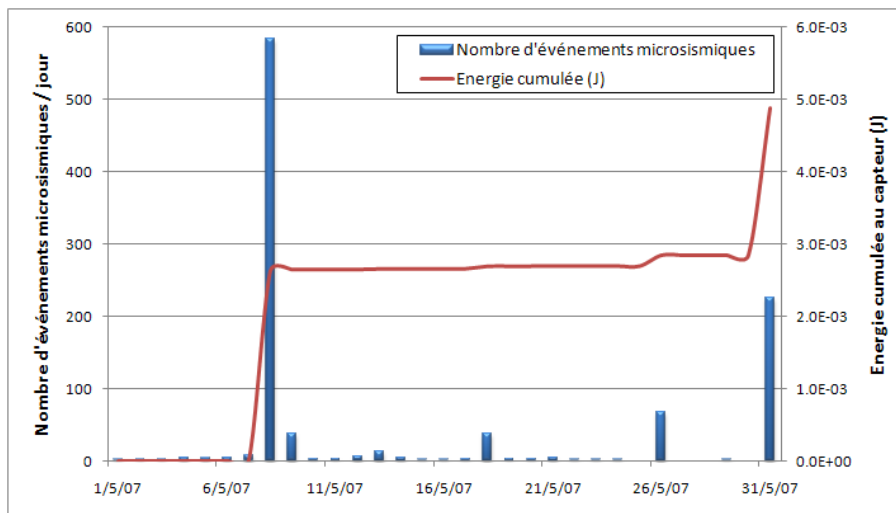


FIGURE 3.8 – Évolution de l'activité microsismique et de l'énergie au capteur enregistrées au mois de Mai 2007.

Localisation des événements :

D. Mercerat a réalisé une analyse de la microsismicité induite enregistrée entre 2005 et 2006 [97], ainsi que pendant la crise de Mai 2007 [98].

Entre les mois d'Avril et Octobre 2005, 156 événements ont été décelés. 57 d'entre eux ont été pointés manuellement (temps d'arrivée des ondes P voire S) et localisés avec le logiciel NonLinLoc ([86] et Chapitre 5). L'incertitude sur les positions des foyers est estimée entre 25 et 40 m dans le plan horizontal et plus du double dans le plan vertical. Aussi, seuls 36 événements ont été localisés avec une précision jugée acceptable, i.e. avec un ellipsoïde d'erreur de rayon maximum inférieur à 60 m et un résidu sur les pointés n'excédant pas 0.05 s. La majorité d'entre eux sont concentrés dans la couche de sel et les Marnes au bord du toit de la cavité (Figure 3.9). En outre, une seule rupture est positionnée près ou au niveau du banc de Dolomie de Beaumont.

Sur les 810 événements comptabilisés les 8 et 31 Mai 2007, 134 ont été pointés manuellement sur plus de 4 stations et 53 d'entre eux ont été localisés en satisfaisant les critères cités précédemment. Les

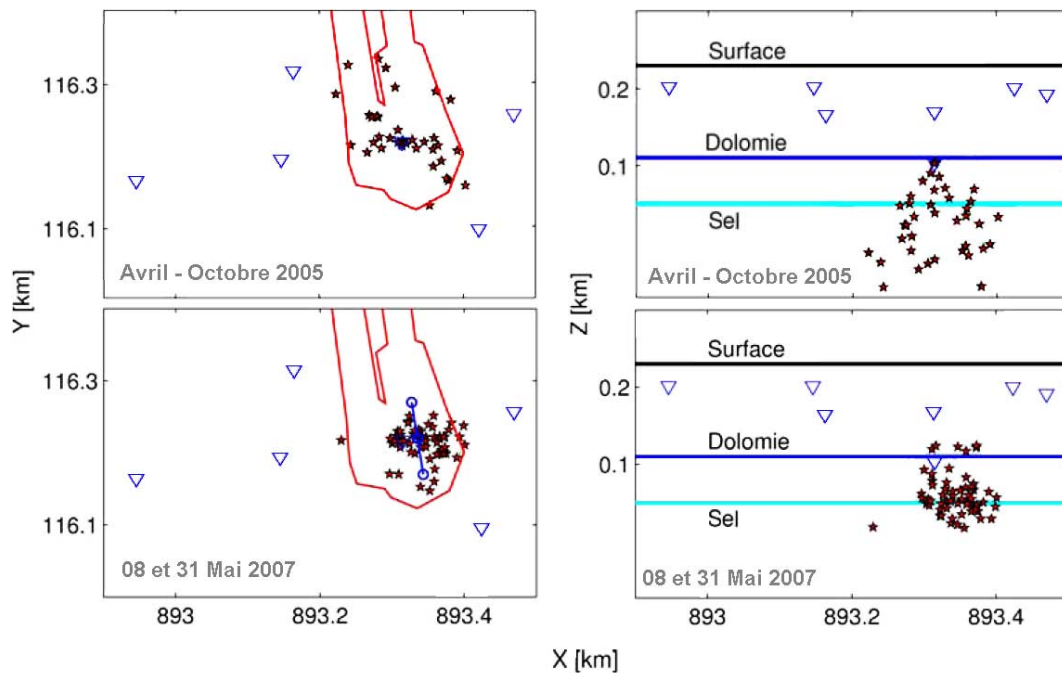


FIGURE 3.9 – Localisation des événements microsismiques enregistrés entre Avril et Octobre 2005, en haut et entre les 8 et 31 Mai 2007, en bas [98]. Les foyers et les sondes sont respectivement représentés par des étoiles et triangles.

foyers déterminés sont regroupés au niveau des sondages 2222 à 2225 (Figure 3.9). De plus, les hypocentres semblent être remontés par rapport à l'image obtenue en 2005. La plupart d'entre eux sont situés au toit de la cavité dans les Marnes à anhydrites et quelques uns se trouvent dans le banc de Dolomie. Néanmoins, la détermination en profondeur est trop imprécise pour en déduire une extension verticale et le nombre d'événements trop faible pour réellement conclure sur un début de rupture dans le banc raide.

NB : Deux types d'événements avaient été discriminés : ceux de type "isolés" et les déclenchements "en rafale". De plus, une étude de la fréquence de quelques signaux avait aussi été réalisée. Nous y reviendrons dans le Chapitre 4.

3.1.3.2 Mesures de déformation en forage

Les données issues des deux ancrages les plus profonds (dans les Marnes à anhydrites) montrant des incohérences, seuls les trois extensomètres situés au-dessus et dans le banc de Dolomie ont été utilisés par la suite.

Les mesures extensométriques effectuées au cours de l'année 2005 montrent de rapides diminutions de l'ordre du centième à dixième de millimètre corrélées à de brusques baisses de pression dans la cavité ; ces déplacements étant irréversibles une fois la pression initiale rétablie (Figure 3.10). En dehors de cela, aucune évolution remarquable n'a été constatée et ce, jusqu'en Juin 2006. À partir de cette date, des déplacements à vitesse constante, d'environ 0.005 mm/jour, sont observés (Figure 3.11).

Après la réalisation de l'essai de pression en Avril 2007 (cf. paragraphe précédent), cette vitesse augmente pour atteindre une valeur constante d'environ 0.008 mm/jour jusqu'en Mars 2008.

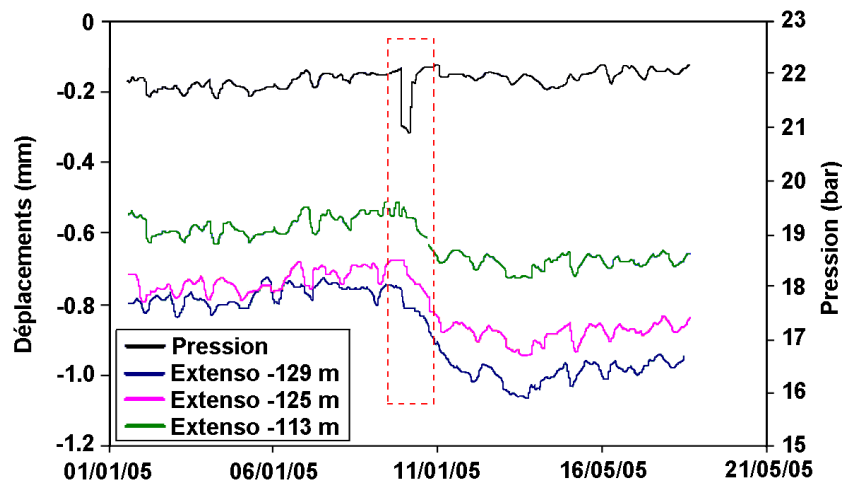


FIGURE 3.10 – Mesures de déformation en forage entre les 1er et 20 Janvier 2005.

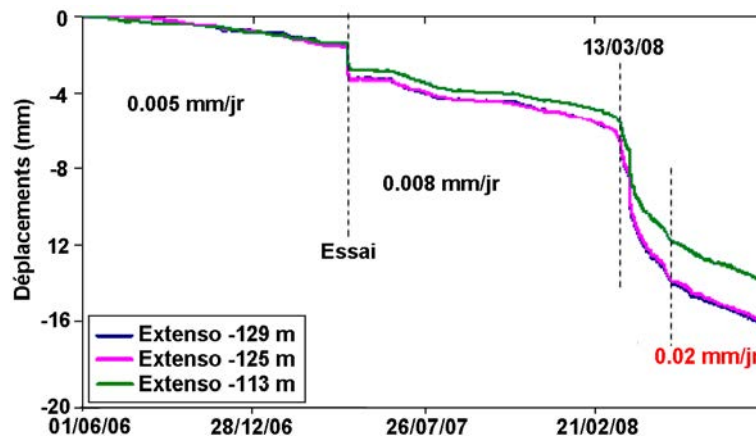


FIGURE 3.11 – Mesures de déformation en forage entre le 1er Juin 2006 et le 15 Septembre 2008.

3.1.3.3 Mesures de diagraphies

Les mesures de diagraphies réalisées par SOLVAY dans la journée du 31 Mai 2007, ont mis en évidence un décrochement de 8 à 23 m de Marnes à anhydrites au niveau des sondages 2223-2224-2225,

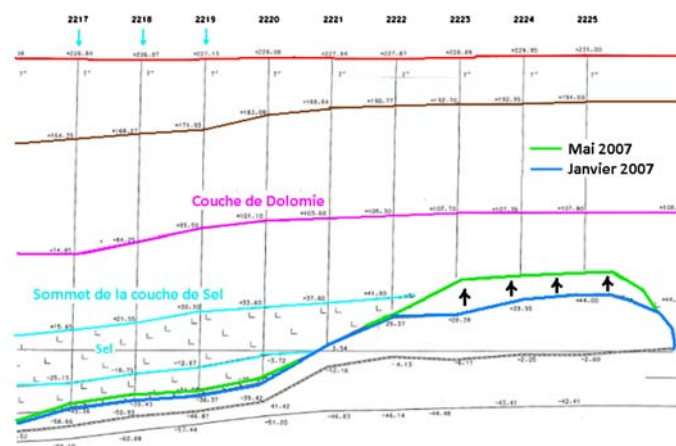


FIGURE 3.12 – Extrait des relevés diagraphiques réalisés en Janvier et Mai 2007 par la société SOLVAY le long des pistes 2200.

depuis Janvier 2007 (Figure 3.12). La piste 2100 présentait quant à elle encore une poutre de sel d'une vingtaine de mètres d'épaisseur.

Le nombre élevé d'événements microsismiques détectés dans la soirée du 31 Mai suggère une continuité de l'évolution (brusque ?) de la cavité vers la surface.

En Juin 2007, la dissolution partielle a été déplacée sur la piste 2100. Fin Janvier 2008, les mesures indiquaient qu'il ne restait plus que 10 m de sel de ce côté, alors que la cavité n'avait quasiment pas progressé sur l'autre piste.

3.1.3.4 Mesures de pression dans la cavité

En Mai 2007, au moment des pics d'activité microsismique (où le nombre d'événements atteignait son maximum), l'exploitant a relevé de légères hausses de pression de saumure, mettant ensuite plusieurs heures à revenir au niveau initial ; ces dernières pourraient être associées à des chutes massives de blocs en fond de cavité.

3.1.3.5 Autres mesures

L'auscultation tachéométrique n'a montré aucune évolution notable de l'affaissement en surface. De même, les mesures piézométriques, de conductivité ou d'émissions gazeuses n'ont présenté aucune variation remarquable, pendant ou après les crises de Mai 2007.

Ces analyses indiquent que la dissolution partielle pratiquée en aval de la cavité avait une influence relative sur son évolution. Ceci pourrait s'expliquer par la migration de l'eau douce par effet "d'amont pendage".

3.2 2008-2009 : Reprise de la dissolution dans la cavité

La reprise de la dissolution dans la cavité en Février 2008 a entraîné une évolution significative du site d'auscultation.

3.2.1 Écoute Microsismique

La microsismicité s'intensifie. De fait, le nombre d'événements enregistrés par jour passe à ~15 événements et plusieurs crises se succèdent (Figure 3.13 et Tableau 3.2).

En outre des critères empiriques, basés sur le nombre d'enregistrements et/ou un seuil en énergie cumulée aux sondes 3D, avaient été utilisés pour définir l'occurrence et quantifier les crises [74]. Les différents épisodes identifiés entre 2008 et 2009 sont répertoriés dans le (Tableau 3.3). On observe que :

- les crises de Mars-Avril 2008 se détachent nettement des autres, ces dernières s'étendant sur plusieurs jours et comptabilisant plusieurs milliers d'événements. Après cette période, les épisodes enregistrés sont courts, la majorité d'entre eux durant moins de 24 h, pour une quarantaine d'événements décelés en moyenne. Signalons toutefois l'activité particulièrement soutenue du 11 Janvier 2009, où 388 événements ont pu être comptabilisés ;
- l'énergie cumulée au capteur n'est pas proportionnelle au nombre d'enregistrements : par exemple, les 10 événements enregistrés le 19 Octobre 2008 concentrent plus d'énergie que les 74 détectés en Décembre 2008.

N.B. : L'énergie cumulée prise en compte est ici calculée en faisant la moyenne de celles déterminées au niveau des sondes M3 et M5 ; les mesures effectuées sur les sondes M6 pouvant biaiser les résultats.

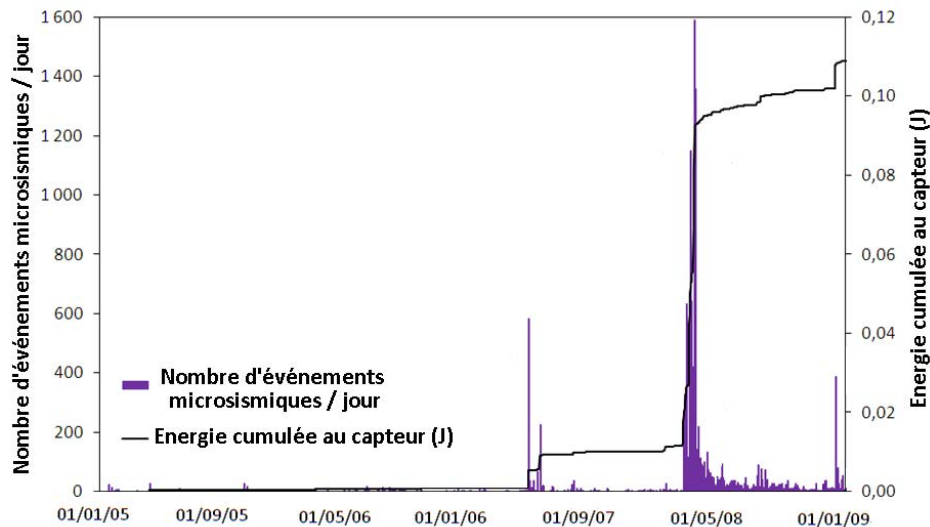


FIGURE 3.13 – Histogramme du nombre d'enregistrements microsismiques par jour et courbe de l'énergie cumulée aux sondes 3D entre Janvier 2005 et 2009. Trois épisodes majeurs ressortent nettement, en Mai 2007, Mars-Avril 2008 et Janvier 2009.

TABLE 3.3 – Caractéristiques des principaux épisodes de crise microsismique recensés sur le site de Cerville-Buissoncourt entre 2008 et 2009.

Date de début de crise	Durée	Énergie cumulée aux sondes 3D (J)	Nombre d'enregistrements
06/02/08	<24 h	1.20E-03	28
12 – 13/04/08	800 h	8.19E-02	12653
15 – 17/04/08	~72 h	4.82E-04	284
21 – 23/04/08	~72 h	7.13E-04	277
28/04/08	<24 h	9.19E-05	132
01/05/08	<24 h	3.98E-05	75
04/05/08	<24 h	1.39E-04	64
09 – 10/05/08	~48 h	4.93E-04	94
28 – 29/05/08	~48 h	4.11E-04	149
14/06/08	<24 h	1.15E-04	33
29/06/08	<24 h	1.23E-04	32
06 – 08/08/08	~72 h	7.25E-04	196
14 – 15/08/08	~48 h	1.33E-03	111
23/08/08	<24 h	1.98E-04	73
07/10/08	<24 h	1.74E-04	38
19/10/08	<24 h	3.73E-04	10
20 – 21/12/08	~48 h	3.38E-04	74
11/01/09	<24 h	5.95E-03	388
14/01/09	<24 h	1.31E-04	27
24/01/09	<24 h	2.60E-04	54

Localisation des événements :

Un échantillon d' $\sim 10\%$ du nombre total d'événements enregistrés entre Mars et Avril 2008, présentant un bon rapport signal sur bruit a été pointé manuellement puis localisé avec le logiciel SYTMISauto (cf. Chapitre 5).

La répartition spatiale de ces derniers montre (Figure 3.14) une migration progressive de la micro-sismicité induite en aval des pistes, vers le Nord, ainsi qu'une extension latérale des foyers, regroupés au centre de la cavité.

De fait, les événements, qui formaient un nuage orienté selon un axe NW-SE au début de la crise, ont ensuite migré vers l'Ouest, pour finir par s'étendre sur une direction E-W.

Par ailleurs, les événements les plus profonds, répartis en bordure de la cavité, se concentraient essentiellement sous le banc de Dolomie du côté de la piste 2100, tandis qu'ils se situaient de part et d'autre de ce banc raide au niveau de la piste 2200. Leur présence dans les terrains de recouvrement, à l'Est, augmente de manière significative au fur et à mesure de la crise.

Aussi, bien que l'erreur moyenne sur la localisation des foyers soit nettement supérieure à l'épaisseur du banc de Dolomie, il apparaît clairement que les bancs supérieurs au toit sont impactés par de grandes déformations et des ruptures.

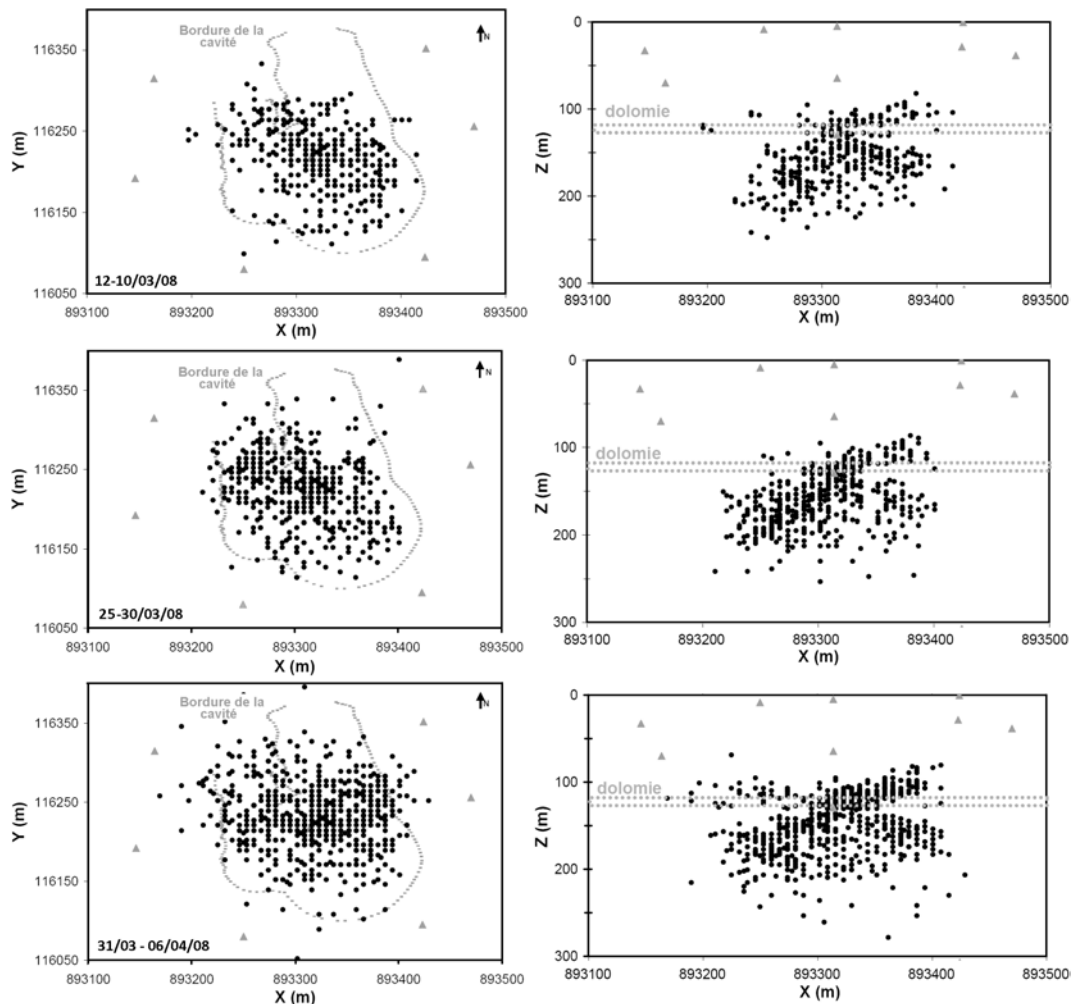


FIGURE 3.14 – Localisation des foyers microsismiques en plan (à gauche) et en coupe (à droite) entre Mars et Avril 2008. L'alignement apparent des événements est lié à la taille des mailles utilisée dans l'outil de localisation et fixée à $10 \times 10 \times 10 \text{ m}^3$.

3.2.1.1 Mesures de déformation en forage

Entre Mars et Avril 2008, les mesures extensométriques ont montré une accélération brutale des déplacements, allant jusqu'à quelques millimètres par jour, pour un total d'environ 8 mm sur les deux mois (Figure 3.11).

Suite à cela, la vitesse de déplacement s'est stabilisée à environ 0.02 mm/jour ; cette dernière restant pratiquement constante jusqu'en février 2009.

3.2.1.2 Mesures de l'affaissement en surface

Durant l'épisode microsismique entre Mars et Avril 2008, un affaissement cumulé de l'ordre de 7 mm est mesuré à l'aplomb de la cavité (Figure 3.15). En particulier, entre les 5 et 6 Avril, un déplacement brutal de ~3.5 mm est relevé. Notons qu'après cette période, l'affaissement en surface ralentit et cumule un total de seulement ~3 cm, au centre de la zone surveillée, en Février 2009.

En outre, la ligne de réflecteurs observée par le tachéomètre montre la formation d'une cuvette (Figure 3.15 b et c), cohérente avec les limites estimées de la cavité en 2008 et en accord avec une déformation d'ensemble des terrains de recouvrement. Sur les bords de cette dernière, l'affaissement, plus faible, se poursuit jusqu'à l'automne 2008. Il est suivi d'une phase de soulèvement, plus marquée à l'Est où la cavité est plus développée.

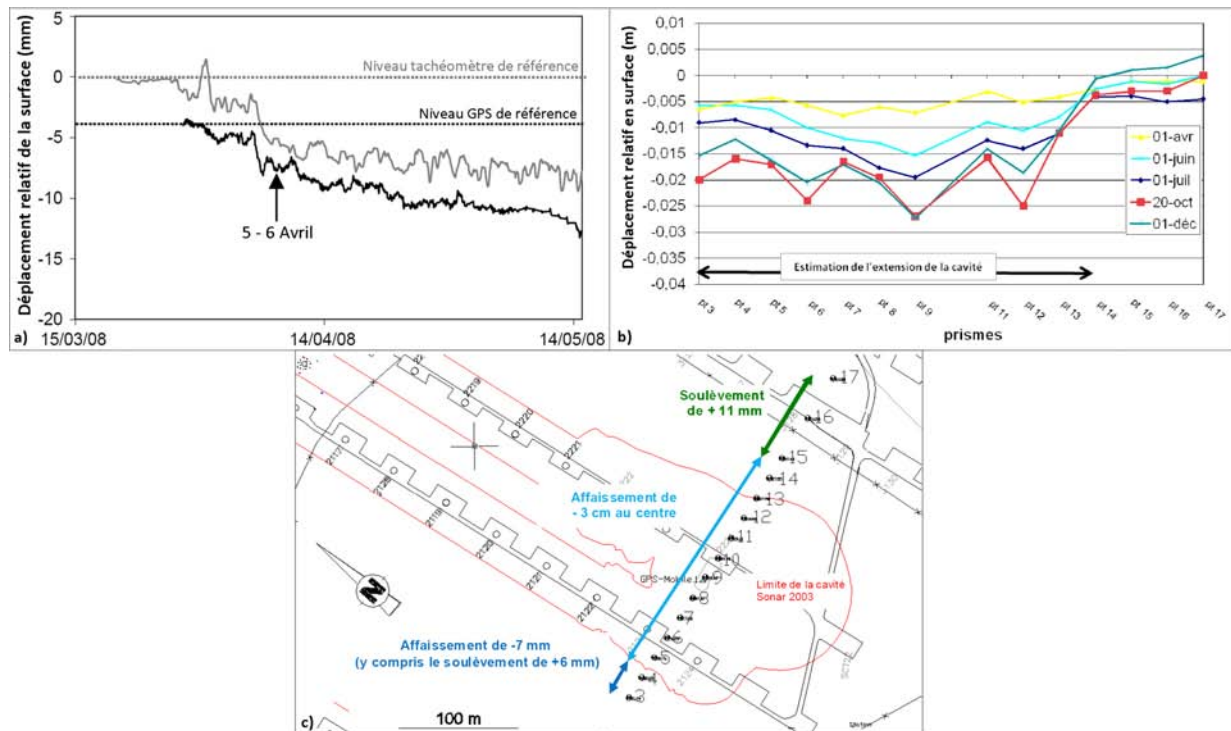


FIGURE 3.15 – En haut : variation relative du niveau de la surface estimée aux points de cible n°9 (en gris) et de mesure GPS (en noir) du 16/03/08 au 15/05/08 (à gauche) et évolution de la cuvette d'affaissement entre le 1er Avril et le 1er Décembre 2008 (à droite). En bas : affaissement de la surface à l'aplomb de la cavité en Janvier 2009.

3.2.1.3 Mesures de diagraphies

Les relevés diagraphiques effectués à intervalles réguliers par l'exploitant (Figure 3.16) montrent une évolution progressive de la cavité pouvant être reliée aux crises microsismiques. Ainsi, la crise du 6 Février 2008 peut être associée à la remontée du toit de quelques mètres, observée entre les profils de Novembre 2007 et fin Février 2008. Les crises de Mars-Avril 2008 semblent être corrélées à un

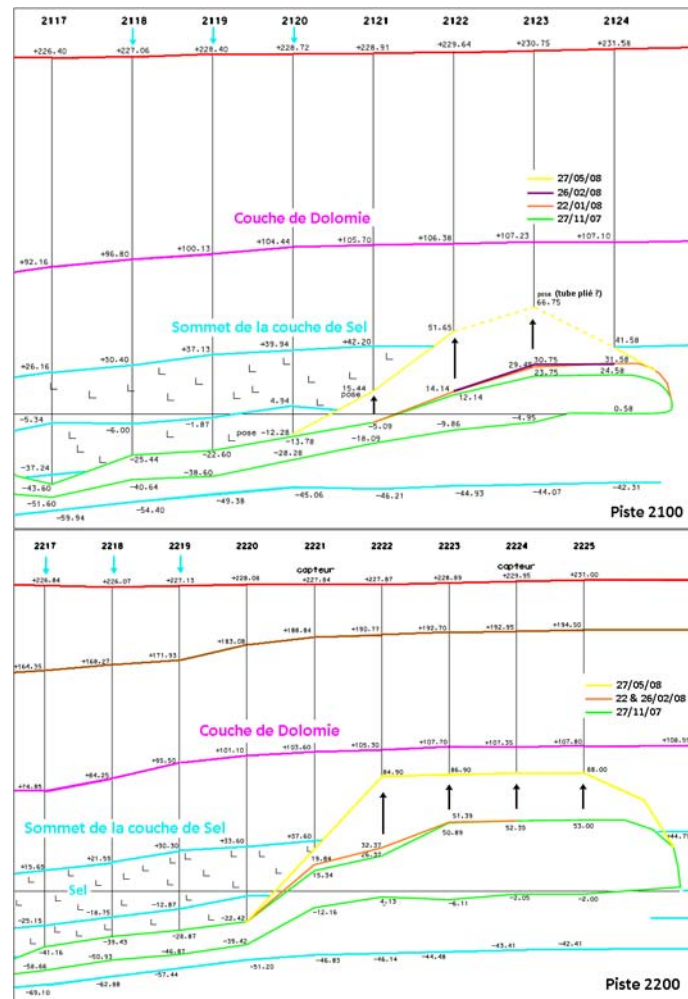


FIGURE 3.16 – Extrait des relevés diagraphiques réalisés entre 2007 et 2008 par la société SOLVAY le long des pistes 2100 (en haut) et 2200 (en bas).

décrochement massif de Marnes au toit de la cavité d' ~ 35 m de hauteur sur près de 200 m de long sur la partie Est de la cavité (2200), et d' ~ 20 m d'épaisseur sur une centaine de mètres de long sur sa partie Ouest (2100), soit un volume estimé d'environ 500000 m^3 .

Aussi, la cavité reste dissymétrique à cette période. Le toit était toujours moins profond le long de la piste 2200 où il avait probablement atteint le mur de la Dolomie, sur une surface estimée à 80×150 à 180 m^2 .

3.2.1.4 Mesures de pression

Des changements de pression de saumure dans la cavité accompagnent les crises microsismiques. Ainsi, des variations quasi-dynamiques, au moment où l'activité microsismique était maximale, ont mis en évidence l'alternance de phénomènes de chutes massives de blocs et de réajustements successifs de contraintes dans le toit.

Notamment, un premier pic de pression a été détecté le 03 Avril à 21h09 puis un second le 04 Avril à 08h34. Ce dernier pic a entraîné une variation de niveau de saumure de plus de 13 m en aval de la cavité, à plus de 1200 m de distance. Ce niveau est revenu à sa valeur initiale ~ 8 heures plus tard. Ce temps de relaxation de l'onde de pression s'explique probablement par une obturation partielle au niveau de l'entrée des pistes par la masse de blocs tombés.

Les données de surveillance ont montré que le rythme et l'ampleur de l'évolution de la cavité se

sont considérablement accentués avec la reprise de la dissolution. De fait, toutes les conditions semblaient réunies pour que lors du rabattement du niveau de saumure (exerçant une pression hydrostatique contribuant à soutenir et stabiliser les parois de la cavité) le massif et la Dolomie de Beaumont soient suffisamment sollicités pour conduire à l'effondrement. Ces opérations ont été planifiées par l'exploitant en Février 2009.

3.3 2009 : Pompage intensif & Effondrement provoqué de la cavité

Alors que la cavité avait atteint des dimensions critiques, un rabattement de saumure a été conduit par l'exploitant, afin de provoquer son effondrement dans des conditions maîtrisées. Ces opérations ont débuté le 10 Février 2009 vers 06h TU et se sont poursuivies jusqu'à l'effondrement généralisé de la cavité, survenu le 13 Février à 04h45 TU.

3.3.1 Protocole et scénarios envisagés

Initialement, deux étapes avaient été envisagées :

1. un rabattement du niveau de saumure sur ~ 120 m, par palier de 30 à 50 m, sur trois jours, pour atteindre le toit de la cavité ;
2. si nécessaire, des cycles rapides de charge/décharge, à partir du 3^{ème} jour, par injection/extraction.

De plus, compte tenu des incertitudes sur le comportement et la réponse du système surveillé, trois scénarios simples avaient été proposés :

1. une évolution lente et progressive de toutes les données de télémessure ;
2. une forte augmentation de l'activité microsismique, à l'instar des crises de 2008, essentiellement sous forme de rafales, mais sans évolution nette des données de déplacement en surface ;
3. une augmentation marquée de l'activité microsismique ainsi que des mesures GPS et tachéométriques, mettant en évidence le début de l'effondrement.

3.3.2 Historique des données enregistrées

Les mesures collectées durant ces opérations par les divers dispositifs de surveillances sont décrites ci-dessous.

3.3.2.1 Mesures de pression

La Figure 3.17 montre l'évolution du niveau de saumure, déduit des mesures de pression en aval de la piste 2100, durant les trois jours précédents l'effondrement généralisé. Ainsi :

- $\sim H - 70$, les opérations de pompage débutent, le niveau de saumure diminue de manière assez constante, de 203 à 163 m en côte NGF (soit ~ 27 à 67 m de profondeur) ;
- $\sim H - 63$, le pompage est arrêté ; le niveau de saumure se stabilise ;
- $\sim H - 46$, le pompage est repris ; la baisse du niveau de saumure est continue (cette dernière est plus lente que le jour précédent du fait que certaines pompes ne sont plus utilisées) ;
- $\sim H - 34$, une hausse quasi-instantanée de 9 m du niveau de saumure est constatée. Le pompage est stoppé momentanément. Il recommence quelques heures plus tard, mais devient insuffisant pour faire diminuer le niveau de saumure dans la cavité, qui s'élève inexorablement ;
- $\sim H - 20$, une élévation brutale de pression est mesurée. Notons qu'à ce moment, des bruits sourds sont entendus sur le site ;
- $\sim H - 9$, les puits entrent en éruption.

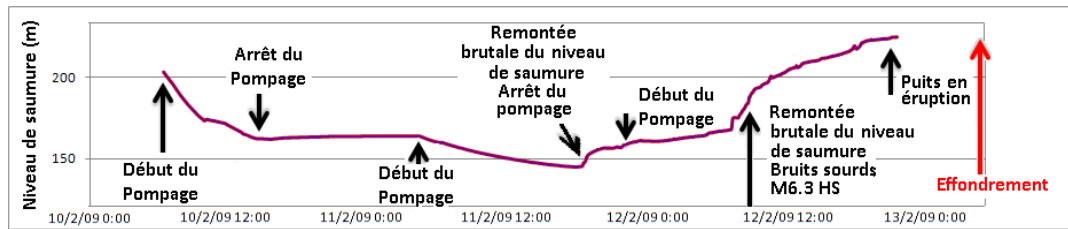


FIGURE 3.17 – Évolution par tranche horaire du niveau de saumure mesuré en aval de la piste 2100 durant la période d'effondrement.

3.3.2.2 Écoute Microsismique

La Figure 3.18 présente l'évolution du nombre d'événements détectés par jour entre Février 2008 et 2009. On constate que l'activité enregistrée pendant l'effondrement est considérablement plus importante que celle des crises ; ainsi durant cette période, ~ 50000 événements ont été décelés dont plus de 30000, uniquement sur les trois jours d'opération.

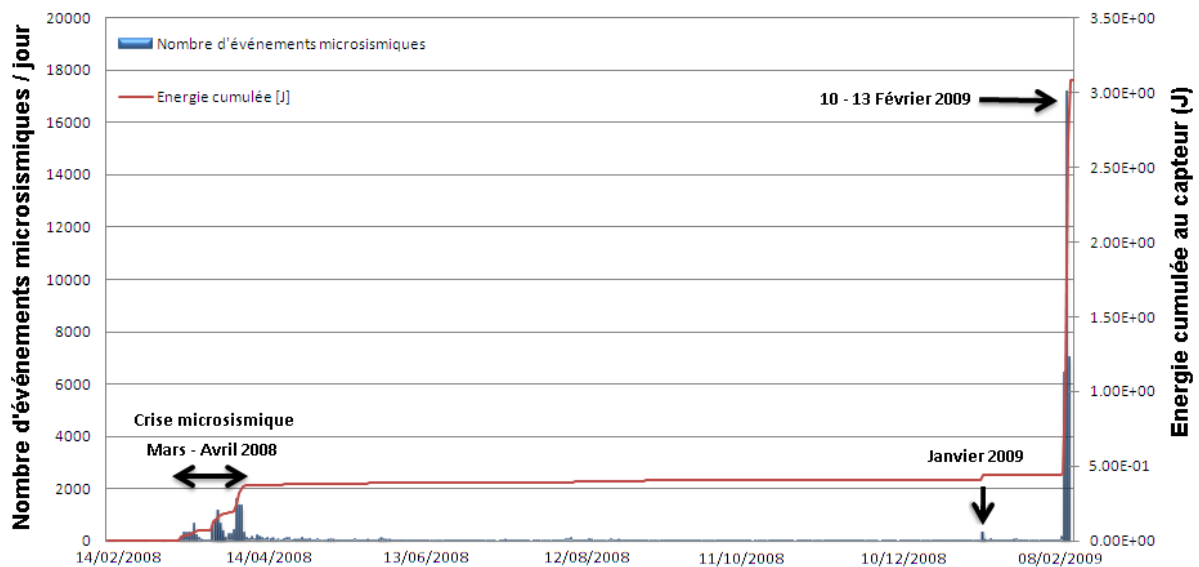


FIGURE 3.18 – Histogramme du nombre d'enregistrements microsismiques par jour et courbe de l'énergie cumulée aux sondes 3D entre Février 2008 et 2009.

La Figure 3.19 montre le nombre d'événements décelés par tranche horaire durant la période d'effondrement. Il s'ensuit que :

- durant les premières heures de pompage, le nombre d'événements enregistrés reste faible (< 10 par heure en moyenne) ;
- ~ H – 46 il augmente légèrement et passe à ~50 par heure en moyenne ;
- ~ H – 34, un premier pic d'activité, avec plus de 1600 événements est observé. Après cela, la microsismicité diminue mais reste assez soutenue ;
- ~ H – 20, un deuxième pic d'activité, avec près de 2600 événements est enregistré. La sonde M6.3 est perdue (à 08h43 TU) et dans les heures qui suivent, l'activité microsismique se réduit ;
- ~ H – 9, l'activité microsismique s'accroît de nouveau, allant jusqu'à 1700 événements/h et reste soutenue jusqu'à l'effondrement.

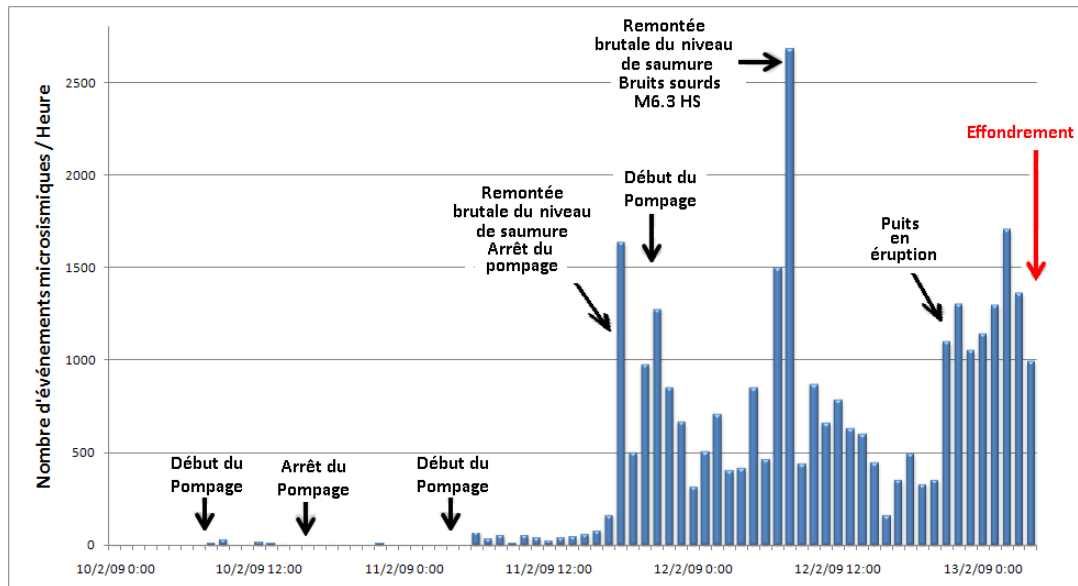


FIGURE 3.19 – Évolution du nombre d'événements microsismiques enregistrés par tranche horaire durant la période d'effondrement.

3.3.2.3 Écoute Hydro-Acoustique

Les RMS (Root Mean Square) de tous signaux ont été calculés. Ces derniers sont définis comme la puissance efficace du signal, par :

$$RMS = \frac{1}{T} \int_T s^2(t) dt \quad (3.1)$$

avec :

- $s(t)$: le signal temporel ;
- T : sa période.

La Figure 3.20 présente les RMS cumulés enregistrés pour les basses et hautes fréquences des voies 1, située au centre de la cavité, et 2, positionnée à l'extérieur de la zone d'effondrement. La Figure 3.21 décrit l'évolution des RMS mesurés en continu. L'analyse de ces courbes montre que :

- les RMS augmentent légèrement dès le début du pompage, à la fois pour les voies basses et hautes fréquences ;
- $\sim H - 34$, les pentes de toutes les courbes RMS changent radicalement. Notons que cette augmentation est plus importante pour la voie 1, cette dernière entrant en régime continu ;
- $\sim H - 30$, les courbes de RMS de la voie 2 se stabilisent relativement, tandis que l'activité enregistrée sur l'autre voie reste importante ;
- $\sim H - 21$, les RMS de la voie 2 ré-augmentent de manière intense. L'hydrophone de la voie 1 est perdu à ce moment-là ;
- $\sim H - 19$, les courbes des RMS restants s'horizontalisent ;
- $\sim H - 9$, l'activité enregistrée par la voie 2 basse fréquence augmente de nouveau, jusqu'à l'effondrement généralisé.

N.B. : L'analyse et interprétation des données hydro-acoustiques antérieures à l'effondrement n'étaient pas encore disponibles, à la rédaction de ce mémoire.

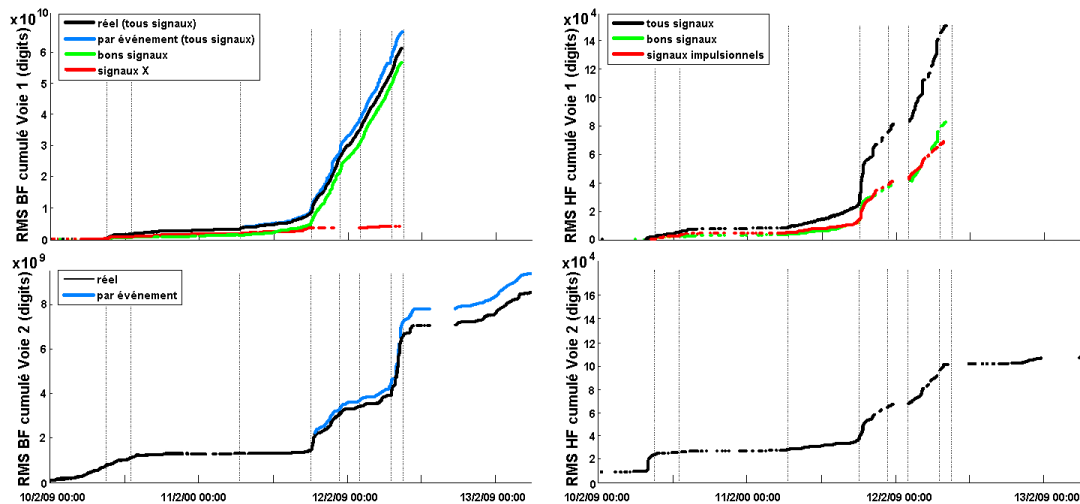


FIGURE 3.20 – Courbes de cumul RMS des Emissions Acoustiques dans les basses et hautes fréquences durant l’effondrement (d’après Rapport annuel du GISOS 2009, modifié).

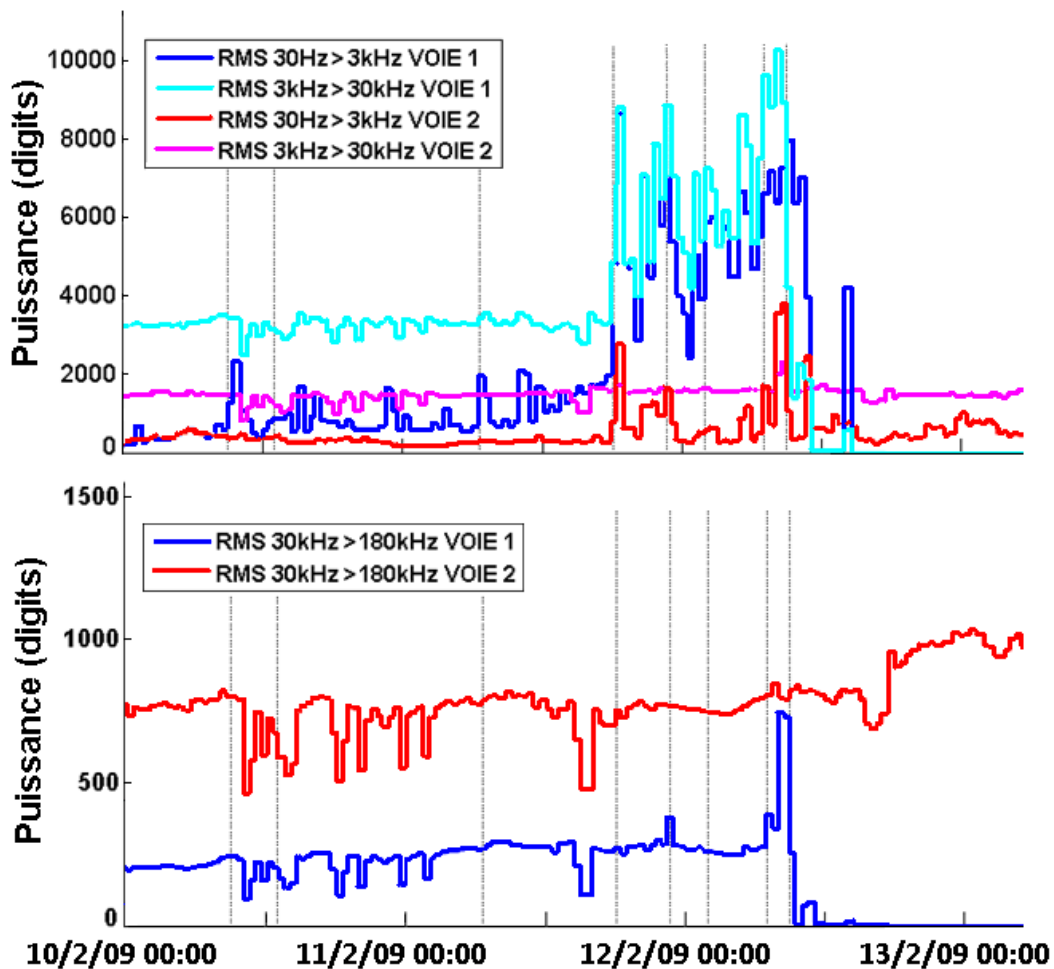


FIGURE 3.21 – Évolution des RMScont durant l’effondrement (d’après le Rapport annuel du GISOS 2009, modifié).

3.3.2.4 Suivi sismologique Large-Bande

Les résultats issus du suivi sismologique large-bande montrent que :

- $\sim H - 45$, les premiers microséismes sont enregistrés sur les sismomètres large-bande ;

- $\sim H - 34$, le nombre de microséismes augmente de manière significative. Néanmoins, aucun signal de type VLP (Very Long Period) n'est relevé ;
- $\sim H - 29$, les séismes VLP semblent apparaître ;
- $\sim H - 26$, leur nombre augmente ;
- $\sim H - 14$, plus aucun signal VLP n'est détecté ;
- $\sim H - 5$, une série de microséismes et VLP se produisent ;
- $\sim H - 0h45$, un relatif calme est observé dans toutes les fréquences. Au moment de l'effondrement, un seul signal longue-période de ~ 25 s est visible, suivi d'une oscillation sur plusieurs minutes de ~ 12 s de période. Notons que d'autres événements de ce type se sont produits par la suite.

Par ailleurs, l'analyse des hautes fréquences des signaux des enregistrements sismologiques et des accéléromètres, semble indiquer que l'effondrement généralisé, qui a duré environ une minute, se divise en deux phases : la partie Est du toit s'écroulant avant la partie Ouest.

3.3.2.5 Suivi gravimétrique

Les enregistrements ont été effectués en continu entre les 09 et 16 Février 2009 (Figure 3.22).

Après diverses corrections apportées aux mesures, on observe, au premier ordre, une augmentation de pesanteur de l'ordre de 20 microgal au moment de l'effondrement généralisé. Cette analyse, encore en cours, devrait permettre de quantifier la masse éboulée.

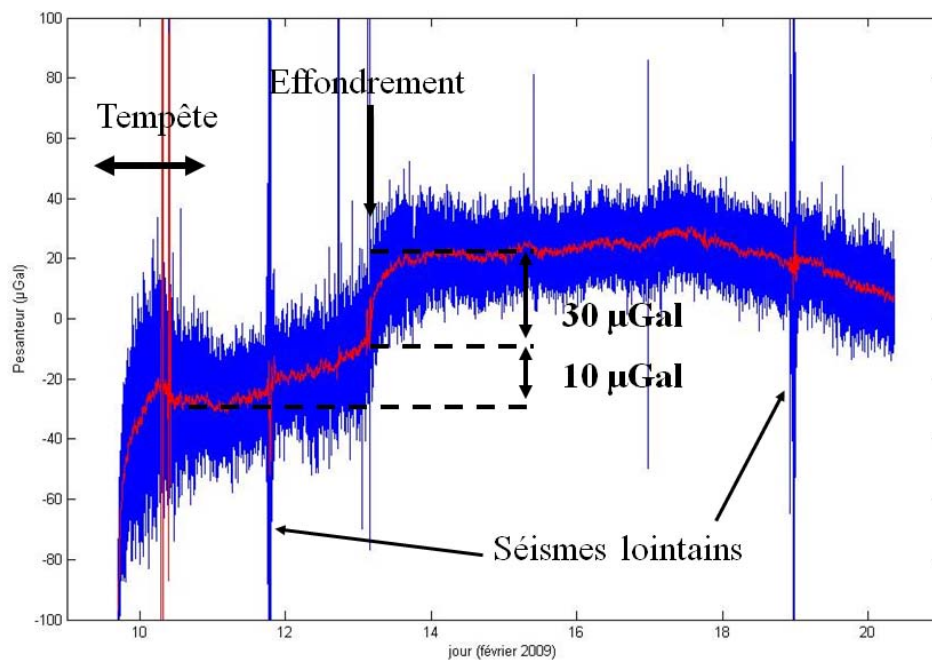


FIGURE 3.22 – Variations de la pesanteur observée au moment de l'effondrement de la cavité de Cerville (d'après le Rapport annuel du GISOS 2009). La courbe bleue est l'enregistrement (1 donnée par 15 secondes) après élimination de la dérive instrumentale et de la marée terrestre. La courbe rouge est une interpolation (méthode Savitsky-Golay) permettant de quantifier les variations.

3.3.2.6 Mesures de déformation en forage

Les déformations mesurées par les extensomètres sont tracées sur la Figure 3.23.

Aussi, les déplacements des ancrages étant ici accompagnés d'importants affaissements en surface (et donc du point de mesure censé rester fixe), il est impossible d'estimer précisément le fléchissement des couches. Néanmoins, l'étude des variations des valeurs déterminées permet d'avoir un indicateur intéressant quant à l'évolution du recouvrement. En outre, les instants de pertes de mesure donnent des

informations importantes sur le comportement du recouvrement et sur la cinétique de la rupture ; ces derniers correspondant au décollement de la cimentation d'une base et donc à l'apparition d'une fissure franche à ce niveau.

Il s'ensuit que :

- $\sim H - 70$, des déplacements inframillimétriques sont observés dès le début du pompage ;
- $\sim H - 63$, la déformation des extensomètres s'arrête ;
- $\sim H - 48$, un peu plus de deux heures après la reprise du pompage, des déplacements sont de nouveau signalés ;
- $\sim H - 34$, les extensomètres montrent un fort décrochement d'environ 5 mm et les déformations s'accroissent ;
- $\sim H - 20$, l'ancrage positionné à 129 m de profondeur, dans le banc raide disparaît ; celui fixé à 125 m, dans la partie supérieure du banc s'est décollé quant à lui environ 1h30 plus tard ;
- $\sim H - 17$, la base située dans les Marnes irisées supérieures, à 113 m de profondeur est perdue.

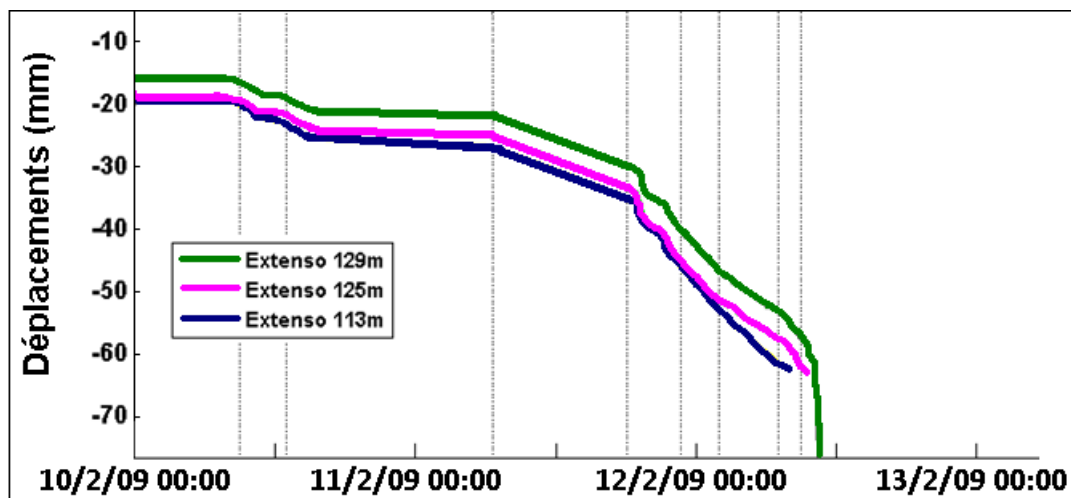


FIGURE 3.23 – Évolution des mesures extensométriques durant la période d'effondrement (d'après le Rapport annuel du GISOS 2009, modifié).

3.3.2.7 Mesures de l'affaissement en surface

Les mesures tachéométriques et de l'antenne GPS ont permis de suivre l'affaissement en surface jusqu'à respectivement ~ 10 heures et une vingtaine de minutes avant l'effondrement généralisé (Figure 3.24). On observe que :

- $\sim H - 70$, un premier décrochement est détecté au début des opérations. Cependant, les déplacements en surface restent faibles ; l'amplitude maximale atteinte au moment où le niveau de saumure était le plus bas étant inférieure à 10 cm. Notons que toutes les cibles tachéométriques subissent cet affaissement, la cuvette s'accroissant petit à petit ;
- $\sim H - 34$, les mouvements en surface s'accroissent légèrement, arrivant à des vitesses de ~ 0.02 m/h ;
- $\sim H - 20$, le taux subsidence augmente une nouvelle fois, ce dernier étant de l'ordre de ~ 0.1 m/h ;
- $\sim H - 9$, l'affaissement accélère encore, jusqu'à atteindre une vitesse instantanée de 1m/h une vingtaine de minutes avant l'effondrement final. La subsidence cumulée observée est alors de 4 m. Le cratère formé, aux bords très francs, mesure ~ 150 m de diamètre.

À l'inverse des crises, une évolution notable des mesures est détectée sur l'ensemble des instruments. Aussi, les principales étapes définies concordent-elles d'un dispositif à l'autre.

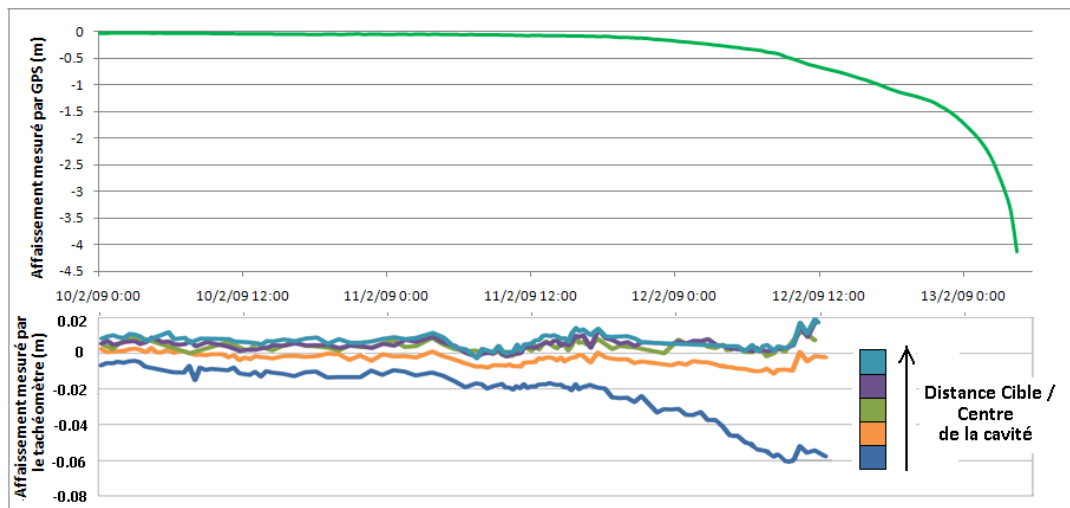


FIGURE 3.24 – Évolution de l'altitude mesurée par GPS et tachéomètre durant la période d'effondrement.

3.3.3 Modélisations numériques prédictives

En s'appuyant sur les données *in situ* acquises entre 2003-2004, diverses modélisations numériques ont été effectuées afin de définir les conditions d'apparition du premier effondrement en amont des pistes. Ces dernières se focalisent sur l'incidence de la diminution du niveau de saumure dans la cavité par rapport à la propagation de l'endommagement dans le recouvrement et l'initiation de la rupture du banc raide.

Remarques : Tous les modèles sont quasi-statiques, la propagation des ruptures dans le temps et donc les éventuels transferts dynamiques de contraintes entre elles ne sont pas considérés. De plus, les changements de régime liés à la remontée progressive de la cavité dans les Marnes à anhydrites ou à leur dégradation au contact de la saumure n'ont pas été simulés. En particulier, la cinétique précise de ces phénomènes est difficile à établir à l'échelle du massif, pouvant être ralenti par certains bancs d'anhydrites massives ou encore accélérés par la présence d'une fissuration, dans cette formation fortement hétérogène.

3.3.3.1 Daupley et Laouafa (2003)

Daupley et Laouafa (2003) ont mis au point un modèle numérique tenant compte du comportement rhéologique des principaux faciès intervenant dans l'effondrement, i.e. Dolomie de Beaumont, Marnes à anhydrites et Sel (les couches supérieures étant supposées homogènes). Les différentes étapes de la démarche adoptée sont décrites ci-dessous.

Esquisse analytique des conditions de rupture du banc de Dolomie de Beaumont :

Tout d'abord, une approche analytique simple a été employée afin d'estimer les mécanismes de rupture du banc raide. Ce dernier a ainsi été considéré sous forme d'une plaque circulaire, encadrée sur tout son pourtour et soumise à une charge uniformément répartie (poids des terrains de recouvrement). Il en résulte que :

- la rupture en traction est beaucoup plus précoce que celle en cisaillement et ce, quelque soit le diamètre de plaque étudié ;
- le banc de Dolomie de Beaumont ne peut être totalement élastique ; une plastification partielle est nécessaire pour pouvoir retranscrire les mesures telles que l'affaissement en surface ;
- la présence de saumure soulage le banc raide (supposé imperméable) en exerçant à sa base une poussée verticale ascendante.

Définition du modèle numérique et des hypothèses utilisées :

Une approche numérique, plus adaptée au contexte, a ensuite été employée. Cette dernière s’appuie sur le code de calcul VIPLEF (VIscO-PLasticité par Éléments Finis, version 011208), développé par MINES ParisTech, en particulier pour la modélisation des ouvrages en milieu salifère.

Le modèle quasi-statique considère une cavité de forme cylindrique, entourée de faciès ayant un comportement rhéologique "élastoplastique radoucissant" (Mohr-Coulomb). La fissuration des matériaux s’initie et se propage une fois leur critère d’endommagement atteint, conduisant progressivement à une perte quasi totale de leur cohésion.

Pour les conditions initiales, un état de contrainte isotrope, sans cisaillement a été supposé. Les effets de dissolution ou dégradation des matériaux au contact de la saumure étant négligés, les deux seules sollicitations prises en compte sont : la gravité agissant sur tout le massif et la pression s’exerçant sur les parois de la cavité (Figure 3.25). Cette dernière a ensuite été réduite graduellement selon un facteur λ allant de 1 (état géostatique initial) à 0 (cavité vide) dans les simulations numériques effectuées. La valeur seuil $\lambda = 0.5$ définit le passage entre la prise en compte ou non de la pression de saumure.

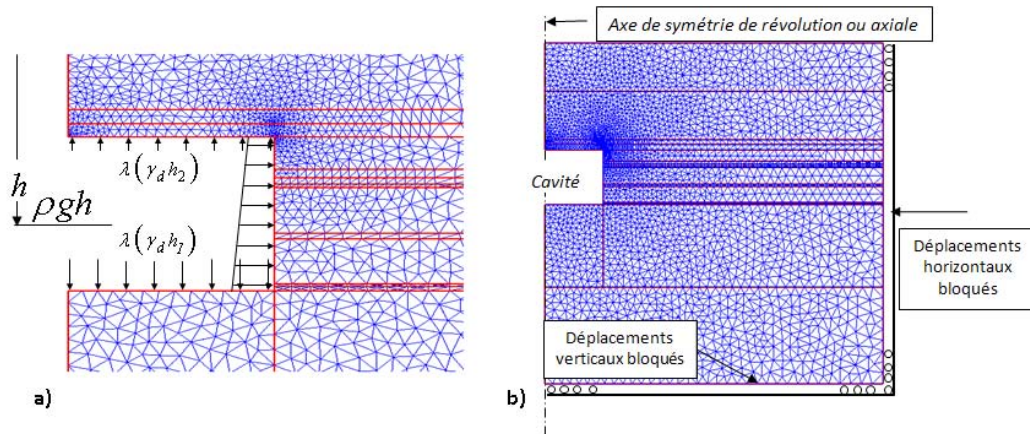


FIGURE 3.25 – (a) Sollicitations aux parois de la cavité et (b) maillage utilisé (d’après [96]).

Analyse paramétrique et calage du modèle numérique de base :

La rétro-analyse d’effondrements documentés survenus à quelques kilomètres du site de Cerville-Buissoncourt, dans des contextes géologiques similaires, a permis de fournir des informations indispensables, pour caler et tester le modèle élaboré. Les cas étudiés étaient ceux (Tableau 3.4) :

TABLE 3.4 – Données dimensionnelles de rétro-analyse des effondrements survenus à l’aplomb des cavités à Haraucourt et à Gellenoncourt (d’après [96], modifié).

			Haraucourt (SOLVAY)		Gellenoncourt (CSME)
			Piste 700	Piste 800	
Mesures avant effondrement	Profondeur du Toit (m)	Gisement Dolomie	170	155	220
		Cavité	105	95	136 / 137
			115	130-140	145-146
	Dimensions du Toit de la cavité		$\geq 80 \times 160 \text{ m}$, rayon $\sim 64 \text{ m}$	$\sim 90 \times 150 \text{ m}$, rayon $\sim 65 \text{ m}$	$> 25 \times 75 \text{ m}$, rayon $\geq 25 \text{ m}$
Affaissement maximal		-2.8 cm	-6.8 cm	-	
Conditions hydrauliques		Cavité remplie de saumure		Cavité vide	
Dimensions du cratère initial			120-130 m ²	150x120 m	60 x 90 m

1. des **pistes 700 et 800 à Haraucourt**, en 1975 puis 1978, exploitées elles-aussi par SOLVAY par la méthode des pistes et sondages :
 - ces cavités ont progressé dans les Marnes à anhydrites en formant une cloche dont les parements avaient un angle de ~ 25 à 40° ;
 - l’effondrement s’est produit alors que la cavité, remplie de saumure, était remontée jusqu’au mur de la Dolomie pour la piste 700 et à 25-35 m sous ce banc raide pour la piste 800, respectivement 5 et 3 ans après que le toit du sel ait été atteint. Cette différence s’expliquerait par les variations de dimensions des cavités, ainsi que la présence d’une faille en amont de la piste 800 ;
 - des mouvements en surface de quelques millimètres à 2-3 cm ont été mesurés alors que la couche de sel était encore en place. Une accélération de l’affaissement a ensuite été notée lorsque la cavité progressait dans les Marnes, conduisant à des valeurs maximales observées de ~ 3 cm pour la piste 700 et 7 cm pour la piste 800, 1,5 à 2 ans avant l’effondrement ;
2. des **cavités SG4 et SG5 de l’exploitation CSME à Gellenoncourt** en 1998. Ici, la méthode d’exploitation était extensive. Elle visait à créer un ensemble maillé de cavités connectées à leur base et de conserver l’intégrité du recouvrement en laissant un banc de sel d’une épaisseur suffisante au toit. Cependant, une cavité unique s’était formée au niveau des mailles SG4 et SG5 et avait migré dans le recouvrement pour rejoindre le mur de la Dolomie. Il a alors été décidé de provoquer l’effondrement, d’abord en abaissant la pression de saumure puis en reprenant la dissolution pour agrandir la cavité. La profondeur du banc raide étant supérieure d’une trentaine de mètres à celle mesurée sur les pistes d’Haraucourt et la pression de saumure ayant été supprimée, l’effondrement est apparu pour des dimensions de cavité assez faibles d’environ 25×75 m.

Les résultats obtenus avec le modèle numérique sont conformes aux observations tant sur le plan qualitatif (forme des cratères initiaux globalement circulaires) que quantitatifs (dimensions et positions des cavités). En outre, ils confirment que le principal mécanisme initiateur de l’effondrement est la rupture en traction du banc raide. De fait, une diminution de pression dans la cavité entraîne une flexion de ce dernier. Il en résulterait alors une décharge du banc en partie centrale, ainsi qu’un report de charge et la naissance de cisaillements sur ses appuis.

Modélisations numériques appliquées à différentes configurations géométriques des pistes :

Le modèle a été appliqué au site de Cerville-Buissoncourt (Figure 3.26), en considérant la géométrie définie par les mesures sonars en Juin 2003 ou en supposant que la cavité avait atteint (pour les deux pistes) :

- les Marnes à anhydrites, pour étudier la progression de leur plastification et obtenir l’intersection de l’angle limite du cône d’effondrement des Marnes avec le banc de Dolomie (Figure 3.27 a) ;
- le mur du banc raide, afin de déterminer le diamètre minimal de la cavité conduisant à sa rupture (Figure 3.27 b et c).

Le croisement des résultats des divers calculs montrent que :

- en Juin 2003, la cavité était stable avec ou sans pression de saumure. Ceci tenait du fait que ses dimensions étaient encore bien inférieures aux valeurs critiques conduisant à l’initiation de l’effondrement. En particulier, la présence de Marnes à anhydrites soulageait le banc de Dolomie et empêchait sa rupture ;
- les conditions nécessaires (mais non suffisantes) pour l’apparition du premier effondrement sont :
 1. en présence de saumure : un rayon critique de la cavité compris entre 40 et 50 m au mur du banc raide, soit 65 à 80 m au toit du sel, pour un angle de propagation de la cloche d’éboulement dans les Marnes allant de 20 à 30° par rapport à la verticale ;
 2. en l’absence de pression de saumure : un rayon équivalent de l’ordre de 30 m au mur du banc de Dolomie soit ~ 45 m au toit du sel.

Ces dimensions induisent des valeurs critiques de flexion du banc raide inférieures à 10 cm (Figure 3.27 c), soit un affaissement en surface estimé à 2-3 cm (Figure 3.27 b).

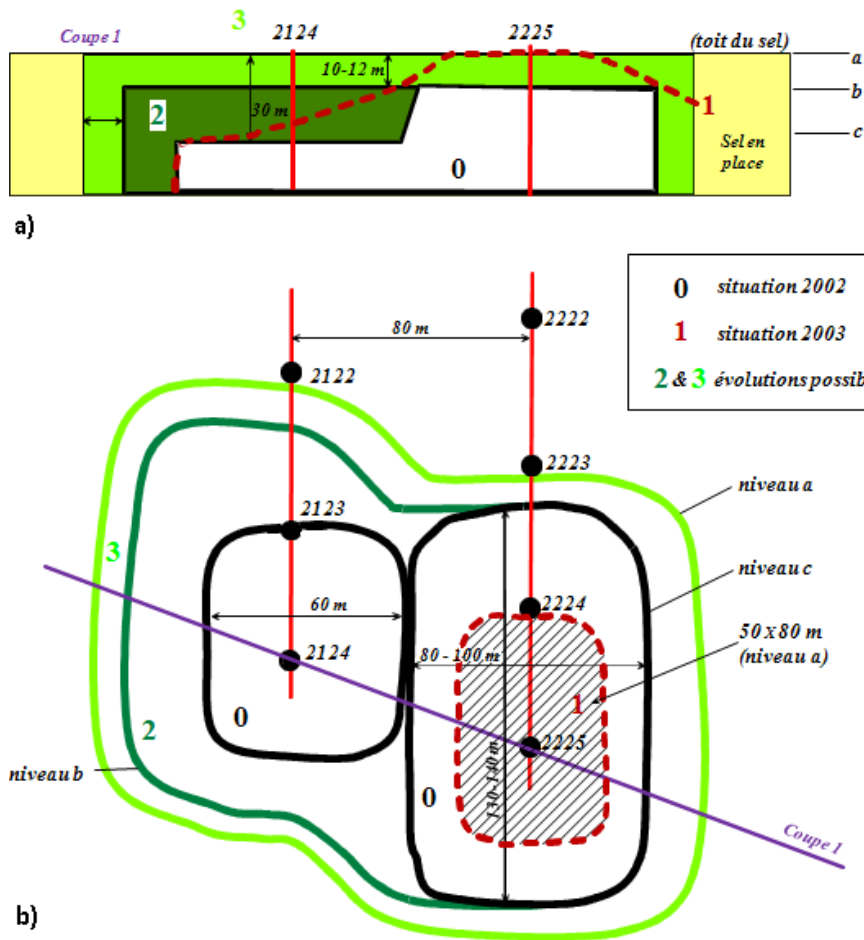


FIGURE 3.26 – a) Représentations schématiques en coupe et b) en plan des cavités des pistes 2100 et 2200. Situation en 2002-2003 et évolutions possibles. (d'après [96]).

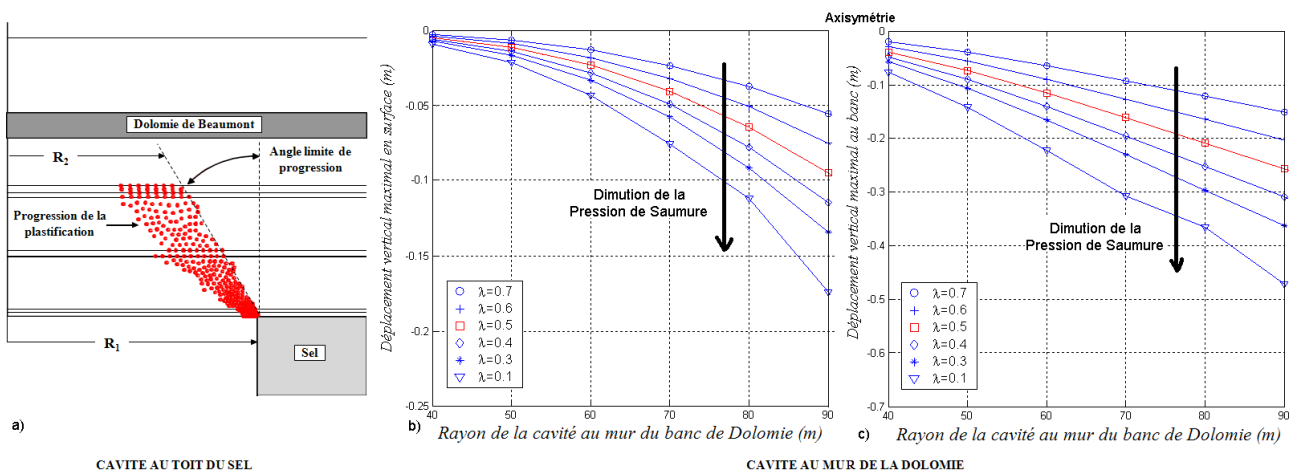


FIGURE 3.27 – Évolution de la plasticité dans les Marnes à anhydrite (a) ainsi que de l'affaissement en surface (a) et du déplacement vertical du banc (en flexion, b) en fonction du rayon et de la pression de saumure dans la cavité (λ allant de 0.7 à 0.1) (d'après [96]).

3.3.3.2 Mercerat (2007)

D. Mercerat a développé des modèles géomécaniques en 2D, en considérant une section transversale fixée à la dimension maximale de la cavité, mesurée en 2003 (Figure 3.26). En tenant compte des mêmes formations et contraintes que celles citées dans le paragraphe précédent, deux approches ont été utilisées

(Figure 3.28) :

1. continue, à l'aide du code aux différences finies FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua), en supposant tous les faciès élastoplastiques ;
2. continue/discrète, en se servant de :
 - FLAC pour modéliser les couches marneuses et le sel, au comportement mécanique allant de l'élasticité à l'élastoplasticité avec écrouissage ;
 - PFC^{2D} (Particle Flow Code) pour simuler le comportement élastoplastique du banc raide et pouvoir représenter explicitement l'initiation, la propagation et la coalescence des microfissures dans ce dernier.

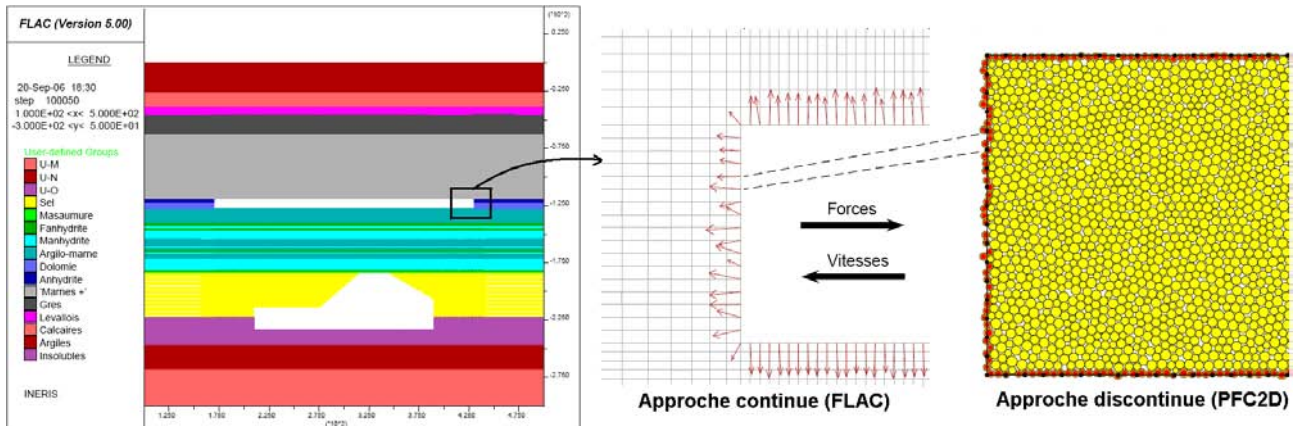


FIGURE 3.28 – Modèle hybride FLAC-PFC^{2D} du site de Cerville-Buissoncourt. Détail de l'inclusion PFC^{2D} et maillage FLAC avec les forces appliquées aux segments de la frontière (d'après [97]).

En outre, différents scénarios ont été établis, en modifiant le niveau de rabattement de la saumure ainsi que les propriétés mécaniques des Marnes à anhydrites (diminution des valeurs de cohésion/angle de frottement mesurés en laboratoire pour tenir compte d'un effet d'échelle ou utilisation du critère d'endommagement Mohr-Coulomb défini par Daupley et Laouafa (2003)).

Les résultats obtenus, qualitativement identiques pour les deux méthodes, indiquent que :

- les caractéristiques mécaniques des Marnes jouent un rôle prépondérant dans l'apparition et la cinétique de rupture du banc de Dolomie de Beaumont : elles conditionnent la vitesse de remontée de la plasticité jusqu'à sa base et l'étendue des zones plastiques va influencer sur la position de ses appuis et les fractures associées ;
- le banc raide se fracture essentiellement en traction. En effet, plus de 90% des microfissures sont de ce type (Figure 3.29 a) ;
- il commence à se rompre pour un rabattement de saumure de ~130 à 160 m de profondeur, soit une diminution de 0.28 à 0.64 MPa de pression sur le toit de la cavité. De fait, lorsque ces valeurs sont dépassées, l'apparition de microfissures s'accroît (Figure 3.29 a). La coalescence de ces dernières produisent des ruptures, d'abord sur la partie supérieure de la couche, à l'aplomb des appuis (Figure 3.29 b), puis à la base de la zone centrale, parallèles à l'arc de compression maximale.

Notons que ces calculs donnent une valeur de flèche critique au niveau du banc raide de l'ordre de 8 cm, à la rupture.

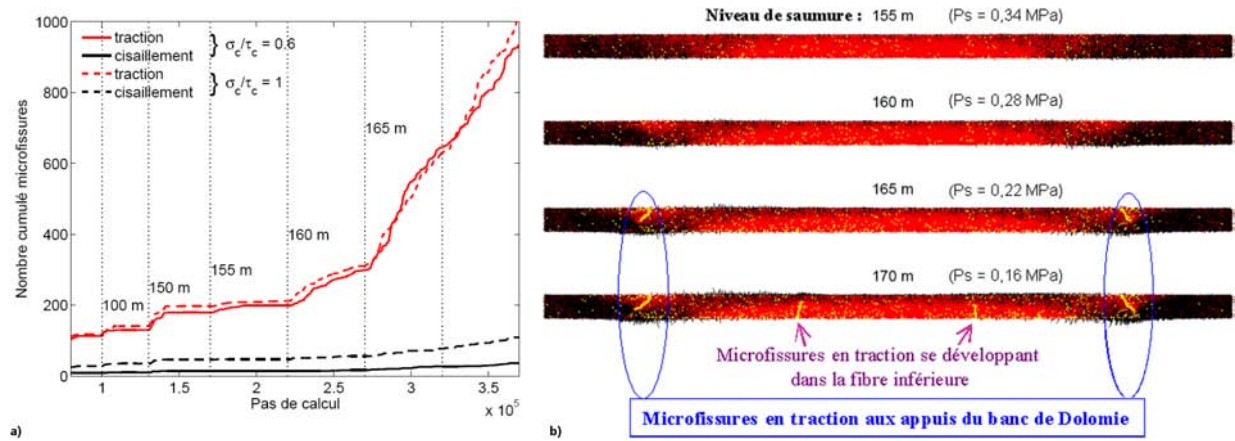


FIGURE 3.29 – a) Évolution du nombre de microfissures en traction/cisaillement pour la modalité Mohr-Coulomb ; les lignes verticales représentent les différentes étapes de la vidange de la cavité. b) Inclusion PFC^{2D} à différentes étapes de la vidange (niveaux de saumure entre -100 et -170 m, d'après [97]).

Ces modélisations permettent d'appréhender les mécanismes d'effondrement des pistes de Cerville-Buissoncourt. En particulier, les ruptures dans le banc de Dolomie de Beaumont seraient générées plutôt en traction qu'en cisaillement (i.e. onde S peu / ou pas visible sur les enregistrement des signaux microsismiques) ; les zones les plus sollicitées étant situées au niveau des appuis et de la partie centrale. Notons cependant que les valeurs critiques estimées, tels que l'affaissement en surface ou le fléchissement du banc raide, mesurables in situ, doivent être prises avec précaution du fait des hypothèses de calcul de base.

L'ensemble des données collectées permet d'appréhender un scénario d'évolution généralisé. Aussi, avant de discuter de ce dernier (Chapitre 6) et dans l'optique de le compléter, nous allons nous focaliser sur l'analyse approfondie des signaux microsismiques et sur leurs résultats, notamment en termes de définition des signes précurseurs à l'effondrement et d'évolution spatio-temporelle des ruptures.

Chapitre 4

Signature des événements microsismiques

4.1	Discrimination des événements de type Isolés / Rafales	73
4.2	Amplitude	76
4.2.1	Estimation de l'amplitude maximale par tranche horaire	76
4.2.2	Comparaison entre les Crises et l'Effondrement	76
4.2.3	Rapports d'amplitude	81
4.2.4	Comparaison entre les ondes P et S	83
4.2.5	Conclusions sur l'évolution en amplitude	83
4.3	Énergie au capteur	84
4.3.1	Estimation de l'énergie enregistrée au capteur	84
4.3.2	Comparaison entre les Crises et l'Effondrement	84
4.3.2.1	Énergie cumulée au capteur	84
4.3.2.2	Énergie au capteur par événement	87
4.3.3	Rapports d'énergie au capteur	91
4.3.4	Comparaison entre les ondes P et S	92
4.3.5	Conclusions sur l'évolution en énergie au capteur	93
4.4	Fréquence Fondamentale apparente	94
4.4.1	Détermination de la fréquence fondamentale des signaux	94
4.4.1.1	Estimation	94
4.4.1.2	Élimination des valeurs aberrantes	94
4.4.2	Comparaison entre les Crises et l'Effondrement	95
4.4.3	Causes des différences de fréquences calculées entre les voies des sondes 3D ?	100
4.4.3.1	Comparaison entre les ondes P et S	100
4.4.3.2	Comparaison entre les écarts en amplitude et en fréquence des signaux	102
4.4.4	Conclusions sur l'évolution de la fréquence fondamentale apparente	102
4.5	Comparaison entre l'évolution des Amplitudes, Énergies au capteur et Fréquences des Événements	103
4.6	Paramètre β	104
4.6.1	Estimation du paramètre β	104
4.6.2	Comparaison entre les périodes de Crises, Inter-Crises et l'Effondrement	105
4.6.3	Détermination de la taille de la fenêtre glissante optimale	107
4.6.4	Conclusions sur l'évolution du paramètre β	108
4.7	Conclusions sur la signature des événements microsismiques	108

Dans ce chapitre, nous allons décrire les principales informations tirées de l'analyse de la signature des événements microsismiques issus du réseau de Cerville-Buissoncourt, en termes de type d'événements (isolé ou rafale), amplitudes, énergies au capteur, fréquences fondamentales et paramètre β .

Une comparaison sera effectuée entre les événements se produisant lors des trois jours d'opérations qui ont précédé l'effondrement généralisé de la cavité (du 10 au 13 Février 2009) et ceux enregistrés sur un intervalle de temps similaire, pendant une des crises de Mars-Avril 2008 (du 03 au 06 Avril, la plus forte en nombre d'événements), afin d'évaluer les similitudes et différences entre ces deux périodes d'activité. Notons qu'une comparaison avec des crises antérieures ou postérieures permet d'aboutir aux mêmes conclusions (cf. Annexes B).

De plus, les événements dits "isolés" seront systématiquement confrontés à ceux de type "rafale" et les caractéristiques des ondes P et S (lorsqu'elles ont pu être pointées) ont également été discriminées.

Enfin, étant donné le nombre particulièrement élevé d'enregistrements, dans les figures suivantes, il a été entrepris de regrouper les événements par tranche horaire (indiquée en heures TU) afin de faciliter la lecture et l'interprétation des données.

4.1 Discrimination des événements de type Isolés / Rafales

Entre Janvier 2005 et Mai 2009, 59906 enregistrements ont été effectués. Les sismogrammes comportent deux types d'événements :

- isolés sur les fenêtres d'enregistrement, d'une durée généralement inférieure à 0,5 s ;
- "en rafale", se traduisant par l'occurrence quasi simultanée d'événements d'amplitudes variables, rendant délicate l'association des temps d'arrivée entre les différentes sondes du réseau.

Aussi, D. Mercerat (2007) a discriminé visuellement ces événements sur une centaine d'enregistrements réalisés en 2005. Cet exercice étant extrêmement fastidieux pour l'ensemble de la base de données, un critère automatique a été appliqué. Ce dernier repose sur un seuil en amplitude des signaux atteint en début de fenêtre (égal à 50 digits, i.e. la valeur maximale du bruit) ; les intervalles dits de "pré-événement", censés assurer l'enregistrement du début de l'événement, n'étant pas respectés lors de déclenchements "en rafale".

Trois types de rafales coexistent dans la sélection effectuée (Figure 4.1) :

1. des événements pouvant être isolés dans la fenêtre d'enregistrement ;
2. des événements indissociables (les plus nombreux), pouvant être superposés les uns sur les autres, où les temps d'arrivée ne peuvent être pointés ;
3. des queues de rafales, correspondant à la fin d'un événement.

De la même manière, il faut avoir conscience que dans ce classement, les fichiers suivants pourront être comptabilisés comme des événements isolés :

1. ceux où deux, voire trois, événements peuvent être individualisés sur la fenêtre d'enregistrement ;
2. ceux comportant le début d'une rafale ;
3. ceux contenant des événements en début de fenêtre, de très faible amplitude sur toutes les voies ; ces derniers n'étant pas déclenchant.

Néanmoins, ce type de sismogrammes étant en minorité, le tri effectué paraît assez satisfaisant en première approximation.

Notons que la définition d'un critère indépendant des paramètres d'acquisition, permettant de calculer le nombre exact d'événements sur les enregistrements est complexe. Ainsi, l'application d'un simple seuil STA/LTA (utilisé notamment dans le pointé automatique) est ici insuffisante. En effet, pour les fichiers sur lesquels plusieurs événements se superposent ou sont très rapprochés, les valeurs estimées ne descendent pas suffisamment pour permettre la détection de la fin d'un événement et l'algorithme n'en détectera alors qu'un seul. À l'inverse, sur les signaux très bruités, le seuil STA/LTA peut être dépassé

4.1. DISCRIMINATION DES ÉVÉNEMENTS DE TYPE ISOLÉS / RAFALES

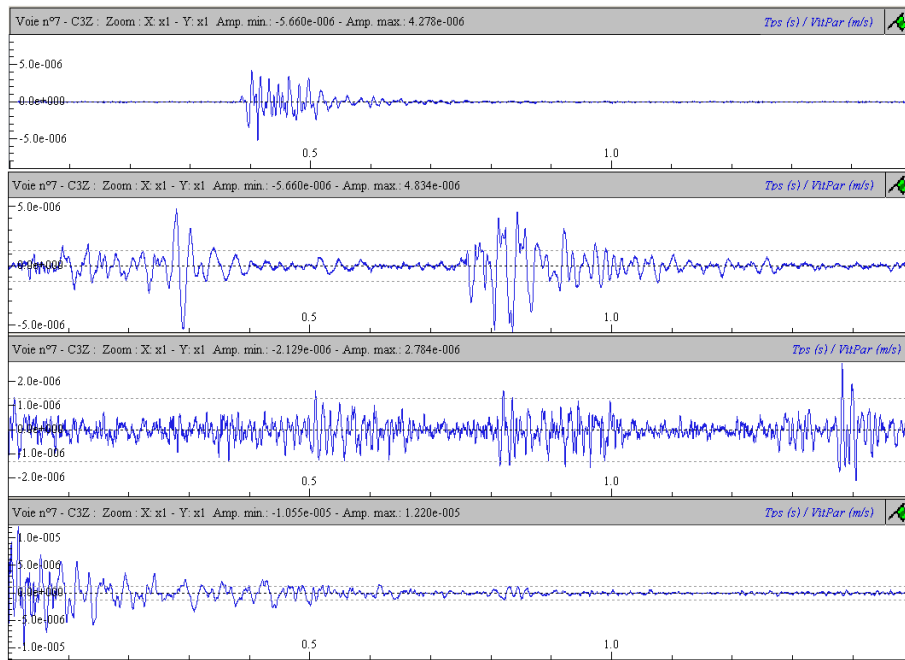


FIGURE 4.1 – Exemples d'événements dits "isolé" et "en rafale".

plusieurs fois bien qu'il n'existe qu'un seul événement dans la fenêtre d'enregistrement.

Les Figures 4.2 et 4.3 montrent le nombre d'événements enregistrés respectivement entre les 03 et 06 Avril 2008 et les 10 et 13 Février 2009. Les événements "isolés" et "en rafale" sont distingués.

Il apparaît que l'évolution du nombre d'événements isolés ne rend pas compte des pics d'activité. Notamment, pendant la période d'effondrement, ce nombre varie peu entre les deux premiers pics. À l'inverse, les déclenchements en rafales traduisent bien les variations observées : ainsi, elles apparaissent avec la légère augmentation de la microsismicité, environ huit heures avant le premier pic et peuvent représenter jusqu'à 80% des enregistrements.

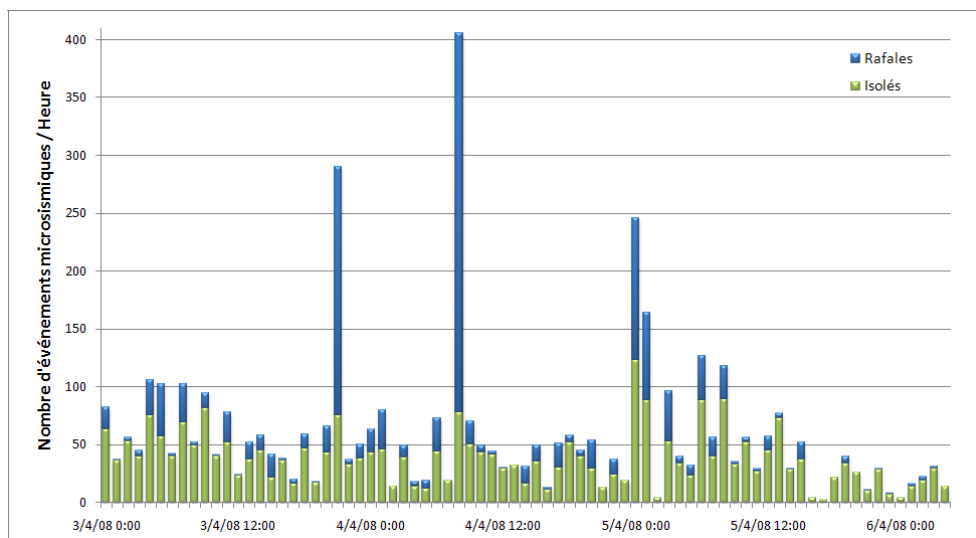


FIGURE 4.2 – Évolution du nombre d'événements microsismiques enregistrés entre les 03 et 06/04/08. Les événements dits "isolés" sont figurés en vert, et ceux en "rafale" en bleu.

4.1. DISCRIMINATION DES ÉVÉNEMENTS DE TYPE ISOLÉS / RAFALES

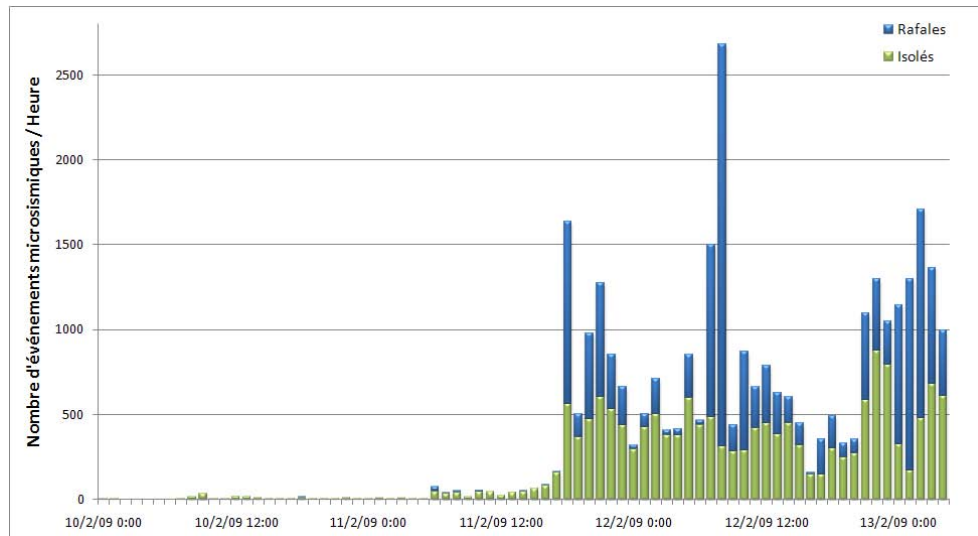


FIGURE 4.3 – Évolution du nombre d'événements microsisimiques enregistrés entre les 10 et 13/02/09. Les événements dits "isolés" sont figurés en vert, et ceux en "rafale" en bleu.

La Figure 4.4 représente le pourcentage de rafales en fonction du nombre total d'événements enregistrés par heure, du 03 au 06 Avril 2008 et durant l'effondrement.

Les deux périodes diffèrent l'une de l'autre.

Au cours des crises, le pourcentage de rafales peut varier énormément pour un même nombre d'enregistrements et semble donc indépendant de ce dernier. Tandis que pendant l'effondrement, une relation plus ou moins linéaire/parabolique se dessine et plus le nombre d'événements détectés est grand, plus la proportion de rafales calculé est importante.

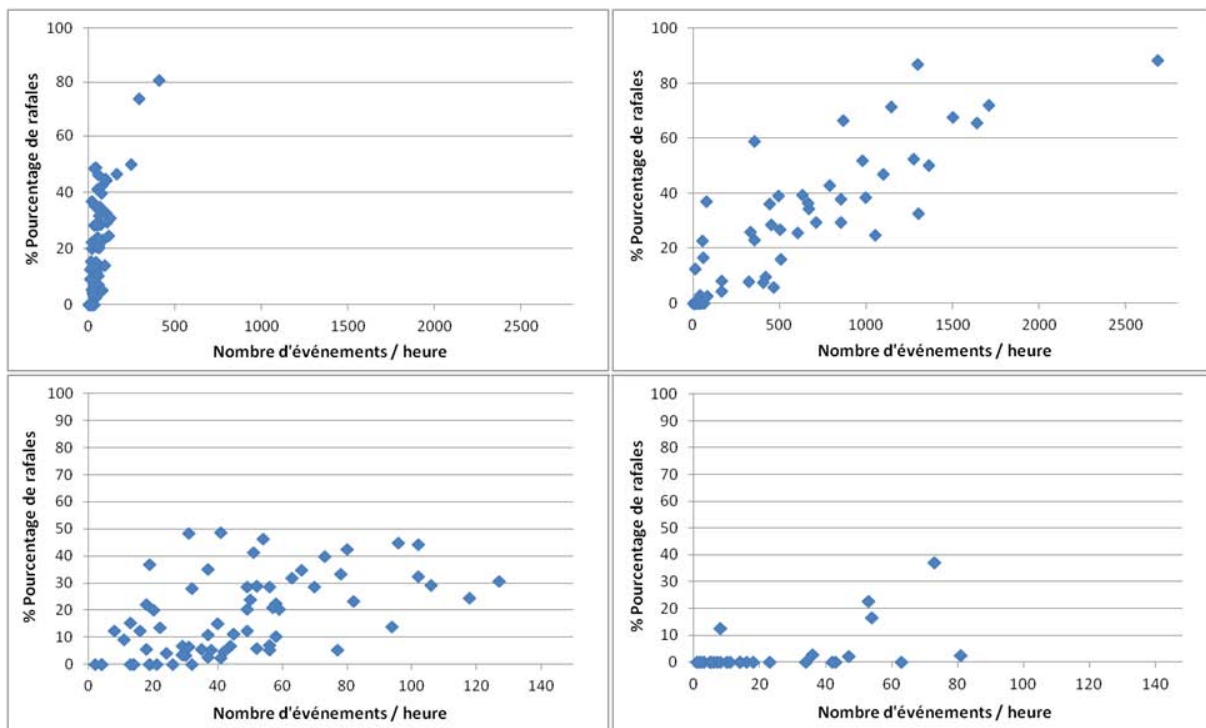


FIGURE 4.4 – Pourcentage de rafales par rapport au nombre total d'événements enregistrés par heure, entre les 03 et 06 Avril 2008 (à gauche) et pendant l'effondrement (à droite). Les figures du bas représentent un agrandissement de celles du haut.

En outre, lors des crises, les valeurs déterminées pouvaient être élevées, pour un taux de microsismicité relativement faible ; pouvant par exemple atteindre 50% pour une trentaine d'enregistrements. À l'inverse, durant l'effondrement, ce pourcentage n'est dépassé qu'à partir de plusieurs centaines d'enregistrements.

→ Ces différences pourraient indiquer des variations entre les mécanismes de déclenchement de rafales entre les deux périodes (occurrence quasi simultanée de microséismes au même ou à différents endroits ?).

4.2 Amplitude

4.2.1 Estimation de l'amplitude maximale par tranche horaire

L'amplitude des signaux dépend d'un certain nombre de paramètres, dont l'énergie libérée au moment de la rupture, la distance entre la source et les sondes et les propriétés d'atténuation des ondes dans le milieu.

Aussi, dans l'optique de donner une première approximation de l'évolution de l'intensité des événements et d'évaluer le rapprochement éventuel des sources en dehors de toute localisation, nous avons examiné les variations de l'amplitude maximale (en valeur absolue) atteinte sur les fenêtres d'enregistrement (Figure 4.5), en termes de minimum, moyenne, maximum et écart-type par tranche horaire. Ce travail a été réalisé pour toutes les voies de toutes les sondes du réseau d'auscultation.

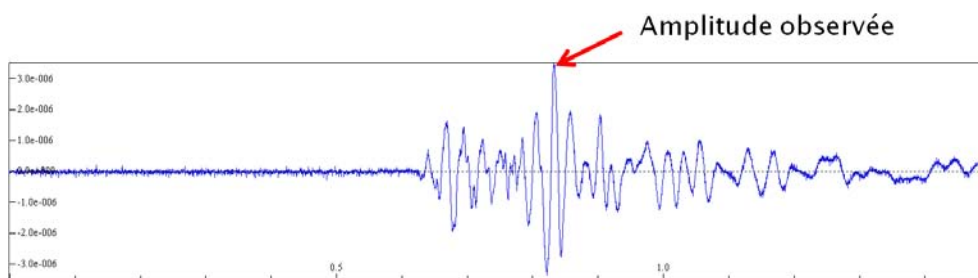


FIGURE 4.5 – Paramètre d'Amplitude observée.

4.2.2 Comparaison entre les Crises et l'Effondrement

Le Tableau 4.1 montre les valeurs minimales, moyennes et maximales atteintes par voie pour les périodes du 03 au 06 Avril 2008 et d'effondrement.

En comparant les valeurs mesurées sur les diverses sondes, on observe que :

- les amplitudes sont en moyenne 2 à 27 fois supérieures sur la M6.3 que sur les autres sondes pendant les crises de 2008 et 4 à 63 fois plus pendant l'effondrement. Notamment, elles sont divisées par 4 en moyenne, 60 m au dessus de la sonde M6.3, au niveau de la M6.2 ;
- la dispersion des amplitudes enregistrées augmente pour chaque sonde entre les deux périodes (les écarts-types étant plus de 2 fois plus élevés) ;
- les valeurs observées divergent entre les voies horizontales et verticales des sondes 3D. Par exemple, elles sont en moyenne 2 fois plus élevées sur la voie Z de la sonde M6.3 que sur les autres voies. En revanche, elles sont jusqu'à 2 fois plus faibles sur la voie Z de la sonde M3 que sur les voies horizontales (Annexe B.2) ;
- à profondeurs égales, les amplitudes déterminées peuvent aussi différer. Ainsi, la sonde M6.2 enregistre notamment des valeurs 2 à 3 fois plus élevées que la M3 pendant l'effondrement ;

4.2. AMPLITUDE

TABLE 4.1 – *Comparaison entre les amplitudes minimales, moyennes et maximales observées sur les diverses voies du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d’effondrement. Notons que l’amplitude moyenne du bruit est estimée à 40 $\mu\text{m/s}$.*

Amplitude ($\mu\text{m/s}$)	03-06 Avril 08				10-13 Février 2009			
	Minimum	Moyenne	Maximum	Écart-Type	Minimum	Moyenne	Maximum	Écart-Type
C1Z	0.4	2.0	61.1	3.6	0.5	2.6	340.7	5.9
C2Z	0.4	4.7	142.0	8.8	0.6	7.8	466.9	16.8
C3X	0.4	11.8	336.5	22.2	0.6	17.9	655.4	36.1
C3Y	0.4	10.8	411.9	21.6	0.6	15.9	655.3	31.2
C3Z	0.4	8.3	189.8	15.4	0.6	12.6	655.4	25.9
C5X	0.4	4.4	148.6	8.5	0.5	8.2	655.3	18.8
C5Y	0.4	5.7	191.9	11.5	0.6	10.3	655.3	24.2
C5Z	0.4	4.5	166.1	9.4	0.5	7.7	655.3	18.2
C63X	0.8	22.1	572.6	34.9	0.6	77.6	655.4	117.4
C63x	0.3	2.3	57.1	3.5	0.4	8.7	487.7	18.5
C63Y	0.9	23.4	625.4	35.3	0.6	78.3	655.4	119.1
C63y	0.3	2.4	62.7	3.5	0.4	8.6	357.0	17.9
C63Z	2.1	53.9	655.4	78.7	0.5	165.2	655.4	198.3
C63z	0.4	5.5	109.3	8.4	0.5	22.5	655.4	44.3
C62X	0.4	11.5	539.0	23.7	0.5	30.4	655.4	60.8
C62Y	0.4	11.8	655.3	25.3	0.5	31.9	655.4	60.6
C62Z	0.4	15.4	495.3	27.0	0.5	38.5	655.4	72.2
C61Z	0.7	26.5	655.4	51.8	0.5	40.0	655.4	80.5
C7Z	0.4	10.6	472.0	21.4	0.4	16.3	655.3	38.9
C8Z	0.4	10.1	388.6	20.6	0.6	16.3	655.4	37.3

- de même, à distances égales du centre du réseau, les amplitudes de la M5 sont en moyenne environ 2 fois inférieures à celles de la M3 ;
- les événements enregistrés pouvaient déjà saturer la voie verticale, C63Z, de la sonde M6.3 (seulement en gain fort), ainsi que la sonde M6.1 (du fait d’un effet d’amplification de surface) et la voie Y de la sonde M6.2 (observé sur un seul et unique événement), dès les premières crises tandis qu’ils n’ont pu atteindre la saturation que durant la période d’effondrement pour les autres voies. De même, les voies horizontales en gain fort de la sonde M6.3, ainsi que la voie verticale en gain faible, n’ont saturé uniquement que pendant l’effondrement.

La Figure 4.6 compare les variations d’amplitude minimales, moyennes et maximales par tranche horaire enregistrées au niveau des voies verticales des sondes M3 et M6.3.

De fait, bien que les amplitudes minimales et moyennes par tranche horaire des événements augmentent légèrement d’une période à l’autre, les fluctuations observées pour ces valeurs ne semblent pas réellement significatives. À l’inverse, l’évolution des maxima atteints sur ces intervalles de temps est beaucoup plus marquée. Ainsi, alors qu’ils stagnent pendant les crises, ces derniers vont jusqu’à tripler pendant la période d’effondrement pour les sondes situées autour de la cavité, comme la M3.

Notons cependant un accroissement de la proportion d’événements de forte amplitude sur la sonde M6.3 (associée à une augmentation de la moyenne et de l’écart-type des amplitudes observées), peu avant que celle-ci ne soit plus opérationnelle.

La Figure 4.7 montre l’évolution des amplitudes maximales enregistrées au niveau des voies verticales des sondes M3 et M6.3 conjointement au nombre d’événements détectés par tranche horaire.

On remarque que les maxima enregistrés suivent plus ou moins la même évolution sur toutes les

4.2. AMPLITUDE

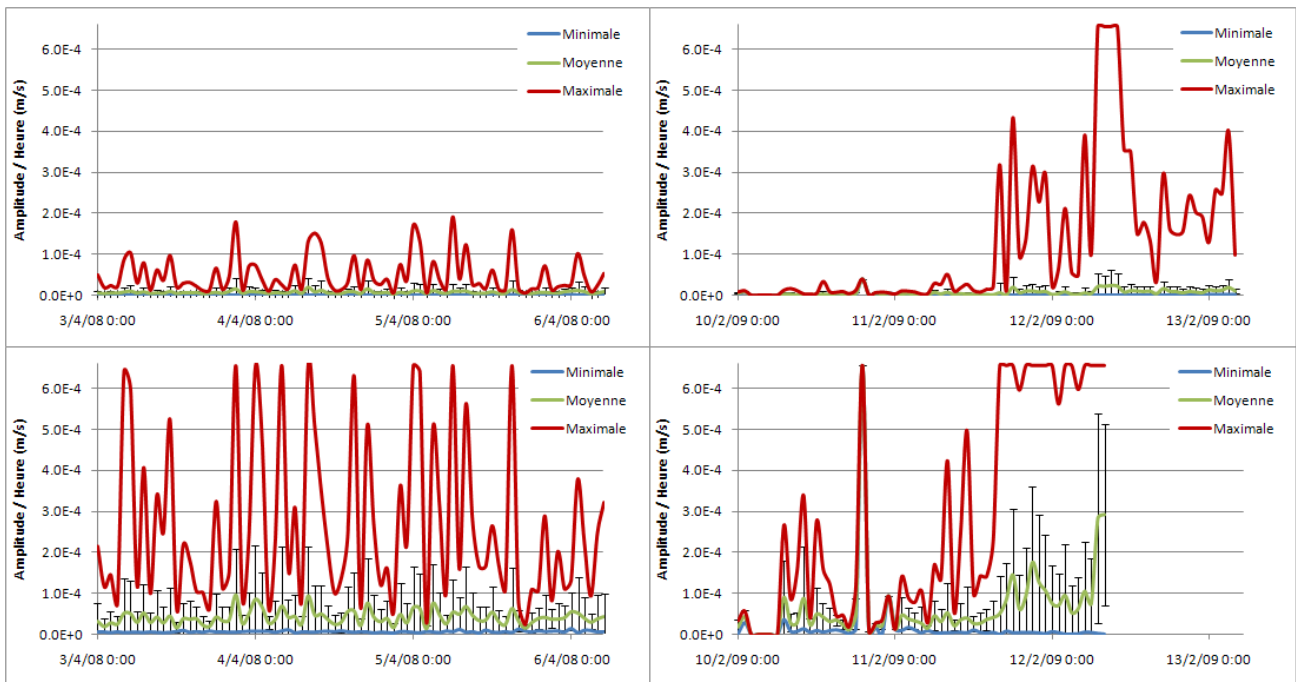


FIGURE 4.6 – Évolution des amplitudes minimales, moyennes et maximales aux niveaux des voies verticales des sondes M3 (en haut) et M6.3 (en bas), entre les 03 et 06/04/08 (à gauche) et du 10 au 13/02/09 (à droite).

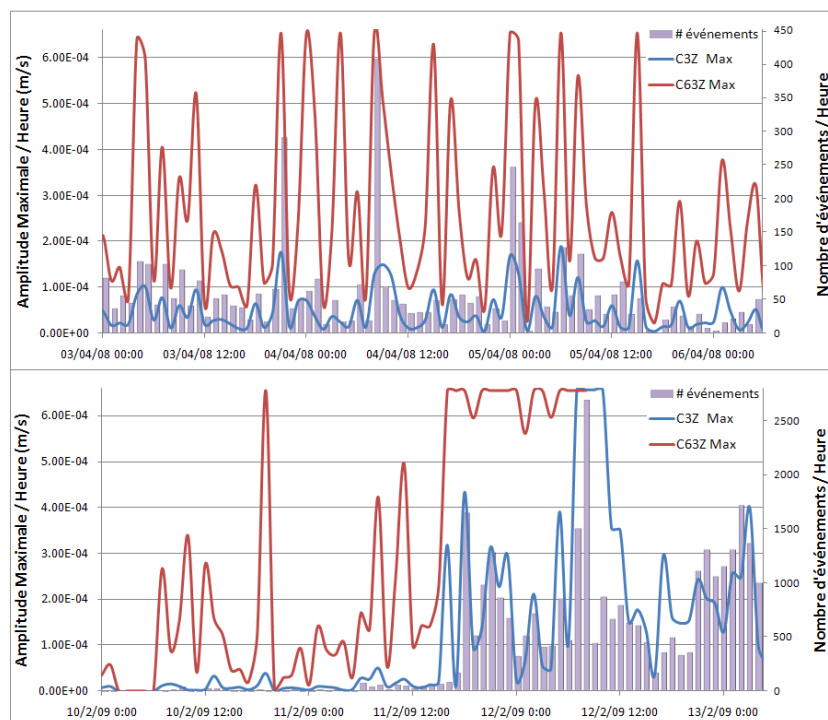


FIGURE 4.7 – Évolution de l'amplitude maximale enregistrée au niveau des sondes M3 et M6.3 entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).

4.2. AMPLITUDE

sondes ; en effet, les courbes présentent les mêmes pics d'amplitude, bien que ces derniers ne soient pas forcément atténués de la même manière d'un intervalle de temps à un autre.

De plus, les événements de très forte amplitude ne sont pas toujours enregistrés durant les pics d'activité. De fait, pendant la période d'effondrement, un peu moins de 24h avant le premier pic d'activité, le 10/02/09 à 19:04:08, on distingue la présence d'un seul et unique événement déclenché sur toutes les sondes, saturant la M6.3 (en gain fort, Annexe B.2). Puis, quelques heures plus tard, on constate l'enregistrement régulier d'événements saturant cette sonde, et ce, toujours avant ce pic d'activité (le premier événement de cette liste étant détecté le 11/02/09 à 16:46:52).

Pour les autres sondes, un saut des amplitudes environ deux heures avant le premier pic d'activité est aussi observé et la saturation est atteinte au moment de ce dernier sur la sonde M6.2, la voie Z de la sonde M6.3 en gain faible et les sondes de surface. Les sondes les plus éloignées de la cavité, telles que la M3, quant à elles voient les amplitudes maximales des événements atteindre un nouveau palier au niveau du second pic d'activité, voire du troisième (pour les sondes M2 et M5, Annexe B.2).

Les Tableaux 4.2 et 4.3 montrent les valeurs d'amplitude minimales, moyennes, maximales et écarts-types, atteintes par voie pour les périodes du 03 au 06 Avril 2008 et celle d'effondrement, respectivement pour les événements isolés et en rafale.

TABLE 4.2 – *Comparaison entre les amplitudes minimales, moyennes et maximales observées pour les événements isolés, du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.*

Amplitude ($\mu\text{m/s}$)	03-06 Avril 08				10-13 Février 2009			
	Minimum	Moyenne	Maximum	Écart-Type	Minimum	Moyenne	Maximum	Écart-Type
C1Z	0.4	1.1	23.9	1.6	0.5	1.3	138.5	2.0
C2Z	0.4	2.6	70.4	4.2	0.6	3.6	452.1	7.3
C3X	0.4	6.4	189.9	12.0	0.6	8.2	360.1	14.6
C3Y	0.4	5.9	163.2	10.8	0.6	7.2	386.7	12.2
C3Z	0.4	4.5	121.9	8.1	0.6	5.8	655.3	12.0
C5X	0.4	2.5	87.9	4.5	0.5	3.6	655.3	10.6
C5Y	0.4	3.1	91.7	5.3	0.6	4.5	655.3	14.8
C5Z	0.4	2.7	90.8	5.0	0.5	3.2	655.3	8.7
C63X	0.8	14.4	262.9	19.0	0.6	35.5	655.3	50.5
C63x	0.3	1.5	26.3	1.9	0.4	3.6	130.9	5.4
C63Y	0.9	15.9	293.5	21.6	0.6	34.8	655.3	50.3
C63y	0.3	1.6	29.1	2.1	0.4	3.6	172.3	5.6
C63Z	2.1	33.8	655.2	45.7	0.5	67.6	655.4	89.5
C63z	0.4	3.4	78.7	4.7	0.5	7.1	337.1	11.6
C62X	0.4	6.5	306.0	12.9	0.5	12.3	632.0	24.1
C62Y	0.4	6.5	395.2	14.4	0.5	14.6	655.3	26.1
C62Z	0.4	9.8	253.5	15.6	0.5	16.9	655.4	33.0
C61Z	0.7	15.7	389.9	27.7	0.5	16.1	655.3	34.3
C7Z	0.4	6.0	230.8	12.5	0.4	6.4	655.2	17.4
C8Z	0.4	5.8	155.5	10.7	0.6	6.8	655.3	14.7

4.2. AMPLITUDE

TABLE 4.3 – *Comparaison entre les amplitudes minimales, moyennes et maximales observées pour les événements en rafale, du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d’effondrement.*

Amplitude ($\mu\text{m/s}$)	03-06 Avril 08				10-13 Février 2009			
	Minimum	Moyenne	Maximum	Écart-Type	Minimum	Moyenne	Maximum	Écart-Type
C1Z	0.4	3.8	61.1	5.5	0.6	4.0	340.7	7.9
C2Z	0.5	8.9	142.0	13.1	0.6	12.2	466.9	22.0
C3X	0.7	22.7	336.5	32.2	0.6	27.9	655.4	47.3
C3Y	0.8	20.6	411.9	32.2	0.7	24.9	655.3	41.0
C3Z	0.7	16.0	189.8	22.4	0.6	19.6	655.4	33.6
C5X	0.5	8.4	148.6	12.5	0.6	12.9	655.3	23.7
C5Y	0.4	10.9	191.9	17.3	0.6	16.4	655.3	29.9
C5Z	0.5	8.4	166.1	14.0	0.6	12.4	474.4	23.5
C63X	2.2	37.8	572.6	50.9	1.9	124.7	655.4	149.0
C63x	0.3	3.8	57.1	5.1	0.5	14.3	487.7	25.1
C63Y	1.9	38.6	625.4	49.9	2.4	127.1	655.4	150.8
C63y	0.4	3.9	62.7	5.0	0.5	14.3	357.0	24.2
C63Z	6.6	94.8	655.4	110.0	5.4	274.5	655.4	227.5
C63z	0.7	9.7	109.3	11.9	0.6	39.8	655.4	58.8
C62X	0.5	21.8	539.0	34.7	0.6	49.1	655.4	79.0
C62Y	0.7	22.5	655.3	36.9	0.7	50.0	655.4	78.4
C62Z	1.5	26.6	495.3	39.2	0.7	61.0	655.4	92.2
C61Z	2.0	48.5	655.4	76.6	0.8	64.8	655.4	103.9
C7Z	0.9	19.9	472.0	30.8	0.5	26.5	655.3	50.6
C8Z	0.9	18.9	388.6	30.7	0.7	26.3	655.4	49.2

Ainsi :

- les remarques effectuées pour l’ensemble des événements peuvent être réitérées que ce soit pour les événements isolés ou en rafale ;
- les valeurs déterminées pour les rafales sont systématiquement supérieures à celles des événements isolés et ce sur les deux périodes. De fait, selon les voies, les moyennes peuvent être 2 à 5 fois plus élevées pour les rafales ;
- les maxima atteints pour les événements isolés peuvent être 2 fois inférieurs à ceux obtenus pour les rafales. En particulier, certaines voies, comme par exemple la M6.1 pendant les crises ou encore la voie X de la sonde M6.2 durant l’effondrement, n’atteignent pas la saturation ;
- la dispersion des valeurs enregistrées est aussi systématiquement plus grande pour les rafales (les écarts-types étant 2 à 4 fois plus élevés).

N.B. : Les amplitudes moyennes des rafales, enregistrées entre 2005 et 2006, relevées par D. Mercerat (2007) ne dépassaient pas le niveau de bruit ambiant (~ 20 digits soit $2.0e-7$ m/s).

La Figure 4.8 montre l’évolution des amplitudes maximales enregistrées au niveau des voies verticales des sondes M3 et M6.3 comparée au nombre d’événements isolés et en rafales détectés par tranche horaire. Ainsi, l’évolution des maxima mesurés au niveau des rafales concorde avec celle déterminée pour l’ensemble des événements. Pour les événements isolés, moins d’événements saturent pendant les crises sur la sonde M6.3 ; alors que les pics d’amplitude, pendant l’effondrement, sont bien observés.

4.2. AMPLITUDE

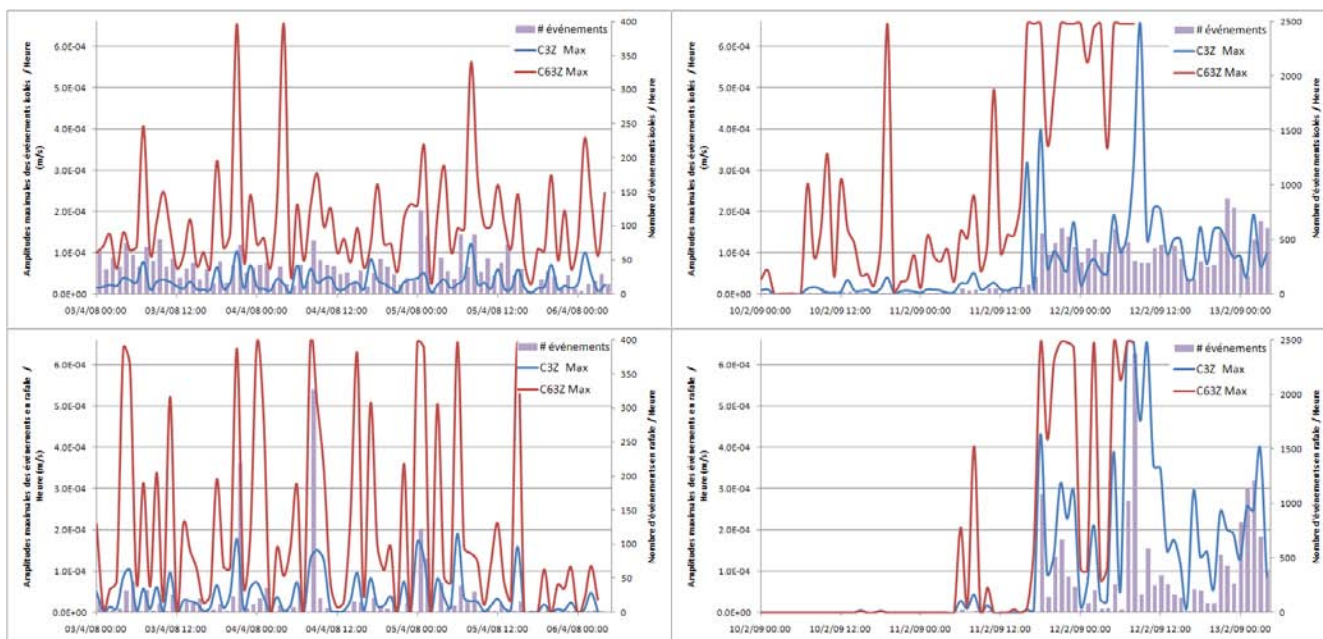


FIGURE 4.8 – Évolution de l'amplitude maximale enregistrée, au niveau des sondes M3 et M6.3 entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas), pour des événements isolés (à gauche) et "en rafale" (à droite).

4.2.3 Rapports d'amplitude

Outre les variations individuelles des amplitudes des signaux, nous avons aussi examiné les rapports entre les diverses sondes. Ces derniers indiquent si une source est relativement plus proche d'une sonde que d'une autre. L'utilisation de plusieurs rapports peut notamment aider à localiser grossièrement les événements, dont les arrivées de phases sont peu marquées ou non identifiables, comme c'est le cas par exemple pour les tremors volcaniques.

Le Tableau 4.4 compare les rapports d'amplitude à la sonde M6.3, pendant les crises et la période d'effondrement, jusqu'à ce que celle-ci ne soit plus opérationnelle. Notons que, pour les sondes 3D, les calculs sont effectués ici en faisant la moyenne des amplitudes sur les trois composantes, afin d'éliminer d'éventuels biais liés à l'orientation des rais incidents (i.e. mouvements verticaux et horizontaux plus ou moins importants selon la direction du capteur).

On observe que :

TABLE 4.4 – Comparaison entre les rapports d'amplitude à la sonde M6.3 du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.

Rapport d'amplitude	03-06 Avril 08				10-13 Février 2009			
	Minimum	Moyen	Maximum	Écart-Type	Minimum	Moyen	Maximum	Écart-Type
M1	2.37E-03	7.81E-02	1.16E+00	6.03E-02	1.11E-03	3.80E-02	1.16E+00	4.03E-02
M2	5.17E-03	1.51E-01	1.16E+00	9.31E-02	1.59E-03	7.23E-02	1.09E+00	6.54E-02
M3	9.25E-03	3.62E-01	3.41E+00	2.95E-01	1.85E-03	1.65E-01	2.82E+00	1.73E-01
M5	4.23E-03	1.78E-01	6.29E+00	2.80E-01	1.55E-03	8.04E-02	1.48E+00	7.15E-02
M62	1.99E-02	4.38E-01	9.61E+01	8.48E-01	2.80E-03	3.37E-01	3.43E+02	3.13E+00
M61	2.04E-02	7.82E-01	7.85E+00	4.48E-01	3.00E-03	3.52E-01	6.47E+00	3.23E-01
M7	9.71E-03	2.93E-01	2.89E+00	1.98E-01	1.40E-03	1.36E-01	2.16E+00	1.54E-01
M8	7.16E-03	3.01E-01	1.93E+00	1.74E-01	1.72E-03	1.32E-01	1.47E+00	1.27E-01

4.2. AMPLITUDE

- comme attendu, les rapports sont en moyenne inférieurs à 1, la sonde M6.3 étant la plus profonde ;
- les minima et les moyennes diminuent tous entre les deux périodes ;
- les maxima baissent, à l'exception de ceux estimés avec la M6.2. Aussi, la dispersion des rapports calculés avec cette sonde est multipliée par 4 durant l'effondrement ;
- les amplitudes de la sonde de surface M6.1 sont en moyenne plus élevés que sur la M6.2, ce qui est visible sur les valeurs déterminées.

La Figure 4.9 illustre l'évolution des rapports d'amplitude des sondes M3 et M6.2 sur la sonde M6.3, entre les 03 et 06 Avril 2008 et du 10 au 13 Février 2009.

De fait, on remarque que les valeurs calculées sont assez stables durant les crises, oscillant entre 0.05-0.1 et 1. Pendant l'effondrement, les minima diminuent après le premier pic d'activité et les rapports sont plus faibles pour une proportion plus ou moins élevée d'événements (46% et 17% respectivement pour les sondes M3 et M6.2), montrant ainsi un net rapprochement entre les microséismes et la sonde M6.3. Un certain nombre d'événements se détachent, en considérant les rapports d'amplitude des signaux des sondes M6.2/M6.3. En particulier entre les deux pics d'activité, plusieurs d'entre eux sont largement supérieurs à 1, i.e. les sources sont déclenchées au-dessus du banc de Dolomie de Beaumont, plus près de la M6.2 que de la M6.3¹.

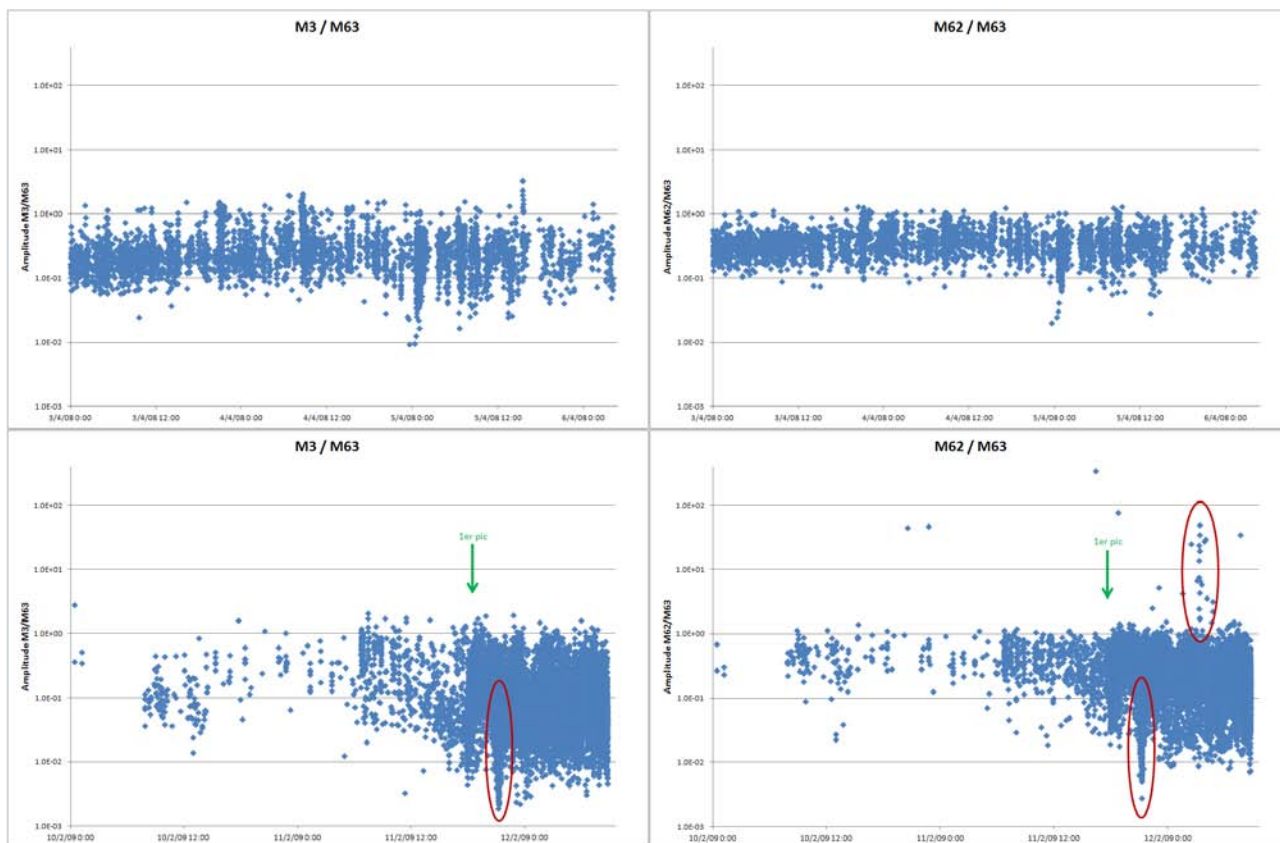


FIGURE 4.9 – Évolution des rapports d'amplitude, à la sonde M6.3, entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).

→ L'évolution des rapports d'amplitude peut donc être intéressante pour étudier l'évolution des distances relatives des événements entre les sondes. En particulier, dans le cas de Cerville-Buissoncourt, en comparant les valeurs enregistrées par la sonde M6.3 avec une autre, plus superficielle, ceci peut permettre de présumer de la remontée des microséismes et donc de la cavité.

1. Ces événements n'ont pas pu être localisés par la suite, ces derniers ne "déclenchant" que les sondes de la colonne M6, cf. Chapitre 6.

N.B. : Les résultats obtenus en séparant les événements isolés des rafales sont disponibles en Annexe B.2.

4.2.4 Comparaison entre les ondes P et S

Les ondes S ont été pointées sur un certain nombre d'événements isolés de la période d'effondrement, sur les sondes 3D (nous y reviendrons dans le Chapitre 5).

Les rapports d'amplitude maximale résultante (i.e. de la moyenne sur les trois composantes) des ondes S sur P sont tracés sur la Figure 4.10. Ces derniers oscillent entre 0 et 14 et diffèrent d'une sonde à l'autre. Ainsi, les valeurs déterminées pour la M3 semblent plus élevées en moyenne que pour les autres sondes alors que celles de la M5 paraissent inférieures.

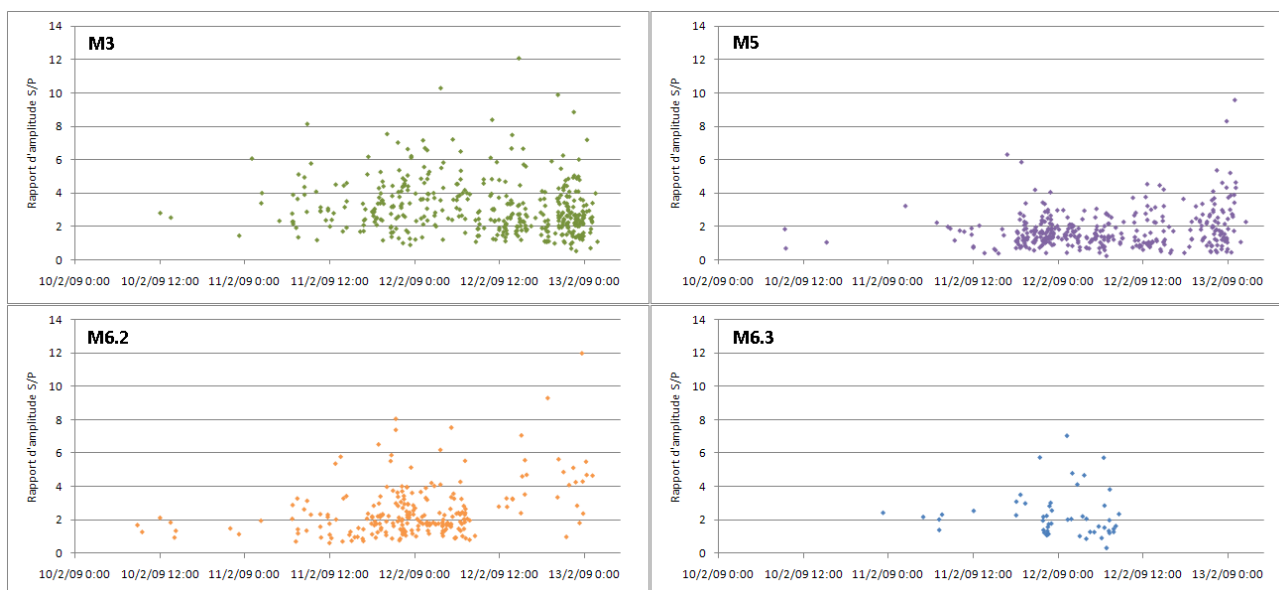


FIGURE 4.10 – Évolution des rapports d'amplitude des ondes P et S déterminés au niveau des sondes 3D, entre les 10 et 13/02/09.

Ceci pourrait s'expliquer par :

- le fait que les événements pris en compte ne sont pas forcément les mêmes ;
- une influence plus ou moins marquée des composantes en traction/cisaillement en fonction de la position des sondes ;
- des ondes P converties en S au niveau des interfaces (cf. Chapitre 5).

En outre, l'évolution temporelle des rapports est difficile à quantifier, étant donné le peu de pointés disponibles. Néanmoins, les valeurs maximales semblent augmenter légèrement avant le premier pic d'activité.

4.2.5 Conclusions sur l'évolution en amplitude

Les comparaisons entre les valeurs mesurées au niveau des diverses voies montrent que l'amplitude dépend de plusieurs paramètres : l'orientation des voies, la profondeur d'implantation, la distance par rapport au centre de la cavité et le mécanisme à la source (i.e. génération ou non d'onde S).

L'évolution des maxima atteints sur les différentes périodes est beaucoup plus marquée que celle observée en moyenne, quelle que soit la sonde. Les valeurs obtenues augmentent nettement entre les crises et l'effondrement. Dans la période d'effondrement même, les sauts dans les maxima permettent de

présumer d'un changement de régime. Aussi, l'augmentation des écarts-types au cours de cette période indique la hausse du nombre d'événements de forte amplitude : ces derniers pouvant être de plus forte énergie ou arriver plus près des sondes.

De plus, les amplitudes des rafales sont en moyenne supérieures à celles des événements isolés. Plusieurs explications peuvent être avancées :

- les événements isolés ont des énergies plus faibles et/ou les rafales sont de plus fortes énergies ;
- les rafales, enregistrées lors des phases d'activité intense, sont synonymes de plusieurs ruptures quasi simultanées ; ceci pouvant donner des interférences constructives entre les signaux émis.

En outre, la dispersion mesurée pour les rafales, montre qu'elles sont plus hétérogènes que les événements isolés. Ceci concorde avec le fait que leurs amplitudes atteignent des valeurs beaucoup plus élevées et pourraient indiquer la présence de plusieurs types de rafale (de faible / forte énergie ?).

Les rapports d'amplitude quant à eux pourraient être un indicateur intéressant du rapprochement relatif des événements d'une sonde à une autre, en complément de l'étude des maxima. En particulier, durant l'effondrement, en considérant les valeurs par rapport à la sonde la plus profonde, M6.3, ceci permet d'observer la remontée des événements.

Notons cependant que l'utilisation du simple paramètre d'amplitude maximale par événement peut être restreinte, par exemple lorsque les signaux atteignent la saturation (comme pour la sonde M6.3) ou si l'on ne souhaite considérer qu'un type d'onde.

4.3 Énergie au capteur

4.3.1 Estimation de l'énergie enregistrée au capteur

L'énergie au capteur des événements est déterminée comme suit :

$$E_{Cpt} = \rho_i \cdot v_i \cdot \int_{t_1}^{t_2} V_R(t)^2 \cdot dt \quad (4.1)$$

avec :

ρ_i : masse volumique locale de la roche ;

v_i : vitesse des ondes P dans la couche i (m/s) ;

V_R : vitesse particulaire maximale résultante (m/s) ;

t_1 et t_2 : début et fin de l'événement (s) ; par défaut, si les événements ne sont pas pointés, le calcul est effectué sur toute la fenêtre d'enregistrement.

Ce calcul tient compte du modèle de vitesse imposé (cf. Chapitre 5). La masse volumique a été définie par défaut, à l'aide des résultats des essais en laboratoire, à 2500 kg/m³ pour toutes les couches à l'exception du banc de Dolomie de Beaumont, où elle a été imposée à 2857 kg/m³.

4.3.2 Comparaison entre les Crises et l'Effondrement

4.3.2.1 Énergie cumulée au capteur

L'énergie cumulée au niveau des sondes 3D était un paramètre utilisé dans l'auscultation micro-sismique pour définir l'occurrence d'une crise. Il paraissait donc intéressant de vérifier si l'utilisation d'autres sondes pouvait permettre d'aboutir aux mêmes conclusions, avant de considérer les événements individuellement.

Le Tableau 4.5 montre l'énergie totale cumulée au capteur, sur l'ensemble des événements entre les 03 et 06 Avril 2008 et pour l'effondrement (les événements enregistrés avant que la M6.3 ne soit plus opérationnelle ont été distingués, afin de pouvoir comparer les valeurs obtenues par cette sonde avec les autres). On remarque que :

4.3. ÉNERGIE AU CAPTEUR

- l'énergie cumulée est 2 à 300 fois supérieure au niveau de la sonde M6.3 que sur les autres sondes pendant les crises de 2008 et 14 à 2800 fois plus pendant l'effondrement (avant qu'elle ne soit plus opérationnelle); les écarts les plus importants étant observés au niveau de la sonde M1. Notons qu'elle est divisée par 10 à 40 au niveau de la M6.2;
- les valeurs observées divergent entre les voies horizontales et verticales des sondes 3D. Elles sont 5 à 7 fois plus élevées sur la voie Z de la sonde M6.3 que sur les autres voies. À l'inverse, elles sont 2 fois plus faibles sur la voie Z de la sonde M3 que sur les voies horizontales;
- à profondeurs égales, les énergies cumulées diffèrent. Ainsi, la sonde M6.2 enregistre des valeurs 2 à 4 fois plus élevées que la M3;
- de même, à distances égales du centre du réseau, les énergies cumulées de la M5 sont 2 à 6 fois inférieures à celles de la M3;
- l'amplification des ondes en surface est bien marquée : la M6.1 cumule une énergie 5 et 3 fois plus élevée, respectivement pour les périodes de crise et d'effondrement que la M6.2; et des sondes telles que les M7 et M8 détectent des valeurs 2 fois plus élevées que la M3;
- la période d'effondrement se distingue des crises par la somme des énergies enregistrées. Elle est 10 à 160 fois plus importante que celle cumulée du 03 au 06/04/08; les plus fortes variations étant observées aux niveaux des sondes M6.2 et M6.3.

TABLE 4.5 – *Énergie totale cumulée au capteur, du 03 au 06 Avril 08 et pendant la période d'effondrement. La période précédant la perte de la M6.3 a été distinguée, afin de pouvoir comparer les énergies cumulées par cette dernière avec celles des autres sondes.*

Énergie cumulée (J)	03-06/04/08	10-12/02/09 à 08h43	10-13/02/09
C1Z	2.67E-03	2.15E-02	3.98E-02
C2Z	1.27E-02	1.44E-01	2.63E-01
C3X	6.91E-02	6.25E-01	1.07
C3Y	6.21E-02	5.50E-01	8.90E-01
C3Z	3.58E-02	3.43E-01	5.75E-01
C5X	1.19E-02	1.27E-01	3.56E-01
C5Y	1.95E-02	2.07E-01	4.79E-01
C5Z	1.10E-02	1.34E-01	2.86E-01
C63X	1.49E-01	6.47	6.47
C63Y	1.49E-01	6.69	6.69
C63Z	7.56E-01	48.5	48.5
C62X	6.99E-02	9.05E-01	11.2
C62Y	8.13E-02	1.37	7.91
C62Z	8.24E-02	1.67	9.59
C61Z	3.76E-01	4.14	6.55
C7Z	6.06E-02	6.96E-01	1.22
C8Z	6.39E-02	7.06E-01	1.26

La Figure 4.11 représente l'évolution de l'énergie cumulée au capteur sur l'ensemble des événements, répartis par tranche horaire (sur une échelle logarithmique afin de mettre en valeur les divers sauts d'énergie), entre les 03 et 06 Avril 2008 et pour la période d'effondrement.

On constate une évolution de l'énergie cumulée similaire d'une sonde à l'autre (les courbes étant dans l'ensemble parallèles), qui semble être fonction du nombre d'événements enregistrés; les sauts d'énergie étant en majorité corrélés aux pics d'activité. Notons cependant que l'événement du 10/02/09 à 19:04:08, de forte amplitude sur les diverses voies, se démarque aussi en termes d'énergie, conduisant à un saut important dans les courbes d'évolution. Un tel événement, entraînant à lui seul la déclaration de l'occurrence d'une crise microsismique, selon les critères empiriques utilisés précédemment (cf. Chapitre 3), n'avait cependant jamais été observé auparavant.

4.3. ÉNERGIE AU CAPTEUR

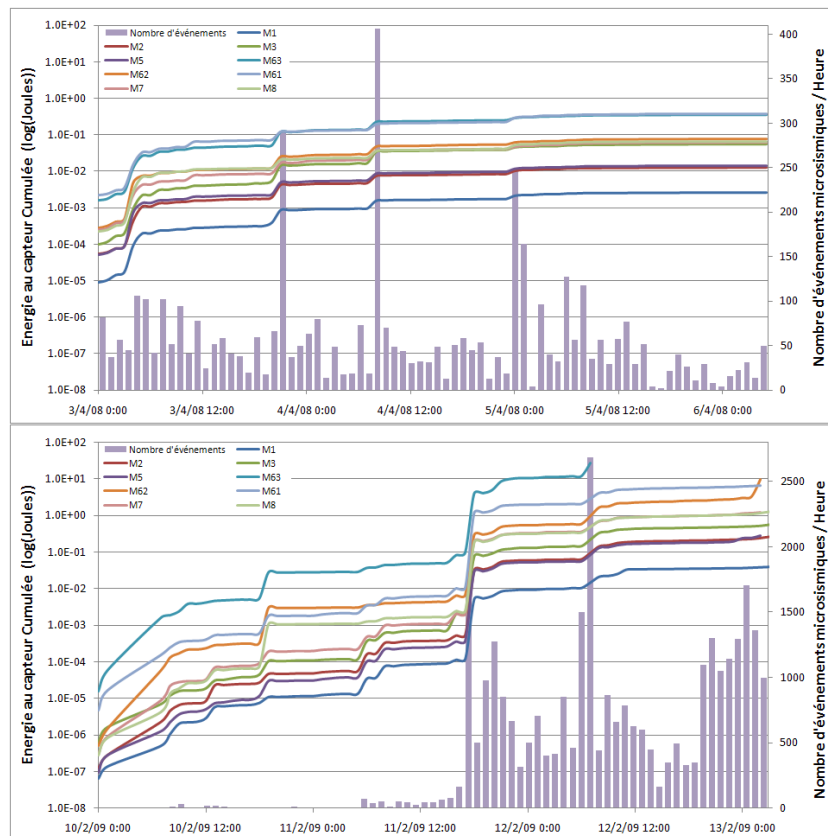


FIGURE 4.11 – Évolution de l'énergie cumulée au capteur entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).

Le Tableau 4.6 montre l'énergie totale cumulée au capteur, pour les événements isolés et en rafale, entre les 03 et 06 Avril 2008 et pour l'effondrement. On observe que :

- les remarques effectuées pour l'ensemble des événements sont aussi valables en séparant les événements isolés de ceux en rafale ;
- les valeurs déterminées sont systématiquement supérieures pour les rafales. De fait, selon les voies, la quantité d'énergie cumulée par ce type d'événement peut être 5 à 8 fois plus élevée, pendant la période de crise, et de 6 à 50 fois plus élevée, lors de l'effondrement, supérieure à celle enregistrée par les événements isolés. Notons cependant que les écarts entre les énergies cumulées diminuent après la perte de la M6.3, pour l'ensemble des sondes à l'exception de la sonde M6.2 ;
- les valeurs cumulées par les événements isolés pendant l'effondrement sont jusqu'à 20 fois supérieures à celles des crises, tandis que pour les rafales elles sont multipliées jusqu'à 180 fois (pour la sonde M6.2).

En outre, les sauts d'énergie cumulée sont clairement liés au nombre d'événements enregistrés, en particulier pour les rafales, tandis qu'ils peuvent en être indépendants pour les isolés (Annexe B.3). Par ailleurs, on remarquera que l'énergie cumulée par les rafales au niveau de la sonde M6.2 dépasse celle de la M6.1 après le second pic d'activité, tandis qu'elle reste inférieure pour les isolés. Cette tendance n'est constatée sur la courbe englobant l'ensemble des événements uniquement une heure avant que ces sondes ne soient plus opérationnelles.

4.3. ÉNERGIE AU CAPTEUR

TABLE 4.6 – *Énergie totale cumulée au capteur pour les événements isolés et en rafales, du 03 au 06 Avril 08 et pendant l'effondrement. La période précédant la perte de la M6.3 a été distinguée, afin de pouvoir comparer les énergies cumulées par cette dernière avec celles des autres sondes.*

Énergie cumulée (J)	Événements isolés			Événements en rafale		
	03-06/04/08	10-12/02/09 à 08h43	10-13/02/09	03-06/04/08	10-12/02/09 à 08h43	10-13/02/09
C1Z	2.96E-04	7.54E-04	2.14E-03	2.35E-03	2.08E-02	3.77E-02
C2Z	1.48E-03	4.52E-03	1.88E-02	1.11E-02	1.39E-01	2.45E-01
C3X	8.67E-03	2.38E-02	6.91E-02	5.95E-02	6.01E-01	1.00
C3Y	7.63E-03	1.94E-02	5.48E-02	5.39E-02	5.30E-01	8.36E-01
C3Z	4.46E-03	1.41E-02	4.08E-02	3.10E-02	3.29E-01	5.34E-01
C5X	1.63E-03	3.74E-03	4.38E-02	1.01E-02	1.24E-01	2.77E-01
C5Y	2.20E-03	5.76E-03	5.67E-02	1.72E-02	2.01E-01	3.89E-01
C5Z	1.39E-03	3.15E-03	2.08E-02	9.57E-03	1.31E-01	2.48E-01
C63X	1.99E-02	1.73E-01	1.73E-01	1.29E-01	6.30	6.30
C63Y	2.37E-02	2.17E-01	2.17E-01	1.25E-01	6.47	6.47
C63Z	1.02E-01	1.25	1.25	6.48E-01	47.2	47.2
C62X	1.07E-02	3.48E-02	2.06E-01	5.86E-02	8.70E-01	11.0
C62Y	1.16E-02	4.97E-02	1.66E-01	6.84E-02	1.32	7.74
C62Z	1.25E-02	5.41E-02	2.46E-01	6.97E-02	1.62	9.34
C61Z	5.20E-02	1.10E-01	4.06E-01	3.23E-01	4.03	6.13
C7Z	8.86E-03	2.17E-02	8.46E-02	5.11E-02	6.74E-01	1.11
C8Z	8.49E-03	1.84E-02	8.02E-02	5.51E-02	6.88E-01	1.18

4.3.2.2 Énergie au capteur par événement

Le Tableau 4.7 montre les valeurs minimales, moyennes et maximales d'énergie par événement et par voie pour les périodes du 03 au 06 Avril 2008 et celle d'effondrement. La Figure 4.12 représente l'évolution des énergies au capteur par événement enregistrées au niveau des voies verticales des sondes M3 et M6.3, en termes de minima, moyennes et maxima par tranche horaire.

En comparant les valeurs mesurées sur les diverses sondes, il s'ensuit que :

- les moyennes déterminées concordent avec les analyses d'énergie cumulée ; les écarts observés entre les différents capteurs correspondant aux variations d'énergie par événement ;
- la période d'effondrement se distingue des crises du fait que les valeurs calculées sont systématiquement plus élevées (même les minima enregistrés) ;
- la dispersion des énergies enregistrées augmente pour chaque sonde entre les deux périodes. Notamment, pour la sonde M6.2, les écarts-types sont 50 à plus de 100 fois plus élevés pendant l'effondrement ;
- l'évolution est surtout remarquable en considérant les maxima atteints. En particulier, ces derniers sont multipliés par 100 pour la sonde M1 et par plus de 200 pour la voie Z de la sonde M6.2 entre les deux périodes. De plus, alors que les moyennes au cours même de la période d'effondrement n'évoluent quasiment pas, plusieurs sauts significatifs sont observables au niveau des maxima.

Sur la Figure 4.13, on peut observer l'évolution des énergies maximales enregistrées au niveau des voies verticales des sondes M3 et M6.3 comparée au nombre d'événements détectés par tranche horaire.

Les énergies maximales sont multipliées par 10 à 100 fois entre les deux périodes (à partir du premier pic d'activité). Elles dépassent ainsi 1J sur la sonde M6.3, juste avant que celle-ci ne soit plus opérationnelle. De fait, bien que les maxima observés au niveau de la sonde M6.3 soient 10 à 100 fois plus élevés que ceux enregistrés par les autres sondes, les variations des valeurs détectées sont similaires d'une sonde à l'autre ; les courbes étant semblables. De même que pour les amplitudes, les sauts dans les maxima atteints ne semblent pas liés aux pics d'activité.

4.3. ÉNERGIE AU CAPTEUR

TABLE 4.7 – Comparaison entre les énergies au capteur minimales, moyennes, maximales et leur écarts-types, observées sur les diverses voies du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.

Énergie (J)	03-06 Avril 08				10-13 Février 2009			
	Minimum	Moyenne	Maximum	Écart-Type	Minimum	Moyenne	Maximum	Écart-Type
C1Z	1.19E-08	5.85E-07	7.08E-05	3.09E-06	2.06E-08	1.30E-06	7.82E-03	4.56E-05
C2Z	1.31E-08	2.77E-06	2.94E-04	1.43E-05	2.22E-08	8.58E-06	8.32E-03	7.72E-05
C3X	1.18E-08	1.51E-05	1.78 E-03	7.12E-05	2.26E-08	3.50E-05	2.28E-02	2.83E-04
C3Y	1.21E-08	1.36E-05	2.01E-03	7.99E-05	2.15E-08	2.90E-05	1.68E-02	2.20E-04
C3Z	1.25E-08	7.84E-06	6.44E-04	3.60E-05	2.14E-08	1.87E-05	9.20E-03	1.55E-04
C5X	1.19E-08	2.60E-06	4.66E-04	1.42E-05	1.97E-08	1.14E-05	1.77E-02	2.07E-04
C5Y	1.32E-08	4.27E-06	7.16E-04	2.52E-05	1.97E-08	1.62E-05	1.73E-02	2.22E-04
C5Z	1.27E-08	2.41E-06	3.58E-04	1.39E-05	1.86E-08	9.47E-06	9.58E-03	1.54E-04
C63X	2.66E-08	3.27E-05	4.14E-03	1.67E-04	3.38E-08	5.30E-04	2.06E-01	3.64E-03
C63Y	2.85E-08	3.27E-05	4.41E-03	1.60E-04	3.08E-08	5.25E-04	1.59E-01	2.95E-03
C63Z	4.87E-08	1.66E-04	1.26E-02	6.75E-04	3.18E-08	4.65E-03	1.14	2.55E-02
C62X	1.29E-08	1.53E-05	3.00E-03	9.21E-05	1.67E-08	4.08E-04	4.89E-01	1.06E-02
C62Y	1.31E-08	1.78E-05	8.52E-03	1.58E-04	1.71E-08	2.88E-04	4.75E-01	8.57E-03
C62Z	1.33E-08	1.81E-05	2.30E-03	9.59E-05	1.82E-08	3.50E-04	4.96E-01	8.89E-03
C61Z	3.98E-08	8.25E-05	1.42E-02	5.18E-04	1.88E-08	2.37E-04	7.48E-02	1.60E-03
C7Z	1.11E-08	1.33E-05	1.57E-03	6.74E-05	1.20E-08	4.37E-05	2.02E-02	3.49E-04
C8Z	1.35E-08	1.40E-05	2.47E-03	8.22E-05	2.58E-08	4.10E-05	1.31E-02	3.05E-04

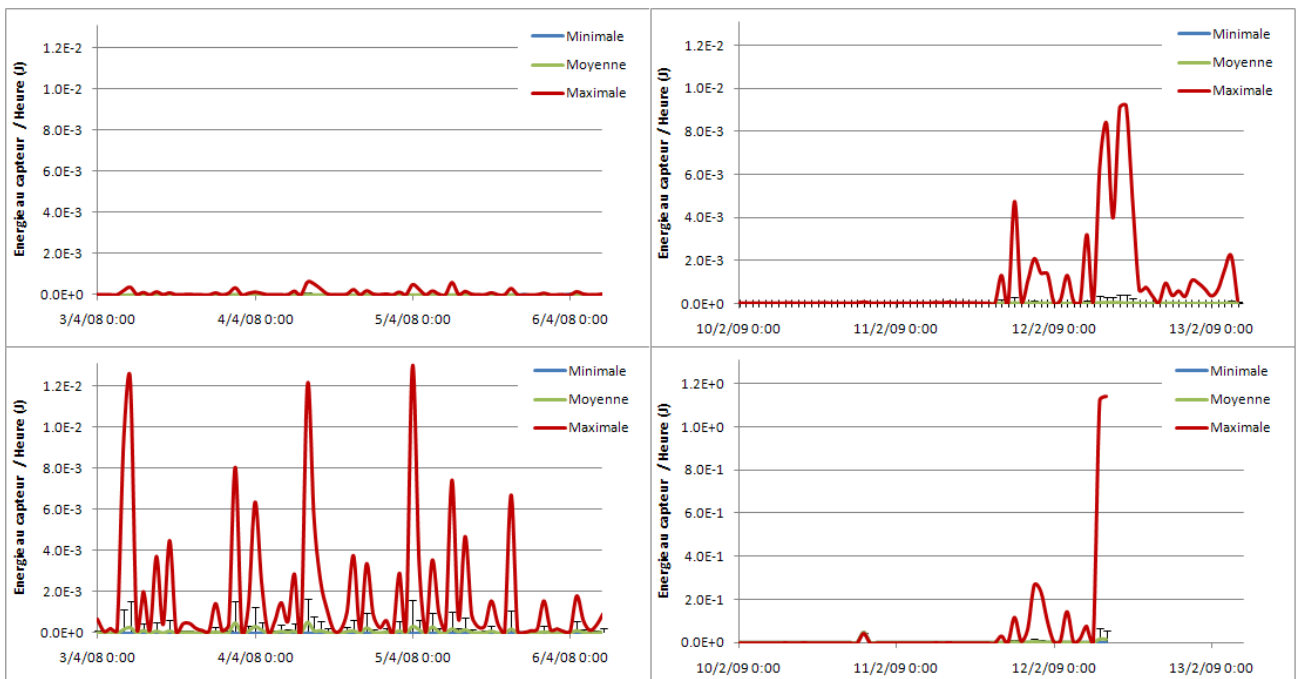


FIGURE 4.12 – Évolution des énergies minimales, moyennes et maximales enregistrées au niveau des voies verticales des sondes M3 (en haut) et M6.3 (en bas), entre les 03 et 06/04/08 (à gauche) et du 10 au 13/02/09 (à droite). Notons que l'échelle en énergie a été multipliée par 100 entre les périodes de crise et d'effondrement pour la sonde M6.3.

Aussi, aucune évolution notable n'est constatée durant la crise de 2008, les valeurs calculées étant similaires d'un bout à l'autre de la période. À l'inverse les trois jours précédents l'effondrement généralisé sont marqués par plusieurs sauts successifs. En outre, l'événement du 10/02/09 à 19:04:08 ressort nettement, son énergie au capteur étant jusqu'à 100 fois plus élevée que celle des événements jusqu'alors détectés (il s'agit notamment de l'événement le plus énergétique enregistré au niveau des sondes M6.1 et M8 sur toute la période d'acquisition). Puis, deux sauts importants sont mesurés : l'un, deux heures avant le premier pic d'activité et l'autre, une heure avant le deuxième. Suite à ce pic, les maxima atteints diminuent quelque peu. Ils ré-augmentent et atteignent un nouveau palier au moment du troisième pic d'activité, uniquement pour les sondes M5, M62, et M7 (Annexe B.3).

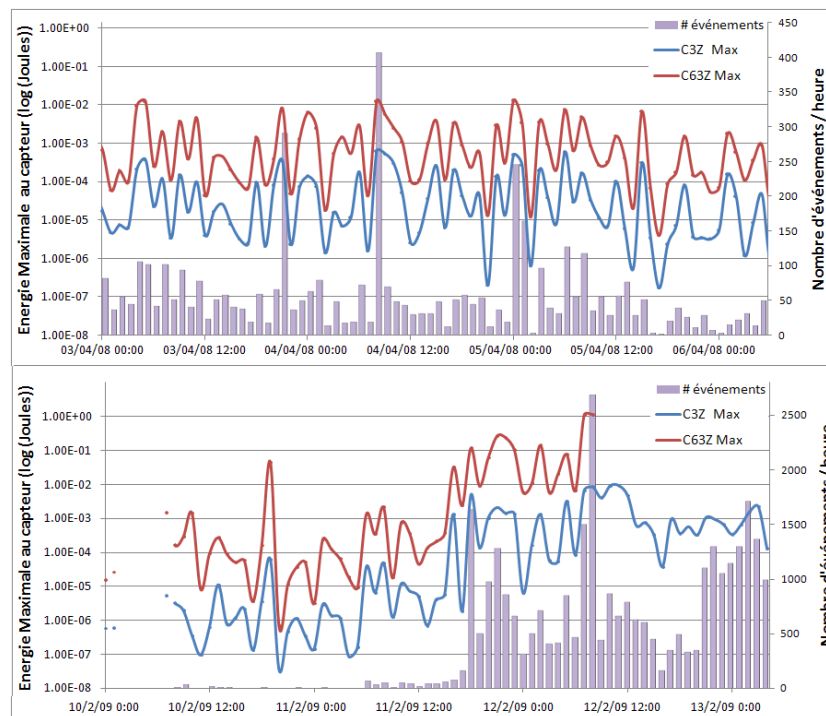


FIGURE 4.13 – Évolution de l'énergie au capteur maximale enregistrée au niveau des sondes M3 et M6.3 entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).

Les Tableaux 4.8 et 4.9 montrent les valeurs d'énergie au capteur minimales, moyennes et maximales atteintes par voies pour les périodes du 03 au 06 Avril 2008 et d'effondrement, respectivement pour les événements isolés et en rafale. De fait :

- les remarques effectuées pour l'ensemble des événements peuvent être réitérées pour les événements isolés et en rafale ;
- comme pour les amplitudes, ces valeurs sont systématiquement plus élevées pour les rafales que pour les événements isolés et les écarts-types montrent une plus grande dispersion des énergies mesurées pour les rafales. Notamment, pour la sonde M6.2, les écarts-types déterminés pour la période d'effondrement sont de 50 à plus de 100 fois plus élevés pour les rafales que pour les événements isolés ;
- de même, les maxima atteints pour les rafales dépassent 2 à 4 fois ceux des événements isolés pendant les crises et jusqu'à 65 fois (pour la voie sonde M6.2) lors de l'effondrement.

4.3. ÉNERGIE AU CAPTEUR

TABLE 4.8 – *Comparaison entre les énergies minimales, moyennes et maximales observées pour les événements isolés, du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d’effondrement.*

Énergie (J)	03-06 Avril 08				10-13 Février 2009			
	Minimum	Moyenne	Maximum	Écart-Type	Minimum	Moyenne	Maximum	Écart-Type
C1Z	1.19E-08	1.04E-07	1.29E-05	5.34E-07	2.06E-08	1.37E-07	2.81E-04	2.43E-06
C2Z	1.31E-08	5.27E-07	9.29E-05	3.31E-06	2.22E-08	1.20E-06	2.57E-03	2.24E-05
C3X	1.18E-08	3.03E-06	6.41E-04	2.04E-05	2.26E-08	4.41E-06	2.90E-03	4.04E-05
C3Y	1.21E-08	2.65E-06	7.40E-04	1.93E-05	2.15E-08	3.50E-06	3.61E-03	4.13E-05
C3Z	1.25E-08	1.59E-06	3.54E-04	1.07E-05	2.14E-08	2.61E-06	3.98E-03	4.06E-05
C5X	1.19E-08	5.73E-07	1.90E-04	4.87E-06	2.20E-08	9.67E-07	1.66E-03	1.66E-05
C5Y	1.32E-08	7.65E-07	1.43E-04	4.89E-06	2.22E-08	1.51E-06	3.17E-03	3.12E-05
C5Z	1.27E-08	4.78E-07	6.51E-05	3.05E-06	2.15E-08	8.22E-07	1.69E-03	1.66E-05
C63X	2.66E-08	6.78E-06	5.65E-04	3.05E-05	3.38E-08	2.40E-05	2.16E-02	2.72E-04
C63Y	2.85E-08	8.08E-06	1.18E-03	4.16E-05	3.08E-08	3.21E-05	3.95E-02	5.67E-04
C63Z	4.87E-08	3.53E-05	6.35E-03	2.01E-04	3.18E-08	1.89E-04	1.12E-01	1.92E-03
C62X	1.29E-08	3.64E-06	1.18E-03	3.48E-05	1.67E-08	1.39E-05	3.33E-02	3.17E-04
C62Y	1.31E-08	4.12E-06	2.05E-03	5.46E-05	1.71E-08	1.18E-05	7.41E-03	1.06E-04
C62Z	1.33E-08	4.31E-06	7.37E-04	2.66E-05	1.82E-08	1.80E-05	2.71E-02	2.66E-04
C61Z	3.98E-08	1.80E-05	4.33E-03	1.19E-04	1.88E-08	2.80E-05	2.40E-02	3.78E-04
C7Z	1.11E-08	3.14E-06	7.77E-04	2.43E-05	1.20E-08	5.97E-06	1.15E-02	1.19E-04
C8Z	1.35E-08	2.93E-06	6.15E-04	1.95E-05	2.58E-08	5.12E-06	1.09E-02	9.67E-05

TABLE 4.9 – *Comparaison entre les énergies minimales, moyennes et maximales observées pour les événements en rafale, du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d’effondrement.*

Énergie (J)	03-06 Avril 08				10-13 Février 2009			
	Minimum	Moyenne	Maximum	Écart-Type	Minimum	Moyenne	Maximum	Écart-Type
C1Z	1.32E-08	1.57E-06	7.08E-05	5.19E-06	2.17E-08	2.51E-06	7.82E-03	6.51E-05
C2Z	1.93E-08	7.36E-06	2.94E-04	2.38E-05	2.36E-08	1.63E-05	8.32E-03	1.07E-04
C3X	2.32E-08	3.97E-05	1.61E-03	1.17E-04	2.45E-08	6.68E-05	2.28E-02	4.00E-04
C3Y	2.62E-08	3.59E-05	2.01E-03	1.34E-04	2.58E-08	5.56E-05	1.68E-02	3.10E-04
C3Z	2.16E-08	2.06E-05	6.44E-04	5.88E-05	2.35E-08	3.56E-05	9.20E-03	2.16E-04
C5X	1.49E-08	6.74E-06	4.66E-04	2.33E-05	1.97E-08	2.06E-05	1.77E-02	2.67E-04
C5Y	1.65E-08	1.14E-05	7.16E-04	4.26E-05	2.01E-08	2.89E-05	1.73E-02	2.73E-04
C5Z	1.83E-08	6.35E-06	3.58E-04	2.34E-05	1.91E-08	1.78E-05	9.58E-03	2.06E-04
C63X	2.16E-07	8.57E-05	4.14E-03	2.81E-04	3.36E-07	1.10E-03	2.06E-01	5.23E-03
C63Y	2.90E-07	8.29E-05	4.41E-03	2.66E-04	3.35E-08	1.08E-03	1.59E-01	4.18E-03
C63Z	1.54E-06	4.31E-04	1.26E-02	1.09E-03	2.77E-06	9.65E-03	1.14E+00	3.65E-02
C62X	1.70E-08	3.90E-05	3.00E-03	1.50E-04	2.04E-08	8.18E-04	4.89E-01	1.51E-02
C62Y	2.13E-08	4.56E-05	8.52E-03	2.62E-04	2.45E-08	5.75E-04	4.75E-01	1.22E-02
C62Z	9.81E-08	4.63E-05	2.30E-03	1.59E-04	2.59E-08	6.95E-04	4.96E-01	1.27E-02
C61Z	2.62E-07	2.14E-04	1.42E-02	8.73E-04	3.03E-08	4.48E-04	7.48E-02	2.22E-03
C7Z	2.79E-08	3.40E-05	1.57E-03	1.09E-04	1.78E-08	8.29E-05	2.02E-02	4.81E-04
C8Z	3.86E-08	3.66E-05	2.47E-03	1.38E-04	2.99E-08	7.85E-05	1.31E-02	4.21E-04

4.3. ÉNERGIE AU CAPTEUR

La Figure 4.14 représente l'évolution des énergies maximales enregistrées au niveau des voies verticales des sondes M3 et M6.3 comparée au nombre d'événements isolés et en rafales détectés par tranche horaire.

Ainsi, l'évolution des maxima calculée pour les rafales concorde avec celle déterminée pour l'ensemble des enregistrements. En revanche, pour les événements isolés, on remarque la disparition du saut mesuré sur la sonde M6.3 lors du second pic d'activité pendant l'effondrement et les variations des maxima divergent davantage d'une sonde à l'autre après le premier pic. Notons par ailleurs que les maxima des événements de type rafale sont beaucoup plus hétérogènes que ceux de type isolé ; en particulier pendant les crises, leurs fluctuations sont de plus grande ampleur.

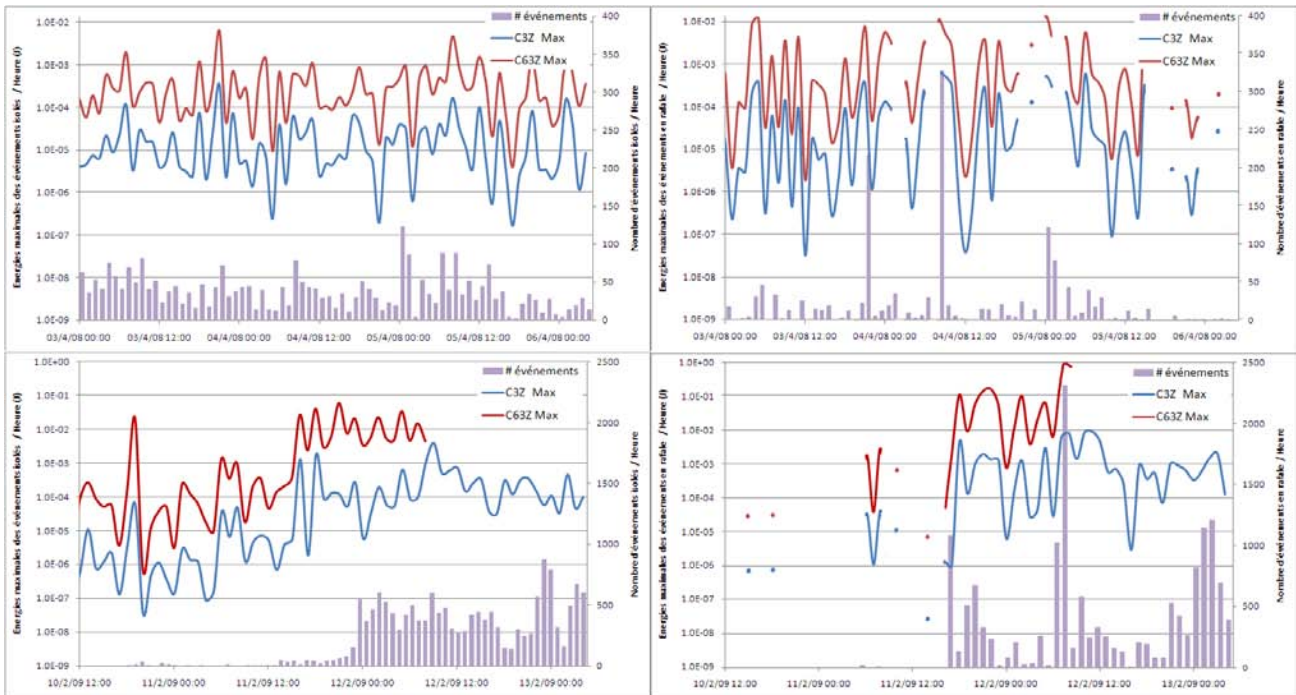


FIGURE 4.14 – Évolution de l'énergie au capteur maximale enregistrée, au niveau des sondes M3 et M6.3 entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas), pour des événements isolés (à gauche) et "en rafale" (à droite). Notons que l'échelle en énergie a été multipliée par 100 entre les périodes de crise et d'effondrement.

4.3.3 Rapports d'énergie au capteur

Le Tableau 4.10 compare les rapports d'énergie à la sonde M6.3, pendant les crises et la période d'effondrement, jusqu'à ce que celle-ci ne soit plus opérationnelle. Les calculs ont été réalisés ici en faisant la moyenne des énergies sur les trois composantes pour les sondes 3D.

De fait, on s'aperçoit que l'ensemble des remarques énoncées pour les rapports d'amplitude sont aussi valables pour ceux en énergie au capteur. En effet, les valeurs estimées sont en moyenne toutes inférieures à 1 ; ces dernières diminuent entre les deux périodes, à l'exception des rapports d'énergie maximaux déterminés avec la sonde M6.2.

La Figure 4.15 représente l'évolution des rapports d'énergie des sondes M3 et M6.2 sur la sonde M6.3, entre les 03 et 06 Avril 2008 et du 10 au 13 Février 2009.

Ces derniers sont assez stables durant les crises, s'étendant dans une bande allant de 0.001 à 1, tandis qu'au cours des trois jours d'opération précédents l'effondrement, les minima diminuent dès le premier pic d'activité et la proportion d'événements se déclenchant à proximité de la sonde M6.3 (rapports d'énergie très faibles) devient plus importante.

4.3. ÉNERGIE AU CAPTEUR

TABLE 4.10 – Comparaison entre les rapports d'énergie à la sonde M6.3 du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.

Rapport d'énergie	03-06 Avril 08				10-13 Février 2009			
	Minimum	Moyen	Maximum	Écart-Type	Minimum	Moyen	Maximum	Écart-Type
M1	7.56E-05	1.75E-02	9.23E-01	2.07E-02	2.96E-06	4.96E-03	7.61E-01	1.89E-02
M2	2.66E-04	4.45E-02	9.36E-01	3.77E-02	2.09E-05	9.08E-03	7.59E-01	2.04E-02
M3	6.56E-04	1.88E-01	6.19E+00	2.80E-01	7.83E-05	3.30E-02	1.74E+00	6.29E-02
M5	2.56E-04	4.40E-02	2.43E+00	3.74E-02	3.09E-05	9.47E-03	7.64E-01	2.08E-02
M62	7.55E-03	2.22E-01	2.65E+00	1.60E-01	1.29E-04	1.50E-01	3.15E+02	3.94E+00
M61	3.82E-05	9.07E-01	5.65E+01	1.04E+00	2.26E-04	1.41E-01	2.22E+01	3.74E-01
M7	3.82E-05	1.56E-01	3.95E+01	4.19E-01	5.83E-05	2.53E-02	8.43E-01	4.31E-02
M8	3.82E-05	1.65E-01	3.20E+00	1.48E-01	9.70E-05	2.44E-02	1.53E+00	4.05E-02

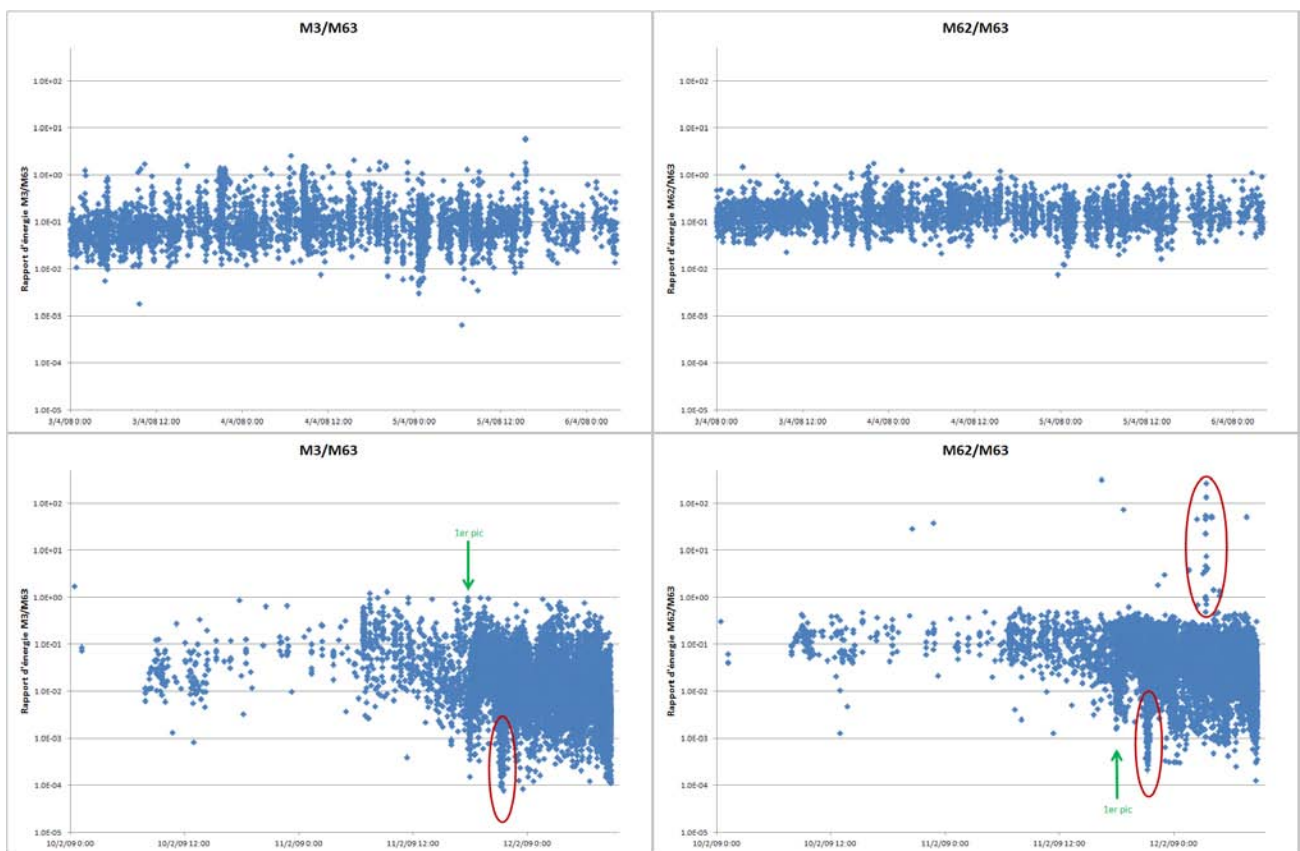


FIGURE 4.15 – Évolution des rapports d'énergie, à la sonde M6.3, entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).

Les événements se démarquant par leur rapport d'amplitude, tels que ceux atteignant des valeurs supérieures à 1 entre les deux pics d'activité, se détachent aussi par leur rapport en énergie.

N.B. : Les résultats obtenus en séparant les événements isolés des rafales sont disponibles en Annexe B.3.

4.3.4 Comparaison entre les ondes P et S

La Figure 4.16 représente les rapports d'énergie des ondes S sur P mesurées aux sondes 3D. Ces derniers varient plus que les rapports en amplitude, oscillant entre 0 et 210 ; ceci pouvant s'ex-

plier par le fait que l'énergie dépend aussi de la longueur des événements.

De plus, de même que pour les amplitudes, ils diffèrent d'une sonde à l'autre, étant en moyenne plus élevés pour la sonde M3 et plus faibles pour la M5, où ils sont souvent inférieurs à 1. Les hypothèses, énoncées précédemment peuvent ici aussi être avancées.

Concernant leur évolution, il semblerait que les valeurs maximales augmentent au cours du temps (tout du moins pour les sondes M3, M6.2 et M6.3). Toutefois, cette indication est à prendre avec précaution, étant donné le faible nombre d'événements pointés.



FIGURE 4.16 – Évolution des rapports en énergie au capteur des ondes P et S déterminés au niveau des sondes 3D, entre les 10 et 13/02/09. Notons que l'échelle des figures est logarithmique.

4.3.5 Conclusions sur l'évolution en énergie au capteur

L'évolution des énergies au capteur concorde avec celle déterminée pour les amplitudes. Elle est similaire d'une sonde à l'autre et la période d'effondrement se démarque des crises par les valeurs d'énergies atteintes. Aussi l'évolution des minima et moyennes par sonde est peu significative par rapport à celle des maxima. Notons que les écarts de mesure entre les diverses sondes sont plus marqués en énergie qu'en amplitude.

Par ailleurs, l'énergie des événements en rafale est aussi en moyenne supérieure à celle des événements isolés. Ceci pourrait indiquer que les événements isolés ont des énergies plus faibles que celles des rafales. Néanmoins, étant donné que les calculs s'effectuent sur toute la fenêtre d'enregistrement, les valeurs déterminées pour les rafales peuvent résulter de la somme des énergies de plusieurs événements et non d'un seul.

De même, la dispersion des énergies est beaucoup plus élevée pour les événements en rafale ; ceci pourrait témoigner de l'hétérogénéité de ces événements ou simplement provenir de la variation du nombre d'événements dans la fenêtre d'enregistrement.

4.4 Fréquence Fondamentale apparente

4.4.1 Détermination de la fréquence fondamentale des signaux

4.4.1.1 Estimation

L'évolution du contenu fréquentiel des événements, en particulier la fréquence fondamentale, où le spectre atteint son amplitude maximale (Figure 4.17), a été examinée.

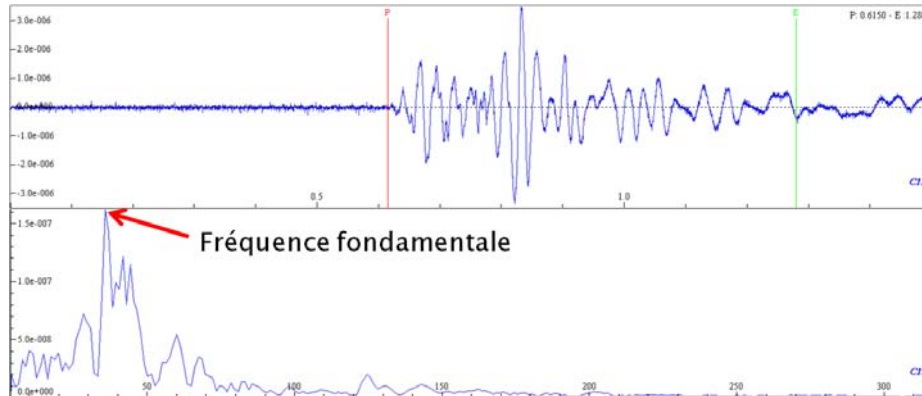


FIGURE 4.17 – Fréquence fondamentale apparente

Remarque : La fréquence d'échantillonnage a été fixée à 5 kHz. D'après le théorème de Shannon-Nyquist, la fréquence maximale pouvant être théoriquement déterminée est de 2.5 kHz. Or, la réponse des géophones est assurée par le constructeur jusqu'à 1 kHz ; les fréquences données au-delà de cette valeur sont donc éventuellement faussées et doivent être prises en compte avec précaution.

4.4.1.2 Élimination des valeurs aberrantes

Dans un premier temps, l'ensemble des événements a été considéré.

Or, le bruit enregistré au niveau des divers capteurs était différent du bruit blanc et présentait des fréquences dominantes. Ces dernières provenaient en majorité de parasites électriques (courants harmoniques), reconnaissables par le fait qu'ils possèdent des fréquences fondamentales égales à un multiple (en général impair) de 50 Hz (fréquence fondamentale de la tension électrique délivrée). Ces fréquences peuvent masquer les valeurs propres des événements. Ceci est le cas notamment lorsqu'ils sont peu émergents ou quand le bruit est élevé (Annexe B.4.1).

En outre, les graphes représentant les fréquences des événements en fonction du temps montraient des "alignements" inexplicables au niveau de certaines valeurs (Annexe B.4.1). En visualisant les sismogrammes et les spectres associés à chacune d'entre elles, plusieurs fréquences parasites ont été identifiées, pour toutes les sondes, sur les deux périodes à : 0.610352 Hz, 50.0488 Hz, 149.536 et 150.146 Hz.

De plus, les fréquences dominantes supérieures à 400 Hz résultaient de parasites, pour l'ensemble des sondes, à l'exception de la M6.2 et M6.3. De fait, pendant l'effondrement, à partir du 12/02/09 à 03h19, certains événements enregistrés sur la sonde M6.2 possèdent des fréquences fondamentales supérieures à 400 Hz et seules les valeurs dépassant 700 Hz pour la voie C62X et 600 Hz pour les voies C62Y et C62Z de la sonde M6.2 sont dues à des parasites. Le comportement de la M6.3 diffère quant à lui des autres sondes puisque les fréquences de plus de 400 Hz sont systématiquement liées à des événements.

Aussi, seuls les parasites déterminés à environ 50 Hz peuvent réellement poser problème, puisqu'ils appartiennent à la gamme de fréquences caractéristiques des événements enregistrés par les sondes. Cependant, les valeurs déterminées après avoir pointé le début (i.e. le temps d'arrivée de l'onde P) et la fin des événements, s'éloignent systématiquement de la valeur de 50.0488 Hz. Il a donc été décidé de ne pas en tenir compte (Annexe B.4.1).

4.4.2 Comparaison entre les Crises et l'Effondrement

Le Tableau 4.11 présente les valeurs minimales, moyennes et maximales de fréquence fondamentale apparente par événement et par voie pour les périodes du 03 au 06 Avril 2008 et celle d'effondrement, après avoir retiré les fréquences parasites. Le nombre d'événements utilisés pour effectuer ce calcul est également indiqué. Il s'ensuit que :

- le contenu fréquentiel ne semble pas forcément diminuer avec la distance du centre du réseau : si les valeurs déterminées pour la M6.3 sont en moyenne 2 à 4 fois supérieures aux autres sondes, ces dernières quant à elles enregistrent toutes à peu près les mêmes gammes de fréquences ;
- à profondeur ou distances égales du centre du réseau, les fréquences relevées sont du même ordre de grandeur ;
- les valeurs observées semblent peu diverger entre les voies horizontales et verticales des sondes 3D, sauf au niveau de la sonde M6.2 pendant les crises et la M6.3 pour la période d'effondrement, où les fréquences des voies horizontales sont environ 1.5 fois supérieures à celles de la voie Z ;
- les fréquences moyennes n'évoluent quasiment pas d'une période à l'autre, hormis pour la sonde M6.3 où elles sont multipliées par 2 à 3 et pour la sonde M6.2 où les trois composantes finissent par enregistrer les mêmes fréquences ;
- de même, la dispersion des valeurs enregistrées n'augmente réellement que pour la M6.3 ;
- les fréquences maximales atteintes sur les deux périodes quant à elles enregistrent une augmentation plus significative, allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de Hertz selon les sondes. Notamment, la sonde M6.3 sature en fréquence sur les trois voies pendant l'effondrement.

TABLE 4.11 – *Comparaison entre les fréquences minimales, moyennes et maximales observées sur les diverses voies du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.*

Fréquence (Hz)	03-06 Avril 08					10-13 Février 2009				
	Min	Moy	Max	σ	‡ Valeurs	Min	Moy	Max	σ	‡ Valeurs
C1Z	4.27	42.41	102.54	14.76	2155	4.27	41.44	128.78	12.41	17623
C2Z	4.27	47.13	242.92	14.83	3177	4.27	47.15	234.38	11.81	25123
C3X	14.04	48.46	191.04	22.48	3933	5.49	51.05	226.44	20.63	28066
C3Y	7.32	48.8	184.33	22.22	3819	7.32	52.51	232.54	22.01	27884
C3Z	4.27	51.28	257.57	26.02	3741	7.32	50.88	288.7	20.71	27327
C5X	4.27	41.82	166.02	18.28	3448	4.88	46.93	347.29	18.32	22054
C5Y	4.27	43.52	244.75	20.33	3434	4.88	50.29	369.87	21.62	22561
C5Z	4.27	41.98	255.13	19.29	2496	4.27	45.98	305.18	21.6	22253
C63X	15.87	86.04	1044.31	96.78	4170	7.93	252.71	2500	283.3	13641
C63Y	17.7	88.17	817.87	90.72	4162	17.7	229.94	2500	271.78	13589
C63Z	14.65	91.94	864.87	69.92	4267	20.75	146.03	2500	248.45	13779
C62X	4.27	39.26	236.21	20.41	3725	4.88	60.78	682.37	33.76	25360
C62Y	5.49	39.98	189.21	21.38	3785	6.1	60.3	591.43	31.98	24673
C62Z	10.99	60.4	343.63	36.72	4108	4.88	58.32	521.85	32.95	25385
C61Z	10.38	39.16	246.58	20.59	4248	4.88	45.02	346.07	32.38	26126
C7Z	7.32	40.46	120.24	14.61	4035	4.88	37.99	166.02	9.04	24470
C8Z	6.71	41.77	157.47	14.31	4085	4.27	41.88	396.12	14.79	27902

La Figure 4.18 montre l'évolution des fréquences fondamentales apparentes par événement enregistrées au niveau des voies verticales des sondes M3 et M6.3, en termes de minima, moyennes et maxima par tranche horaire.

On observe que les fréquences sont en moyenne stables pour chaque période.

Aussi, aucune augmentation notable n'est constatée durant la crise de 2008, les valeurs calculées évoluant de manière assez monotone.

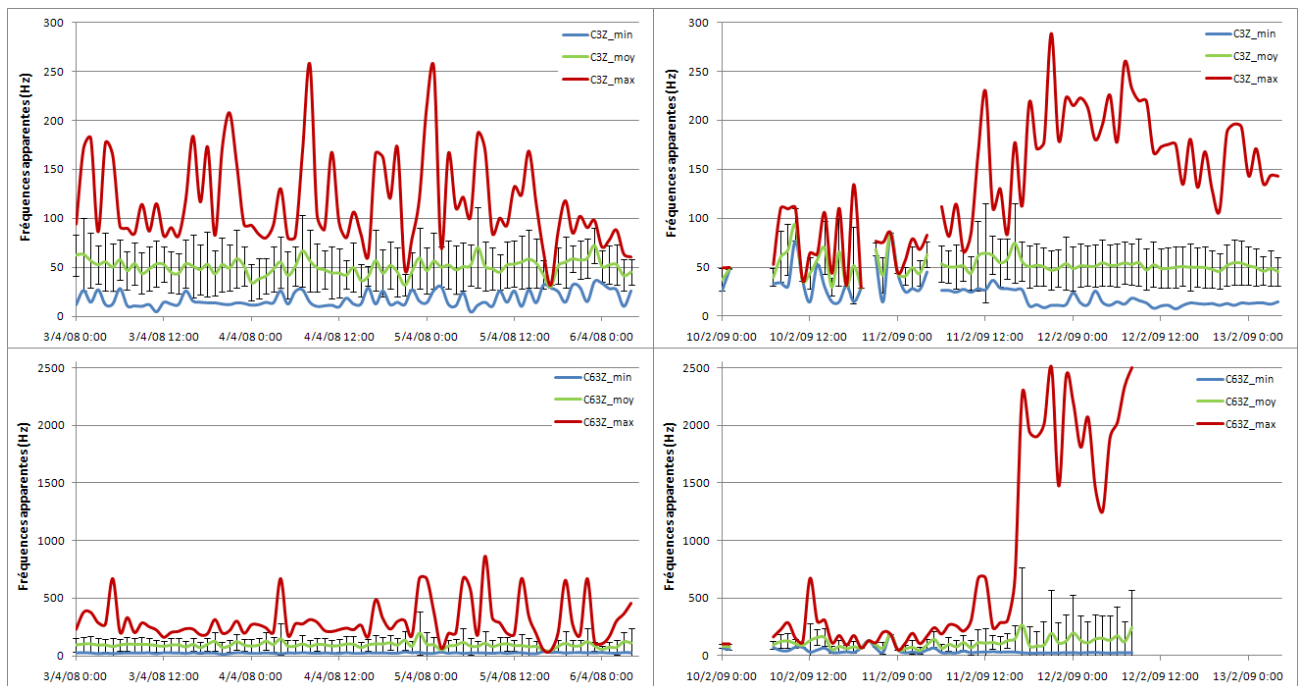


FIGURE 4.18 – Évolution des fréquences apparentes minimales, moyennes et maximales au niveau des voies verticales des sondes M3 (en haut) et M6.3 (en bas), entre les 03 et 06/04/08 (à gauche) et du 10 au 13/02/09 (à droite). Notons que l'échelle en fréquence a été multipliée par un peu plus de 8 entre les graphes des deux sondes.

Seuls les maxima mesurés au niveau de la sonde M6.3 varient de manière significative d'une période à l'autre et au cours même de l'effondrement. En particulier, un saut est observé le 11/02 entre 12h et 18h : les fréquences maximales apparentes étant multipliées par un facteur cinq sur cette sonde, dépassant ainsi largement les valeurs jamais atteintes.

Le contenu fréquentiel des autres sondes quant à lui ne change quasiment pas durant la période d'effondrement (Annexe B.4.3). Notons cependant que :

- les maxima atteints par les sondes M3 et M5 enregistrent un saut avant le premier pic d'activité (les valeurs restant toutefois similaires à celles estimées au cours des crises) ;
- entre les deux premiers pics d'activité, la sonde M6.2 commence à détecter des fréquences dominantes supérieures à 400 Hz, tandis que la sonde de surface, M8, enregistre pour la première fois des valeurs supérieures à 200 Hz.

La Figure 4.19 présente l'évolution des fréquences apparentes maximales enregistrées au niveau des voies verticales des sondes M3 et M6.3 comparée au nombre d'événements détectés par tranche horaire.

De fait, à l'inverse des amplitudes et énergies, on constate que l'évolution des maxima diffère d'une sonde à l'autre (ainsi que sur les différentes voies des sondes 3D, Annexe B.4.3) ; les oscillations ne présentant aucune correspondance d'une courbe à l'autre.

De plus, leurs variations sont indépendantes du taux de microsismicité. Ceci est particulièrement visible pendant les crises, où des événements de fréquence plus faible peuvent être détectés au moment des pics d'activité. Pendant l'effondrement, comme indiqué précédemment, le saut le plus important dans les fréquences maximales de la M6.3 est enregistré avant le premier pic.

Par ailleurs, au cours de l'effondrement, il est à noter que le contenu fréquentiel sur les voies horizontales de la sonde M6.3 commence à augmenter avant celui de la voie verticale (Figure 4.20) ; ceci n'étant pas visible pour les autres paramètres. Sur les sondes M3 et M5, ce phénomène n'est pas non plus observable ; sur la M6.2, les courbes d'évolution des fréquences maximales présentent des sauts ponctuels à partir du premier pic d'activité, d'abord uniquement pour les voies horizontales, puis sur les trois composantes un peu avant la perte de la sonde.

4.4. FRÉQUENCE FONDAMENTALE APPARENTE

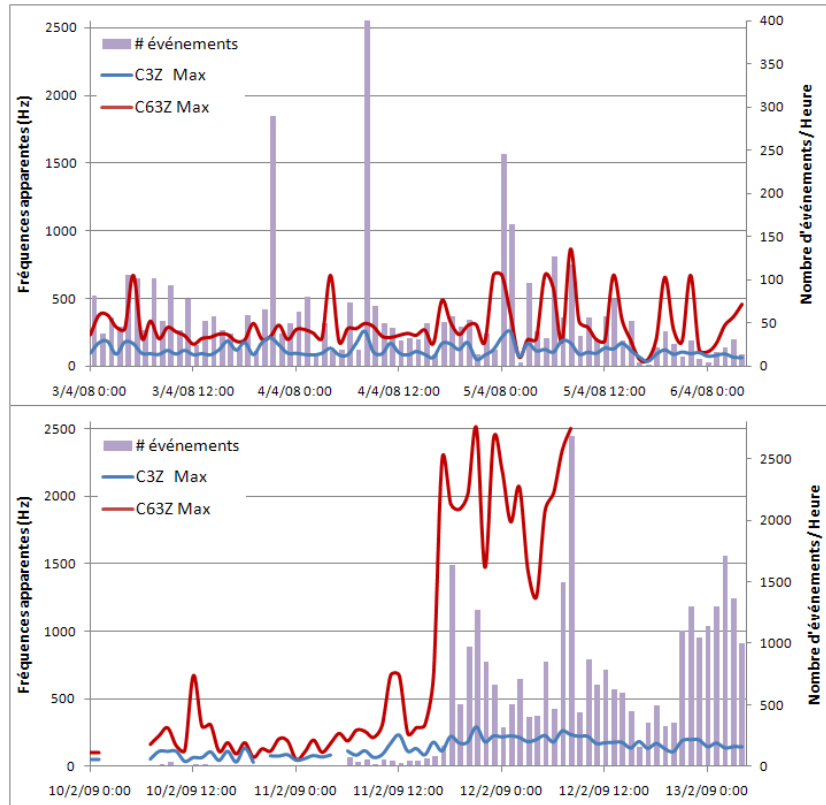


FIGURE 4.19 – Évolution des fréquences apparentes maximales enregistrées, au niveau des sondes M3 et M6.3 entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).

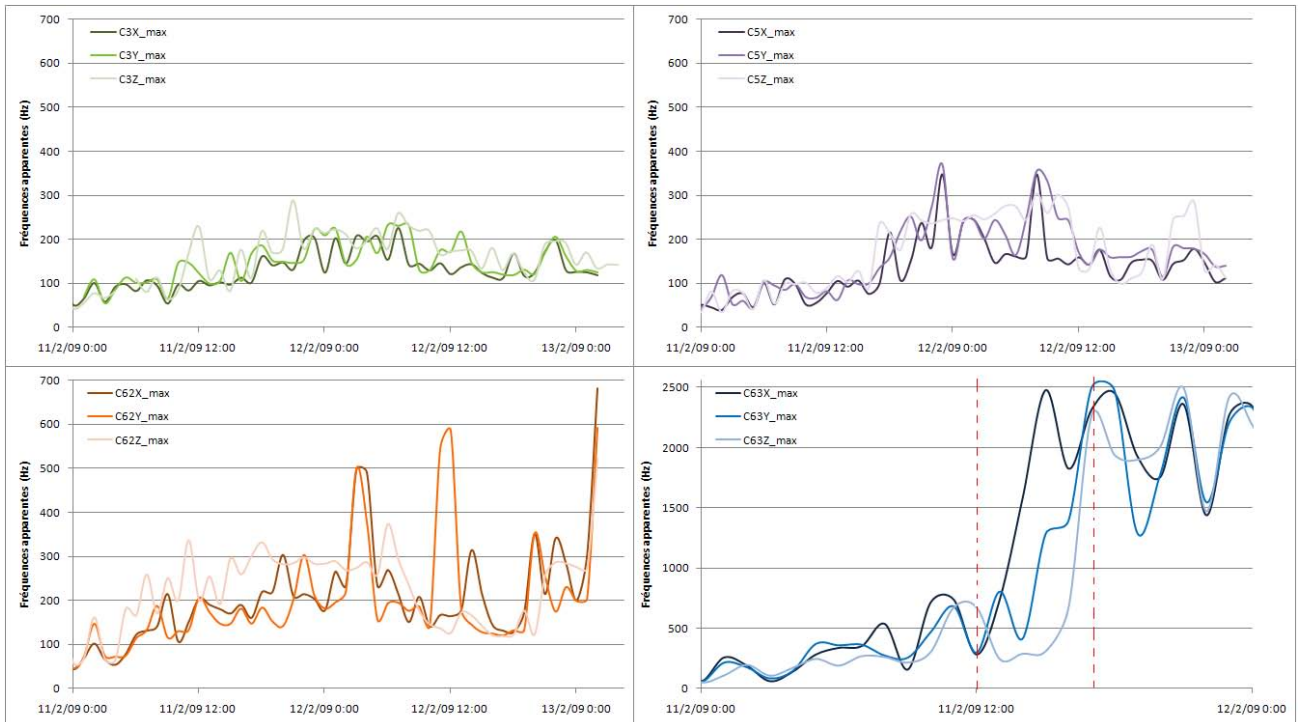


FIGURE 4.20 – Évolution des fréquences fondamentales maximales observées au niveau des trois voies des sondes 3D, durant l'effondrement. Notons que l'échelle a été multipliée par 4 pour la sonde M6.3.

4.4. FRÉQUENCE FONDAMENTALE APPARENTE

En considérant indépendamment les événements isolés (Tableau 4.12) et en rafale (Tableau 4.13), on observe que :

- les remarques effectuées pour l'ensemble des événements peuvent être réitérées ;
- à l'exception de la sonde M6.3, les fréquences moyennes enregistrées sont du même ordre de grandeur pour les deux types d'événements (les valeurs calculées pour les rafales étant en moyenne toutefois légèrement inférieures à celles des événements isolés) ;
- de même, les fréquences maximales sur les deux périodes sont globalement supérieures pour les événements isolés, excepté pour la sonde M6.2, pendant l'effondrement, où elles sont en-dessous de 6 à 184 Hz de celles des rafales. Pour la sonde M6.3, la saturation est atteinte uniquement pour les événements isolés ;
- mise à part la sonde M1, la dispersion des valeurs calculées est supérieure pour les événements isolés, sur les deux périodes.

N.B. : D. Mercerat (2007) avait calculé pour quelques sismogrammes de sondes 3D enregistrés en 2005, un contenu fréquentiel oscillant entre :

- 20 et 150 Hz, avec une dominante autour de 80 Hz pour les événements isolés ;
- 20 et 80 Hz avec des pics de résonance essentiellement dans les basses fréquences, pour les rafales.

Ces valeurs concordent avec celles que nous avons déterminées. Les fréquences fondamentales des événements isolés, néanmoins quelques peu élevées, peuvent s'expliquer par le peu d'événements pris en compte, ces derniers étant tous bien émergents.

La Figure 4.21 représente l'évolution des fréquences maximales enregistrées au niveau des voies verticales des sondes M3 et M6.3 comparée au nombre d'événements isolés et en rafales détectés par tranche horaire. L'évolution des maxima pour les événements isolés est identique à celle observée pour l'ensemble des événements. Pour les rafales, cette dernière diffère pour la sonde M6.3. En effet, pendant les crises de 2008, les fréquences maximales déterminées par tranche horaire sont systématiquement inférieures et lors de l'effondrement, leur évolution est beaucoup plus irrégulière, avec notamment des fréquences plutôt basses entre les deux premiers pics d'activité.

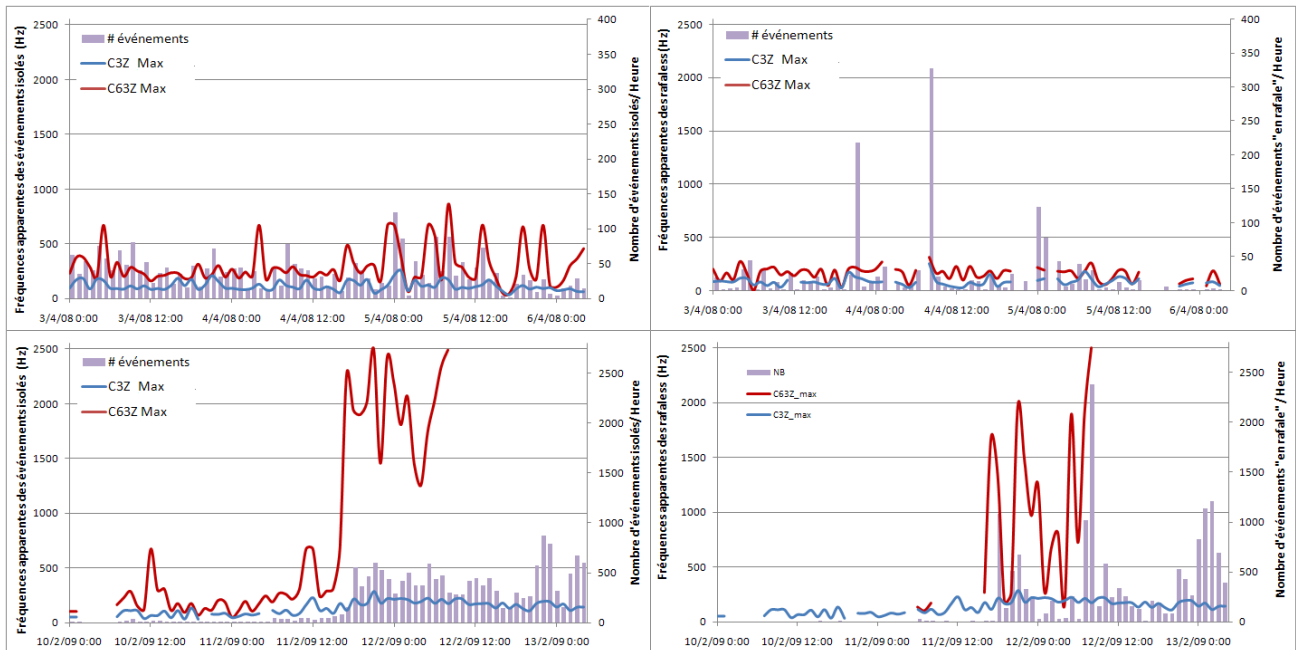


FIGURE 4.21 – Évolution des fréquences apparentes maximales enregistrées au niveau des sondes M3 et M6.3, entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas), pour des événements isolés, (à gauche) et "en rafale" (à droite).

4.4. FRÉQUENCE FONDAMENTALE APPARENTE

TABLE 4.12 – *Comparaison entre les fréquences minimales, moyennes et maximales des événements isolés observées du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.*

Fréquence (Hz)	03-06 Avril 08					10-13 Février 2009				
	Min	Moy	Max	σ	# Valeurs	Min	Moy	Max	σ	# Valeurs
C1Z	4.27	43.01	87.89	14.5	910	4.27	40.81	125.12	12.22	5461
C2Z	4.27	47.06	242.92	15.43	1765	4.27	47.25	234.38	12.7	10786
C3X	14.04	50.37	191.04	23.58	2478	5.49	52.01	226.44	21.58	13285
C3Y	7.32	49.96	184.33	23.55	2366	10.99	53.12	232.54	22.86	13147
C3Z	4.27	51.28	253.3	26.03	2281	8.54	51.51	288.7	22.16	12677
C5X	4.27	42.15	166.02	18.35	2000	4.88	47.35	347.29	20.17	9281
C5Y	4.27	44.34	244.75	21.44	1999	5.49	51.36	369.87	24.48	9727
C5Z	4.27	43.93	255.13	21.77	1183	4.27	47.48	302.73	24.83	9440
C63X	15.87	95.49	1044.31	109.2	2700	15.26	303.53	2500	316.08	7096
C63Y	17.7	98.28	817.87	101.7	2693	17.7	276.4	2500	303.23	7067
C63Z	18.92	96.43	864.87	76.78	2799	21.36	157.28	2500	274.95	7261
C62X	4.27	40.67	236.21	22.24	2262	4.88	62.55	497.44	34.11	12124
C62Y	5.49	41.63	189.21	22.54	2327	6.1	62.47	585.33	32.19	11512
C62Z	10.99	64.51	343.63	40.13	2631	4.88	62.33	373.54	38.31	12219
C61Z	10.38	40.1	246.58	23.27	2787	4.88	50.29	346.07	41.68	12915
C7Z	7.32	41.1	120.24	14.8	2565	6.1	38.56	166.02	9.98	11265
C8Z	7.93	42.64	157.47	15.11	2616	4.27	42.98	396.12	19.01	13178

TABLE 4.13 – *Comparaison entre les fréquences minimales, moyennes et maximales des événements "en rafale" observées du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.*

Fréquence (Hz)	03-06 Avril 08					10-13 Février 2009				
	Min	Moy	Max	σ	# Valeurs	Min	Moy	Max	σ	# Valeurs
C1Z	4.27	41.98	102.54	14.94	1245	4.27	41.73	128.78	12.49	12162
C2Z	4.27	47.23	94.6	14.04	1412	4.27	47.08	174.56	11.09	14337
C3X	15.87	45.22	122.07	20.06	1455	7.32	50.19	144.65	19.7	14781
C3Y	15.87	46.92	120.24	19.71	1453	7.32	51.97	231.93	21.2	14737
C3Z	10.99	51.29	257.57	26.01	1460	7.32	50.33	258.79	19.35	14650
C5X	5.49	41.37	129.4	18.17	1448	4.88	46.62	241.7	16.85	12773
C5Y	5.49	42.38	156.86	18.61	1435	4.88	49.47	249.02	19.12	12834
C5Z	4.27	40.22	127.56	16.55	1313	4.27	44.88	305.18	18.8	12813
C63X	20.75	68.69	765.99	64.85	1470	7.93	197.61	2362.06	230.5	6545
C63Y	20.14	69.65	742.19	61.9	1469	17.7	179.6	1934.81	222.28	6522
C63Z	14.65	83.39	316.77	53.48	1468	20.75	133.51	2497.56	214.45	6518
C62X	6.71	37.09	158.69	16.98	1463	4.88	59.17	682.37	33.35	13236
C62Y	5.49	37.33	148.32	19.11	1458	6.1	58.39	591.43	31.67	13161
C62Z	11.6	53.1	236.82	28.25	1477	7.32	54.6	521.85	26.51	13166
C61Z	11.6	37.36	244.75	13.95	1461	6.71	39.87	261.84	17.92	13211
C7Z	10.38	39.35	93.38	14.19	1470	4.88	37.51	131.84	8.12	13205
C8Z	6.71	40.19	157.47	12.62	1469	4.27	40.9	172.73	9.44	14724

4.4.3 Causes des différences de fréquences calculées entre les voies des sondes 3D ?

Les fréquences fondamentales déterminées par les voies horizontales sont en moyenne plus faibles que celles de la voie verticale sur la sonde M6.2 pendant les crises et plus élevées sur la sonde M6.3 lors de l'effondrement. De fait, si les écarts en amplitude ou énergie sur les trois composantes d'une sonde 3D peuvent aisément s'expliquer (mouvements verticaux ou horizontaux plus ou moins importants), il n'en va pas de même pour les fréquences.

Signalons néanmoins que les spectres de tels événements suivent à peu près les mêmes variations, celles-ci étant d'amplitudes différentes d'une voie à l'autre.

4.4.3.1 Comparaison entre les ondes P et S

Les fréquences dominantes sont calculées sur toute la durée de l'événement. Or, en regardant certains fichiers où les variations entre les fréquences calculées étaient élevées, la présence d'une onde S a été observée. Les spectres associés à ces événements étaient bimodaux et en faisant varier la longueur du signal pris en compte, ces derniers pouvaient changer considérablement (Annexe B.4.2).

De fait, afin de vérifier si l'influence d'une onde S pouvait expliquer les écarts entre les valeurs déterminées sur les diverses composantes des sondes 3D, les fréquences dominantes ont été recalculées, d'une part, entre les pointés P et S et d'autre part, entre l'arrivée de l'onde S et la fin de l'événement, pour tous les enregistrements où les ondes cisailantes ont pu être discriminées.

La Figure 4.22 présente les variations mesurées entre les valeurs estimées sur les voies de la sonde M6.2, en prenant en compte la totalité de l'événement microsismique et l'intervalle entre les temps d'arrivée des ondes P et S ou celui entre les pointés S et la fin de l'événement. Il s'ensuit que :

- la majorité des fréquences des ondes P sont supérieures à celles définies pour l'événement entier. Les écarts observés peuvent être importants, allant jusqu'à 300 Hz ;
- à l'inverse, les valeurs déterminées pour les ondes S sont très proches de celles caractérisant tout l'événement.

Nous pouvons donc en conclure que les fréquences des ondes S sont en général prédominantes par rapport aux P, lorsqu'elles sont présentes.

Notons qu'après rotation des signaux suivant les directions de compression et de cisaillement (permettant de maximiser ces deux composantes, cf. Chapitre 5 et [3]), les fréquences des ondes P restent également en majorité supérieures à celles des ondes S.

Les écarts entre les fréquences mesurées sur les voies horizontales et la voie verticale de la sonde M6.2 sont tracées sur la Figure 4.23, en considérant soit tout l'événement ou simplement l'intervalle entre les pointés P et S. De fait, en comparant les divers graphes, on constate que : les variations de fréquences entre les 3 composantes peuvent soit augmenter (allant jusqu'à être multipliées par 6) soit disparaître complètement.

→ La présence d'une onde S sur certains événements n'explique donc pas entièrement la disparité des fréquences des signaux enregistrés sur les sondes 3D.

Remarque : Tous ces résultats sont aussi valables pour les autres sondes 3D (Annexe B.4.2).

4.4. FRÉQUENCE FONDAMENTALE APPARENTE

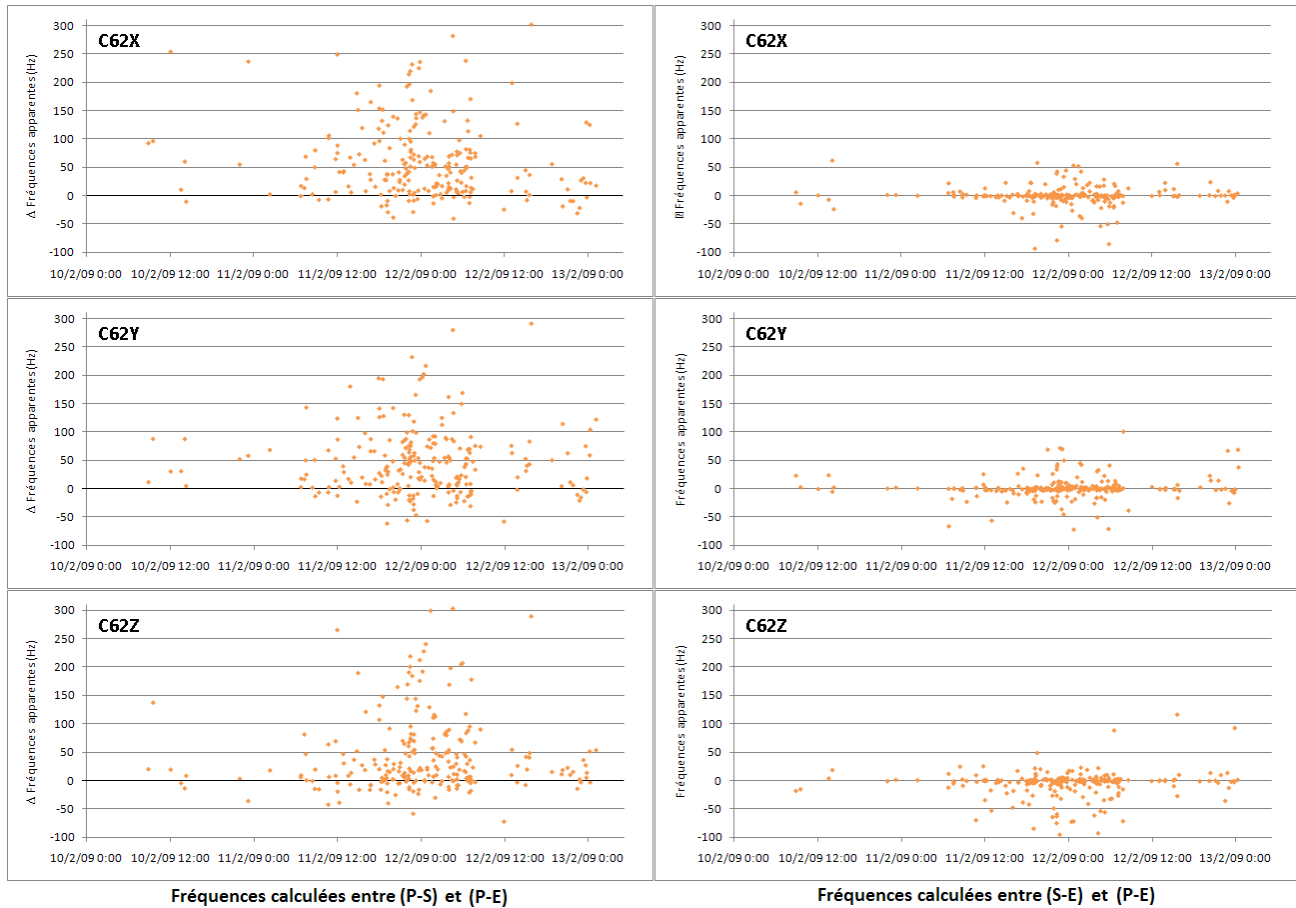


FIGURE 4.22 – Écarts entre les fréquences dominantes de tout l'événement et celles déterminées : entre les pointés P et S (à gauche) et entre l'arrivée de l'onde S et la fin de l'événement (à droite), au niveau des trois voies de la sonde M6.2.

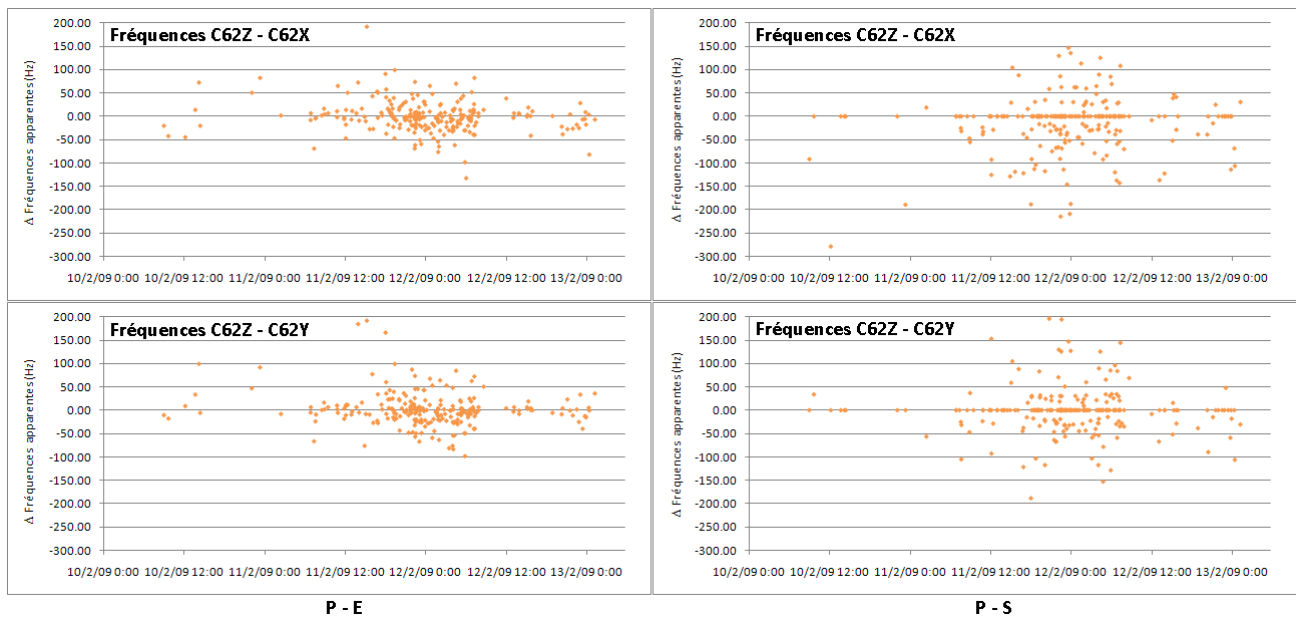


FIGURE 4.23 – Écarts entre les fréquences dominantes déterminées sur les voies horizontales et verticales de la sonde M6.2, en considérant tout l'événement (à gauche) et uniquement l'onde P (à droite).

4.4.3.2 Comparaison entre les écarts en amplitude et en fréquence des signaux

Bien que l'amplitude ou l'énergie des événements n'est pas censée jouer sur les variations de fréquences enregistrées par les composantes d'une sonde 3D, ces dernières peuvent éventuellement être masquées, du fait de l'influence plus ou moins marquée du bruit ambiant.

La Figure 4.24 confronte les écarts en amplitudes et ceux en fréquences des ondes P sur les signaux de la sonde M6.2 où l'onde S a été pointée. On constate qu'il n'existe pas de lien direct entre les différences d'amplitudes et celles en fréquences mesurées sur les diverses voies. En particulier, les événements de faible amplitude ne sont pas forcément ceux où les plus grands écarts sont détectés.

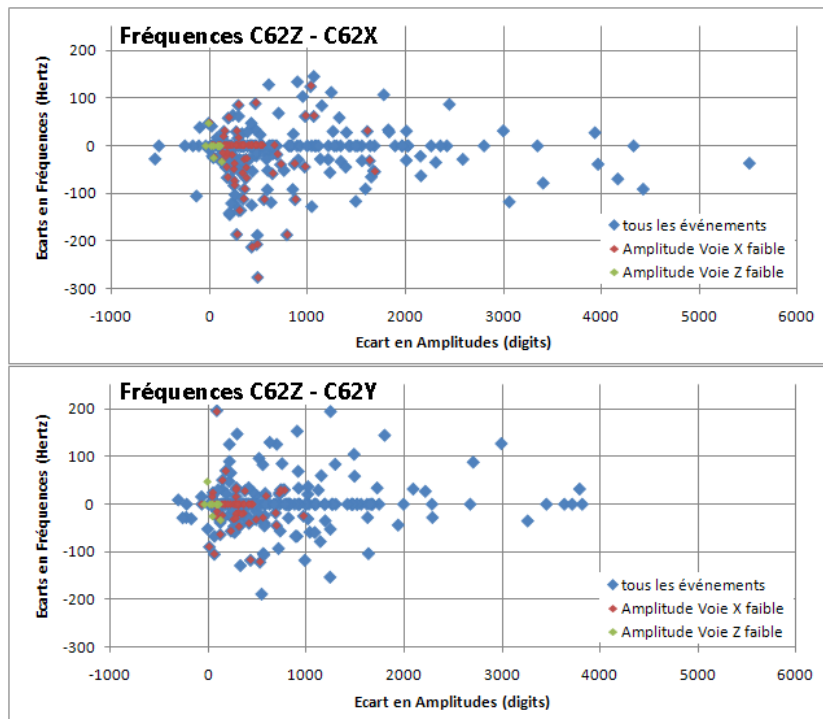


FIGURE 4.24 – Comparaison entre les écarts mesurés en amplitude et en fréquence des signaux sur les différentes voies de la sonde M6.2.

Ces remarques peuvent être réitérées pour les autres sondes tridirectionnelles ou en utilisant l'énergie au capteur des événements.

4.4.4 Conclusions sur l'évolution de la fréquence fondamentale apparente

Le bruit enregistré au niveau du site, du fait de parasites électriques, présente des fréquences dominantes pouvant fausser les analyses ; les événements, où ces dernières ont été observées, ont été écartés sur les diverses sondes. Notons que la prise en compte des événements déclenchant seuls (i.e. avec une amplitude supérieure à 200 digits) ou encore uniquement des fichiers pointés (avec au moins le début et la fin de l'événement) permet de limiter, voire de supprimer les erreurs.

L'évolution des fréquences fondamentales des événements diffère de celle rencontrée pour les amplitudes et énergies au capteur :

- elle diverge d'une sonde à l'autre ;
- seules les variations au niveau de la M6.3 (voire la M6.2) et en particulier des maxima atteints sont significatives ; il n'y a pas d'augmentation notable dans les gammes de fréquences enregistrées par les autres sondes entre les deux périodes ;

4.5. COMPARAISON ENTRE L'ÉVOLUTION DES AMPLITUDES, ÉNERGIES AU CAPTEUR ET FRÉQUENCES DES ÉVÉNEMENTS

- les valeurs calculées pour les événements isolés sont supérieures à celles des rafales.

Des différences parfois notables sont détectées entre les voies des sondes 3D. Ces dernières ne peuvent cependant pas être totalement imputées à la présence occasionnelle d'une onde cisailante ou aux variations d'amplitude des signaux parfois élevées entre les diverses composantes.

4.5 Comparaison entre l'évolution des Amplitudes, Énergies au capteur et Fréquences des Événements

Les valeurs des divers paramètres, i.e. amplitude, énergie et fréquence fondamentale apparente par événement et par sonde, ont été centrées réduites (en soustrayant ces dernières par leur moyenne et en divisant ensuite par leur écart-type), afin de pouvoir comparer leur évolution. En superposant les courbes d'évolution par tranche horaire des maxima (Figure 4.25 et Annexe B.4.5). Il apparaît que :

- les variations ne sont pas simultanées d'un paramètre à un autre. Lors des crises, il n'y a quasiment aucune correspondance entre les oscillations observées. Pendant l'effondrement, avant le premier pic d'activité, la sonde M6.3 enregistre des sauts d'abord en amplitude, puis en fréquence et enfin en énergie au capteur. De fait, en visualisant les fichiers par tranche horaire où l'énergie est maximale, on s'aperçoit qu'ils ne correspondent pas toujours à ceux où l'amplitude ou encore la fréquence est maximale. Notons que, hormis pour les fréquences, ces remarques sont aussi valables pour les autres sondes ;
- lors de l'effondrement, l'évolution de l'énergie mesurée sur M6.3 se révèle beaucoup plus marquée que celle des autres paramètres. En effet, si après le premier pic d'activité, les amplitudes et fréquences maximales restent stables (du fait qu'elles atteignent la saturation), les valeurs d'énergie au capteur oscillent beaucoup plus.

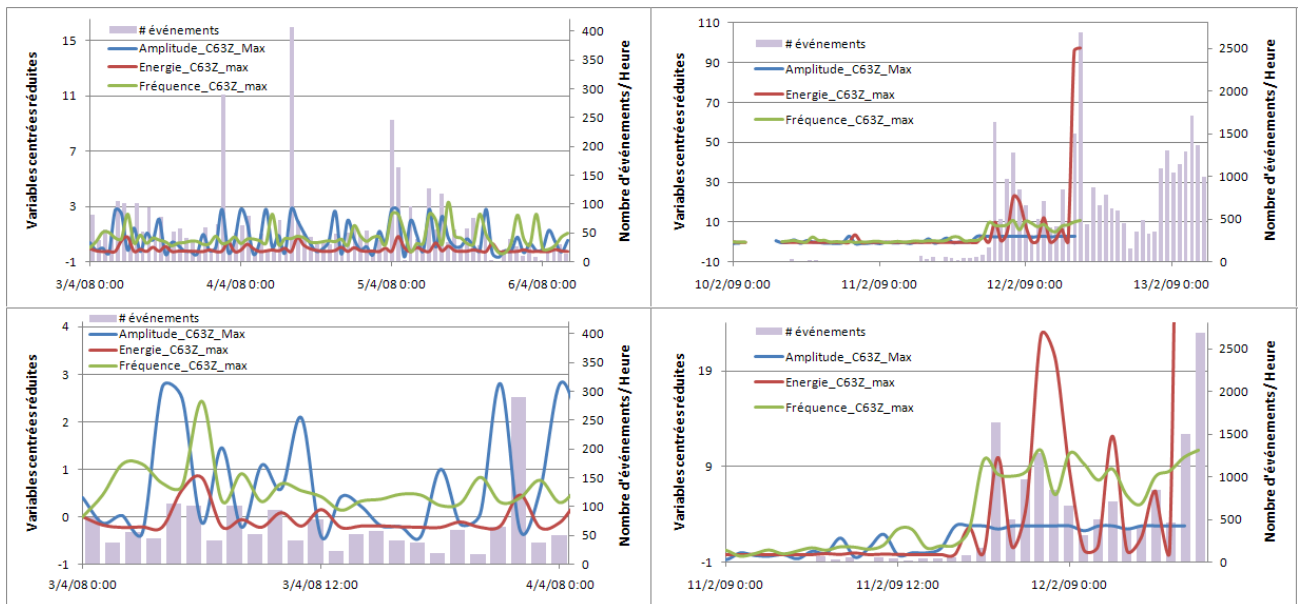


FIGURE 4.25 – Comparaison entre les variations en amplitudes, énergies et fréquences maximales, au niveau de la voie verticale de la sonde M6.3, du 03 au 06 Avril 2008 (à gauche) et pendant l'effondrement (à droite). Notons que l'échelle a été multipliée par plus de 6 entre les deux périodes et que les figures du bas correspondent à un agrandissement de la fenêtre de temps.

4.6 Paramètre β

4.6.1 Estimation du paramètre β

La loi empirique de récurrence de Gutenberg-Richter (1954) est souvent utilisée pour caractériser la sismicité. Cette dernière, stable à différentes échelles, dit que dans un volume et sur un intervalle de temps donnés, le nombre de séismes, N , avec une magnitude supérieure à M , décrit une relation de la forme :

$$\log(N(> M)) = a - bM \Leftrightarrow N(> M) \propto M^{-b} \quad (4.2)$$

Le coefficient a est un indicateur du taux de sismicité local, tandis que b , connu sous le nom de *b-value* décrit l'abondance relative des petits et grands séismes : plus il est grand, plus la proportion d'événements de faible ampleur est élevée.

La *b-value* oscille généralement entre 0.5 et 1.5. Ses variations, indiquant des modifications de régime sismique, ont notamment pu être reliées qualitativement aux hétérogénéités des matériaux, aux changements dans l'état de contrainte ou dans les mécanismes de fracturation [58].

En s'inspirant de cette relation, nous avons estimé l'évolution de la distribution des événements microsismiques en termes d'énergie libérée et d'occurrence, sur des fenêtres glissantes d'événements, en remplaçant les magnitudes par les énergies mesurées au capteur (Contrucci, 2011), soit :

$$N(> E) \sim E^{-\beta} \quad (4.3)$$

avec :

$N(> E)$: nombre d'événements avec une énergie $> E$;

β : paramètre équivalent à la *b-value*.

Cette variante, déjà employée par D. Amitrano (2003) dans le cadre du projet PROTECT (cf. Chapitre 1) se justifie par le fait que la magnitude et l'énergie sont proportionnelles, dépendant toutes deux de la taille de la source. Notons que d'autres auteurs, tels que Köhler (2009) préfèrent quant à eux utiliser l'amplitude maximale absolue à la place de l'énergie.

En outre, les calculs ont été effectués sur toute la période d'acquisition en considérant chaque sonde individuellement ou en moyennant les valeurs des sondes 3D. De fait, l'énergie n'étant pas corrigée de la distance à la source, la moyennant sur plusieurs capteurs peut permettre de compenser l'effet d'atténuation qui entraîne parfois un biais dans les distributions évaluées. Par ailleurs, différentes tailles d'échantillons ont été prises en compte, avec des fenêtres glissantes allant de 100 à 1000 événements, décalées tous les 10 à 100 événements.

Cette démarche permet de tenir compte de tous les événements enregistrés, isolés ou en rafale, localisés ou non et peut facilement être mise en œuvre dans le cas de la surveillance opérationnelle.

Il s'ensuit que :

- on obtient à peu près les mêmes résultats quelle que soit la/les sonde(s) considérée(s) (Annexe B.4.6) ;
- les distributions des événements observées étant à première vue de forme polynomiale (exemple en Figure 4.26) et les β déterminés étant majoritairement inférieurs à 1, on peut estimer que le catalogue d'événements est cohérent pour chacune d'entre elles, i.e. que la complétude est atteinte (Weiss, 1997) ;
- comme attendu, en augmentant la largeur des fenêtres d'événements, on lisse la courbe d'évolution du paramètre β (Figure 4.30), jusqu'à parfois faire disparaître des pics ou chutes marqués d'une distribution à l'autre.

4.6. PARAMÈTRE β

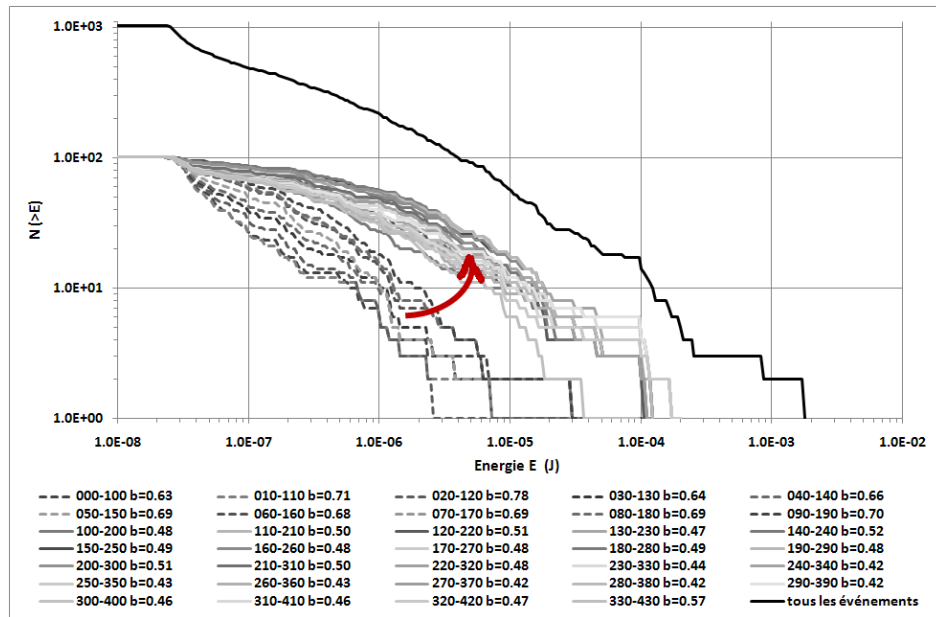


FIGURE 4.26 – Distribution cumulée entre les 10 et 11 Février 2009 des énergies moyennées sur les sondes M3 et M5, en considérant une fenêtre glissante de 100 événements, décalée tous les 10 événements. Deux groupes se distinguent : celui formé par les 190 premiers événements (pointillés) et celui incluant les 100 à 430 événements suivants (trait plein), ces variations s'expliquant par l'arrivée des premières rafales de la période d'effondrement. Le paramètre β recherché correspond aux pentes des différentes courbes.

4.6.2 Comparaison entre les périodes de Crises, Inter-Crises et l'Effondrement

Les figures suivantes présentent les variations de β estimées à partir des enregistrements sur les sondes M3 et M5 (situées à environ 150 du centre de la cavité) sur des fenêtres de 100 et par pas de 10 événements.

La Figure 4.27 compare les β calculées en période inter-crise, aux mesures GPS et à l'énergie cumulée sur les sondes M3 et M5. On observe que :

- bien qu'aucune augmentation significative de l'affaissement ne soit constatée, le paramètre β évolue

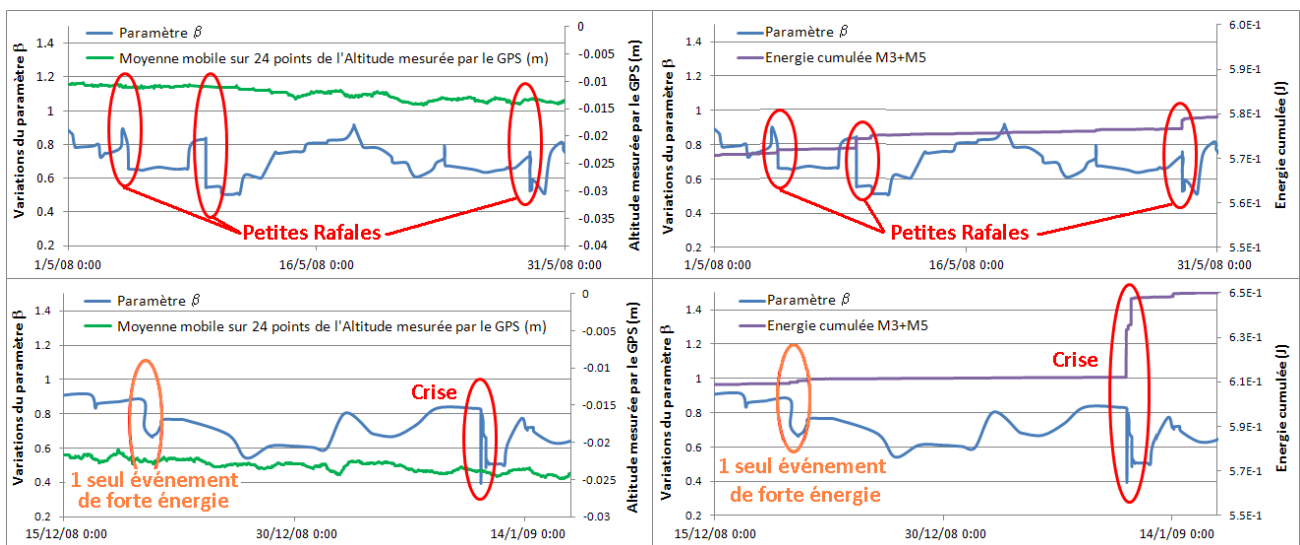


FIGURE 4.27 – Variations du paramètre β calculé sur des fenêtres de 100 événements, comparées à l'altitude mesurée par le GPS (à gauche) et à l'énergie moyennée (à droite) sur les sondes M3 et M5, en période "stable".

4.6. PARAMÈTRE β

lue de manière assez irrégulière, les valeurs oscillant entre 0.4 et 1 ;

- ses fluctuations ne sont pas directement proportionnelles à l'énergie cumulée. Par exemple, les diminutions mesurées en Mai 2008 et Janvier 2009 sont du même ordre de grandeur alors que l'énergie cumulée est plus de 5 à 6 fois supérieure sur la deuxième période ;
- β semble très sensible à la moindre variation d'énergie. D'importantes chutes sont notées lorsque :
 - des rafales courtes de fortes énergies sont détectées (\Leftrightarrow petites crises < 24h, Chapitre 3) ;
 - la présence d'un seul événement de plus forte énergie (néanmoins dix fois moins élevée que celle des rafales) est enregistrée.

La Figure 4.28 trace les β entre la crise du 03 au 06 Avril 2008 et la période d'effondrement, conjointement à l'affaissement mesuré par le GPS et l'énergie cumulée sur les sondes M3 et M5. Ainsi,

- les variations sont à peu près équivalentes à celles évaluées précédemment. L'effondrement est toutefois ponctué par de rapides et forts sauts, dépassant souvent 1, à partir du premier pic d'activité (le 11/02/09 vers 18h), indiquant des instabilités marquées (\Leftrightarrow phase transitoire) ;
- ces oscillations peuvent être corrélées à des accélérations plus ou moins prononcées de l'altitude en surface durant l'effondrement, ce qui n'est pas le cas pour les crises ;
- un pic de β est distingué le 04 Avril 2008, vers 08h38. Ce dernier semble lié à la brusque élévation du niveau de saumure mesurée par l'exploitant le même jour, vers 08h34, elle-même corrélée à un important saut de l'énergie cumulée.

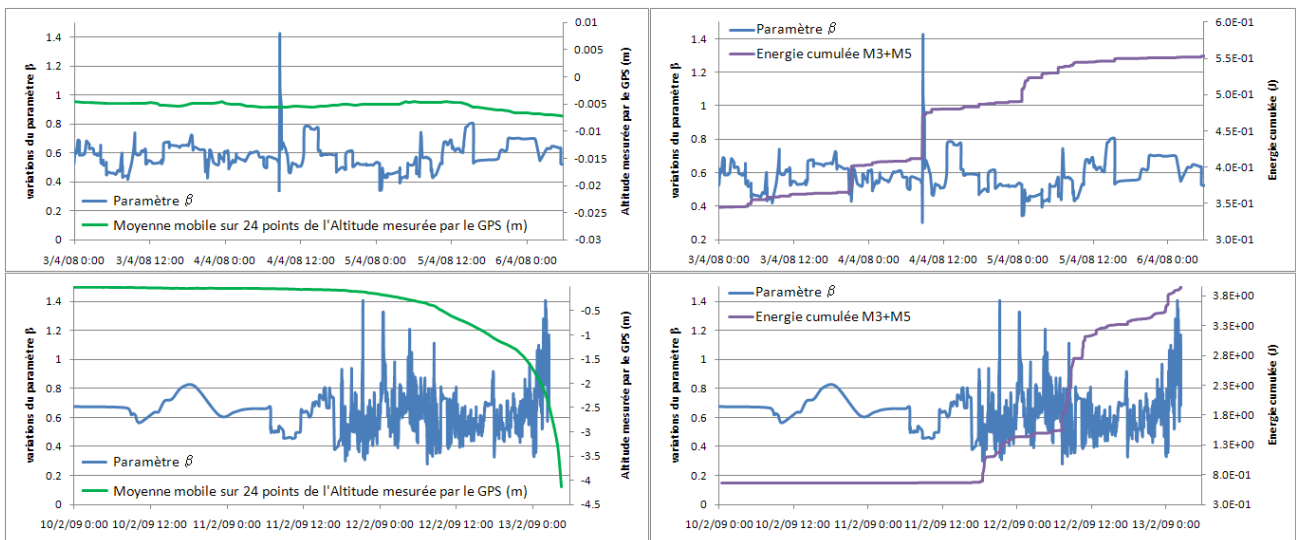


FIGURE 4.28 – Variations du paramètre β calculé sur des fenêtres de 100 événements, comparées à l'altitude mesurée par le GPS (à gauche) et à l'énergie moyennée (à droite) sur les sondes M3 et M5, du 03 au 06 Avril 2008 (en haut) et du 10 au 13 Février 2009 (en bas).

La Figure 4.29 montre l'évolution de β durant les premières heures d'opération de la période d'effondrement, comparée au niveau de saumure estimé en aval de la cavité, à l'altitude mesurée par le GPS et l'énergie cumulée sur les sondes M3 et M5. On observe que :

- le début du pompage coïncide avec une légère accélération de l'affaissement, ainsi qu'une petite diminution de β . Suite à cela, ce paramètre ré-augmente, jusqu'à l'événement du 10/02/09 à 19:04:08 (de forte amplitude sur toutes les sondes), avant de rediminuer et revenir à son niveau initial environ 12h après le premier arrêt du pompage, alors que l'altitude en surface semble stagnée ;
- les premières rafales détectées durant la période (une dizaine d'heures avant le 1er pic d'activité) induisent non seulement un saut dans l'énergie cumulée, mais aussi, une hausse du niveau de saumure d'une dizaine de centimètres, une nouvelle accélération dans l'affaissement de surface

4.6. PARAMÈTRE β

(?) et surtout une forte chute de β (qui passe d'environ 0.68 à 0.5). Après, ce dernier reste faible pendant près de cinq heures, avant de remonter de manière soudaine ;

- une à deux heures avant le 1er pic d'activité, alors que les événements saturent notamment en amplitude et fréquence sur la sonde M6.3, une chute de plus forte ampleur que les précédentes est déterminée ($\beta < 0.4$).

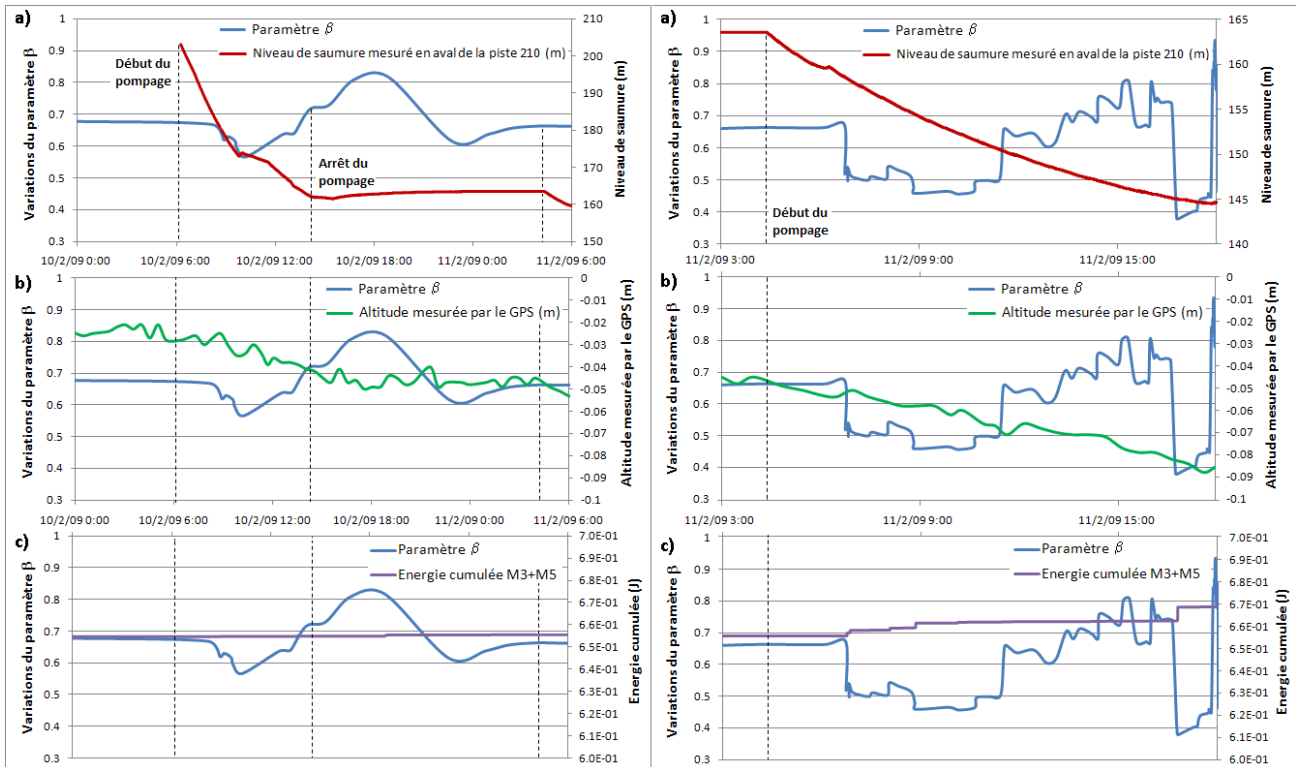


FIGURE 4.29 – Variations du paramètre β calculé sur des fenêtres de 100 événements, comparées au niveau de saumure déterminé en aval de la cavité (a), à l'altitude mesurée par le GPS (b) et à l'énergie moyennée sur les sondes M3 et M5 (c), durant les premières heures de pompage, avant le premier pic d'activité.

4.6.3 Détermination de la taille de la fenêtre glissante optimale

La Figure 4.30 confronte l'évolution des β déterminés en modifiant la taille des échantillons, pendant une crise d'Avril 2008 et la période d'effondrement. Comme indiqué précédemment, plus les fenêtres sont larges, plus les courbes sont lisses, notamment :

- au cours des crises :
 - le pic de β peut disparaître entièrement, laissant place à une légère fluctuation, de même ordre de grandeur que celles qui l'entourent ;
 - certaines variations, à peine visibles avec un échantillon de 100 événements sont mises en avant dans les autres distributions. Notons par exemple la chute de β identifiée le 03 Avril 2008, coïncidant elle aussi avec un pic de pression de saumure dans la cavité ;
- pour l'effondrement :
 - les oscillations relevées durant les premières heures d'opération se perdent complètement ;
 - la chute de β définie quelques heures avant le premier pic d'activité microsismique, est décalée au niveau de celui-ci ;
 - de multiples variations sont toujours visibles après ceci, finissant par faire ressortir le second pic d'activité.

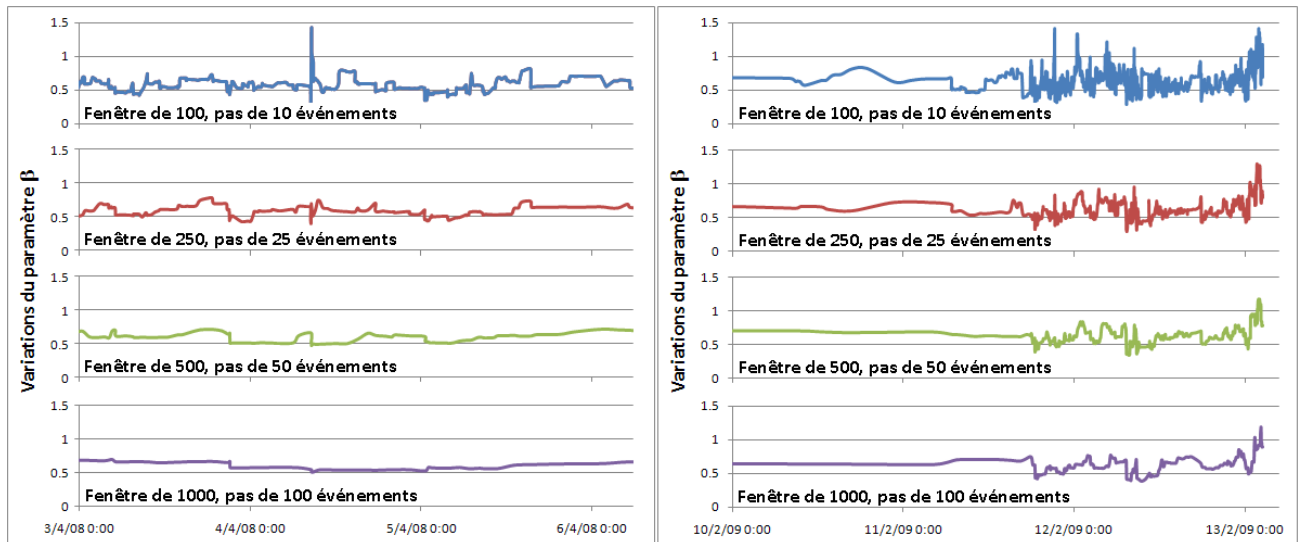


FIGURE 4.30 – Comparaison entre l'évolution du paramètre β calculé du 03 au 06 Avril 2008 (à gauche) et du 10 au 13 Février 2009 (à droite) en fonction de la taille de la fenêtre d'événements et du pas considérés.

L'interprétation de l'évolution du paramètre β peut donc être fortement influencée par le nombre d'événements pris en compte dans les fenêtres glissantes ainsi que le taux de microsismicité (courbes constantes sur des intervalles de temps plus ou moins importants). De fait, toutes les variations observées pour de petits groupes d'enregistrements ne paraissent pas forcément significatives ; néanmoins des pertes d'information sont constatées sur les courbes calculées avec une quantité d'événements plus élevée.

Dans le cadre de la surveillance opérationnelle, il paraîtrait donc intéressant d'estimer ce paramètre pour différentes tailles de fenêtre (par exemple, dans ce cas, 100 et 500 événements) afin de pouvoir comparer les résultats ou encore de moduler les calculs en fonction du taux de microsismicité.

4.6.4 Conclusions sur l'évolution du paramètre β

Le paramètre β est une variable complexe, pouvant être assez difficile à interpréter, les variations observées étant du même ordre de grandeur sur toute la période d'acquisition.

Avant la période d'effondrement, les multiples oscillations observées ne semblent pas significatives et indiqueraient une instabilité marquée uniquement si l'on enregistre des rafales énergétiques. Pendant l'effondrement, avant le premier pic d'activité microsismique, les diverses chutes de β peuvent être corrélées à de petites accélérations de l'affaissement de surface.

En outre, la taille des échantillons considérée peut jouer considérablement sur l'interprétation du paramètre.

Enfin, notons que ces analyses pourraient être fortement améliorées et les variations du paramètre β beaucoup plus pertinentes, en réussissant à discriminer les ruptures dans le recouvrement / des chutes de blocs en fond de cavité.

4.7 Conclusions sur la signature des événements microsismiques

L'évolution des amplitudes, énergies au capteur et fréquences fondamentales des événements a été étudiée entre les crises de 2008 et la période d'effondrement. De fait, les variations moyennes des différents paramètres ne sont pas significatives, quelle que soit la sonde, et ce d'une période à l'autre. À l'inverse, l'évolution des maxima atteints sur ces intervalles de temps est beaucoup plus prononcée. En

effet, alors que ces derniers sont assez stables durant les crises, ils enregistrent des sauts marqués durant la période d'effondrement témoignant d'une remontée progressive des zones de rupture.

De plus, l'augmentation dans les maxima est indépendante des pics d'activité (elle les précède d'ailleurs lors de l'effondrement), et n'est pas simultanée pour les divers paramètres (les sauts apparaissant d'abord en amplitude, puis fréquence, et énergie).

Il semblerait donc, en termes de surveillance opérationnelle, plus approprié de suivre l'évolution des maxima atteints. Notons cependant que seules les fréquences mesurées par la sonde M6.3, la plus proche des zones de rupture, ont augmenté ; les valeurs enregistrées par les sondes plus éloignées étant similaires d'une période à l'autre.

Par ailleurs, les rafales ont en moyenne des amplitudes ainsi que des énergies plus élevées et des fréquences plus faibles que celles des événements isolés. Néanmoins, les valeurs déterminées pourraient être faussées du fait de l'existence de plusieurs événements dans les enregistrements en rafales.

Enfin, le paramètre β , dérivé de la loi de Gutenberg-Richter, a aussi été évalué. Ce dernier est souvent assez difficile à interpréter (superposition de différents phénomènes : chutes de blocs dans la cavité / ruptures dans le recouvrement). Notons que ses variations ont néanmoins pu être corrélées avec des hausses du niveau de saumure (pendant les crises), ainsi que de petites accélérations de l'affaissement (dans la première phase de l'effondrement).

Dans la prochaine étape, il s'agira de passer à une analyse plus fine, en essayant de caractériser l'évolution de ces valeurs en fonction de la localisation des foyers.

Chapitre 5

Localisation absolue des événements microsismiques

5.1	Méthode de localisation absolue	111
5.1.1	Rappels sur la notion de problème direct / problème inverse	111
5.1.2	Problème direct : Calcul des trajets et temps de propagation des ondes	112
5.1.3	Problème inverse : Recherche globale 8-Tree	113
5.1.4	Estimation de la qualité de la localisation	115
5.2	Calibrage de la localisation	115
5.2.1	Définition d'un nouveau modèle de vitesse	116
5.2.1.1	Position des tirs de calage	116
5.2.1.2	Analyse de polarisation	116
5.2.1.3	Construction du modèle de vitesse	122
5.2.1.4	Localisation des tirs de calage	126
5.2.1.5	Comparaison entre les anciens modèles de vitesse et le modèle retenu	128
5.2.1.6	Synthèse sur la définition du modèle de vitesse	129
5.2.2	Paramétrage & Sensibilité de la localisation des événements microsismiques	130
5.3	Description des événements à localiser	131
5.3.1	Sélection et pointé des fichiers	131
5.3.2	Répartition temporelle des événements à localiser	132
5.3.3	Caractéristiques des événements à localiser	133
5.4	Influence des données d'entrée pour la localisation 2D	136
5.4.1	Différentes localisations effectuées	136
5.4.2	Résultats	137
5.4.2.1	Écarts entre les diverses localisations	137
5.4.2.2	Qualité des localisations	140
5.4.3	Tests supplémentaires avec la sonde M6.2	146
5.4.3.1	Localisation sans la sonde M6.2	146
5.4.3.2	Modification du paramétrage au niveau de la sonde M6.2	148
5.4.4	Choix des données d'entrée utilisées pour la localisation 2D	148
5.4.4.1	Utilisation des pointés S ?	148
5.4.4.2	Utilisation des angles de polarisation ?	148
5.4.5	Synthèse sur l'influence des données d'entrée pour la localisation 2D	150
5.5	Analyse de l'évolution spatio-temporelle des foyers microsismiques	150
5.5.1	Crises de Mars-Avril 2008	150
5.5.2	Période d'effondrement	153
5.5.2.1	Avant le 1er pic d'activité	154
5.5.2.2	Entre les 1er et le 2ème pics d'activité	158
5.5.2.3	Entre les 2ème et le 3ème pics d'activité	161

5.5.2.4	À partir du 3ème pic d'activité	165
5.5.3	Synthèse sur l'analyse de l'évolution spatio-temporelle des foyers microsismiques	167
5.6	Conclusions sur la localisation absolue des événements	170

La localisation absolue des événements microsismiques consiste à retrouver par inversion leurs coordonnées spatiales (X, Y, Z) ainsi que leurs temps d'origine (t_0), à partir de données telles que les temps de premières arrivées des ondes de volume mesurés aux diverses stations et/ou de la polarisation des signaux. Il s'agit d'une étape cruciale, contribuant à définir et caractériser les étapes et mécanismes de rupture des structures surveillées.

Dans ce chapitre, après avoir présenté la méthode utilisée, nous décrirons les diverses étapes ayant permis de calibrer correctement la localisation initiale, ainsi que l'échantillon d'événements sélectionnés. Enfin, il s'agira d'exposer et comparer les résultats obtenus en faisant varier les paramètres d'entrée pris en compte (pointés P, S, angles de polarisation, modèle de vitesse), afin de jauger leur fiabilité, ainsi que leur évolution au cours du temps.

5.1 Méthode de localisation absolue

Tout comme de nombreuses propriétés ou paramètres étudiés dans divers champs scientifiques, la localisation des microséismes enregistrés par un réseau de surveillance est inaccessible à l'observation directe et nécessite le recours à des méthodes numériques indirectes ou inverses.

5.1.1 Rappels sur la notion de problème direct / problème inverse

Le *problème direct* décrit la manière dont les paramètres d'un modèle théorique se traduisent en effets observables expérimentalement. Soit :

$$d = G(m) \tag{5.1}$$

où :

- d représente les données mesurées ;
- m correspond aux paramètres du phénomène ;
- G est un opérateur reliant les données aux paramètres ;

Dans le cas de la localisation absolue, d correspond aux temps d'arrivée des ondes de volume et/ou des angles de polarisation (azimuts et/ou pendages) du signal ; m , aux coordonnées de l'hypocentre et au temps d'origine du déclenchement ; G dépend du modèle de vitesse de propagation des ondes.

La question posée est alors : quels seraient les temps et/ou angles mesurés aux différentes sondes, en supposant un foyer donné ?

Le *problème inverse* consiste à essayer d'approximer au mieux les paramètres m qui permettent de rendre compte des données d disponibles. Il s'agira ici, après avoir fixé la fonction G , de trouver la position de la source d'un événement microsismique à partir des enregistrements aux sondes.

Pour ce faire, un critère appelé *fonction objectif* (= misfit function) est minimisé. Ce dernier évalue l'écart entre les données observées et celles estimées à partir d'un modèle théorique. Il est typiquement exprimé par une fonction pondérée au sens des moindres carrés (*weighted least square function*) ou par une fonction de vraisemblance (*likelihood function*).

Les résultats de l'inversion ne sont pas uniques, les valeurs prédites différant généralement de celles observées. Leur qualité dépendra :

- des erreurs sur les mesures ou au niveau de la modélisation du problème directe (temps et/ou angles mesurés au niveau des sondes, schéma de propagation des ondes) ;
- de la quantité de mesures disponibles (géométrie du réseau microsismique).

5.1.2 Problème direct : Calcul des trajets et temps de propagation des ondes

Dans le module SYTMISauto, développé à l'INERIS, les trajets des ondes entre les sources microsismiques et les différentes sondes d'un réseau de surveillance peuvent être estimés géométriquement (2D) ([34] et [85]).

Dans cette méthode, le modèle de vitesse est défini avec des couches présentant :

- des interfaces planes, d'orientation connue et parallèles les unes aux autres (épaisseurs uniformes) ;
- des vitesses d'ondes volumiques (P ou S) constantes.

Les temps de propagation sont alors calculés en supposant des trajets rectilignes ; le passage éventuel d'une couche à une autre étant déterminé en utilisant les lois de Snell-Descartes (Figure 5.1). Ainsi, lorsqu'une onde rencontre une interface séparant deux milieux d'impédance acoustique différente, elle sera soit :

- réfléchi, auquel cas les angles formés par la normale à l'interface avec les ondes incidente (θ_1) et réfléchi (θ_2) sont égaux en valeur absolue ;
- transmise, les angles d'incidence (θ_1) et de transmission (θ_2) étant reliés aux vitesses des couches (V_1, V_2) par :

$$\frac{\sin(\theta_1)}{V_1} = \frac{\sin(\theta_2)}{V_2} = \text{constante} \quad (5.2)$$

La première arrivée enregistrée par les sondes pourra donc correspondre à (Figure 5.1) :

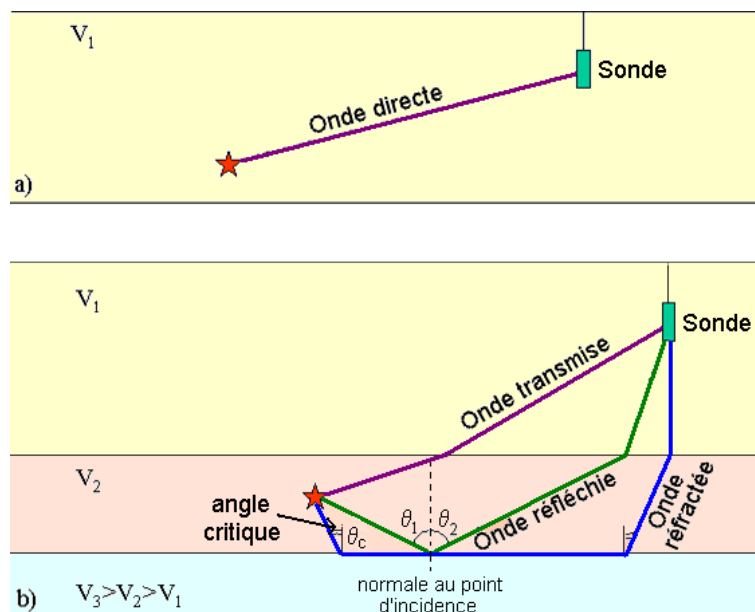


FIGURE 5.1 – a) Onde directe dans un modèle monocouche ; b) différents types d'ondes dans un modèle à trois couches.

- une onde *directe*, lorsque source et récepteur sont localisés dans une même couche. Dans ce cas, le temps de trajet, T , est donné simplement en fonction du parcours de l'onde, d , et de la vitesse, V , dans la couche par :

$$T = d/V \quad (5.3)$$

- une onde *transmise* et/ou *réfléchie*, déviée à chaque interface, si les hypocentres et les capteurs sont dans des couches différentes. Le trajet optimum est obtenu en minimisant l'écart entre la distance épacentrale δ et le parcours effectué par les ondes :

$$T = \sum_{i=1}^N \frac{h_i}{v_i \cdot \cos \theta_i} = \sum_{i=1}^N \frac{h_i}{v_i \sqrt{1 - p^2 v_i^2}} \quad (5.4)$$

avec :

N : nombre de segments du rai ;

v_i : vitesse des ondes dans la couche contenant le segment i ;

h_i : projection verticale du rai dans les couches correspondantes pour $i = 1$ ou N , sinon, épaisseur de la couche contenant le segment i ;

p : constante de Snell-Descartes ;

θ_i : angle d'incidence dans la couche i ;

- une onde *réfractée*, quand la/les couche(s) située(s) entre source et récepteur possède(nt) des vitesses inférieures à celle(s) qui les entourent. En outre, plus la différence de vitesse de propagation est grande, plus la déviation sera importante. Les temps de trajet sont déduits après avoir déterminé les angles d'incidence critiques (au-delà desquels la réfraction se fait à 90°) et la distance parcourue dans la couche rapide (par projection et différence avec la distance épacentrale).

N.B. : lorsque les ondes P atteignent une interface, outre les phénomènes de diffraction / transmission / réflexion, il peut également se produire une conversion de ces dernières en ondes de cisaillement. Tout se passe ainsi comme si l'interface se comportait comme une nouvelle source d'onde P et S.

5.1.3 Problème inverse : Recherche globale 8-Tree

La fonction objectif que nous avons utilisée est exprimée en norme $L2$ par une *fonction de vraisemblance*, proportionnelle à la densité de probabilité (= *PDF* ou *Probability Density Function*) :

$$pdf(x, t_0) \propto k \times \exp \left(-\frac{1}{2} \sum_{obs_i} \frac{[d_{obs_i}(x) - d_{calci}(x)]^2}{\sigma_i^2} \right) \quad (5.5)$$

où :

d représente les données observées ou calculées ;

σ correspond aux erreurs sur ces dernières.

Pour la minimiser, le module SYTMISauto met à disposition la méthode inverse itérative *Oct-Tree* (ou *8-Tree*) ([85] et [86]). Cette dernière est non-linéaire (i.e. l'opérateur G , défini dans l'équation 5.1, reliant les données et les paramètres recherchés n'est pas linéaire) et utilise un algorithme d'échantillonnage subdivisant l'espace de manière récursive, en "cellules".

La probabilité de la localisation d'un foyer, dans une cellule donnée, dépend : du volume de cette dernière et de la PDF en son centre.

Aussi, cette méthode, qui ne nécessite pas la définition d'un foyer *a priori*, implique un échantillonnage initial global de l'espace de recherche sur une grille grossière régulière. Les temps de trajets

théoriques jusqu'aux sondes et/ou les angles d'incidence (azimuts et pendages) des rais correspondant, la PDF et la probabilité de localisation sont déterminés au niveau de chaque cellule de la grille.

Ensuite, les étapes suivantes sont répétées jusqu'à ce qu'un nombre prédéterminé d'itérations (ou un autre critère d'arrêt tel qu'un volume minimal de cellule) ait été atteint :

1. la cellule de la grille avec la plus grande probabilité de localisation (carrés rouges sur la Fig. 5.2) est divisée en 8 sous-cellules égales ;
2. les temps de trajets théoriques jusqu'aux sondes et/ou les angles d'incidence (azimuts et pendages) des rais correspondant, la PDF et la probabilité de localisation sont évalués en chacune de ces 8 sous-cellules.

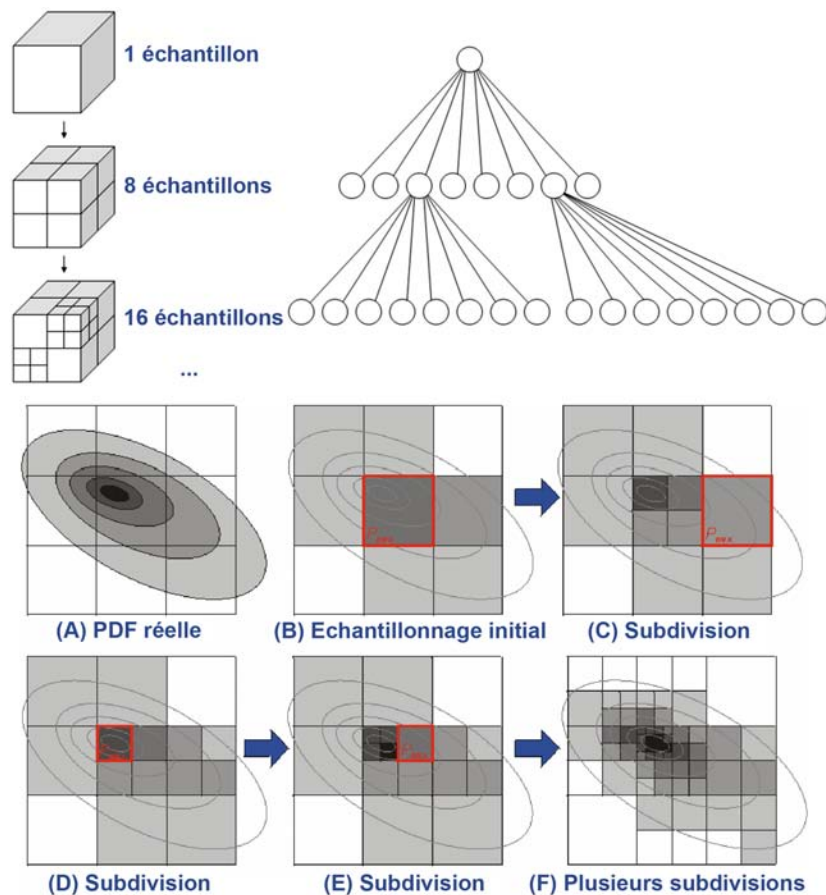


FIGURE 5.2 – Illustration du processus de recherche du maximum de vraisemblance utilisé dans la méthode 8-Tree. (Source : <http://alomax.free.fr/>, modifié)

La position du foyer microsismique déterminée correspondra alors à celle du centre de la cellule ayant la probabilité de localisation la plus forte, à la dernière itération.

Cette procédure itérative produit une structure dite en "Oct-Tree", avec un nombre plus élevé de cellules dans les régions de plus grande PDF. De fait, elle donne un échantillonnage approximatif "en importance" de la PDF de localisation des foyers dans l'espace de recherche. Les solutions obtenues correspondent bien à des minima globaux de la fonction objectif, du fait qu'à chaque itération, l'algorithme explore systématiquement tout l'espace de recherche. De plus, étant donné que la méthode 8-Tree ne linéarise pas le problème inverse, elle permet de donner une bonne représentation de la complexité de la densité de probabilité.

Cependant, les temps de calcul peuvent être très importants puisque l'algorithme s'emploie à lire tous les temps de trajet et PDF de la grille en mémoire, allant ainsi très lentement avec un grand nombre d'observations et de grandes grilles ou un maillage initial fin.

5.1.4 Estimation de la qualité de la localisation

La qualité des résultats de localisation peut être jaugée en sortie de SYTMISauto à l'aide :

- des résidus sur les données d'entrée (temps d'arrivée des ondes de volume et/ou angles de polarisation), i.e. les écarts algébriques entre les mesures observées et calculées ;
- de la densité de probabilité (Figure 5.3), plus ou moins bien répartie autour du foyer déterminé ;
- des ellipsoïdes d'erreur, contenant la position des événements avec un niveau de confiance d'au moins 68% (correspondant à une erreur gaussienne, à un écart-type), calculés de manière empirique et centrés sur le centre de gravité de la densité de probabilité (pouvant différer du foyer déterminé).

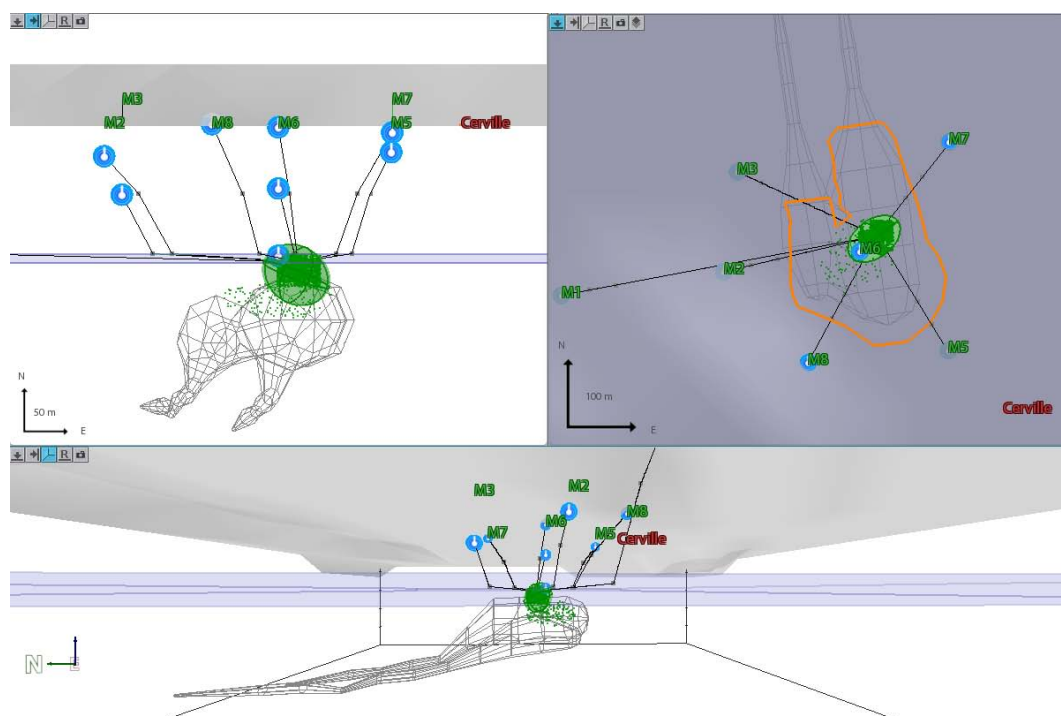


FIGURE 5.3 – Représentation de la PDF et de l'ellipsoïde d'erreur pour un événement microsismique donné. Cet exemple illustre bien la complexité de la PDF ; les 2000 points de la grille ayant les probabilités de localisation les plus élevées n'étant pas répartis de manière homogène.

N.B. : les autres méthodes/options de localisation offertes par le logiciel SYTMISauto, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients sont présentées en Annexe C.1.1. Ces dernières, testées précédemment pour le site de Cerville-Buissoncourt et d'autres réseaux de surveillance dans le Bassin ferrifère Lorrain, produisent de moins bons résultats que la méthode 8-Tree.

5.2 Calibrage de la localisation

La définition d'un paramétrage adéquat du module de localisation a été réalisée afin de contraindre et d'assurer au mieux la qualité des résultats.

5.2.1 Définition d'un nouveau modèle de vitesse

La détermination de la position précise des foyers nécessite un modèle de vitesse permettant de reproduire au mieux la propagation des ondes dans le milieu. Aussi, le modèle jusqu' alors employé pour le site de Cerville-Buissoncourt, avait été estimé par essai-erreur [63], sans exploiter toutes les données à disposition (10 tirs de calage/210, en se servant uniquement des temps d'arrivée des ondes P).

Or, l'INERIS dispose d'un logiciel d'inversion SYTMISvel [34], permettant d'ajuster des modèles de vitesse par inversion à partir des données issues de tirs de calage. De fait, afin d'améliorer la précision de la localisation, il a été entrepris de définir un nouveau modèle de vitesse à l'aide de ce logiciel. Les résultats des trois étapes ayant permis de calibrer la localisation, à savoir : (1) l'analyse de polarisation (orientation des sondes tridirectionnelles du réseau), (2) la construction d'un modèle de vitesse et (3) la localisation des tirs de calage, sont décrites dans les paragraphes suivants.

5.2.1.1 Position des tirs de calage

Afin de caractériser le recouvrement de la cavité, une campagne de tomographie sismique entre forage avait été effectuée par le BRGM en Octobre 2004 [131]. 210 tirs de surface provenant de deux types de sources différentes, explosifs et marteau hydraulique, ont ainsi été réalisés, ces derniers étant répartis comme indiqué sur la Figure 5.4. Ces tirs ont servi de base pour définir un modèle de vitesse du recouvrement. Notons que lors de l'expérimentation, les temps d'origine des tirs n'ont pu être enregistrés par le réseau microsismique.

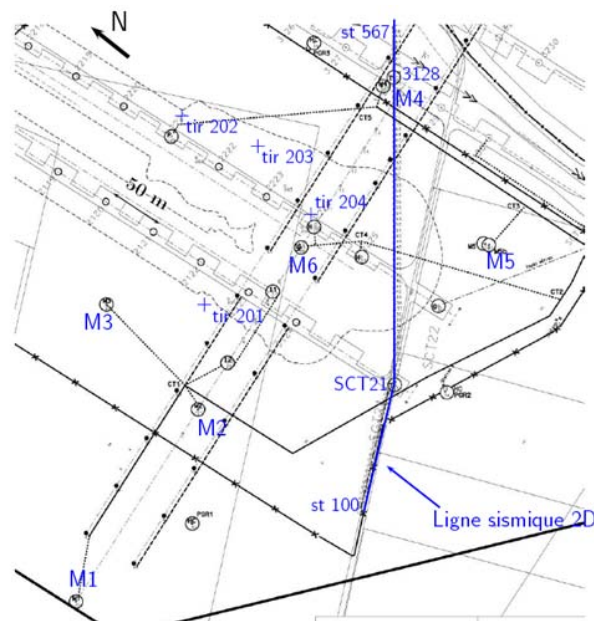


FIGURE 5.4 – Position des tirs de calage.

5.2.1.2 Analyse de polarisation

La polarisation des tirs de calage (angles de polarisation et sens de premiers mouvements) a été analysée à l'aide du logiciel SYTMISView. Ceci devait permettre de mettre en évidence d'éventuelles incohérences angulaires et de corriger si besoin l'orientation des sondes ainsi que d'avoir une première idée de la complexité du milieu en termes de structure de vitesse.

Pour ce faire, la technique de rotation d'onde a été appliquée sur les tirs enregistrés par les sondes 3D [3], en imposant par convention une orientation positive des rais vers le haut (les tirs étant en surface

et les sondes en profondeur)¹ ; les angles de polarisation ont ainsi été pointés sur les signaux les plus stables. Puis, on compare les angles observés et calculés à partir de l'hypothèse de propagation en rais droits entre source et capteur. On observe (Tableaux 5.1 et 5.2 et Annexe C.2.1) :

- au niveau des sondes M3 et M6.3 : des azimuts inversés de 180°, indiquant des pendages observés opposés aux théoriques (Figure 5.5) pour les tirs situés au Sud-Ouest pour la sonde M6.3 et au Nord-Est pour la sonde M3 ; ceci avait déjà été observé par D. Mercerat [97]. Ces tirs montrent également des sens de premier mouvement inversés sur les voies verticales, tandis que ceux observés sur les voies latérales concordent avec ceux prédits (Figures 5.7 et 5.8) ;
- au niveau de la sonde M6.2 située 65 m au-dessus de la sonde M6.3 : les tirs ne présentent aucune anomalie de polarisation. Les sens de premier mouvement observés et attendus sont cohérents sur toutes les voies ;
- au niveau de la sonde M5 :
 - les azimuts observés et calculés sont cohérents à 180° près ;
 - les sens de premier mouvement sur les voies X et Y sont inversés (Figure 5.9) ;
- à l'exception de ces "anomalies" sur les sondes M3, M5 et M6.3, l'orientation des sondes dans la direction azimutale est cohérente, à ±180° près. Il n'y a pas de différences systématiques entre les azimuts mesurés et calculés ;
- les pendages calculés présentent de fortes variations avec les théoriques, les rais sismiques se verticalisant d'environ 30° en moyenne au niveau de la sonde M3, tandis qu'ils s'aplatissent d'approximativement 30° sur la sonde M6.3.

TABLE 5.1 – Écarts moyens entre azimuts et pendages calculés et mesurés pour l'expérimentation de tir.

Sondes / Écarts (Obs-Théo) moyens en degrés	Explosions		Chutes		Les deux	
	Azimut	Pendage	Azimut	Pendage	Azimut	Pendage
M3	-4.32	-27.25			-4.32	-27.25
M5	-2.38	16.39	5.25	18.44	-0.18	16.96
M6.3	1.68	30.18	-6.74	49.01	-0.01	33.94
M6.2	-1.53	-14.02	-0.76	-12.57	-1.3	-13.59

TABLE 5.2 – Écarts moyens entre azimuts et pendages calculés et mesurés pour l'expérimentation de tir (ne tenant pas compte des tirs présentant des "anomalies" de polarisation de 180°).

Sondes / Écarts (Obs-Théo) moyens en degrés	Explosions		Chutes		Les deux	
	Azimut	Pendage	Azimut	Pendage	Azimut	Pendage
M3	3.7	-31.68			3.7	-31.68
M5	-2.8	10.31	-3.91	12.53	-3.01	10.73
M6.3	-2.69	29.84	-3.24	26.16	-2.76	29.38
M6.2	-0.31	-7.49	-0.4	-10.31	-0.36	-8.9

→ Les anomalies de 180° en azimut (i.e. les pendages négatifs) observées sur les sondes M3 et M6.3 seraient dues à plusieurs hétérogénéités (Figure 5.5). En effet, ces dernières ne sont pas systématiques et semblent donc témoigner d'effets locaux induisant une déviation des rais (pour des tirs situés à égale distance des sondes, il n'y a pas de "symétrie" entre ceux présentant des anomalies ou non ; donc ce phénomène ne peut seulement être expliqué par l'apparition progressive d'une onde réfractée sur une couche plus rapide avec l'augmentation de la distance).

1. Les angles de polarisation calculés par SYTMISView tiennent compte de l'orientation *a priori* des pendages fournis par l'utilisateur. Ainsi, en imposant par convention tous les pendages positifs, les angles donnés en sortie par le logiciel seront justes si les rais arrivent à la sonde par le haut ; tandis que s'ils surgissent par le bas, le pendage obtenu sera à l'opposé et les azimuts à 180° des valeurs réelles.

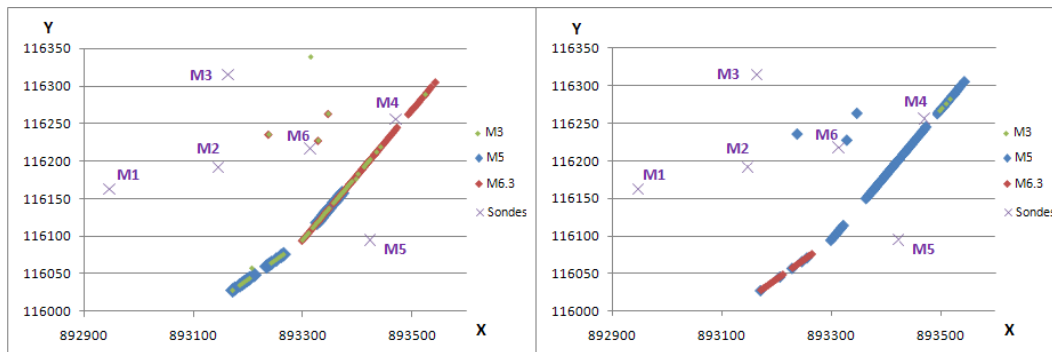


FIGURE 5.5 – Position des tirs ne présentant pas d'"anomalie de polarisation" (à gauche) et ceux présentant une "anomalie" (à droite) au niveau des sondes M3, M5 et M6.3.

L'origine des hétérogénéités mises en évidence par les sondes M3 et M6.3 semble difficile à déterminer ; ces dernières différant d'une sonde à l'autre et étant situées de part et d'autre de la ligne de tir (Figure 5.5). Notons par ailleurs que, s'il existe des hétérogénéités locales, elles ne semblent pas dévier les rais arrivant jusqu'à la M6.2 (Figure 5.6). Ainsi, en comparant les zones où les anomalies sont observées ou non et connaissant le trajet des rais, on pourrait essayer de localiser ces hétérogénéités.

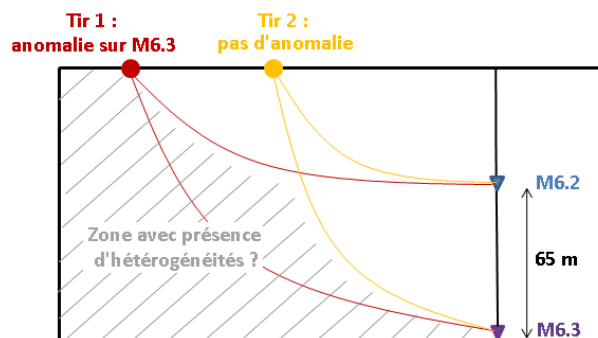


FIGURE 5.6 – Localisation des zones pouvant contenir des hétérogénéités, à partir des tirs de calage, présentant ou non une anomalie de polarisation.

→ Au niveau de la sonde M5, deux types d'anomalie se cumulent. D'une part, un problème d'orientation de 180° souligné par le fait que les sens de premier mouvement sur les voies horizontales soient toujours inversés par rapport à ceux attendus. D'autre part, malgré la prise en compte de l'orientation réelle de la sonde, la présence de tirs montrant des inversions azimutales de 180° liées à des hétérogénéités locales. En outre, les tirs dits "anormaux" sur la sonde M5 se répartissent quasiment tout le long de la ligne de tir. Ceci peut s'expliquer par le fait que la sonde est située en sub-surface et qu'elle est, par conséquent, plus sensible aux hétérogénéités de surface.

Enfin, l'analyse en pendage met en évidence la complexité du milieu en termes de vitesse. En effet, on observe des écarts importants entre pendages calculés (en rais droits) et observés sur les sondes les plus profondes, M3 et M6.3, pouvant aller jusqu'à 60° (Annexe C.2.1). Ceci est incompatible avec un milieu monocouche, homogène en vitesse.

N.B. : les sens de premier mouvement sur les sondes unidirectionnelles ont aussi été visualisés. Cette étude montre (Annexe C.2.1) :

- une arrivée des ondes en général peu marquée sur la sonde M1, ceci provenant du fait qu'il s'agisse de la sonde la plus éloignée du centre de la cavité et des tirs ;
- sur la sonde M2, une première arrivée nettement vers le haut pour les tirs situés au Sud de la sonde,

5.2. CALIBRAGE DE LA LOCALISATION

- ce mouvement s'atténuant et devenant de moins en moins marqué pour ceux effectués au Nord ;
- pour la sonde M4, un mouvement vers le haut pour les tirs les plus au Sud, présentant une anomalie azimutale de 180° au niveau de la M6.3.

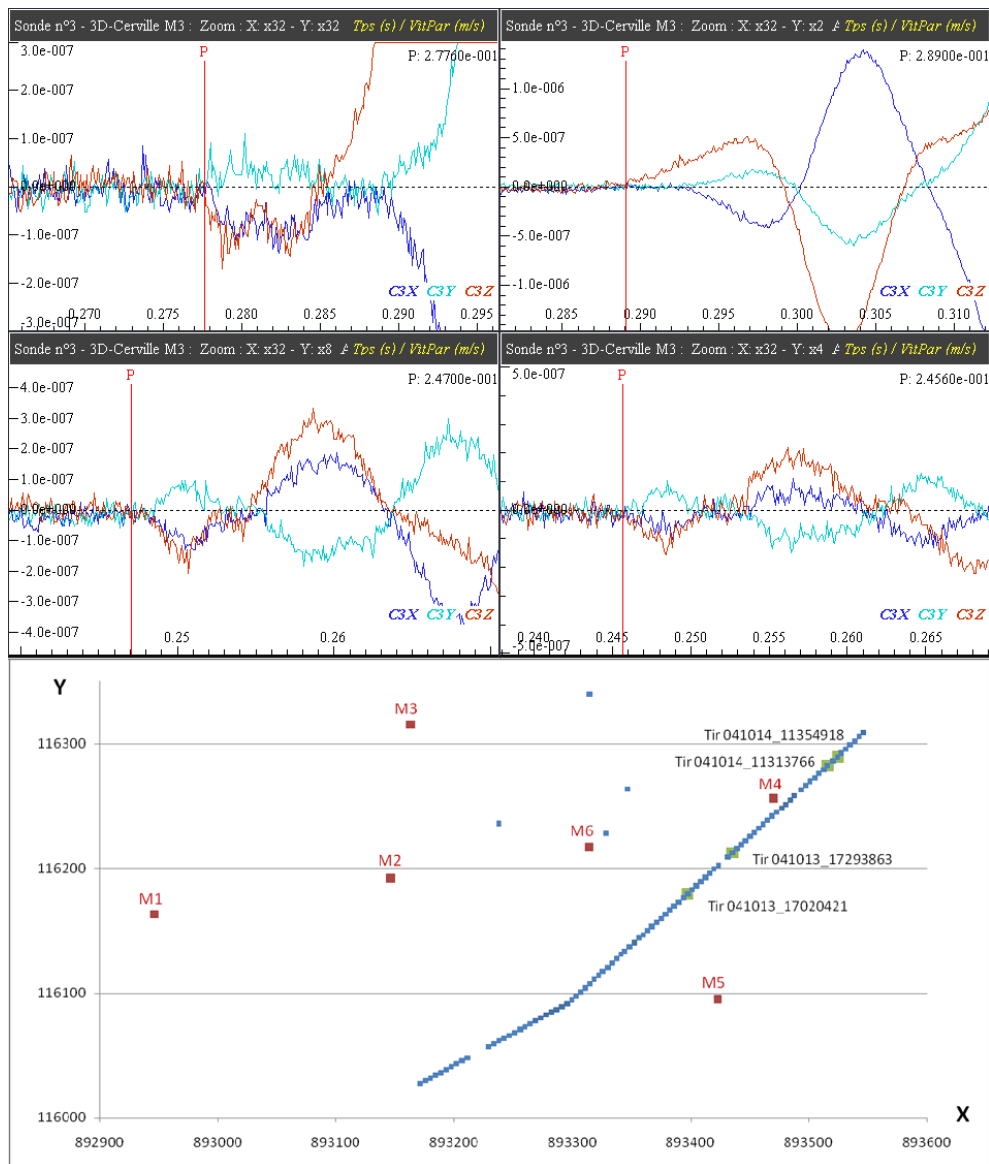


FIGURE 5.7 – Évolution des formes d'onde enregistrées au niveau de la voie Z de la sonde M3 en fonction de la position des tirs. De haut en bas et de gauche à droite, tirs : 041014_11354918, 041014_11313766, 041013_172938 et 041013_17020421.

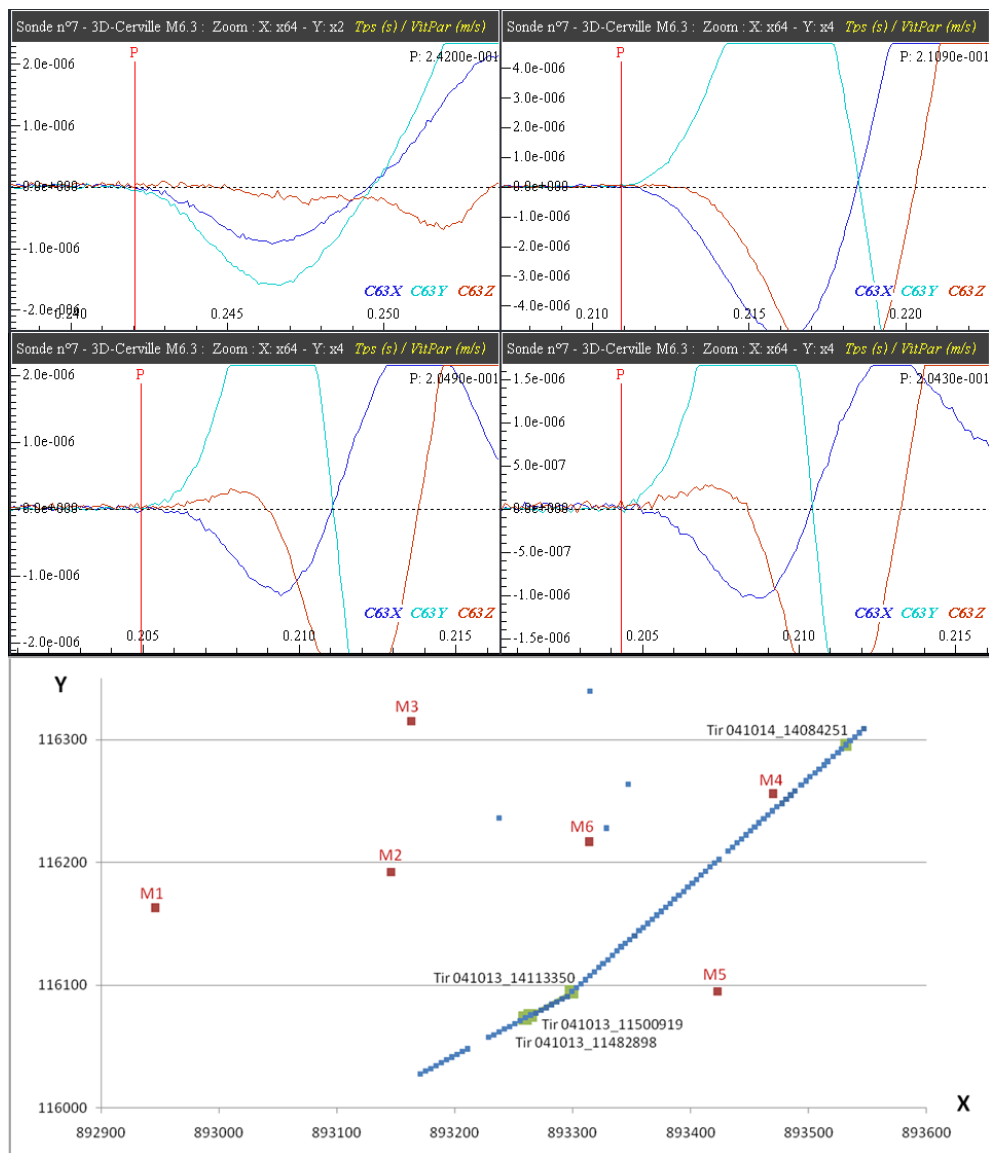


FIGURE 5.8 – Évolution des formes d'onde enregistrées au niveau de la voie Z de la sonde M6.3 en fonction de la position des tirs. De haut en bas et de gauche à droite, tirs : 041014_14084251, 041013_14113350, 041013_11500919 et 041013_11482898.

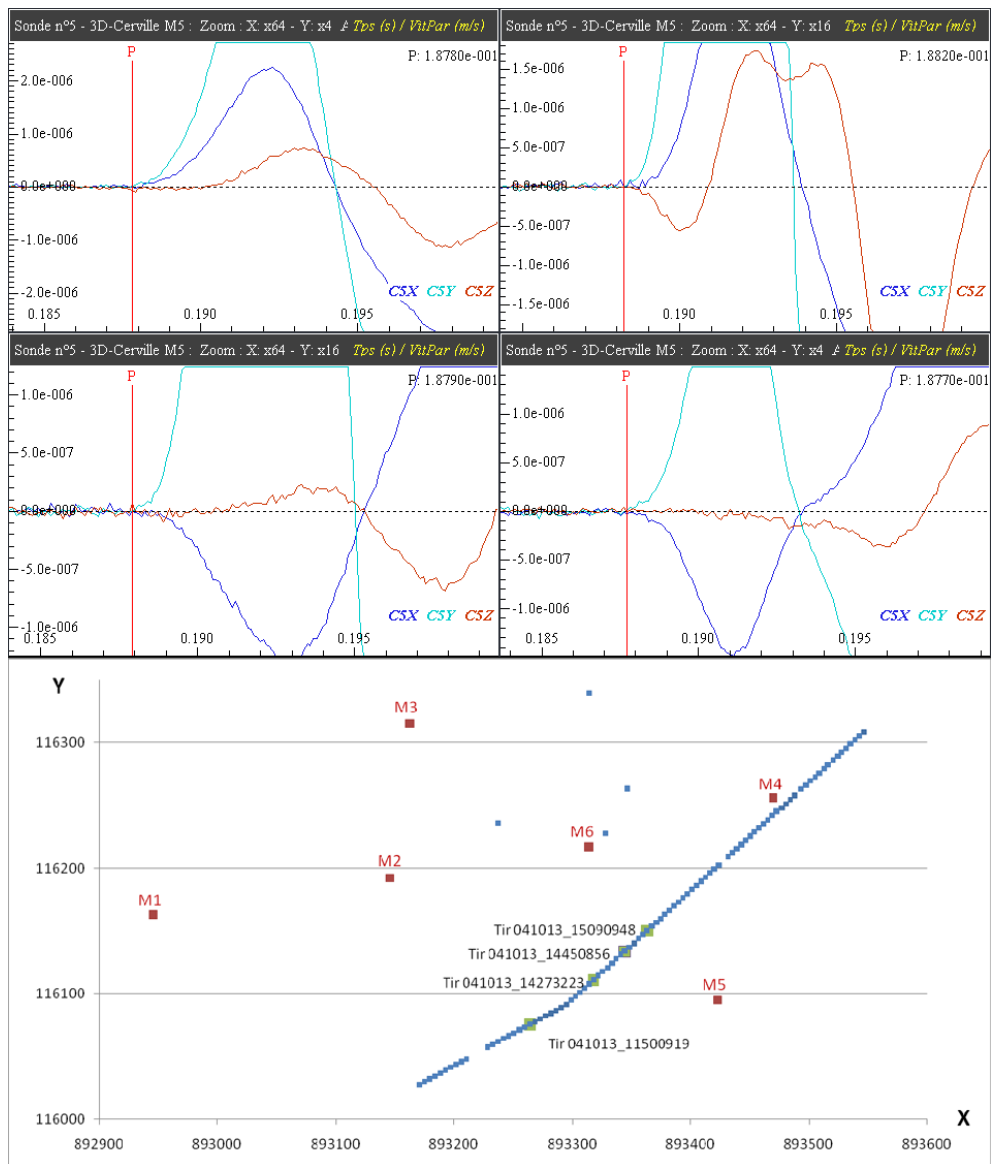


FIGURE 5.9 – Évolution des formes d'onde enregistrées au niveau de la voie Z de la sonde M5 en fonction de la position des tirs. De haut en bas et de gauche à droite, tirs : 041013_15090948, 041013_14450856, 041013_14273223 et 041013_11500919.

5.2.1.3 Construction du modèle de vitesse

Suite à l'étude de polarisation, il a été entrepris de redéfinir un modèle de vitesse à partir des tirs de calage. Pour ce faire, le logiciel d'inversion SYTMISvel a été utilisé.

Ce dernier a permis d'explorer de nombreux modèles de vitesse, générés de façon aléatoire, selon un algorithme de type Monte-Carlo par Metropolis-Hastings (i.e. les modèles sont évalués de proche en proche, en tenant compte de ceux déjà testés [34]) et de sélectionner celui minimisant au mieux une fonction pondérée au sens des moindres carrés, en norme L2, évaluant les différences entre les données calculées et observées tout en considérant leurs incertitudes.¹

Il prend en compte à la fois :

- les temps d'arrivées des ondes de volume et leurs erreurs associées ;
- les angles d'incidence mesurés au niveau des sondes 3D (azimuts et pendages) ainsi que leurs erreurs estimées ;
- une structure géologique *a priori* avec des couches supposées planes et parallèles, en indiquant leur nombre, épaisseur et pendage éventuels, ainsi que l'intervalle de vitesse dans lequel les recherches peuvent être réalisées.

Les erreurs considérées sur ces valeurs ont été fixées respectivement à : 0.005 s sur les pointés des ondes P et, au vu des résultats de l'analyse de polarisation, 10° pour les azimuts et 15° pour les pendages.

Notons que les valeurs déterminées par inversion pour le banc de Dolomie de Beaumont, pourront être comparées avec les mesures effectuées en laboratoire [65] ; celles-ci indiquant que cette couche était caractérisée par des vitesses sismiques relativement élevées, supérieures à 5000 m/s.

Plusieurs tests ont été effectués, faisant notamment varier le nombre de données d'entrée ou de couches prises en compte. La validité de ces derniers a été jaugée en considérant à la fois les erreurs estimées sur les vitesses définies, mais aussi les résidus entre les valeurs des temps d'arrivées des ondes P et des angles de polarisation mesurés et calculés pour chaque tir, au niveau de chaque sonde, ainsi que les connaissances *a priori* du milieu.

Modèles de vitesse de départ testés :

Divers modèles de vitesse ont été testés, en faisant varier le nombre de couches prises en compte. Ces derniers ont été déclinés en rassemblant ou non les diverses formations géologiques identifiées précédemment (cf. Chapitre 2), à l'exception du banc de Dolomie (Tableau 5.3).

Par exemple, dans le modèle 5A, les Argiles à Promicrocérans et les Calcaires à Gryphées ont été réunis en une seule couche, les quatre formations suivantes ayant été distinguées ; tandis que dans le modèle 5B, les Argiles à Promicrocérans sont individualisées et les Calcaires Gryphées sont regroupés avec les Argiles de Levallois...

Remarques :

- mises à part les Argiles à Promicrocérans, les couches sont échantillonnées au mieux par une seule sonde. Les rassembler pour l'inversion peut permettre d'obtenir des résultats plus cohérents et robustes, que lorsqu'elles sont considérées individuellement ;
- la sonde la plus profonde étant implantée dans le banc raide, les vitesses dans les couches inférieures ne peuvent donc être déduites par inversion ;
- les formations géologiques étant assez continues au niveau de la zone surveillée et leur pendage étant très faibles (< 1°), il ne paraissait pas nécessaire de faire des tests faisant varier l'épaisseur même des différentes couches autour des valeurs théoriques.

1. SYTMISvel peut aussi générer tous les modèles indépendamment les uns des autres (simple Monte-Carlo) et de minimiser la fonction objectif avec une norme EDT.

TABLE 5.3 – *Identification des différents modèles de vitesse testés. Les formations géologiques sont tour à tour rassemblées en une seule couche ou dissociées.*

Formations / Nb de couches		Argiles P (26 m)	Calcaires (12.5 m)	Argiles L (7 m)	Grès (17 m)	Marnes (57 m)	Dolomie (9 m)
6							
5	A						
	B						
	C						
	D						
4	A						
	B						
	C						
	D						
	E						
	F						
3	A						
	B						

Par ailleurs, afin de jauger l'apport des données d'entrée ainsi que la stabilité et la fiabilité des résultats, des essais ont été effectués tour à tour en prenant en compte ou non les angles de polarisation, en séparant le type de source et en diminuant le nombre de tirs considérés.

Élimination des valeurs aberrantes :

La démarche adoptée consiste à utiliser dans un premier temps tous les tirs à disposition, puis, éliminer les temps d'arrivée et/ou angles présentant les résidus les plus forts. Ainsi, seules les données les plus pertinentes seront prises en compte, afin d'obtenir un modèle localisant au mieux la majorité des tirs. Il s'ensuit que :

- aucun modèle de vitesse ne peut être défini en imposant un milieu à une seule ou deux couches séparant le banc de Dolomie du reste du recouvrement (résultats d'inversion instables). Le recouvrement situé au dessus du banc de Dolomie ne peut pas être assimilé à une seule couche ; on ne peut donc se satisfaire du modèle de vitesse qui avait été défini auparavant (cf. paragraphes suivants) ;
- si les angles de polarisation ne sont pas utilisés, la vitesse définie pour le banc de dolomie est extrêmement faible (inférieure à 1000 m/s, Annexe C.2.2) et donc erronée. L'utilisation des angles de polarisation est donc indispensable pour définir le modèle de vitesse ;
- si la sonde M1 est utilisée aucun modèle à 6 couches ne peut être déterminé. De plus, si l'on considère un nombre de couches inférieur, les résidus sur les temps d'arrivée déterminés pour cette sonde sont élevés, de l'ordre de 0.01 s (Annexe C.2.2). Les rais arrivant à cette sonde, qui est la plus éloignée des tirs, étant plus sensibles aux hétérogénéités de surface, il a été décidé de ne pas la prendre en compte pour redéfinir le modèle de vitesse ;
- les résidus sur les pendages de la M5 sont en moyenne assez élevés par rapport aux autres sondes (de l'ordre de 15° en moyenne). De plus, ces mesures oscillent de manière irrégulière entre des valeurs tour à tour positives ou négatives ("anomalie" azimutale à 180°). Les angles de cette sonde ne seront pas utilisés ;
- les résidus sur les tirs présentant des "anomalies" de polarisation au niveau des sondes M3 et M6.3 sont élevés (d'environ 0.02 s sur les temps d'arrivée de la sonde M3). Ces tirs ne seront donc pas considérés ;
- de même, certains tirs, présentant des résidus assez élevés sur la sonde M2 ont été éliminés.

⇒ Au final, seuls 115 tirs ont finalement été utilisés pour redéfinir le modèle de vitesse.

Résultats :

Les résultats d'inversion obtenus montrent que (Tableau 5.4) :

- les vitesses évaluées pour les couches d'argiles et de calcaire, lorsqu'elles sont prises en compte individuellement, peuvent présenter des erreurs élevées. Par ailleurs, les valeurs déterminées pour le calcaire dans les modèles à 6 couches et 5D sont extrêmement faibles (de l'ordre de 1100 m/s) par rapport à celles habituellement trouvées dans la littérature.
 - Ceci tient du fait que ces formations sont de faibles épaisseurs et qu'aucune sonde n'était implantée dans l'Argile de Levallois ;
- les vitesses évaluées pour le banc de Dolomie de Beaumont, un peu plus faibles que la valeur de 5000 m/s attendue, présentent elles-aussi des erreurs en général élevées.
 - Ceci peut s'expliquer par le fait que cette couche est non seulement très fine (~ 9m) mais aussi la plus profonde et que seule la sonde M6.3 l' "échantillonne" ;
- des inversions de vitesse, l'une entre les bancs d'Argile de Levallois et de Grès et l'autre entre les couches de Grès et de Marnes sont observables.
 - Ces dernières n'ont jamais été spécifiées auparavant (cf. paragraphe suivant) ;
- lorsque les bancs de Grès et de Marnes irisées sont réunis (5D, 4C, 4E, 4F, et 3B), les vitesses déterminées pour le banc de Dolomie sont plus faibles que dans les autres inversions.
 - Ces modèles paraissent a priori moins pertinents, connaissant les propriétés du banc raide ;
- les résidus sur les données d'entrée sont similaires d'un modèle à l'autre (Tableaux 5.5 et 5.6). Ils sont de l'ordre de 0.003 s en moyenne pour les temps d'arrivée des ondes P. Pour les azimuts, ils sont de 3.85° en moyenne par tir, les valeurs les plus élevées étant détectées au niveau de la M3, plus éloignée de la ligne de tirs que les autres sondes 3D. Les résidus sur les pendages quant à eux

TABLE 5.4 – Vitesses définies en prenant en compte 115 tirs, avec angle de polarisation.

		Argiles P (26 m)	Calcaires (12.5 m)	Argiles L (7 m)	Grès (17 m)	Marnes (57 m)	Dolomie (9 m)	
6 couches	V_P (m/s)	3062	1123	3918	2826	2986	4614	
	Erreur (m/s)	134	495	276	168	268	276	
5 couches	A	V_P (m/s)	3352		3242	3032	2684	4694
		Erreur (m/s)	124		607	126	205	244
	B	V_P (m/s)	3379	3412		2912	2732	4764
		Erreur (m/s)	214	229		127	205	254
	C	V_P (m/s)	3447	3473	3028		2752	4782
		Erreur (m/s)	280	280	122		204	269
	D	V_P (m/s)	3100	1150	3960	2866		4578
		Erreur (m/s)	130	490	321	159		223
4 couches	A	V_P (m/s)	3308			3003	2747	4778
		Erreur (m/s)	98			121	194	240
	B	V_P (m/s)	3495	2700			2861	4751
		Erreur (m/s)	102	112			202	246
	C	V_P (m/s)	3434	3463	2618			4545
		Erreur (m/s)	432	186	105			190
	D	V_P (m/s)	3343		3034		2768	4758
		Erreur (m/s)	100		119		197	242
	E	V_P (m/s)	3308		3528	2610		4592
		Erreur (m/s)	157		479	106		164
	F	V_P (m/s)	3376	3418		2579		4534
		Erreur (m/s)	374	188		109		175
3 couches	A	V_P (m/s)	3344				2439	4866
		Erreur (m/s)	95				110	169
	B	V_P (m/s)	3485	2701				4468
		Erreur (m/s)	100	95				157

TABLE 5.5 – Résidus sur les temps d'arrivée des ondes P pour les divers modèles de vitesse.

Résidus moyens (s)		M2	M3	M4	M5	M6.3	M6.2	Tir
6 couches		0.0038	0.0017	0.0024	0.0029	0.0018	0.0012	0.0026
5 couches	A	0.0047	0.0022	0.0017	0.0023	0.0017	0.0032	0.003
	B	0.0048	0.0027	0.0016	0.0022	0.0017	0.003	0.003
	C	0.0051	0.003	0.0014	0.0019	0.0015	0.0022	0.0029
	D	0.0038	0.0017	0.0023	0.0028	0.0016	0.0012	0.0026
4 couches	A	0.0049	0.0027	0.0016	0.0021	0.0016	0.0028	0.003
	B	0.0054	0.0039	0.0014	0.0017	0.0016	0.0015	0.003
	C	0.0051	0.0029	0.0012	0.0018	0.0017	0.0025	0.0029
	D	0.005	0.0031	0.0014	0.0019	0.0016	0.0022	0.0029
	E	0.0047	0.0022	0.0016	0.0022	0.0016	0.0034	0.0029
	F	0.0048	0.0025	0.0014	0.002	0.0016	0.0033	0.0029
3 couches	A	0.0044	0.002	0.002	0.0023	0.0013	0.0042	0.003
	B	0.0054	0.0037	0.0013	0.0016	0.0017	0.0017	0.0029

TABLE 5.6 – Résidus sur les angles de polarisation pour les divers modèles de vitesse.

Résidus moyens (°)		Azimuts				Pendages			
		M3	M6.3	M6.2	Tir	M3	M6.3	M6.2	Tir
6 couches		6.65	2.68	2.18	3.85	5.33	3.98	2.64	3.83
5 couches	A	6.65	2.68	2.18	3.85	6.62	3.96	4.61	4.85
	B	6.65	2.68	2.18	3.85	7.54	3.95	4.91	5.13
	C	6.65	2.68	2.18	3.85	7.11	3.98	4.73	5.07
	D	6.65	2.68	2.18	3.85	5.5	3.98	2.5	3.76
4 couches	A	6.65	2.68	2.18	3.85	7.11	3.95	5.28	5.16
	B	6.65	2.68	2.18	3.85	8.56	3.95	2.95	4.96
	C	6.65	2.68	2.18	3.85	7.09	4.21	4.74	5.06
	D	6.65	2.68	2.18	3.85	7.46	3.95	4.49	5.05
	E	6.65	2.68	2.18	3.85	6.41	3.99	4.55	4.82
	F	6.65	2.68	2.18	3.85	6.76	4.3	5.51	5.32
3 couches	A	6.65	2.68	2.18	3.85	4.62	3.98	5.54	4.63
	B	6.65	2.68	2.18	3.85	8.77	4.54	2.87	5.13

sont en général faibles, y compris pour les sondes M3 et M6.3, allant de 3 à 9° en moyenne.

→ ces modèles permettent donc de rendre compte de la verticalisation et de l'horizontalisation des rais mesurés au niveau des sondes M3 et M6.3 ;

→ étant donné qu'aucun modèle de vitesse ne se démarque en ne considérant que les résidus sur les données d'entrée, le choix du meilleur modèle se fera sur les résultats de localisation, en regardant les écarts entre positions réelles et calculées).

Tests complémentaires :

Des tests complémentaires ont été menés afin de s'assurer de la qualité des modèles de vitesse définis, en testant l'influence :

- du type de source. En séparant les tirs de type "explosifs" et "chutes de poids", les modèles définis ainsi que les résidus associés sont similaires (Annexe C.2.2). Notons cependant que les vitesses pour les couches d'Argiles à Promicrocérans et de Dolomie de Beaumont obtenues en utilisant uniquement les "chutes de poids" sont légèrement plus élevées.

→ Le type de source utilisé n'influe donc quasiment pas sur les modèles de vitesse déterminés.

- du nombre de tirs pris en compte. En outre, les dix tirs de calage utilisés pour définir les anciens modèles de vitesse ([97] et [63]) ont été repris et inversés afin de jauger la pertinence des résultats

obtenus précédemment. Il en ressort que :

- un modèle a pu être défini en ne considérant qu'une ou deux couches (Annexe C.2.2). Les vitesses calculées sont assez faibles : 2916 m/s pour tout le recouvrement et 2917 m/s et 4042 m/s pour le modèle à deux couches (les valeurs estimées par essai/erreur étant de 3000 m/s et 5000 m/s).
 - Le meilleur modèle déterminé par inversion avec les 10 tirs diffère donc de celui estimé par essai-erreur ;
- les vitesses paraissent sous-estimées, en particulier pour le banc de Dolomie (de 3000 m/s en considérant un modèle à trois couches).
 - L'utilisation de seulement 10 tirs semble donc insuffisante pour définir précisément un modèle de vitesse.
- des intervalles de recherche des vitesses. Étant donné qu'aucune inversion n'avait été observée auparavant (cf. paragraphe suivant), il a été entrepris de réaliser des tests aux niveaux desquels l'espace de recherche des vitesses était restreint. Ainsi, on peut imposer numériquement une augmentation de vitesse avec la profondeur, en bornant les intervalles de vitesse de recherche pour chaque couche, afin d'essayer de se rapprocher au mieux des modèles définis antérieurement (dans les tests précédents, les intervalles de recherche pour chaque couche allait de 500 à 7000 m/s).
 - Aucun modèle de vitesse n'a pu être identifié avec cette hypothèse, la probabilité pour les modèles testés étant trop basse (numériquement ~ 0).

5.2.1.4 Localisation des tirs de calage

Paramétrage utilisé pour la localisation des tirs :

- Le logiciel SYTMISauto a été paramétré de la manière suivante pour localiser les tirs de calage :
- la dimension de la zone de calcul est de 900 m en X, 800 m en Y et 500 m en Z avec un point situé au centre du réseau comme référence (Coordonnées Lambert, X : 893355, Y : 116305, Z : 50) ;
 - les tailles des mailles sont de 6 m au minimum¹ et 50 m au maximum ;
 - aucun bornage de la zone de recherche n'a été imposé, les tirs étant effectués en surface ;
 - l'erreur sur le pointé d'arrivée des ondes P est fixée à ± 0.005 s ;
 - les erreurs sur les angles de polarisation sont de $\pm 10^\circ$ pour les azimuts, $\pm 15^\circ$ pour le pendage ;
 - l'erreur sur le modèle utilisé varie de 0.048 m/s à 0.1 m/s selon le modèle utilisé.

Résultats :

Les tirs de calage ont été relocalisés en utilisant les différents modèles de vitesse définis dans le paragraphe précédent, avec ou sans les angles de polarisation. Les tirs présentant ou non des "anomalies" de polarisation ont été traités séparément.

Les résultats obtenus pour les 115 tirs ayant servi à définir les modèles de vitesses ont été comparés avec les positions réelles des tirs (Tableaux 5.7 et 5.8, ainsi que Figure 5.10).

Ainsi, en considérant les mêmes données d'entrée, les différents modèles produisent des résultats comparables (les vitesses des diverses couches étant similaires d'un modèle à l'autre). En outre, la localisation des tirs est largement améliorée lorsque les angles de polarisation sont utilisés ; les distances entre les positions réelles et calculées diminuant dans les trois directions de l'espace et étant divisées par deux en moyenne.

De fait, étant donné que les résidus sur les temps d'arrivée et les angles de polarisation sont similaires d'un modèle de vitesse à l'autre (cf. paragraphe précédent), le critère utilisé pour choisir le plus approprié est la distance entre positions réelles et calculées.

1. Dans la version 4.30 de SYTMISauto utilisée, le logiciel divisait la zone de recherche par dichotomie, jusqu'à atteindre une valeur égale ou inférieure à celle indiquée, dans les trois directions de l'espace. Ainsi, en imposant ici une valeur de 6 m, la taille minimale des mailles était en réalité de l'ordre de 3 m en X et Y, et de 2 m en Z.

TABLE 5.7 – *Écarts moyens entre positions réelles et calculées sans les angles de polarisation.*

Écarts moyens (m)		X	Y	Z	Distance
5 couches	A	36.56	12.25	25.56	54.92
	B	43.2	12.6	25.74	61
	C	45.12	13.88	23.15	60.3
4 couches	A	34.17	10.79	29.06	55.71
	B	45.22	18.03	21.81	60.23
	C	25.45	13.83	29.12	49.18
	D	36.23	11.24	27.01	55.9
	E	24.81	16.62	29.56	51.03
	F	48.05	19.16	29.17	64.13
3 couches	A	22.15	11.97	28.76	43.24
	B	60.92	13.24	18.63	74.73

TABLE 5.8 – *Écarts moyens entre positions réelles et calculées avec les angles de polarisation mesurées au niveau des sondes M3, M6.3 et M6.2.*

Écarts moyens (m)		X	Y	Z	Distance
5 couches	A	17.97	11.01	1.09	32.76
	B	15.6	10.05	5.08	30.46
	C	15.05	6.84	5.64	29.21
4 couches	A	10.16	11	3.21	25.85
	B	11.42	2.91	6.62	23.95
	C	9.7	10.76	18.65	24.73
	D	12.67	7.41	7.42	26.93
	E	11.21	16.44	12.2	28.08
	F	25.85	19.19	11.28	39.92
3 couches	A	9.68	3.59	8.03	15.03
	B	26.86	7.88	11.97	34.12

Aussi cette dernière est en moyenne plus faible (en considérant ou non les angles de polarisation) pour le modèle 3A. Ce modèle, divisant le recouvrement au-dessus du banc de Dolomie en deux, avec une couche d'Argiles + Calcaire + Grès (ces formations ayant des épaisseurs individuelles faibles) et une autre de Marnes a donc été retenu.

Le Tableau 5.9 présente les écarts observés entre les positions réelles et calculées des tirs avec ou sans "anomalie" de polarisation. Les distances totales sont en moyenne deux fois supérieures pour le deuxième type de tirs. En particulier, les décalages latéraux deviennent particulièrement importants lorsque les angles de polarisation ne sont pas pris en compte. Les valeurs observées en utilisant ces paramètres

TABLE 5.9 – *Résultats de localisation obtenus avec les tirs présentant ou non des "anomalies de polarisation"*

Tirs / Écarts absolus (m)		Sans les Angles de polarisation				Avec les Angles de polarisation			
		X	Y	Z	Distance	X	Y	Z	Distance
sans anomalie	Minimum	0.23	0.19	1.3	4.35	0.23	0.07	0.17	1.49
	Moyen	22.15	11.97	28.76	43.24	9.68	3.59	8.03	15.03
	Maximum	145.87	59.87	63.5	147.11	51.86	21.63	43.97	53.32
	Écart-type	27.24	13.03	17.95	28.61	11.62	3.97	8.54	12.96
avec anomalie	Minimum	0.01	0.09	0.15	7.05	0.01	0.09	0.73	1.93
	Moyen	48.65	63.73	19.02	89.56	11.5	20.8	13.72	30.9
	Maximum	360.2	268.79	64.87	444.75	73.17	199.45	71.47	224.14
	Écart-type	70.57	56.58	15.04	84.61	17.17	47.74	18.46	52.06

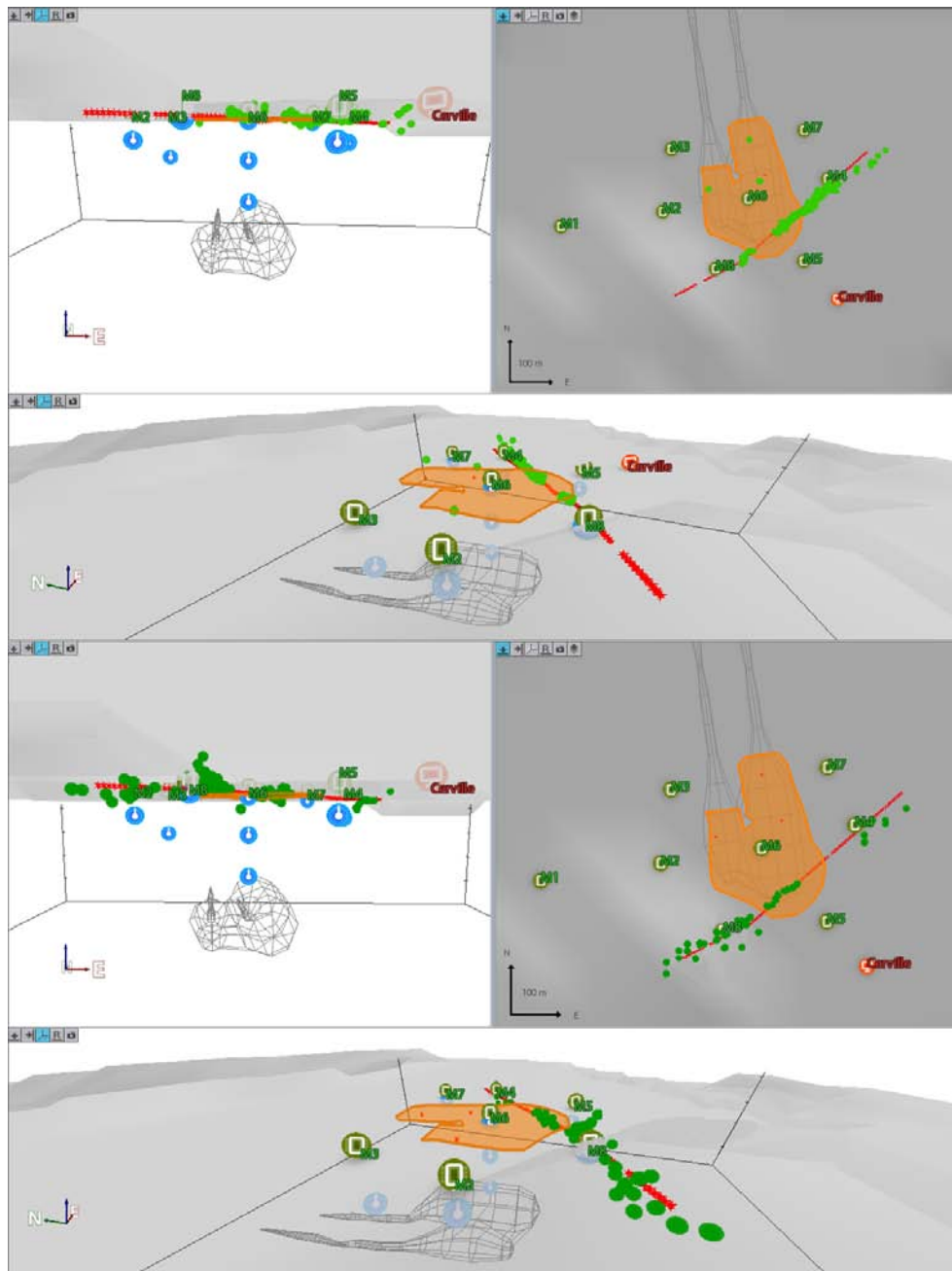


FIGURE 5.10 – Localisations des tirs sans (en haut) et avec anomalies de polarisation (en bas) effectuées avec le nouveau modèle de vitesse. La position des tirs de calage, des sondes microsismiques ainsi que le contour relatif de la cavité sont indiqués.

restent quant à elles raisonnables.

Les événements sont donc bien localisés à $\pm 180^\circ$ près en azimut et l'inversion des pendages observée (par réflexion/réfraction) est bien prise en compte avec le nouveau modèle de vitesse (Figure 5.10).

5.2.1.5 Comparaison entre les anciens modèles de vitesse et le modèle retenu

Différents modèles de vitesse ont déjà été définis pour le site de Cerville-Buissoncourt (Tableau 5.10) :

- par le BRGM [131], à l'aide des mêmes tirs, effectués dans le cadre d'une campagne de Profil Sismique Verticale. Les hydrophones chargés de les enregistrer étaient situés entre 87 à 181 m de

profondeur et ne pouvaient donc pas détecter toute inversion de vitesse dans les couches les plus superficielles. Des vitesses d'intervalle ont été calculées (NB : les tirs ont aussi fait l'objet d'une étude tomographique : cependant, les résultats n'étaient pas satisfaisants du fait que les vitesses obtenues étaient très faibles) ;

- à l'aide de données de Sismique Haute Résolution réalisées à proximité de Cerville [110], dont le but était de détecter la présence de cavité ;
- sur la base de seulement 10 tirs de calage, en ne tenant compte que des temps d'arrivée des ondes P, déterminés par essais/erreurs :
 - l'un par D. Mercerat au cours de sa thèse [97], regroupant les couches situées au-dessus du banc de Dolomie de Beaumont en une seule, cette dernière présentant un gradient de vitesse positif vers le bas (ce qui est en contradiction avec nos résultats). Ce modèle n'a pu être testé ou utilisé du fait que le logiciel SYTMISauto ne permettait pas de représenter ce gradient de vitesse ;
 - l'autre, employé antérieurement dans SYTMISauto [63], regroupant aussi les couches situées au-dessus du banc de Dolomie de Beaumont en une seule, sans gradient de vitesse.

TABLE 5.10 – *Comparaison entre les différents modèles déterminés.*

Formations	Épaisseurs (m)	Différents modèles de vitesse (m/s)				
		BRGM	Nova	Mercerat	Hernandez	Cao
Argiles à Promicrocérans	26	3000	1700	2400 + 5 z[m]	3000	3344
Calcaires à Gryphées	12.5					
Argiles de Levallois	7					
Grès infraliasiques	17					
Marnes irisées supérieures	57		3000			2439
Dolomie de Beaumont	9	6000	5000	5000	5000	4866
Marnes à Anhydrites	∞	3000	4000	4000	4000	4000

Ainsi, les valeurs calculées pour le nouveau modèle sont cohérentes avec celles définies dans les anciens. La seule différence réside dans l'inversion de vitesse déterminée au niveau des Marnes irisées.

N.B. : les Marnes à Anhydrites n'étant échantillonnées par aucune sonde, les vitesses des ondes P dans cette dernière n'ont pu être inversées.

Par ailleurs, le nouveau modèle permet d'obtenir des écarts entre positions réelles et calculées bien inférieures à celles déterminées avec le modèle précédemment employé dans SYTMISauto, et ce, en utilisant ou non les angles de polarisation (Annexe C.2.2).

5.2.1.6 Synthèse sur la définition du modèle de vitesse

L'analyse de polarisation des tirs de calage montre que les sondes tridirectionnelles M3, M6.3 et M6.2 sont bien orientées, aucune erreur systématique n'ayant été trouvée ; tandis que les voies horizontales de la sonde M5 sont tournées de 180°. De plus, elle a mis en évidence la présence d'hétérogénéités dans le recouvrement.

Le modèle de vitesse retenu (Tableau 5.11) a été fixé en considérant à la fois les temps d'arrivée des ondes P et les angles de polarisation. Il montre une inversion de vitesse au niveau du banc de Marnes irisées (à environ 65 m de profondeur) qui permet de rendre compte des pendages observés au niveau de la sonde M3, incompatibles avec une augmentation des vitesses avec la profondeur.

TABLE 5.11 – *Caractéristiques du modèle de vitesse retenu.*

Couches	Épaisseurs (m)	V_P estimées (m/s)	Erreurs (m/s)
Argiles + Calcaire + Grès	65	3344	95
Marnes irisées supérieures	58	2439	110
Dolomie de Beaumont	9	4866	169
Marnes à Anhydrites		4000	

5.2.2 Paramétrage & Sensibilité de la localisation des événements microsismiques

Pour la localisation des événements microsismiques induits dans la cavité :

- tous les temps d'arrivée des ondes P et les angles de polarisation (azimuts et pendages) mesurés ont été utilisés ; les sources étant en majorité situées en profondeur, les trajets des rais sont moins affectés par les hétérogénéités rencontrées en surface ;
- les azimuts mesurés sur la sonde M5 sont systématiquement corrigés de 180° ;
- les tailles des mailles, minimales et maximales, sont identiques à celles définies pour positionner les tirs de calage ; l'espace de recherche, quant à lui a été borné en surface, afin de diminuer les temps de calcul.

La qualité des résultats dépendra principalement des facteurs suivants :

- la position de l'hypocentre par rapport à la position des sondes ; les événements situés à l'intérieur du réseau microsismique étant mieux contraints que ceux localisés aux bords ou à l'extérieur. Dans le cas de Cerville-Buissoncourt, au centre du réseau (i.e. au niveau du forage M6), l'ouverture azimutale maximale entre deux sondes est d'environ 100° (la sonde M4 n'étant plus opérationnelle pour la période étudiée). La couverture en profondeur quant à elle est bonne jusqu'au banc de Dolomie de Beaumont. La localisation des événements pourra donc de manière générale être assez précise dans le plan horizontal, mais mal contrainte dans la direction verticale pour les événements situés dans et sous le banc de Dolomie ;
- la précision des pointés :
 - des ondes P et S : sur les enregistrements, le niveau de bruit est suffisamment faible et la fréquence d'échantillonnage (5 kHz) élevée pour pouvoir déterminer l'apparition d'une phase avec précision. Néanmoins, la plupart des signaux présentaient des arrivées peu émergentes, de faible amplitude. Aussi, l'erreur moyenne a été estimée à : 0.005 s (25 pas d'échantillonnage) pour les pointés P pour toutes les sondes, à l'exception de la M1, la plus éloignée du centre de la cavité, pour laquelle elle est de 0.006 s (30 pas d'échantillonnage) ; et 0.006 s pour les pointés S, sur les sondes 3D ;
 - des angles de polarisation : l'analyse des tirs de calage ayant montré que ces données pouvaient être définies avec une bonne précision, les incertitudes ont été fixées à 10° pour les azimuts et 15° pour les pendages.

Notons que toutes ces erreurs observationnelles sont toujours supposées gaussiennes ;

- l'exactitude dans le calcul du problème direct (i.e. détermination du trajet hypocentre-station). Elle est difficile à estimer *a priori*, car la méconnaissance du modèle de vitesse réel reste importante. En outre, du fait de l'évolution du milieu (particulièrement rapide au moment de l'effondrement), on peut s'attendre à une dégradation progressive des localisations au cours du temps. Par ailleurs, les résultats peuvent être fortement biaisés par la présence d'interfaces à forts contrastes d'impédance acoustique (Lomax et al., 2000) comme c'est le cas sur le site de Cerville.

En général, l'hypothèse gaussienne est adoptée, les erreurs estimées étant comparables à celles sur les observations (Lomax et al., 2001). Dans notre cas d'étude, nous avons supposé que ces erreurs étaient de l'ordre de 0.0048 s à chaque sonde. Ceci correspond à une erreur de vitesse d'environ

300m/s pour un trajet de 180 m (entre la surface et le toit initial de la cavité) à 3300 m/s (vitesse moyenne pondérée pour le modèle utilisé).

5.3 Description des événements à localiser

Les événements microsismiques enregistrés par les réseaux de surveillance ne sont pas toujours exploitables en termes de localisation. De fait, c'est le cas lorsqu'ils sont détectés par un nombre de sondes insuffisant ou s'ils arrivent de manière quasi continue (i.e. déclenchements "en rafales").

Aussi, après avoir explicité les critères utilisés pour sélectionner un échantillon d'événements adéquat, nous caractériserons l'évolution de la signature de ces derniers, en termes d'amplitude, énergie et fréquence fondamentale, afin de jauger de leur pertinence (représentatifs ou non de toute la population ?).

5.3.1 Sélection et pointé des fichiers

La stratégie de sélection mise en place sur les enregistrements de la base de données de Cerville-Buissoncourt se décline comme suit :

1. les événements déclenchés uniquement sur les sondes de la colonne M6 ont été écartés (ces derniers n'étant pas localisables en se servant seulement des temps d'arrivée des ondes P) ;
2. les rafales (cf. chapitre 4), dont les phases sont en majorité non identifiables, ont été éliminées ;
3. seuls les enregistrements avec un bon rapport signal sur bruit et dont les temps d'arrivée des ondes P sont pointés sur au moins six sondes (dont en majorité trois sur les sondes M6) ont été pris en compte, pour garantir la qualité de la localisation.

Aussi, afin d'assurer cette troisième étape, l'algorithme de pointé automatique des ondes P, disponible dans SYTMISauto, a été mis à profit. Ce dernier est basé sur :

- l'analyse d'une *fonction caractéristique*, représentative du signal. Les modifications dans le contenu fréquentiel et/ou d'amplitude, lors de l'arrivée d'une phase sont mises en valeur en comparant l'évolution de cette fonction sur de petites et grandes fenêtres de temps (STA/LTA) ;
- l'utilisation d'un seuil au niveau du rapport signal sur bruit, afin d'éviter de pointer lorsque ce dernier est faible.

Cet algorithme a été testé et paramétré individuellement pour chaque voie [26]. Les résultats montrent notamment qu'un seuil de rapport signal sur bruit de 10 semble être optimal pour toutes les sondes : en-dessous, les temps d'arrivée déterminés peuvent être erronés, et au-dessus, certains événements dont les phases sont identifiables visuellement ne sont plus pointés automatiquement. De plus, le niveau de bruit étant en moyenne environ de 20 digits (soit $4e-7$ m/s), et le seuil de déclenchement étant de 200 digits (soit $4e-6$ m/s), i.e. 10 fois plus, cette valeur de seuil semble pertinente.

→ Dans la suite, les fichiers satisfaisant les deux premiers critères (i.e. événements isolés déclenchant sur d'autres sondes que les M6) seront dits *localisables*, tandis que ceux répondant aux trois, seront qualifiés à *localiser*.

Les événements à localiser ont été retraités manuellement, avec le logiciel SYTMISView [83]. Les angles ont été pointés sur les sondes 3D, quand la polarisation semblait stable et les ondes S ont été définies sur ces enregistrements, avec la rotation d'onde, lorsqu'elles étaient bien émergentes. Aussi, sur certains enregistrements, la présence d'une onde S semblait visible mais son arrivée ne pouvait être déterminée avec précision.

Le Tableau 5.12 présente les pourcentages de pointés sur les diverses sondes, sur les événements à localiser. On observe que :

5.3. DESCRIPTION DES ÉVÉNEMENTS À LOCALISER

- les ondes P ont été discernées sur la quasi totalité des fichiers, sur les sondes de la colonne M6 et celles de surface ; à l'inverse sur la sonde M1, la plus éloignée du centre du réseau, seuls 40% de ces temps d'arrivée ont été déterminés ;
- 90% des fichiers localisés comportent au moins une sonde 3D où les angles de polarisation (azimut et pendage) ont été pointés ; leur nombre étant inférieur sur les sondes M5 et M6.3.
 - la distance entre les sources et ces récepteurs pourrait expliquer la faible polarisation de ces signaux ; la sonde M5 étant assez proche de la surface (i.e. polarisation plus "bruitée"), la M6.3, quant à elle, recevant des événements avec des fréquences plus élevées (i.e. polarisation moins stable) ;
- moins de 40% des événements présentait une onde cisailante émergente sur au moins une sonde 3D ; cette dernière étant moins visible sur M6.3.
 - les ondes S seraient plus immergées dans le coda de l'onde P étant donné la proximité des événements à cette sonde (champ proche).

TABLE 5.12 – *Pourcentages d'onde P, S et angles de polarisation pointés sur les événements à localiser de la période d'effondrement.*

% de pointés	M1	M2	M3	M5	M6.3	M6.2	M6.1	M7	M8	Localisés
P	40	88	97	89	99	99	99	99	98	100
S			23	25	6	20				38
Angles			62	52	48	79				90

5.3.2 Répartition temporelle des événements à localiser

Le Tableau 5.13 et la Figure 5.11 présentent la répartition des enregistrements selon les critères énoncés ci-dessus, avant et pendant l'effondrement.

On observe que :

- les proportions d'événements déclenchés exclusivement sur les sondes de la colonne M6 diminuent d'une période à l'autre (de 30% à 20%), leur apparition au cours du temps étant indépendante de l'activité microsismique globale ;
- le taux de rafales double lors de l'effondrement ($\sim 48\%$ contre $\sim 24\%$) ;
- respectivement une moitié et un tiers des événements sont théoriquement "localisables" pour les deux périodes, parmi lesquels $\sim 30\%$ et 20% présentent au moins six pointés P.
 - ⇒ seuls 15% et 7% du total d'événements enregistrés ont été localisés, ces derniers ne rendant pas compte des pics d'activité.

Remarques :

- le nombre d'événements ayant fait l'objet d'un pré-traitement manuel et localisés entre le 1er Mars 2008 et le 9 Février 2009, était de 2780, valeur comparable avec la sélection automatique ;
- les positions des foyers ont été calculées jusqu'à environ 2h avant l'effondrement généralisé, le nombre de sondes opérationnelles devenant insuffisant pour assurer une localisation précise ;

TABLE 5.13 – *Répartition des événements avant et pendant l'effondrement.*

Nombre d'événements / Période	01/03/08 - 09/02/09	10 - 13/02/09
Total	18494	30698
Déclenchant uniquement les M6	5597	6153
En "Rafale"	4408	14893
Localisables	8854	10139
À localiser	2874	2006

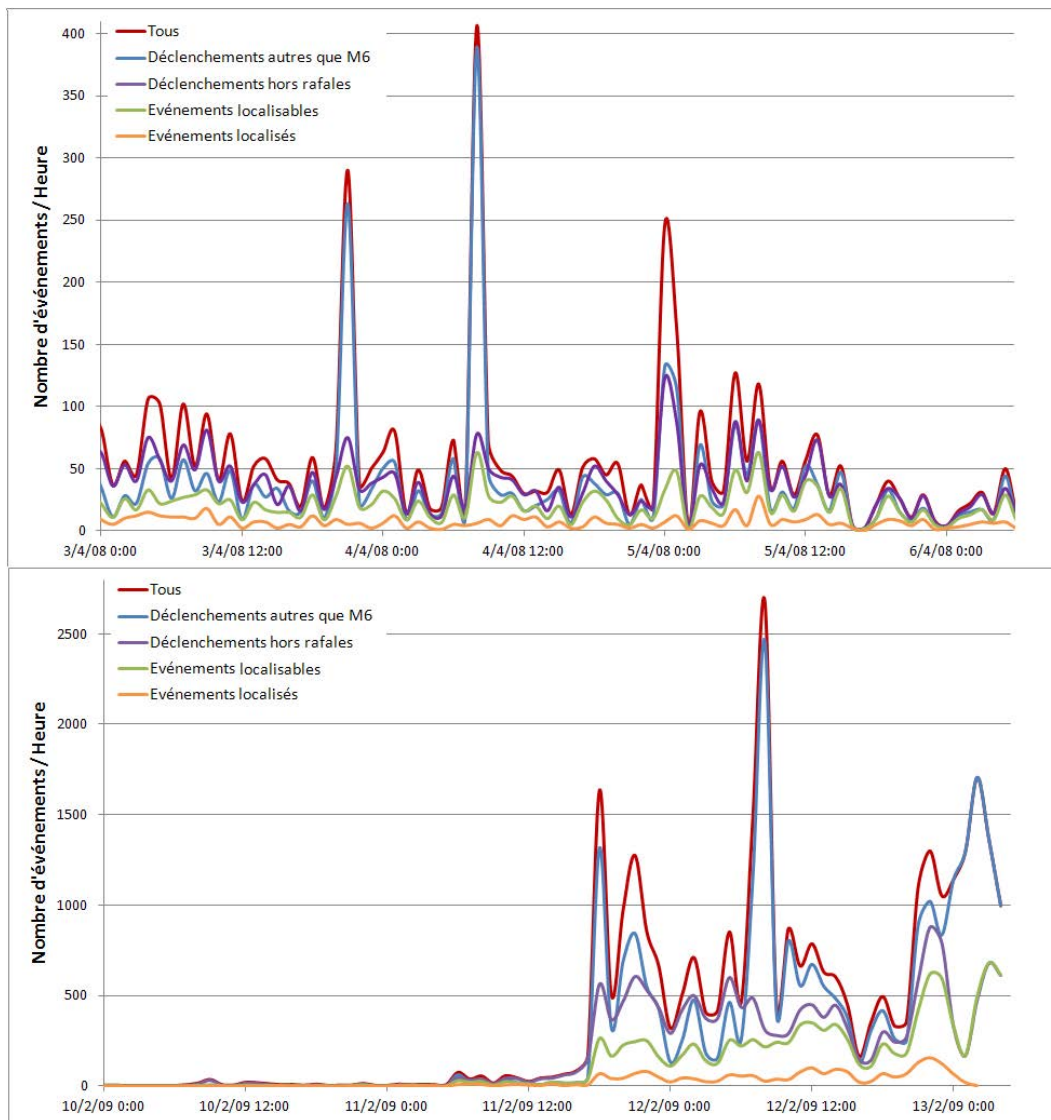


FIGURE 5.11 – Répartition des enregistrements entre les 03 et 06 Avril 2008 (en haut) et pendant la période d'effondrement (en bas). Les événements déclenchés sur d'autres sondes que celles de la colonne M6 suivent à peu près les tendances générales. Les événements de type isolé, et donc ceux sélectionnés pour la localisation, ne rendent pas compte des pics d'activité.

- en écartant les événements déclenchés uniquement sur les sondes de la colonne M6, on élimine tous les microséismes de faibles énergies, localisés à proximité de ces dernières ;
- de même, la suppression des rafales dans les traitements suivants peut entraîner l'omission d'une partie des phénomènes/mécanismes de rupture.

5.3.3 Caractéristiques des événements à localiser

La Figure 5.12 présente les variations d'amplitudes maximales enregistrées au niveau des voies verticales des sondes M3 et M6.3 comparées au nombre d'événements à localiser par tranche horaire.

On observe qu'à l'inverse des autres sondes, les événements de très forte amplitude mesurée au niveau de la M6.3, pendant les périodes de crise ne sont pas inclus dans cet échantillon. Les fichiers retenus pendant la période d'effondrement quant à eux reflètent bien les tendances observées avec tous les événements isolés (i.e., saturation en amplitude avant et pendant les pics d'activité, cf. Figure 4.8).

5.3. DESCRIPTION DES ÉVÉNEMENTS À LOCALISER

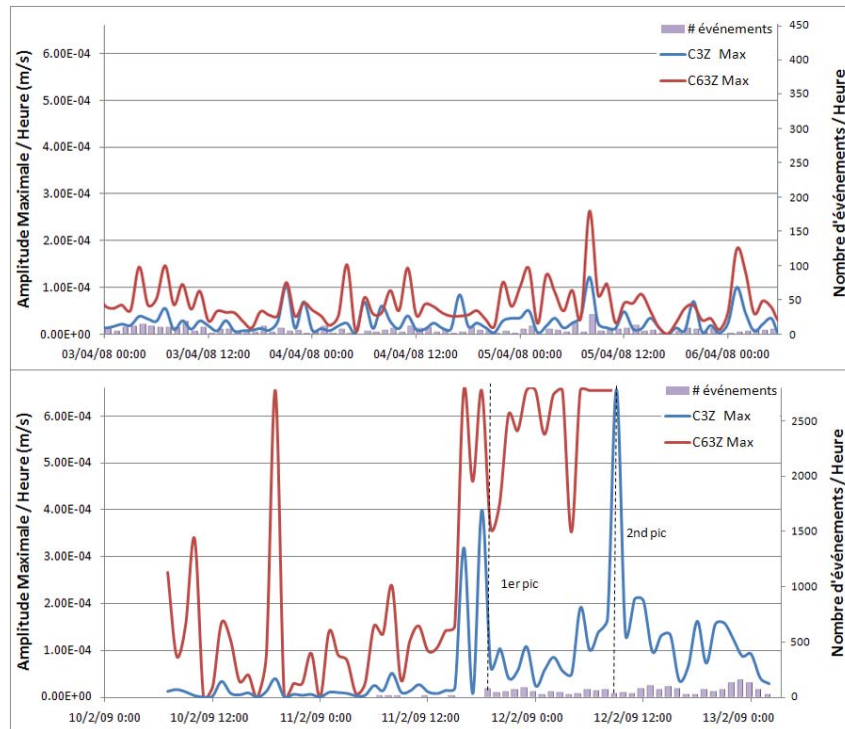


FIGURE 5.12 – Évolution de l’amplitude maximale des événements localisés enregistrée au niveau des sondes M3 et M6.3 entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).

La Figure 5.13 montre l’évolution des énergies au capteur maximales enregistrées au niveau des voies verticales des sondes M3 et M6.3 comparée au nombre d’événements à localiser par tranche horaire.

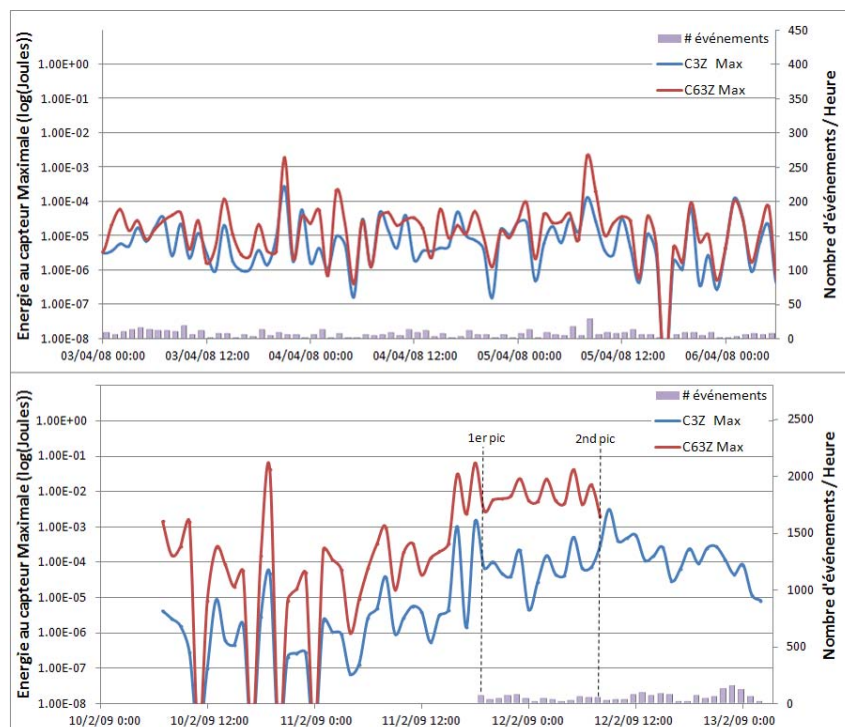


FIGURE 5.13 – Évolution de l’énergie au capteur maximale des événements à localiser enregistrée au niveau des sondes M3 et M6.3 entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).

5.3. DESCRIPTION DES ÉVÉNEMENTS À LOCALISER

De même que pour l'amplitude, les fichiers à localiser durant les périodes de crise ne comprennent pas ceux où l'énergie de la M6.3 est maximale ; de fait, l'énergie perçue est du même ordre de grandeur pour toutes les sondes dans cet échantillon. Pour la période d'effondrement, les courbes d'énergie observées sont quasiment identiques à celles obtenues pour tous les événements isolés (cf. Figure 4.14), certains maxima étant toutefois légèrement plus faibles pour la sonde M6.3 entre les deux premiers pics d'activité microsismique.

Les variations des fréquences fondamentales apparentes maximales enregistrées au niveau des voies verticales des sondes M3 et M6.3 comparées au nombre d'événements à localiser par tranche horaire sont tracées dans la Figure 5.14.

On constate que pour les deux périodes d'acquisition, les événements de hautes fréquences sont éliminés, quelque soit la sonde considérée (cf. Figure 4.19). Pendant la période d'effondrement, au niveau de la M6.3, un saut est toujours observable peu avant le premier pic d'activité, mais celui-ci apparaît ponctuel.

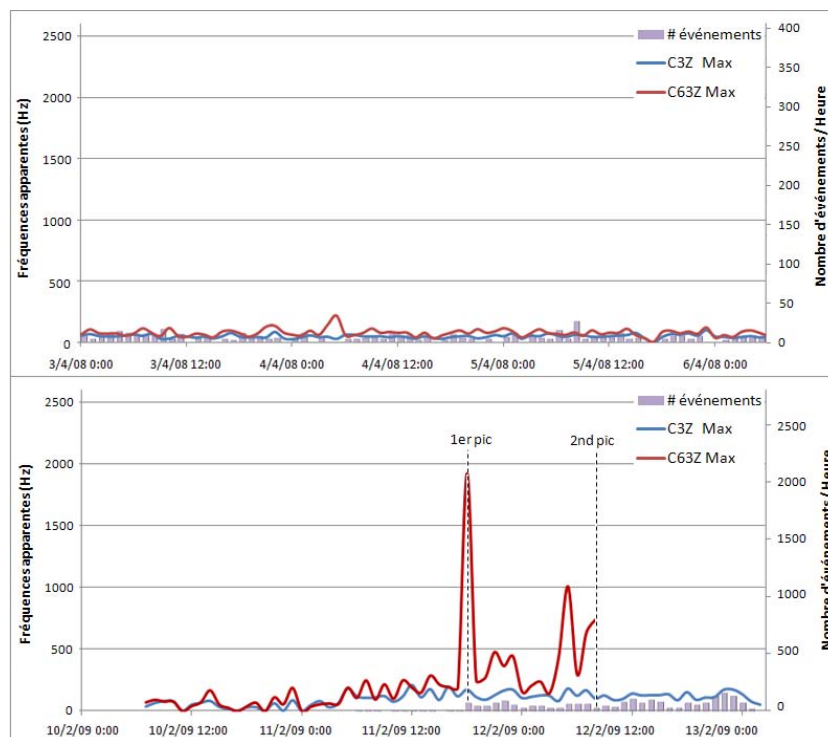


FIGURE 5.14 – Évolution de la fréquence fondamentale maximale des événements localisés enregistrée au niveau des sondes M3 et M6.3 entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).

→ Les maxima des paramètres enregistrés sur la M6.3 pour l'échantillon d'événements à localiser sont en moyenne plus faibles que ceux déterminés pour l'ensemble des événements isolés (mise à part l'amplitude lors de l'effondrement). Notamment, pendant les crises, ces derniers sont quasiment égaux d'une sonde à l'autre.

Aussi, l'absence des événements de hautes amplitudes / énergies / fréquences mesurées au niveau de la M6.3 semble résulter du fait que ces derniers étaient majoritairement déclenchés uniquement sur les sondes M6, provenant de sources situées près de ces sondes.

5.4 Influence des données d'entrée pour la localisation 2D

Nous avons réalisés une série de tests faisant varier les paramètres d'entrée afin de mesurer leur impact sur les localisations et par-là même jauger la stabilité des solutions trouvées.

Pour ce faire, nous nous sommes concentrés exclusivement sur les événements enregistrés durant la période d'effondrement (du 10 au 13 Février 2009), pointés automatiquement (P) et manuellement (P, S, E et angles de polarisation). Par ailleurs, les comparaisons effectuées ici ne tiennent pas compte des événements localisés en bordure de l'espace de recherche, ces derniers étant mal contraints (les résultats considérant tous les événements sont toutefois disponibles en Annexe C.3).

5.4.1 Différentes localisations effectuées

Les paramètres tour à tour pris en compte pour les tests de localisation sont les suivants :

- les *temps d'arrivée des ondes P pointés automatiquement* ou *manuellement*. En outre, sans l'utilisation des angles de polarisation, trois temps d'arrivée au minimum sont théoriquement nécessaires pour pouvoir positionner les sources. Or, les sondes M6 étant situées dans un même forage vertical, l'association des temps d'arrivée pointés sur ces dernières ne permet donc dans la majorité des cas que de caler les foyers en profondeur, et au moins deux temps d'arrivée supplémentaires sont indispensables pour contraindre la localisation. Aussi, en se servant du paramétrage précédemment fixé dans SYTMISauto (cf. paragraphes ci-dessus), seuls les événements présentant au moins six pointés P ont été localisés (les sismogrammes des sondes M6 étant en très grande majorité pointés, cela permet d'assurer que les temps d'arrivée des ondes P soient identifiés sur au moins trois autres sondes) ;
- les *temps d'arrivée des ondes P et les angles de polarisation* définis manuellement. En outre, l'utilisation des azimuts et pendages des rais incidents estimés sur les sondes 3D a permis de mieux contraindre la localisation des tirs de calage. Il s'agira donc de vérifier que c'est aussi le cas pour les événements microsismiques ;
- les *temps d'arrivée des ondes P et les angles de polarisation définis pour toutes les sondes à l'exception de la sonde M6.3*. Du fait de la perte de cette sonde (implantée à 120 m de profondeur, au centre du réseau), les localisations des événements après le second pic d'activité (à partir du 12/02/09 à 08:43:26) sont moins bien contraintes en profondeur. Afin d'évaluer la robustesse des calculs et de quantifier l'influence de cette sonde sur le calage en profondeur des événements, il a donc été entrepris de comparer des localisations effectuées avec ou sans elle ;
- les *pointés P et les azimuts* mesurés au niveau des sondes 3D. L'étude de la polarisation des tirs de calage a montré que les azimuts des rais incidents sont déterminés de manière très précise (cf. paragraphes précédents). Aussi, à l'inverse des pendages, ces valeurs sont indépendantes du modèle de vitesse (tabulaire). Il apparaissait intéressant de localiser les événements en se servant uniquement des temps d'arrivée des ondes P et des azimuts ;
- les *angles de polarisation*. Les angles mesurés sont théoriquement moins influencés par les petites variations de vitesse dans le milieu et devraient être plus stables que les temps d'arrivée des ondes de volume. Notons toutefois que des "anomalies" au niveau de la polarisation ont été distinguées pour certains événements (i.e. observés avec un azimut à $\pm 180^\circ$ de l'orientation théorique). Ces dernières, déjà constatées pour les tirs de calage, peuvent entraîner des erreurs dans la détermination de la position des foyers. Aussi, les événements où les angles ont été pointés sur au moins deux sondes 3D (soit deux azimuts et deux pendages définis) ont été localisés.
- les *temps d'arrivée des ondes P et S*. L'utilisation simultanée des ondes P et S pourrait permettre de lever l'ambiguïté sur le temps d'origine des microséismes. Néanmoins, la définition précise d'un modèle de vitesse pour les ondes S (par exemple, à l'aide du module SYTMISvel) est complexe ; étant donné les écarts observés en faisant varier le nombre de paramètres d'entrée (cf. paragraphes suivants), l'utilisation des positions des foyers déterminées avec les autres localisations, introduirait de possibles erreurs.

Il a donc été entrepris d'effectuer des tests en faisant varier la valeur des vitesses des ondes S de

$\pm 20\%$ autour de la valeur théorique de $V_P/\sqrt{3}$ pour caler le modèle. Les résultats de localisation obtenus en utilisant les temps d'arrivée des ondes P et S devaient notamment permettre de valider ou non ceux estimés avec les angles de polarisation.

Notons cependant que, pour des raisons de commodité, dans ces tests, les vitesses ont été modifiées de façon homogène entre les différentes couches ; la réalité étant sûrement plus complexe.

N.B. : les résultats obtenus en utilisant les pointés P et S ainsi que les angles de polarisation, en utilisant un modèle de vitesse des ondes S : $V_S = V_P/\sqrt{3}$, sont disponibles en Annexe C.3.4.

5.4.2 Résultats

5.4.2.1 Écarts entre les diverses localisations

Le Tableau 5.14 présente les écarts en distance des différentes localisations avec les positions des foyers déterminées à partir des temps d'arrivée des ondes P pointés manuellement.

On observe que :

- les écarts de pointés manuels et automatiques entraînent des variations de localisation de l'ordre d'une cinquantaine de mètres en moyenne, pouvant atteindre jusqu'à plus de 300 m. Ils sont légèrement plus importants verticalement que latéralement (une trentaine de mètres contre une vingtaine) ;
- en tenant compte des angles de polarisation, ces derniers sont un peu plus faibles, étant d'environ 26 m dans le plan vertical, pour une distance inter-foyers moyenne de l'ordre de 42 m ;
- sans la sonde M6.3, les écarts de localisation sont d'environ 20 m en moyenne, et sont, comme attendu, plus importants dans la direction verticale que dans le plan horizontal (ici, environ deux fois plus) ;
- avec les azimuts, les écarts sont similaires pour les trois directions de l'espace, de l'ordre de 18 m en moyenne (bien que la médiane soit plus faible dans le plan vertical), pour une distance moyenne totale d'environ 35 m ;
- les différences les plus importantes sont observées lorsque seuls les angles de polarisation sont pris en compte, étant en moyenne d'une centaine de mètres et pouvant s'élever jusqu'à 464 m ;
- en considérant les temps d'arrivée des ondes S, les écarts semblent plus faibles si la vitesse des ondes S est prise égale à $V_P/\sqrt{3}$, ces derniers étant de l'ordre de la quarantaine de mètres en moyenne. En outre, ils sont environ deux fois plus importants dans le plan vertical.

Le Tableau 5.15 présente les écarts en distance des différentes localisations avec comme référence les positions des foyers déterminées avec les pointés P et les angles de polarisation. Il s'ensuit que :

- sans la sonde M6.3, les distances entre les localisations des foyers sont d'environ 30 m, les variations étant principalement observées dans le plan vertical ;
- sans les pendages, les localisations diffèrent d'environ 25 m en moyenne et ce, essentiellement en Z. De fait, les écarts médians sont nuls dans le plan horizontal (les positions déterminées avec les pointés P et les azimuts sont plus proches de celles estimées en utilisant aussi les pendages que de celles calculées sans les angles de polarisation) ;
- si l'on compare les positions calculées avec celles obtenues en se servant uniquement des angles de polarisation, les différences relevées dans les trois directions de l'espace sont à peu près similaires (> 30 m) et les distances inter-foyers sont assez importantes, d'environ 68 m en moyenne ;
- lorsque les pointés des ondes S sont pris en compte, les écarts les plus faibles (environ 55 m) sont obtenus avec des vitesses d'onde S égales à $V_P/\sqrt{3}$ ou $80\% V_P/\sqrt{3}$.

Remarque : les écarts entre les localisations ne varient pas de manière homogène au cours du temps ; les maxima semblant augmenter au fur et à mesure de l'effondrement (Annexe C.3).

TABLE 5.14 – Comparaisons avec les positions des foyers déterminées en utilisant les temps d'arrivée des ondes P pointés manuellement.

Écarts avec P manuel (m)		X	Y	Z	Distances
P automatique / 1647 événements	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	21.24	19.23	31.24	48.95
	Maximum	253.13	281.25	199.06	312.44
	Écart-type	27.2	24.88	35.48	44.93
	Médiane	14.06	12.5	17.5	33.86
P + angle de polarisation / 1604 événements	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	18.94	15.79	26.19	41.66
	Maximum	214.45	125	142.19	225.93
	Écart-type	18.59	16.17	26.07	29.06
	Médiane	14.06	12.5	17.5	35.4
P sans M6.3 / 715 événements	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	7.12	5.33	14.73	19.51
	Maximum	91.41	71.88	153.13	166.16
	Écart-type	9.74	6.99	20.41	21.81
	Médiane	7.03	3.13	6.56	12.65
P + azimut / 1251 événements	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	18.8	16.32	18.29	35.48
	Maximum	210.94	131.25	166.25	224.95
	Écart-type	17.65	15.71	23.29	28.22
	Médiane	14.06	12.5	9.84	28.56
uniquement angle / 1233 événements	Minimum	0	0	0	2.19
	Moyen	55.66	41.44	48.46	96.21
	Maximum	372.66	325	168.44	464.27
	Écart-type	56.97	44.55	34.66	65.87
	Médiane	35.16	25	43.75	80.6
P + S ($V_S = V_P/\sqrt{3}$) / 499 événements	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	12.14	13.55	31.98	40.57
	Maximum	105.47	215.63	196.88	276.74
	Écart-type	14.86	17.08	32.22	35.47
	Médiane	7.03	9.38	21.88	32.11
P + S ($V_S = 80\% V_P/\sqrt{3}$) / 671 événements	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	15.02	16	49.17	58.47
	Maximum	98.44	215.63	175	276.74
	Écart-type	16.48	15.56	38.85	38.77
	Médiane	10.55	12.5	43.75	52.61
P + S ($V_S = 120\% V_P/\sqrt{3}$) / 281 événements	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	15.51	19.08	33.01	45.25
	Max	119.53	215.63	185.94	276.74
	Écart-type	16.61	21.42	33.57	38.83
	Médiane	10.55	12.5	21.88	35.43

TABLE 5.15 – Comparaisons avec les positions des foyers déterminées en utilisant les temps d'arrivée des ondes P et les angles de polarisation pointés manuellement.

Écarts avec P + angles (m)		X	Y	Z	Distances
P + angles sans M6.3 / 694 événements	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	5.48	4.68	25.71	29
	Maximum	119.53	93.75	192.5	192.91
	Écart-type	8.79	6.82	27.41	27.34
	Médiane	3.52	3.13	15.86	20.91
P + azimut / 1339 événements	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	2.41	1.92	24.01	24.95
	Maximum	77.34	68.75	135.63	135.81
	Écart-type	5.28	4.62	25.83	26.08
	Médiane	0	0	14.22	15.31
uniquement angle / 1351 événements	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	39.14	31.33	30.72	67.83
	Maximum	365.63	306.25	204.53	450.64
	Écart-type	55.57	46.01	28.88	69.96
	Médiane	17.58	12.5	22.97	44.88
P + S ($V_S = V_P/\sqrt{3}$) / 532 événements	Minimum	0	0	0	4.83
	Moyen	23.33	22.43	35.73	54.44
	Maximum	140.63	190.63	170.63	246.39
	Écart-type	19.7	20.39	31.48	33.97
	Médiane	21.09	18.75	26.25	46.14
P + S ($V_S = 80\% V_P/\sqrt{3}$) / 718 événements	Minimum	0	0	0	2.19
	Moyen	23	19.57	39.95	55.48
	Maximum	112.5	190.63	164.06	246.39
	Écart-type	19.2	16.89	29.6	30.97
	Médiane	21.09	12.5	35	50.05
P + S ($V_S = 120\% V_P/\sqrt{3}$) / 283 événements	Minimum	0	0	0	7.36
	Moyen	23.14	27.77	46.08	65.32
	Maximum	147.66	190.63	144.38	246.39
	Écart-type	21.78	23.75	34.02	36.83
	Médiane	17.58	25	37.19	57.5

La Figure 5.15 illustre les variations sur les positions estimées en faisant varier les paramètres d'entrée, pour un même événement microsismique.

⇒ Les écarts de positions calculés entre les diverses localisations, sont assez importants, de l'ordre la trentaine à la quarantaine de mètres. En particulier, les valeurs atteintes dans la direction verticale sont en moyenne supérieures à l'épaisseur du banc raide et ne permettent donc pas de déterminer exactement si des ruptures sont initiées à l'intérieur ou non.

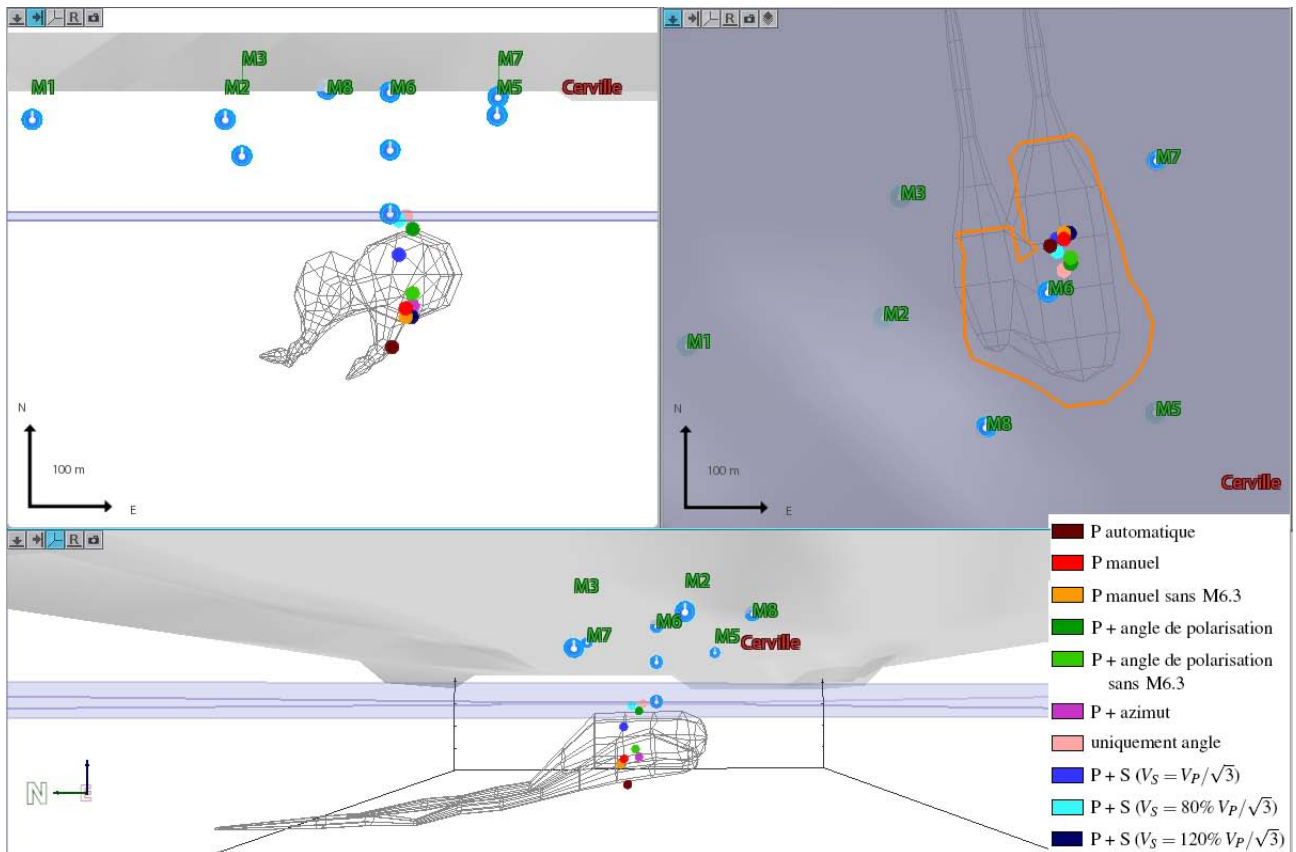


FIGURE 5.15 – Exemple de variations entre les positions des foyers calculées en fonction des données d'entrée prises en compte. La position de la cavité telle qu'elle était définie en 2004 est indiquée.

5.4.2.2 Qualité des localisations

Afin de les départager, la qualité des localisations a été jugée, les critères utilisés étant les suivants :

1. le nombre d'événements dit "mal contraints", qui ont été placés en bordure de l'espace de recherche (donc mal localisés, étant donné les larges dimensions de ce dernier) ;
2. les résidus sur les temps d'arrivée des ondes de volume et/ou sur les angles de polarisation. D'après l'analyse des tirs de calage, ces paramètres ne sont pas forcément pertinents pour discriminer les localisations. Néanmoins, ils peuvent permettre de détecter d'éventuelles anomalies ou encore les événements pour lesquels la localisation est peu précise ;
3. les ellipsoïdes d'erreur (à 68%), peuvent compléter l'étude des résidus ;
4. les écarts entre les angles de polarisation mesurés et ceux recalculés à partir des positions déterminées sans ces données. De fait, les azimuts et pendages étant définis avec une bonne précision pour les tirs de calage, on peut estimer qu'il devrait en être de même pour les événements microsismiques.

N.B. : les résidus sont uniquement des indicateurs de la précision de la résolution numérique du problème inverse, i.e. plus ils sont petits, plus l'algorithme a réussi à minimiser les écarts entre les données mesurées et calculées. De fait, plus le nombre de données d'entrée considérées sera faible, plus il sera "facile" de réduire ces écarts. Les résidus estimés peuvent donc ne pas être représentatifs des erreurs "réelles" sur la position des microséismes.

Événements "mal contraints" :

Le Tableau 5.16 présente pour les divers tests, le nombre d'événements localisés, par rapport à ceux "mal contraints" et ceux comparés avec les résultats obtenus avec les pointés P manuels ou les pointés P et les angles de polarisation. On remarque que le nombre d'événements "mal contraints" est :

- différent d'une localisation à l'autre, les enregistrements associés n'étant pas forcément identiques ;
- plus important dans la direction verticale que dans celles horizontales, quels que soient les paramètres utilisés ;
- 1.5 fois plus élevé pour les fichiers pointés automatiquement que manuellement ;
- proportionnellement plus petit lorsque azimuts et pendages sont utilisés (3% contre 9% avec uniquement les pointés P manuels) ;
- quasiment aussi important dans les trois directions de l'espace, en utilisant uniquement les angles de polarisation (2 azimuts + 2 pendages) ;
- plus faible lorsque la vitesse des ondes S est prise égale à 80% $V_P/\sqrt{3}$. Ainsi, 1/3 et 2/3 des événements avec au moins une arrivée d'onde S pointée sont positionnés en bordure de l'espace de recherche lorsque respectivement $V_S = V_P/\sqrt{3}$ et $V_S = 120\% V_P/\sqrt{3}$.

TABLE 5.16 – Nombre d'événements localisés, mal contraints et comparés pour les divers tests.

Paramètres utilisés	# total d'événements	# d'événements mal contraints				Comparaison avec :	
		X	Y	Z	Total	P manuel	P + angle
P automatique	2006	43	57	209	267	1647	
P manuel	2006	18	35	140	174		1604
P + angles	1788	2	3	44	48	1604	
P sans M6.3	806	1	10	84	91	715	
P + angles sans M6.3	742	1	2	43	46		694
P + azimut	1678	8	10	117	130	1251	1339
uniquement angles	1466	37	25	50	93	1233	1351
P + S ($V_S = V_P/\sqrt{3}$)	762	36	29	197	215	499	532
P + S ($V_S = 80\% V_P/\sqrt{3}$)	762	6	1	17	21	671	718
P + S ($V_S = 120\% V_P/\sqrt{3}$)	762	102	108	435	475	281	283

→ L'utilisation des angles de polarisation, et en particulier des pendages, semble donc limiter le nombre d'événements bloqués en bordure de l'espace de recherche.

Résidus sur les données observationnelles :

Le Tableau C.46 montre les résidus de localisation sur les temps d'arrivée des ondes P sur les diverses sondes. On observe que ces derniers sont :

- similaires d'une localisation à l'autre ;
- en moyenne supérieurs lorsque les enregistrements sont pointés automatiquement, et ce, pour toutes les sondes. Ceci paraît cohérent, étant donné que ces mesures sont théoriquement moins bien définies que les pointés manuels. En outre, sur les divers tests, les résidus maximum les plus élevés sont quasiment tous atteints en localisant ces fichiers ;
- légèrement amplifiés pour toutes les sondes à l'exception des sondes M6.3 et M6.2, quand les angles de polarisation sont pris en compte ;
- en moyenne inférieurs pour les localisations sans la sonde M6.3. Cette diminution apparente pouvant provenir du fait que la direction verticale était principalement contrainte par cette sonde ;
- semblables pour les trois localisations avec les pointés S. En outre, pour chaque sonde, les résidus sur les temps d'arrivée des ondes P les plus faibles ne sont pas forcément obtenus avec le même

5.4. INFLUENCE DES DONNÉES D'ENTRÉE POUR LA LOCALISATION 2D

- modèle de vitesse des ondes S ;
- systématiquement élevés sur la M6.2 (de l'ordre de -0.01 s en moyenne), par rapport aux autres sondes (cf. paragraphes suivants) ; ceci n'ayant pas été relevé pour la localisation des tirs de calage.

TABLE 5.17 – Résidus de localisation sur les temps d'arrivée des ondes P.

Résidus (s) / Sonde		M1	M2	M3	M5	M6.3	M6.2	M6.1	M7	M8	Moyens
P auto-matique	Moyen	0.0060	0.0019	-0.0014	-0.0004	-0.0083	-0.0143	0.0061	0.0050	0.0058	
	Moy abs	0.0068	0.0050	0.0051	0.0056	0.0085	0.0143	0.0075	0.0059	0.0075	0.0075
	σ	0.0091	0.0074	0.0073	0.0090	0.0080	0.0072	0.0065	0.0068	0.0082	0.0040
	Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0003
	Max	0.0917	0.0534	-0.0573	0.1080	-0.0558	-0.0714	-0.0553	0.0455	-0.0698	0.0459
P manuel	Moyen	0.0041	0.0006	-0.0014	-0.0011	-0.0059	-0.0125	0.0062	0.0042	0.0052	
	Moy abs	0.0055	0.0034	0.0040	0.0042	0.0064	0.0126	0.0066	0.0050	0.0063	0.0061
	σ	0.0068	0.0050	0.0053	0.0054	0.0068	0.0052	0.0041	0.0055	0.0058	0.0024
	Min	0	0	0	0	0	-0.0002	0	0	0	0.0003
	Max	0.0462	-0.0431	0.0435	0.0366	-0.0480	-0.0411	0.0272	0.0494	0.0480	0.0286
P + angle de polarisation	Moyen	0.0025	-0.0012	-0.0025	-0.0009	-0.0041	-0.0110	0.0067	0.0051	0.0046	
	Moy abs	0.0059	0.0049	0.0058	0.0052	0.0052	0.0111	0.0073	0.0073	0.0066	0.0068
	σ	0.0081	0.0065	0.0070	0.0069	0.0058	0.0055	0.0046	0.0083	0.0068	0.0023
	Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0020
	Max	0.0472	-0.0433	0.0392	0.0420	-0.0414	-0.0428	0.0277	0.0482	0.0362	0.0235
P sans M6.3	Moyen	0.0030	0.0004	-0.0018	-0.0017		-0.0111	0.0056	0.0031	0.0045	
	Moy abs	0.0043	0.0032	0.0037	0.0037		0.0111	0.0061	0.0038	0.0054	0.0053
	σ	0.0051	0.0048	0.0046	0.0043		0.0049	0.0039	0.0042	0.0052	0.0020
	Min	0	0	0	0		0	0	0	0	0.0003
	Max	0.0233	0.0257	0.0202	0.0185		-0.0359	-0.0214	0.0227	0.0429	0.0179
P + angles sans M6.3	Moyen	0.0038	-0.0006	-0.0022	-0.0013		-0.0101	0.0054	0.0031	0.0044	
	Moy abs	0.0059	0.0045	0.0052	0.0045		0.0103	0.0061	0.0055	0.0061	0.0061
	σ	0.0075	0.0063	0.0063	0.0058		0.0055	0.0043	0.0072	0.0061	0.0023
	Min	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		0	0	0	0	0.0013
	Max	0.0301	-0.0433	0.0381	0.0249		-0.0355	-0.0212	0.0502	0.0429	0.0216
P + azimut	Moyen	0.0026	-0.0008	-0.0028	-0.0008	-0.0052	-0.0114	0.0068	0.0052	0.0049	
	Moy abs	0.0056	0.0045	0.0053	0.0052	0.0058	0.0115	0.0072	0.0069	0.0067	0.0067
	σ	0.0075	0.0061	0.0062	0.0067	0.0068	0.0053	0.0043	0.0075	0.0067	0.0024
	Min	0	0	0	0	0	-0.0002	0	0	0	0.0007
	Max	0.0325	-0.0431	0.0435	0.0376	-0.0480	-0.0426	0.0272	0.0494	0.0480	0.0286
P + S ($V_S = V_P/\sqrt{3}$)	Moyen	0.0045	0.0006	-0.0013	-0.0019	-0.0060	-0.0126	0.0062	0.0044	0.0050	
	Moy abs	0.0059	0.0035	0.0042	0.0050	0.0065	0.0127	0.0067	0.0052	0.0062	0.0063
	σ	0.0073	0.0053	0.0059	0.0064	0.0070	0.0054	0.0045	0.0059	0.0060	0.0025
	Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0003
	Max	0.0462	-0.0431	0.0732	0.0341	-0.0480	-0.0411	0.0453	0.0670	0.0480	0.0352
P + S ($V_S = 80\% \cdot V_P/\sqrt{3}$)	Moyen	0.0043	0.0011	-0.0009	-0.0021	-0.0050	-0.0116	0.0073	0.0042	0.0052	
	Moy abs	0.0058	0.0038	0.0044	0.0052	0.0059	0.0117	0.0077	0.0053	0.0064	0.0064
	σ	0.0073	0.0054	0.0062	0.0064	0.0070	0.0060	0.0050	0.0063	0.0061	0.0025
	Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0003
	Max	0.0462	-0.0431	0.0735	0.0341	-0.0480	-0.0411	0.0457	0.0673	0.0480	0.0354
P + S ($V_S = 120\% \cdot V_P/\sqrt{3}$)	Moyen	0.0041	0.0004	-0.0016	-0.0013	-0.0069	-0.0132	0.0059	0.0041	0.0053	
	Moy abs	0.0058	0.0037	0.0047	0.0048	0.0072	0.0133	0.0065	0.0049	0.0065	0.0064
	σ	0.0074	0.0056	0.0065	0.0064	0.0073	0.0054	0.0045	0.0057	0.0060	0.0026
	Min	0	0	0	0	0	-0.0002	0	0	0	0.0002
	Max	0.0462	-0.0431	0.0729	0.0341	-0.0480	-0.0411	0.0451	0.0668	0.0480	0.0350

→ Mis à part les résidus sur les temps d'arrivée mesurés au niveau de la sonde M6.2, aucune anoma-

lie n'a été détectée.

Le Tableau 5.18 présente les résidus sur les angles de polarisation (azimuts et pendages) pour les diverses localisations où ces données d'entrée ont été utilisées. On constate qu'ils sont :

- similaires d'une localisation à l'autre ;
- inférieurs à 10° en moyenne pour les azimuts et à 14° pour les pendages ;
- comme attendu, plus petits lorsque seuls les angles sont pris en compte pour la localisation ;
- légèrement plus élevés sur les pendages de la M5 (la moins profonde des sondes 3D) que pour les autres sondes ;
- en général négatifs pour les pendages de sonde M6.2, i.e. les valeurs mesurées sont plus élevées que celles calculées et positifs pour les autres. En d'autres termes, les rais se verticalisent sur la M6.2 et s'horizontalisent sur les autres sondes plus que prévu.

→ Si on fait confiance aux mesures, ceci pourrait indiquer des vitesses légèrement plus faibles autour de la M6.2 et/ou plus élevées au niveau des autres sondes que celles déterminées ?

TABLE 5.18 – Résidus de localisation sur les angles de polarisation.

Résidus (s) / Sonde		Azimuts					Pendages				
		M3	M5	M6.3	M6.2	Moyens	M3	M5	M6.3	M6.2	Moyens
P + angle de polarisation	Moyen	4.01	-1.98	-0.49	1.14		5.96	10	5.7	-5.66	
	Moy abs	8.99	6.29	5.71	8.64	7.89	8.49	13.94	10.97	9.58	10.69
	Écart-type	11.07	8.17	8.51	12.03	5.86	9.32	13.76	11.63	11.96	6.91
	Minimum	-0.01	0	0.01	-0.02	0.04	0	0	-0.09	0	0.04
	Maximum	59.88	-43.19	-49.76	55.77	43.19	50.34	-54.19	-55.38	-67.22	65.08
P + angles sans M6.3	Moyen	3.08	-1.81		0.28		4.38	9.60		-5.33	
	Moy abs	7.65	5.39		6.16	6.36	6.68	13.10		9.31	9.85
	Écart-type	10.01	7.14		8.67	4.96	8.22	13.43		13.16	8.42
	Minimum	-0.01	-0.01		0.01	0.04	-0.01	0.26		0.03	0.14
	Maximum	51.74	-30.94		-43.15	43.15	50.35	-47.54		-70.07	69.53
P + azimut	Moyen	4.52	-1.53	-1.02	1.67						
	Moy abs	9.06	6.13	5.49	8.41	7.89					
	Écart-type	10.92	7.95	8.29	11.74	5.39					
	Minimum	-0.01	0	-0.05	-0.01	0.19					
	Maximum	63.34	-39.18	49.52	58.62	36.62					
uniquement angle	Moyen	1.69	0.08	-0.36	-0.18		5.61	9.43	3.93	-4.32	
	Moy abs	4.24	4.25	5.42	3.29	3.77	8.17	12.31	6.52	6.92	8.49
	Écart-type	6.17	6.34	8.31	5.42	3.49	9.18	12.31	6.48	8.54	4.43
	Minimum	0	0	-0.01	-0.01	0.05	-0.02	0.01	0.12	0	0.12
	Maximum	45.31	42.03	-46.24	42.49	37.01	50.33	46.49	-36.84	54.29	37.94

→ Aucune anomalie sur les résidus des angles de polarisation n'a été décelée, les valeurs estimées étant en moyenne assez faibles.

Le Tableau 5.19 montre les résidus sur les temps d'arrivée des ondes S pour les trois tests de localisation où elles ont été exploitées. Il en ressort que :

- les valeurs atteintes peuvent être assez élevées, étant par exemple d'environ 0.02 s en moyenne pour la sonde M5, pour $V_S = 120\% V_P / \sqrt{3}$;
- les résidus estimés sont beaucoup plus dispersés ; les écarts-types moyens par événement étant particulièrement importants (de l'ordre de 0.01 s en moyenne soit environ 4 fois plus élevés que pour les pointés P) ;
- les vitesses des ondes S minimisant au mieux les écarts avec les temps pointés diffèrent d'une sonde à l'autre. Néanmoins, les résidus par événement augmentent considérablement lorsque qu'elles sont prises égales à $120\% V_P / \sqrt{3}$.

TABLE 5.19 – Résidus de localisation sur les temps d'arrivée des ondes S.

Résidus (s) / Sonde		M3	M5	M6.3	M6.2	Moyens
P + S ($V_S = V_P/\sqrt{3}$)	Moyen	0.0009	0.0095	0.0008	-0.0055	
	Moy abs	0.0043	0.0105	0.0051	0.0062	0.0054
	Écart-type	0.0153	0.0088	0.0063	0.0054	0.0122
	Minimum	0	0	0.0001	0	0.0000
	Maximum	-0.2665	0.0382	0.0153	-0.0225	0.2665
P + S ($V_S = 80\% V_P/\sqrt{3}$)	Moyen	-0.0061	-0.0012	0.0024	-0.0065	
	Moy abs	0.0066	0.0046	0.0051	0.0071	0.0058
	Écart-type	0.0141	0.0068	0.006	0.0047	0.0107
	Minimum	0	0	0.0003	0	0.0000
	Maximum	-0.2691	-0.046	0.0159	-0.0202	0.2691
P + S ($V_S = 120\% V_P/\sqrt{3}$)	Moyen	0.0074	0.0216	-0.0011	-0.0016	
	Moy abs	0.0107	0.0222	0.0044	0.0038	0.0095
	Écart-type	0.0221	0.0109	0.0057	0.0054	0.0167
	Minimum	0.0005	-0.0006	0.0001	0	0.0000
	Maximum	-0.2647	0.0541	-0.0149	0.0235	0.2647

→ Les valeurs observées indiquent que les vitesses des ondes de cisaillement dans le milieu oscilleraient plutôt entre des valeurs plus faibles ou égales à la valeur théorique de $V_P/\sqrt{3}$.

Ellipsoïdes d'erreur et dispersion des foyers :

Le Tableau 5.20 présente les variations du volume des ellipsoïdes d'erreur (à 68%) entre les diverses localisations, l'orientation de leur axe principal en termes de pendage, ainsi que la dispersion des foyers par rapport au centre du réseau (pris au niveau de la sonde M6.3). On remarque que :

- les erreurs sur les pointés automatiques conduisent à une augmentation de l'incertitude sur la position des foyers, se traduisant par un volume d'ellipsoïde d'erreur environ 1.5 fois plus élevé en moyenne par rapport aux fichiers traités manuellement ;
- ce volume est plus de deux fois plus petit quand les angles de polarisation sont pris en compte ;
- il est du même ordre de grandeur pour des événements localisés avec ou sans la sonde M6.3 ;
- les foyers déterminés avec les pointés P et les azimuts présentent des volumes d'ellipsoïdes d'erreur en moyenne similaires à ceux obtenus en se servant aussi des pendages, ceci concordant avec les faibles écarts obtenus entre les deux localisations ;
- les incertitudes les plus élevées sont repérées lorsque seuls les angles de polarisation sont utilisés, étant plus de trois fois supérieures en moyenne par rapport aux localisations avec les temps d'arrivée des ondes P pointés manuellement ;
- si les pointés S sont considérés, le volume des ellipsoïdes est en moyenne plus faible avec une vitesse des ondes S égale à $80\% V_P/\sqrt{3}$ et augmente avec cette dernière ;
- le pendage de l'axe principal de l'ellipsoïde est en moyenne supérieur à 40° . En particulier, ils sont de l'ordre de 70° lorsque les angles de polarisation sont pris en compte. Ceci confirme bien que l'incertitude sur les localisations se situe principalement sur la profondeur des événements ;
- la dispersion des foyers par rapport au centre du réseau (pris sous les sondes de la colonne M6) sont plus faibles en considérant les azimuts et pendages.

→ Les ellipsoïdes d'erreur sur le calcul des positions des foyers sont cohérents avec les résidus sur les données d'entrée. Ils sont plutôt dirigés dans la direction verticale, là où le réseau est moins bien contraint.

5.4. INFLUENCE DES DONNÉES D'ENTRÉE POUR LA LOCALISATION 2D

TABLE 5.20 – Volume et orientation des ellipsoïdes d'erreur et dispersion des foyers par rapport au centre du réseau.

Ellipsoïde d'erreur :		Axes (m)			Pendage absolu axe A (°)	Volume (m ³)	Dispersion (m)
		A	B	C			
P automatique	Minimum	24.74	22.15	12.02	0.01	2.76E+04	5.02
	Moyen	118.22	71	55.2	43.77	2.56E+06	111.86
	Maximum	405.71	172.48	131.35	89.71	2.54E+07	326.27
	Écart-type	53.12	22.46	15.37	30.05	2.87E+06	53.47
	Médiane	97.05	65.48	51.59	52.84	1.32E+06	109.68
P manuel	Minimum	31.29	25.23	15.87	0	6.24E+04	5.02
	Moyen	102.71	61.89	48.63	55.84	1.66E+06	108.22
	Maximum	390.35	163.29	127.23	89.54	1.87E+07	353.05
	Écart-type	41.73	19.13	11.52	27	1.98E+06	49.73
	Médiane	87.35	54.67	45.91	67.26	9.20E+05	108.32
P + angles de polarisation	Minimum	15.65	10.84	5.49	0.18	3.90E+03	7.52
	Moyen	80.78	44.73	33.05	66.58	6.79E+05	96.68
	Maximum	343.27	133.86	96.14	89.77	1.26E+07	302.1
	Écart-type	36.88	14.82	9.03	24.7	1.05E+06	41.42
	Médiane	72.33	40.68	31.21	76.73	3.75E+05	94.6
P sans M6.3	Minimum	28.41	25.08	10.86	0.01	3.24E+04	11.1
	Moyen	106.45	65.28	49.61	55.43	1.89E+06	116.44
	Maximum	405.63	162.4	103.91	88.84	2.18E+07	299.65
	Écart-type	48.11	20.4	11.8	27.97	2.42E+06	42.96
	Médiane	88.85	57.61	48.06	67.26	1.02E+06	115.42
P + angles sans M6.3	Minimum	14.76	10.2	5.43	0.04	3.43E+03	18.71
	Moyen	80.79	45.08	32.4	69.83	6.25E+05	110.27
	Maximum	302.79	120.16	79.36	89.68	9.98E+06	327.62
	Écart-type	31.27	14.22	8.01	24.1	8.62E+05	38.66
	Médiane	73.67	41.24	31.08	80.08	3.81E+05	110.06
P + azimut	Minimum	19.48	13.15	8.51	0.2	9.13E+03	17.44
	Moyen	86.08	44.55	31.14	73.79	6.37E+05	103.39
	Maximum	438.56	131.38	76.16	89.84	1.05E+07	322.58
	Écart-type	33.71	15.71	7.25	20.92	9.99E+05	42.05
	Médiane	79.3	40.71	30.08	81.94	3.99E+05	104.81
uniquement angle	Minimum	44.88	31.11	21.2	0	1.72E+05	17.78
	Moyen	240.97	70.52	48.36	36.37	5.41E+06	93.88
	Maximum	797.93	155.25	117.21	89.86	4.54E+07	330.19
	Écart-type	212.7	22.2	18.3	38.17	7.00E+06	54.93
	Médiane	109	77.24	42.22	7.82	1.47E+06	80.33
P + S ($V_S = V_P/\sqrt{3}$)	Minimum	31.15	28.02	18.9	0.44	9.03E+04	6.4
	Moyen	76.58	51.03	38.58	59.86	7.38E+05	110.15
	Maximum	356.64	139.66	80.88	89.41	1.46E+07	336.03
	Écart-type	27.12	12.27	7	24.23	8.90E+05	52.83
	Médiane	71.06	47.3	37.12	69.32	5.26E+05	103.38
P + S ($V_S = 80\% V_P/\sqrt{3}$)	Minimum	29.31	22.57	12.92	0.08	5.78E+04	4.47
	Moyen	62.94	45.26	32.91	39.46	4.81E+05	91.29
	Maximum	221.05	109.05	65.02	88.93	4.16E+06	265.97
	Écart-type	24.89	13.11	6.24	25.93	5.00E+05	45.53
	Médiane	56.95	42.06	32.41	40.66	3.21E+05	85.81
P + S ($V_S = 120\% V_P/\sqrt{3}$)	Minimum	31.55	29.04	19.11	0.01	1.02E+05	19.43
	Moyen	88.71	54.57	42.94	64.57	1.05E+06	106.15
	Maximum	467.38	153.23	103.32	89.26	2.52E+07	296.25
	Écart-type	38.97	13.92	8.43	21.19	1.78E+06	51.16
	Médiane	80.08	50.8	40.75	71.88	6.98E+05	102.12

N.B. : les volumes maximaux des ellipsoïdes d'erreur augmentent au cours du temps, en particulier, dans les dernières phases de l'effondrement (Annexe C.3).

5.4.3 Tests supplémentaires avec la sonde M6.2

5.4.3.1 Localisation sans la sonde M6.2

Comme indiqué dans les paragraphes précédents, les résidus sur les temps d'arrivée des ondes P mesurés au niveau de la sonde M6.2 sont en moyenne élevés (ceci n'ayant pas été observé en relocalisant les tirs de calage, situés en surface). Des tests supplémentaires ont donc été effectués, en localisant les événements sans la sonde M6.2 afin de tester son apport et déterminer notamment la qualité de la localisation (améliorée ou dégradée ?) si elle est prise en compte.

Le Tableau 5.21 présente les écarts de localisation avec ou sans la sonde M6.2, en utilisant soit uniquement les temps d'arrivée des ondes P, soit les pointés P et les angles de polarisation. On constate que :

- les variations sont de l'ordre de la quarantaine de mètres en moyenne (soit plus importants que lorsque la sonde M6.3 n'est pas prise en compte) ;
- les écarts verticaux sont deux fois plus importants que ceux horizontaux pour les foyers calculés avec les pointés P, tandis qu'ils s'équilibrent en utilisant les angles de polarisation.

TABLE 5.21 – Comparaisons avec les positions des foyers déterminées avec ou sans la sonde M6.2.

Écarts (m)		X	Y	Z	Distances
P manuel / sans P M6.2	Minimum	0	0	0	0
	Moyenne	17.72	14.75	35.27	47.19
	Maximum	147.66	150	177.19	250.39
	Écart-type	17.88	15.74	32.81	34.52
	Médiane	14.06	12.5	27.34	38.36
P + angles / sans P + angles M6.2	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	21.54	16.41	24.58	42.86
	Maximum	414.84	468.75	211.09	527.92
	Écart-type	33.35	29.5	29.05	48.24
	Médiane	14.06	6.25	15.31	29.31

→ Ces valeurs montrent la grande influence de la sonde M6.2 dans les résultats de localisation des microséismes.

Le Tableau 5.22 montre le nombre d'événements localisés sans la sonde M6.2, ceux "mal contraints" et ceux comparés avec les foyers déterminés avec les pointés P avec ou sans les angles de polarisation. On note que :

- plus de 30% des événements sont localisés en bordure de l'espace de recherche lorsque seuls les temps d'arrivée des ondes P sont considérés contre seulement 9% avec les angles de polarisation (en utilisant les pointés P avec ou sans les angles de polarisation de la sonde M6.2, respectivement 9% et 3% des événements sont "mal contraints") ;

TABLE 5.22 – Nombre d'événements localisés, mal contraints et comparés pour les tests sans la sonde M6.2.

Paramètres utilisés	# total d'événements	# d'événements mal contraints				Comparaison avec :	
		X	Y	Z	Total	P manuel	P + angle
sans P M6.2	2006	63	83	535	619	1377	
sans P + angle M6.2	1788	32	32	115	158		1663

- de la même manière que pour les tests précédents, ces derniers sont plus nombreux selon l'axe vertical.

→ La sonde M6.2 est donc importante pour contraindre la localisation des événements, en particulier lorsque les angles de polarisation ne sont pas considérés.

Les Tableaux 5.23 et 5.24 indiquent les résidus de localisation sans la sonde M6.2, sur les temps d'arrivée des ondes P et les angles de polarisation. Il s'ensuit que les résidus :

- sur les pointés P, par événement, diminuent en moyenne par rapport aux localisations précédentes. Néanmoins ceux sur la sonde M6.3 augmentent ;
- sur les angles de polarisation sont similaires à ceux des tests considérant la sonde M6.2. En particulier, les valeurs des résidus pour les pendages de la M5 restent élevées en comparaison avec les autres sondes.

TABLE 5.23 – *Résidus de localisation sans la M6.2 sur les temps d'arrivée des ondes P.*

Résidus (s) / Sonde		M1	M2	M3	M5	M6.3	M6.1	M7	M8	Moyens
sans P M6.2	Moyen	0.0044	-0.0004	-0.0017	-0.0021	-0.0095	0.0007	0.0027	0.0031	
	Moy abs	0.0052	0.0032	0.0037	0.0038	0.0096	0.0031	0.0035	0.0046	0.0040
	Écart-type	0.0059	0.0048	0.0052	0.0045	0.0071	0.0043	0.0042	0.0052	0.0027
	Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0001
	Maximum	0.041	-0.0442	0.0422	-0.0358	-0.0523	-0.0272	0.0374	0.0435	0.0310
sans P + angles M6.2	Moyen	0.0033	-0.0012	-0.0027	-0.0029	-0.0068	0.0032	0.0018	0.0032	
	Moy abs	0.0053	0.0038	0.0049	0.0048	0.0075	0.0047	0.005	0.0055	0.0050
	Écart-type	0.0072	0.0052	0.0059	0.0054	0.0075	0.0051	0.0067	0.0062	0.0026
	Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0002
	Maximum	0.041	-0.0443	0.0422	-0.0358	-0.0523	-0.0272	0.0374	0.0435	0.0310

TABLE 5.24 – *Résidus de localisation sans la sonde M6.2 sur les angles de polarisation.*

Résidus (s) / Sonde	Azimuts				Pendages			
	M3	M5	M6.3	Moyens	M3	M5	M6.3	Moyens
Moyen	1.48	0.12	-0.07		5.17	8.24	5.42	
Moy abs	8.08	5.74	4.13	6.79	8.79	13.18	9.93	10.74
Écart-type	10.51	7.62	5.5	5.29	9.97	13.6	10.65	6.48
Minimum	0	-0.02	0.01	0.01	-0.01	-0.09	-0.32	0.01
Maximum	60.75	-45.63	22.99	45.63	47.47	-54	48.71	54

→ Sans la M6.2, l'algorithme d'inversion permet donc toujours d'avoir des résidus sur les données d'entrée assez faibles.

Le Tableau 5.25 présente les variations du volume des ellipsoïdes d'erreur pour des événements localisés sans la sonde M6.2, le pendage de leur axe principal et la dispersion des foyers par rapport au centre du réseau. On constate que:

- les volumes des ellipsoïdes d'erreur sont légèrement supérieurs à ceux des événements localisés avec la sonde M6.2 ;
- les pendages de leur axe principal sont de 50° et 70° en moyenne, similaires à ceux déterminés précédemment ;
- les foyers sont un peu plus dispersés dans le recouvrement.

→ Les ellipsoïdes d'erreur varient peu (volume et orientation), entre les localisations prenant en compte ou non la sonde M6.2. Ceci est cohérent avec les valeurs de résidus sur les données d'entrée observés.

TABLE 5.25 – Volume des ellipsoïdes d'erreur de localisation sans la sonde M6.2 et dispersion des foyers par rapport au centre du réseau.

Ellipsoïde d'erreur :		Axes (m)			Pendage absolu axe A (°)	Volume (m ³)	Dispersion (m)
		A	B	C			
P manuel sans M6.2	Minimum	34.92	29.67	16.22	0.02	1.02E+05	4.87
	Moyen	116.69	70.49	52.98	50.02	2.39E+06	132.7
	Maximum	407.3	191.35	130.67	89.83	2.50E+07	390.88
	Écart-type	50.72	22.27	14.37	30.57	2.78E+06	50.21
	Médiane	92.65	62.78	49.24	63.33	1.16E+06	131
P + angles sans M6.2	Minimum	20.57	14.55	7.49	0.1	9.39E+03	7.39
	Moyen	86.14	48.78	37.01	69.71	8.37E+05	106.13
	Maximum	362.81	147.41	100.83	89.9	1.05E+07	317.91
	Écart-type	35.29	15.28	9.19	24.17	1.17E+06	41.1
	Médiane	77.66	44.89	35.63	79.55	5.20E+05	102.27

⇒ Bien que les erreurs sur la résolution du problème inverse (résidus et ellipsoïdes) ne diminuent pas forcément, le nombre d'événements localisés en bordure de l'espace de recherche indique clairement que ces derniers sont moins bien contraints lorsque les données mesurées au niveau de la sonde M6.2 (pointés P et angles de polarisation) ne sont pas pris en compte.

5.4.3.2 Modification du paramétrage au niveau de la sonde M6.2

Toujours dans le but d'améliorer la localisation, il a été entrepris de réaliser des tests : d'une part, en affectant un délai systématique sur les pointés P de la sonde M6.2 ; d'autre part, en modifiant légèrement le modèle de vitesse au voisinage de cette sonde (cette dernière étant implantée à proximité de l'interface avec la couche où on observe une inversion de vitesse). Les résultats, sur un échantillon de 100 événements localisés sont présentés en Annexe C.3.3. Ainsi, quelque soit les tests, il s'ensuit que :

- les écarts avec les foyers initiaux sont faibles (10 à 15 m en moyenne) ;
- les localisations sont dégradées ; certains événements n'étant plus bien contraints et les résidus pouvant augmenter sur certaines sondes.

⇒ Il semble donc inutile voire inapproprié d'imposer un délai ou de modifier le modèle de vitesse pour améliorer les résultats. La localisation avec les paramètres initiaux, malgré de forts résidus au niveau de la sonde M6.2, paraît la plus optimale.

5.4.4 Choix des données d'entrée utilisées pour la localisation 2D

5.4.4.1 Utilisation des pointés S ?

Les ondes de cisaillement n'ont pas été employées dans la suite. En effet :

- la méconnaissance de leur modèle de vitesse, ne permet pas d'améliorer les résultats lorsque ces dernières sont considérées ;
- les ondes S observées ne proviennent pas forcément du mécanisme à la source et peuvent correspondre à des ondes P, converties au niveau des diverses interfaces, entraînant des biais notables dans les localisations (Annexe C.3.4).

5.4.4.2 Utilisation des angles de polarisation ?

Les écarts observés entre les localisations faisant intervenir ou non les angles de polarisation sont assez importants, surtout dans la direction verticale.

En outre, l'étude des tirs de calage réalisés en surface a montré (cf. paragraphes précédents) que :

- ces angles pouvaient être définis de manière assez précise, les erreurs estimées sur les azimuts et pendages étant en moyenne inférieures à 10 et 15° respectivement. De plus, les résidus de localisation sur ces angles sont faibles, lorsqu'ils sont utilisés ;
- les écarts entre les positions réelles et calculées des tirs de calage diminuent largement lorsque les angles de polarisation sont considérés.

Or, la majorité des foyers microsismiques sont situés en profondeur. Aussi :

- on peut se demander si les positions déterminées en se servant uniquement des pointés P permettent tout de même de rendre compte des azimuts et/ou des pendages mesurés au niveau des sondes 3D ?
- bien que les angles mesurés sont supposés être plus "stables", i.e. moins sensibles aux hétérogénéités locales que les temps d'arrivée des ondes de volume, les pendages recalculés par inversion, eux, sont fortement influencés par le modèle de vitesse imposé. Or, ce dernier est censé varier progressivement au cours du temps, en même temps que la zone de surveillance. L'utilisation des pendages peut donc introduire d'importants biais dans les localisations (surtout en profondeur), si l'évolution du milieu n'est pas prise en compte.

De fait, afin de déterminer si l'utilisation de ces données était pertinente (l'étude des résidus sur les données d'entrée et des ellipsoïdes d'erreur n'ayant pas permis de discriminer les localisations), les angles de polarisation des rais arrivant au niveau des sondes 3D ont été estimés pour les foyers localisés soit uniquement à partir des pointés P, soit avec les pointés P et les azimuts. Pour ce faire, nous nous sommes servis des trajets de rais calculés, reliant les sondes aux sources microsismiques.

Les résultats obtenus (ne tenant pas compte des événements positionnés en bordure de l'espace de recherche), sont résumés dans le Tableau 5.26. On observe que :

- les écarts entre les azimuts calculés et mesurés sont de l'ordre de la trentaine de degré en moyenne, soit trois fois plus élevés que les erreurs estimées lors du calcul de polarisation ;
- les décalages entre les pendages varient selon les sondes : les valeurs moyennes observées pour les sondes M6.2 et M3 sont légèrement supérieures aux erreurs estimées tandis que celles constatées pour la M6.3 sont assez élevées, de l'ordre de 40°.
 - les rais calculés ne s'horizontalisent donc pas comme attendu au niveau de la sonde M6.3, i.e., l'influence de la plus profonde sonde du réseau sur la localisation est moins marquée lorsque les angles ne sont pas considérés. Ceci concorde avec l'augmentation des résidus sur les pointés P observés sur cette sonde (Tableau C.46).

N.B. : Les azimuts sont calculés ici à $\pm 180^\circ$.

TABLE 5.26 – *Écarts entre les angles mesurés et ceux calculés à partir des positions des foyers déterminées en utilisant uniquement les pointés P ou P + azimuts.*

Écarts absolus (°)		Azimuts				Pendages			
		M3	M5	M6.3	M6.2	M3	M5	M6.3	M6.2
Localisation avec P	Minimum	0.06	0.05	0.24	0.01	0.03	0.01	0	0.07
	Moyen	32.7	32.51	28.07	31.69	18.06	24.37	39.35	16.88
	Maximum	89.3	88.99	89.55	89.85	63.15	70.62	84.26	76.8
	Écart-type	23.15	20.37	25.84	25.84	12.37	14.03	23.79	14.34
	Médiane	29.43	29.87	16.54	24.19	15.82	23.59	40.2	12.81
Localisation avec P + Azimut	Minimum					0.1	0.02	0.01	0
	Moyen					16.5	26.45	40.85	16.97
	Maximum					67.88	69.58	87.69	79.53
	Écart-type					12.29	14.21	24.1	14.52
	Médiane					13.84	26.03	43.63	12.88

⇒ Au vu de ces résultats, il a donc été décidé de privilégier les localisations prenant en compte les deux angles de polarisation, azimuts et pendages, et d'essayer d'ajuster au possible le modèle de vitesse (cf. paragraphes suivants).

5.4.5 Synthèse sur l'influence des données d'entrée pour la localisation 2D

Les variations entre les nombres de données d'entrée prises en compte peuvent ici induire des écarts importants sur les positions calculées des microséismes. Ces derniers sont surtout constatés dans la direction verticale, selon laquelle la couverture du réseau de surveillance est plus faible.

L'étude des résidus sur les données d'entrée n'a révélé aucune anomalie, mises à part des valeurs assez élevées pour les pointés P de la sonde M6.2. Celle-ci ne peut cependant pas être écartée, se révélant nécessaire pour bien contraindre la localisation.

Aussi, bien que l'utilisation des angles de polarisation n'entraîne pas forcément une diminution des erreurs estimées sur les résultats de localisation, cette dernière est préconisée ; les positions obtenues en se servant uniquement des pointés P ne permettant pas de redéterminer ces paramètres avec précision.

5.5 Analyse de l'évolution spatio-temporelle des foyers microsismiques

Afin de comprendre la dynamique générale menant à l'effondrement de la cavité saline de Cerville-Buissoncourt, l'évolution spatio-temporelle des événements localisés, avec les pointés P ainsi que les angles de polarisation (azimuts et pendages), a été étudiée en :

- divisant l'espace en plusieurs tranches verticales et/ou horizontales ;
- regardant la distribution par rapport à l'axe radial de la cavité et au centre du réseau (Annexe C.4.1) ;
- examinant le rayon quadratique du nuage d'événements (Annexe C.4.2).

5.5.1 Crises de Mars-Avril 2008

La Figure 5.16 montre l'évolution temporelle des positions des foyers, dans les trois directions de l'espace, X (= Est, perpendiculaire à l'axe des pistes), Y (= Nord, suivant les pistes), Z (= verticale) et la Figure 5.17 présente tous les événements localisés avec le modèle de vitesse initial, en profil et en plan, entre Mars et Avril 2008.

On observe un nuage d'événements de forme cylindrique au niveau de la cavité. Ce dernier ne croît pas de manière uniforme. Son épaisseur latérale paraît plus importante au début de chaque petite crise puis rétrécit au fur et à mesure (→ forme d'un sablier allongé).

Les foyers sont principalement sous le banc de Dolomie de Beaumont, bien qu'une certaine concentration soit notée à son niveau.

De plus, les événements localisés sous la cavité, assez nombreux et majoritairement bien contraints, ne peuvent s'expliquer physiquement (les chutes de blocs pouvant au mieux déclencher des microséismes en fond de la cavité, non en-dessous). La visualisation des sismogrammes correspondant ne montrant aucune aberration au niveau des pointés et le réajustement de ces derniers ne permettant pas de les relocaliser au-dessus de la cavité, ceci pourrait indiquer que les vitesses sont surestimées dans le recouvrement (i.e. qu'il est d'ores et déjà dégradé) ce qui entraînerait un décalage des foyers estimés vers le bas.¹

⇒ Une certaine diffusion latérale des foyers, avec des cycles de charge/décharge est observée pendant les crises se 2008. La dégradation des Marnes à Anhydrites au toit de la cavité avaient un impact sur les couches sus-jacentes, subissant des déformations et ruptures.

Les foyers localisés, pendant les crises de Mars-Avril 2008, dans des tranches verticales de 50 m au centre de la cavité, suivant les directions X et Y sont tracés respectivement dans les Figures 5.18 et 5.19.

Outre les remarques effectuées précédemment, on constate une dissymétrie Est-Ouest, les hypocentres étant moins profonds à l'Est qu'à l'Ouest. Suivant la coupe Nord-Sud, les foyers semblent redessiner les bords de la cavité.

1. Les images réalisées ici, ont été obtenues avec un modèle de vitesse ne considérant pas la saumure dans la cavité, ce qui peut accentuer les décalages.

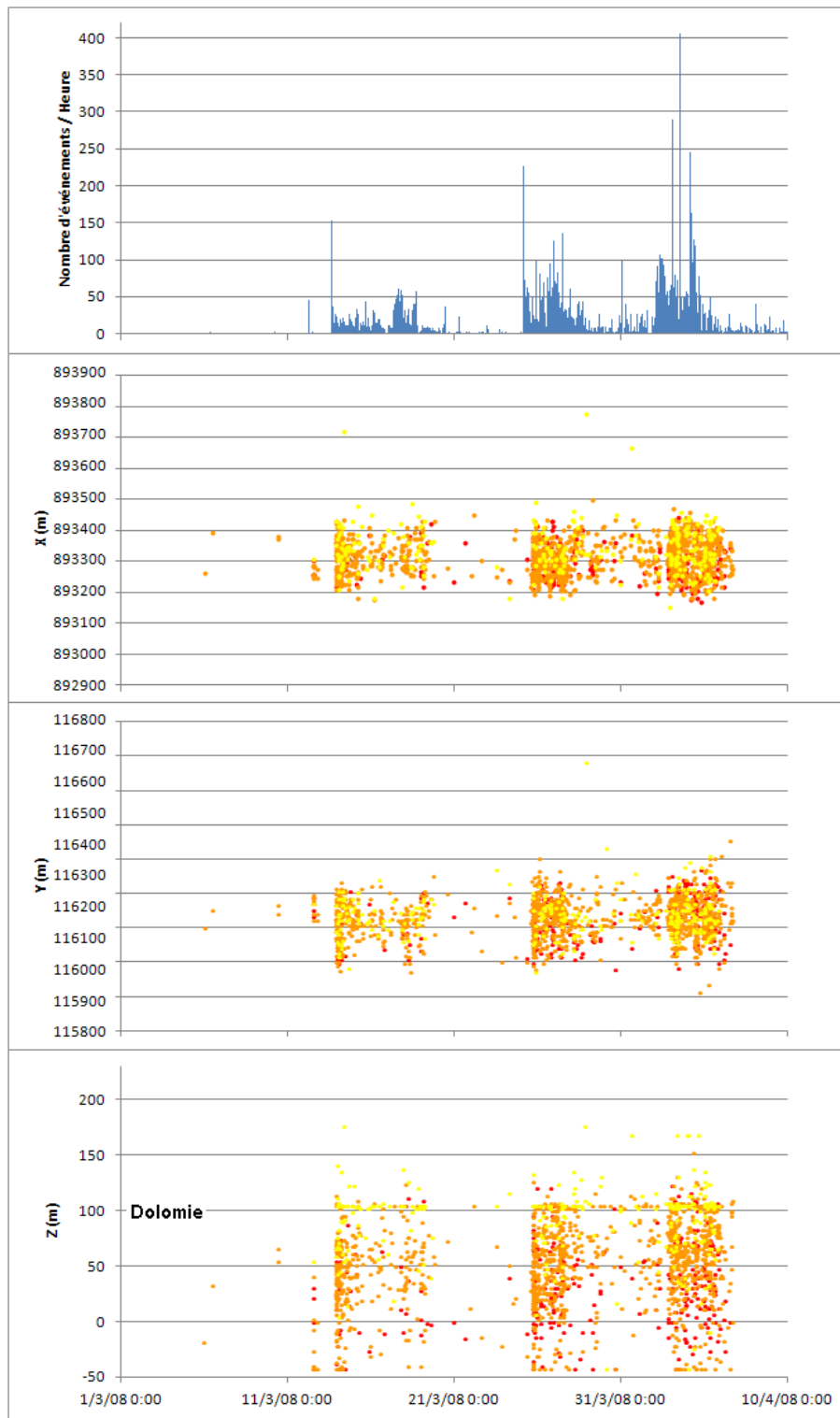


FIGURE 5.16 – Comparaison entre l'évolution du nombre d'événements détectés et les variations de position des foyers microsismiques suivant les directions X (Est), Y (Nord) et Z (verticale) entre Mars et Avril 2008. La confiance relative sur les localisations est indiquée : les événements avec les résidus les plus faibles sont figurés en rouge, tandis que les plus élevés sont représentés en jaune et les intermédiaires en orange.

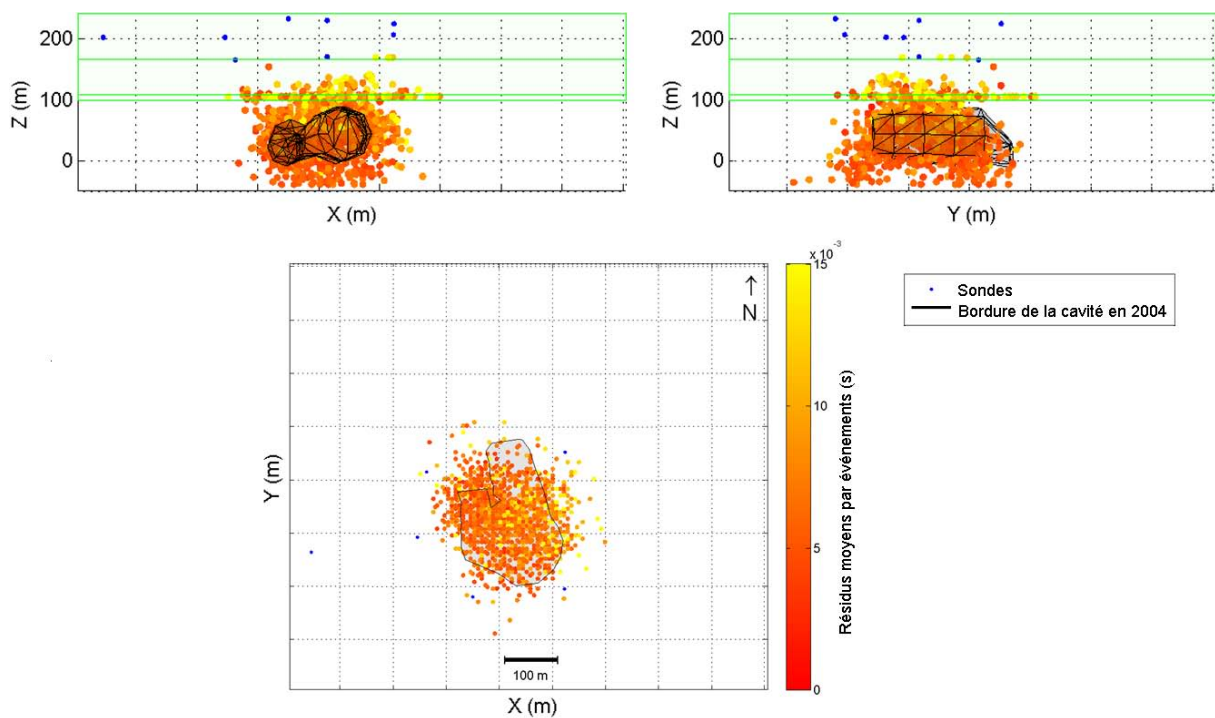


FIGURE 5.17 – Localisation des événements microsismiques entre Mars et Avril 2008, en profil (en haut) et en plan (en bas). La confiance relative sur la position des foyers est figurée selon un code couleur, fonction des résidus moyens par événement. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.

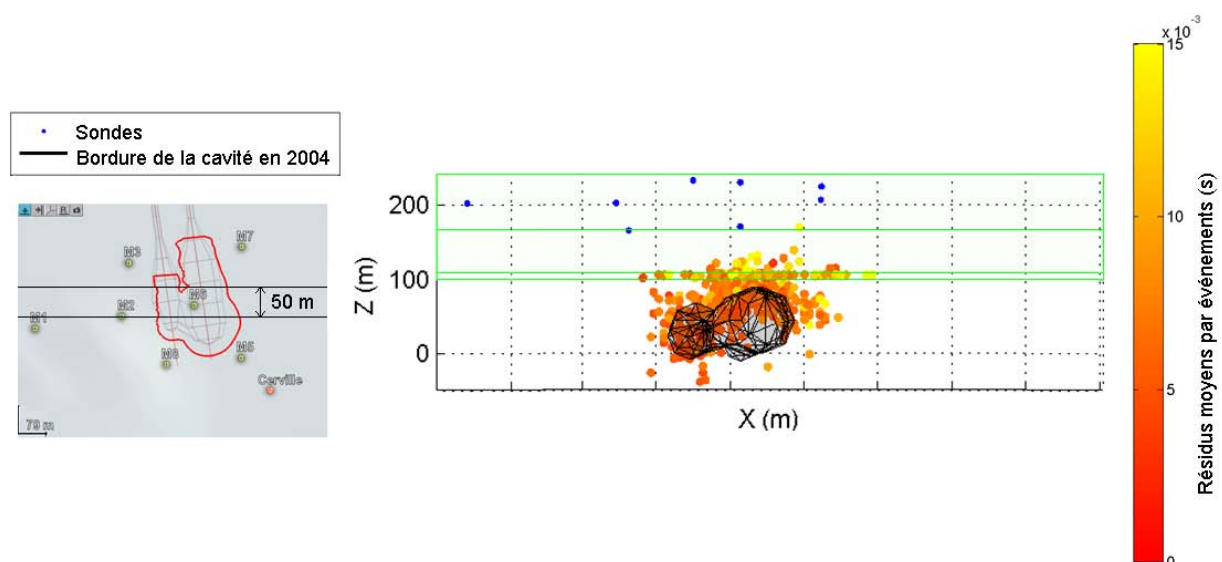


FIGURE 5.18 – Localisation des événements microsismiques, pendant les crises de Mars-Avril 2008, sur une tranche verticale de 50 m ~ perpendiculaire à l'axe des pistes, au niveau du centre de la cavité. La confiance relative sur la position des foyers est figurée. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.

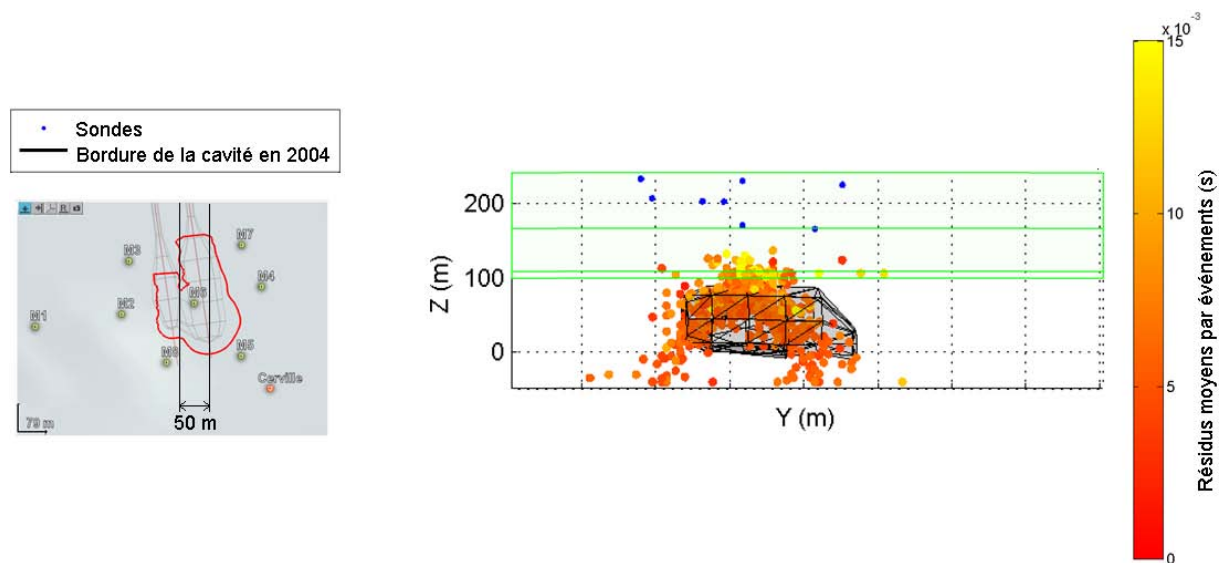


FIGURE 5.19 – Localisation des événements microsismiques, pendant les crises de Mars-Avril 2008, sur une tranche verticale de 50 m \sim parallèle à l'axe des pistes, au niveau du centre de la cavité. La confiance relative sur la position des foyers est figurée. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.

5.5.2 Période d'effondrement

Un modèle de vitesse évolutif a été appliqué afin d'essayer de prendre en compte la remontée progressive de la cavité. Pour ce faire, les principales phases observées au niveau de l'activité microsismique et des autres types mesures (cf. Chapitre 3), ainsi que le scénario d'effondrement global ([40] et Chapitre 6) ont été considérés. Le modèle initial a alors été modifié en imposant une couche de saumure, avec une vitesse des ondes P égale à 1600 m/s, tour à tour à (Figure 5.20) :

- ~ 155 m de profondeur sous les Marnes à anhydrites (côte NGF = 75 m), soit la profondeur moyenne théorique du toit de la cavité après les crises de 2008 ;
- ~ 132 m de profondeur, directement sous le banc de Dolomie de Beaumont (côte NGF = 98 m) ;
- ~ 123 m de profondeur, au-dessus du banc raide (côte NGF = 107 m).

Remarques :

- un modèle faisant disparaître la quasi totalité des Marnes irisées, jusqu'à ~ 1 m sous la sonde M3 (soit ~ 66 m de profondeur), a aussi été envisagé à partir du troisième pic d'activité (Annexe C.4.3). Néanmoins, ce dernier n'a pas été retenu, plus de 70% d'événements se retrouvant en bordure de l'espace de recherche ;
- les résultats obtenus avec le modèle de vitesse initial, ainsi que d'autres intermédiaires, comportant par exemple un recouvrement à vitesse homogène ou encore des vitesses plus importantes en fond de cavité, sont présentés en Annexe C.4.3 ;
- des figures d'évolution des diverses localisations par tranche horaire, en plan et en coupe, pour les diverses formations géologiques, sont disponibles en Annexe C.4.4 ;
- l'évolution des résidus moyens par événement est montrée en Annexes C.4.3. Ils sont similaires pour les modèles testés et augmentent tous en moyenne durant la dernière phase de l'effondrement ;
- l'utilisation des ondes de cisaillement peut entraîner des biais notables dans la localisation ; ces dernières ne pouvant être générées dans la saumure ou la traverser (leur vitesse y étant nulle, Annexe C.3.4).

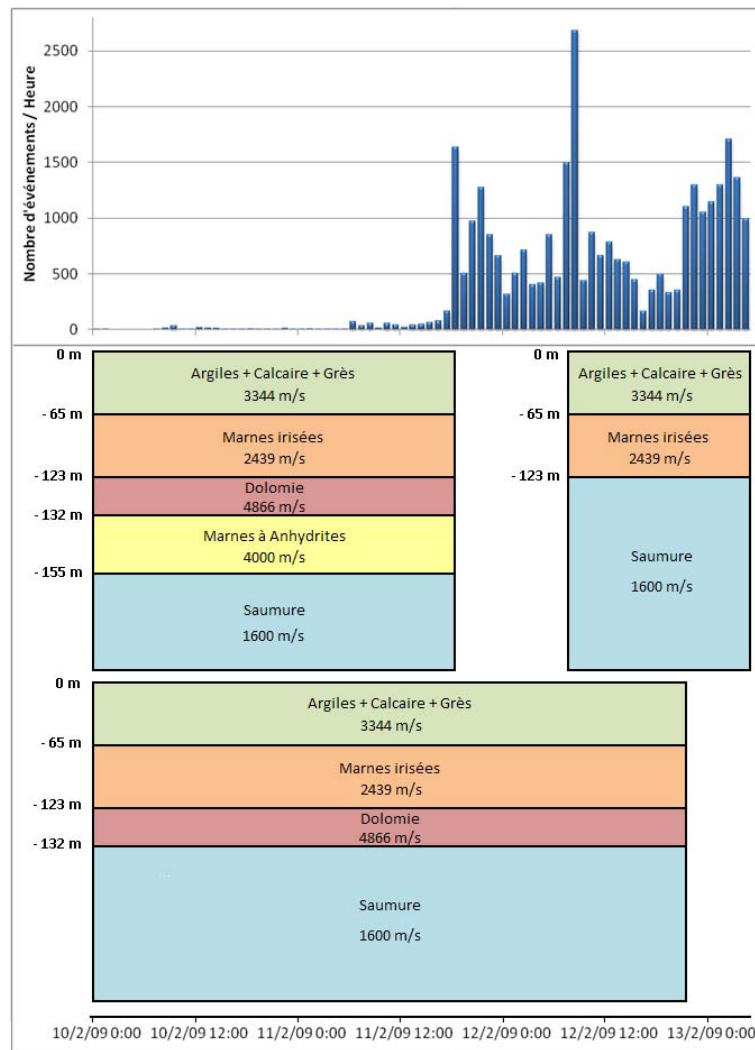


FIGURE 5.20 – Différents modèles de vitesse testés, selon l'activité microsismique enregistrée, pendant la période d'effondrement.

5.5.2.1 Avant le 1er pic d'activité

La Figure 5.21 montre l'évolution des positions des foyers, dans les trois directions de l'espace et les Figures 5.22 et 5.23 présentent tous les événements localisés en profil et en plan, entre les 10 et 11 Février 2009 à 18hTU, en supposant le toit de la cavité à 155 m ou à 132 m de profondeur.

En considérant ou non que les Marnes à anhydrites ont totalement disparues au début des opérations de pompage, les résultats obtenus sont quasiment identiques, les écarts entre les positions trouvées étant de l'ordre de 5 m en moyenne (Annexe C.4.3), principalement dans la direction verticale.

N.B. : Les écarts entre les positions estimées avec le modèle de vitesse initial et ceux définis ci-dessous sont de l'ordre de 30-40 m en moyenne, comme attendu, surtout dans la direction verticale. Les conclusions générales tirées restent toutefois semblables à celles énoncées (Annexe C.4.3).

Aussi tous les foyers sont placés dans une colonne au niveau de la cavité, dans une bande homogène latéralement (d'orientation plutôt Nord-Ouest / Sud-Est ?). Les événements sont principalement définis en-dessous du banc de Dolomie de Beaumont, quelques-uns se trouvant à son niveau.

De même que pour les périodes de crise, la localisation de microséismes sous la cavité pourrait indiquer une surestimation des vitesses des couches et ce, malgré la prise en compte d'un niveau de saumure.

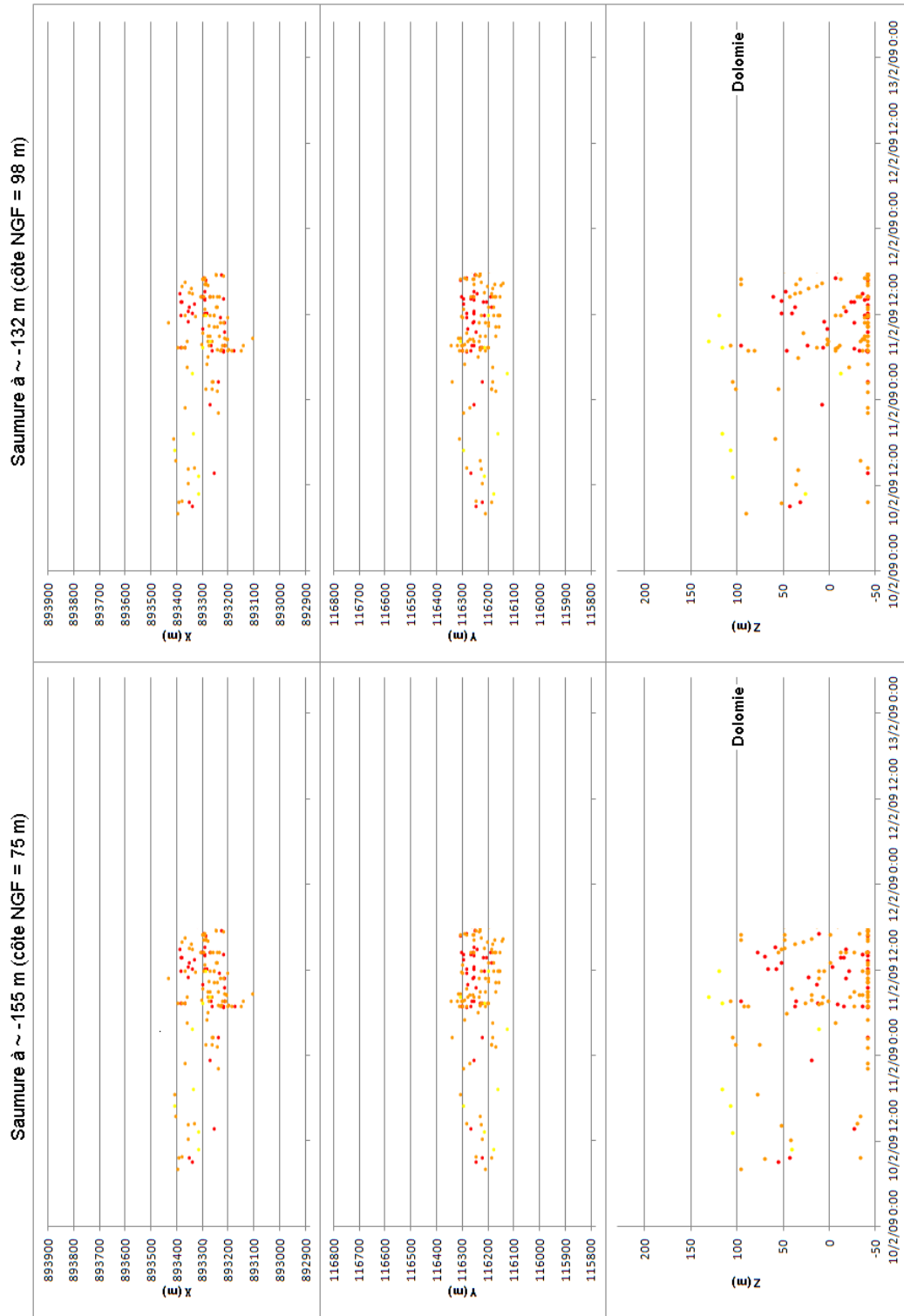


FIGURE 5.21 – Évolution de la position des foyers microsismiques, avant le premier pic d'activité, suivant les directions X (Est), Y (Nord) et Z (verticale). À gauche le toit de la cavité est considéré dans les Marnes à anhydrites, tandis qu'à droite, ce dernier se situe directement sous le banc de Dolomie de Beaumont. La confiance relative sur les localisations est indiquée : les événements avec les résidus les plus faibles sont figurés en rouge, tandis que les plus élevés sont représentés en jaune et les intermédiaires en orange.

5.5. ANALYSE DE L'ÉVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DES FOYERS MICROSEISMQUES

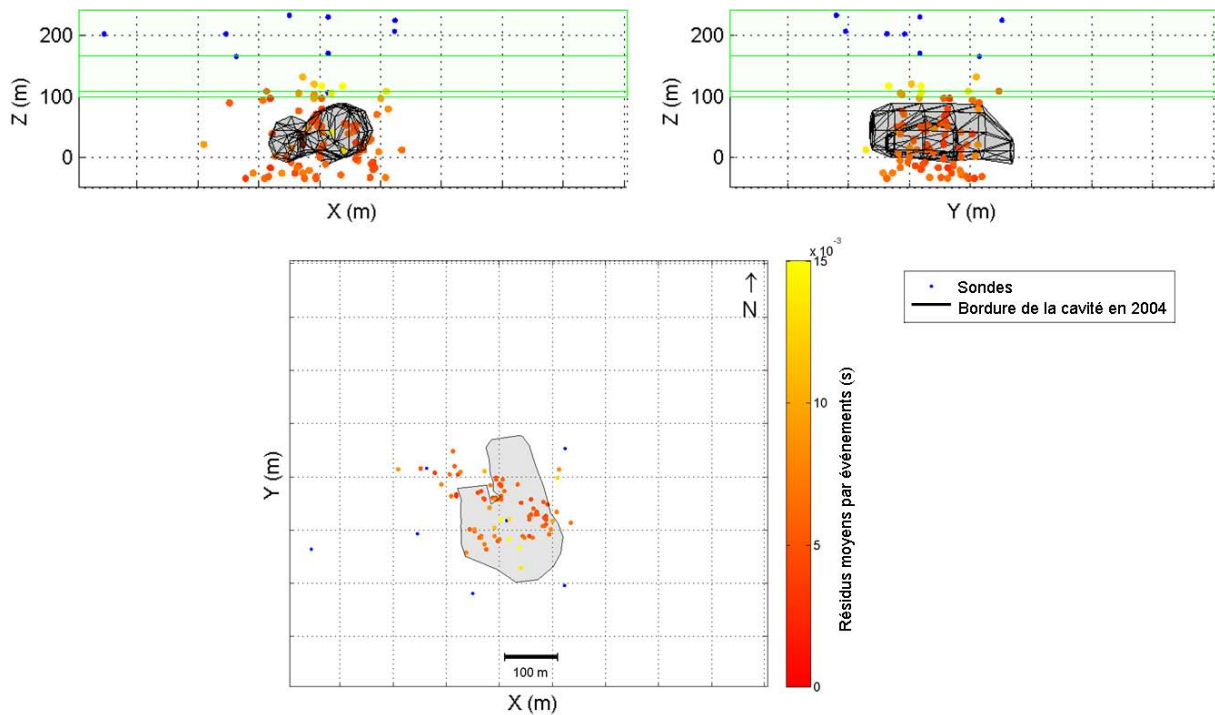


FIGURE 5.22 – Localisation des événements microsismiques jusqu'au premier pic d'activité, en profil (en haut) et en plan (en bas). Une couche de saumure est considérée sous le toit de la cavité, envisagé ici dans les Marnes à anhydrites, à environ 23 m sous le banc de Dolomie de Beaumont. La confiance relative sur la position des foyers est figurée selon un code couleur, fonction des résidus moyens par événement. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.

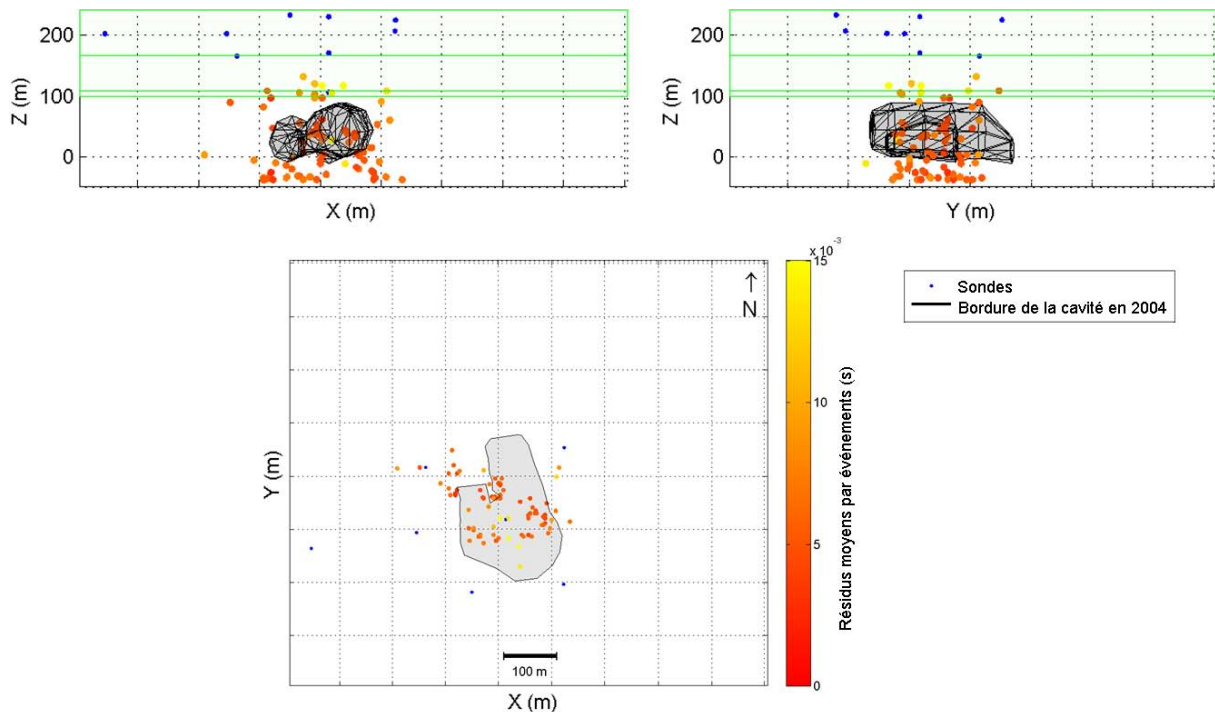


FIGURE 5.23 – Localisation des événements microsismiques jusqu'au premier pic d'activité, en profil (en haut) et en plan (en bas). Une couche de saumure est considérée sous le toit de la cavité, envisagé ici directement sous le banc de Dolomie de Beaumont. La confiance relative sur la position des foyers est figurée selon un code couleur, fonction des résidus moyens par événement. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.

Les foyers localisés avec une saumure à 155 m ou 132 m de profondeur, avant le premier pic d'activité, dans des tranches verticales de 50 m au centre de la cavité, suivant les directions X et Y sont tracés respectivement dans les Figures 5.24 et 5.25.

À ces niveaux, les sources microsismiques sont plutôt déterminées sur des plans à forts pendages, aux bords de la cavité et sous le banc raide. Ces derniers, localisés relativement profondément, devraient se repositionner directement au toit de la cavité, en supposant des vitesses du recouvrement plus faibles.

Dans le recouvrement, les événements se trouvent près de la sonde M6.3. Cependant, ils sont trop peu nombreux pour permettre de distinguer d'éventuelle(s) direction(s) préférentielle(s) de rupture.

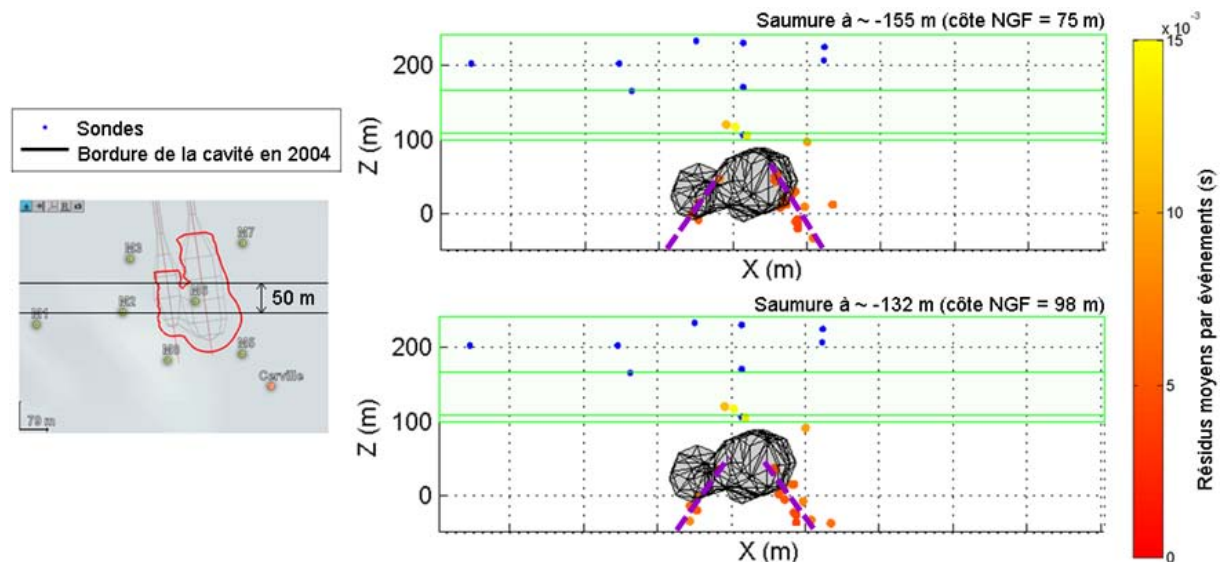


FIGURE 5.24 – Localisation des événements microsismiques, avant le 1er pic d'activité, sur une tranche verticale de 50 m ~ perpendiculaire à l'axe des pistes, au niveau du centre de la cavité, pour les deux modèles de vitesse testés. Les directions préférentielles de rupture observées sont figurées, de même que la confiance relative sur la position des foyers. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.

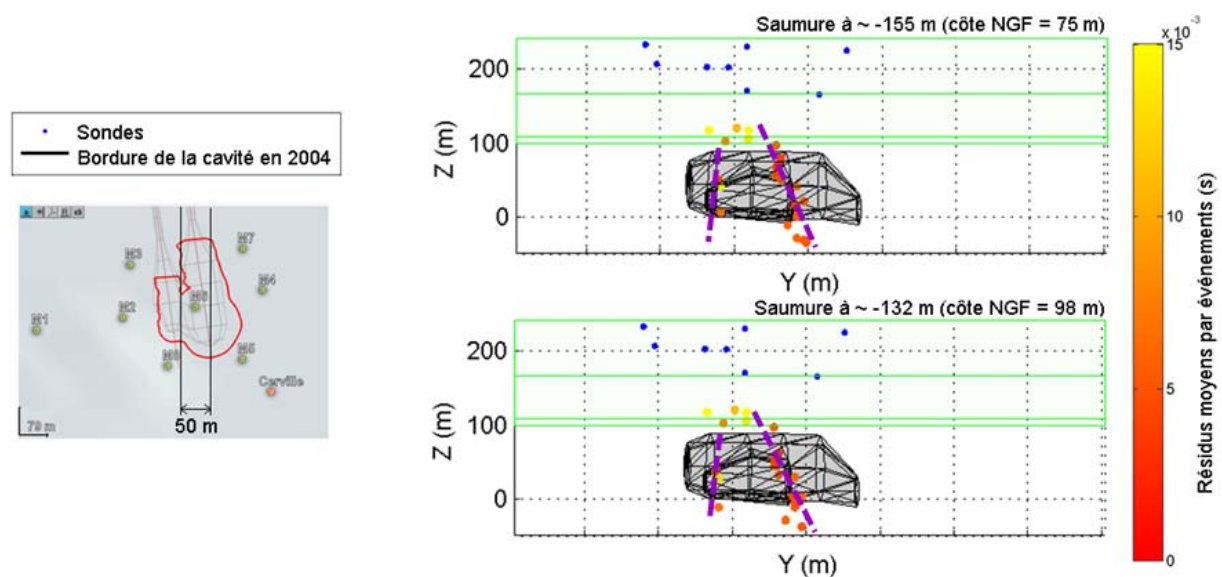


FIGURE 5.25 – Localisation des événements microsismiques, avant le 1er pic d'activité, sur une tranche verticale de 50 m ~ parallèle à l'axe des pistes, au niveau du centre de la cavité, pour les deux modèles de vitesse testés. Les directions préférentielles de rupture observées sont figurées, de même que la confiance relative sur la position des foyers. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.

5.5.2.2 Entre les 1er et le 2ème pics d'activité

La Figure 5.26 montre l'évolution des positions des foyers, dans les trois directions de l'espace et la Figure 5.27 présente tous les événements localisés en profil et en plan, entre les deux premiers pics d'activité (le 11 Février à 18h TU et le 12 Février à 08h TU), en supposant le toit de la cavité directement sous le banc de Dolomie, à 132 m.

On constate que par rapport à la phase précédente :

- le nuage d'événements, toujours centré autour de la cavité, paraît un peu plus large latéralement, en particulier dans la direction Y (parallèle à l'axe des pistes) ;
- des foyers sont observables à toutes les profondeurs, ces derniers paraissant remonter dans le recouvrement ;
- les microséismes localisés sous la cavité sont proportionnellement plus nombreux, pouvant indiquer que le milieu est un peu plus dégradé ;
- une certaine quantité d'événements est concentrée au niveau du banc de Dolomie de Beaumont. En outre, ceux-ci s'étalent plus horizontalement que les foyers positionnés en-dessous ;
- il semble y avoir plus de microséismes à l'Est qu'à l'Ouest, du côté où la cavité était initialement plus développée. Ainsi, une sorte de "vide" est observé sous le banc raide, à l'Est. De même, il existe une certaine dissymétrie Est-Ouest des foyers dans le recouvrement.

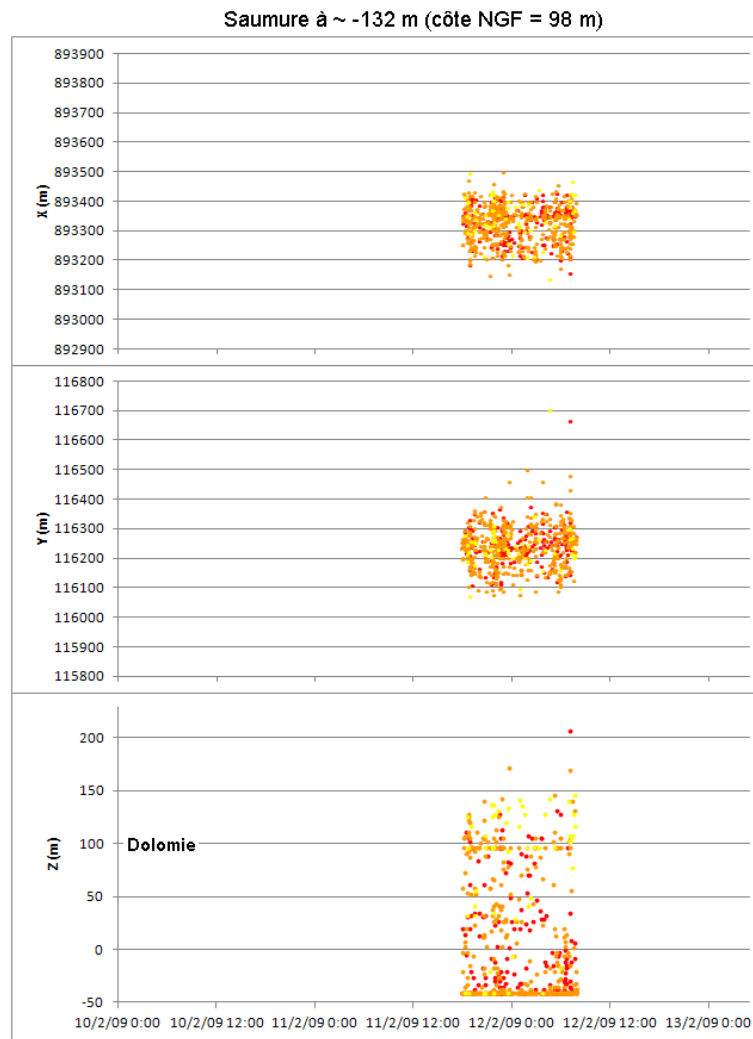


FIGURE 5.26 – Évolution de la position des foyers microsismiques, entre les deux premiers pics d'activité, suivant les directions X (Est), Y (Nord) et Z (verticale). Le toit de la cavité est supposé se situer directement sous le banc de Dolomie. La confiance relative sur les localisations est indiquée : les événements avec les résidus les plus faibles sont figurés en rouge, tandis que les plus élevés sont représentés en jaune et les intermédiaires en orange.

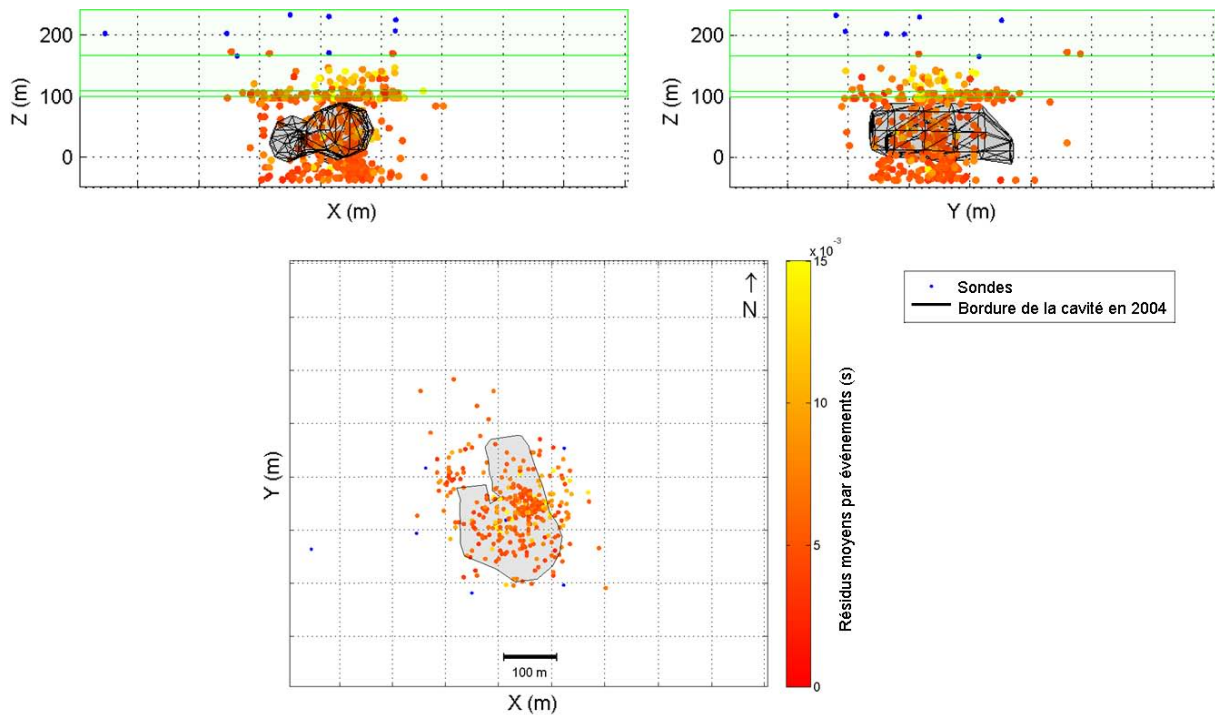


FIGURE 5.27 – Localisation des événements microsismiques entre les deux premiers pics d'activité, en profil (en haut) et en plan (en bas). Une couche de saumure est considérée sous le toit de la cavité, envisagé ici directement sous le banc de Dolomie de Beaumont. La confiance relative sur la position des foyers est figurée selon un code couleur, fonction des résidus moyens par événement. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.

Les Figures 5.28 et 5.29 regroupent tous les foyers localisés entre les deux premiers pics d'activité, dans des tranches verticales de 50 m, au niveau du centre de la cavité, respectivement dans les directions X et Y.

Dans ces parties, les événements sont visibles à toutes les profondeurs. Les plans de part et d'autres de la cavité, observés sous le banc de Dolomie avant le premier pic d'activité, sont là encore plus ou moins distinguables et semblent se rejoindre au niveau de la sonde M6.3.

Par ailleurs, la dissymétrie des hypocentres dans le recouvrement, notée précédemment, est bien visible. Ces derniers sont moins profonds à l'Est qu'à l'Ouest et ici, au Sud qu'au Nord. Des plans préférentiels de rupture peuvent alors être envisagés : l'un suivant une pente Est/Ouest à Nord-Ouest/Sud-Est, les autres subverticaux, aux bords Est et Sud de la cavité.

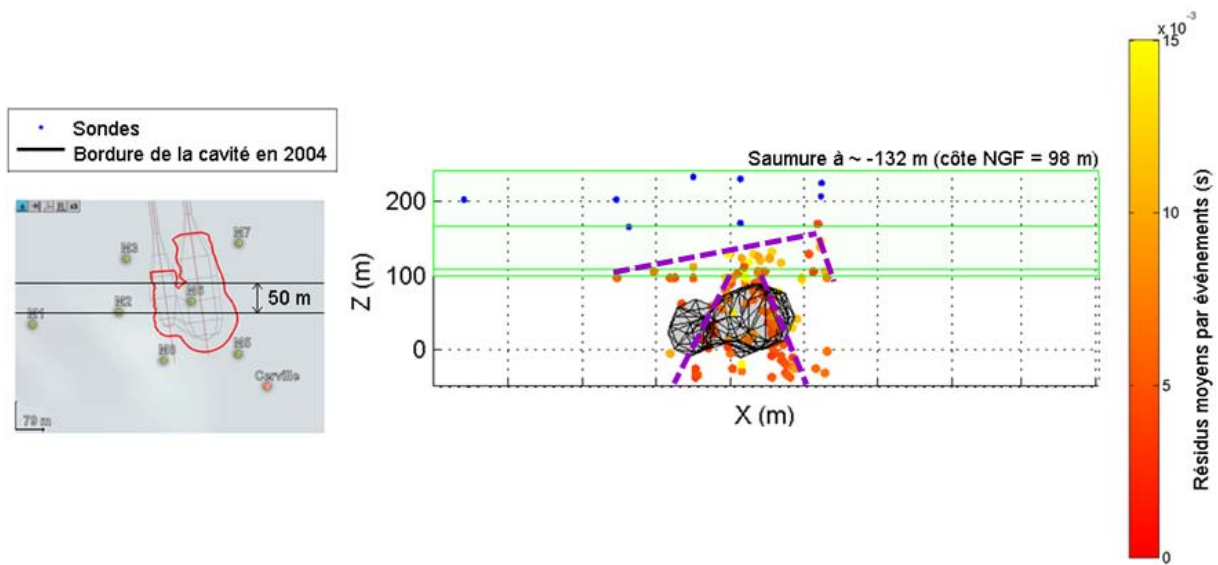


FIGURE 5.28 – Localisation des événements microsismiques, entre les deux premiers pics d'activité, sur une tranche verticale de 50 m \sim perpendiculaire à l'axe des pistes, au niveau du centre de la cavité. Les directions préférentielles de rupture observées sont figurées, de même que la confiance relative sur la position des foyers. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.

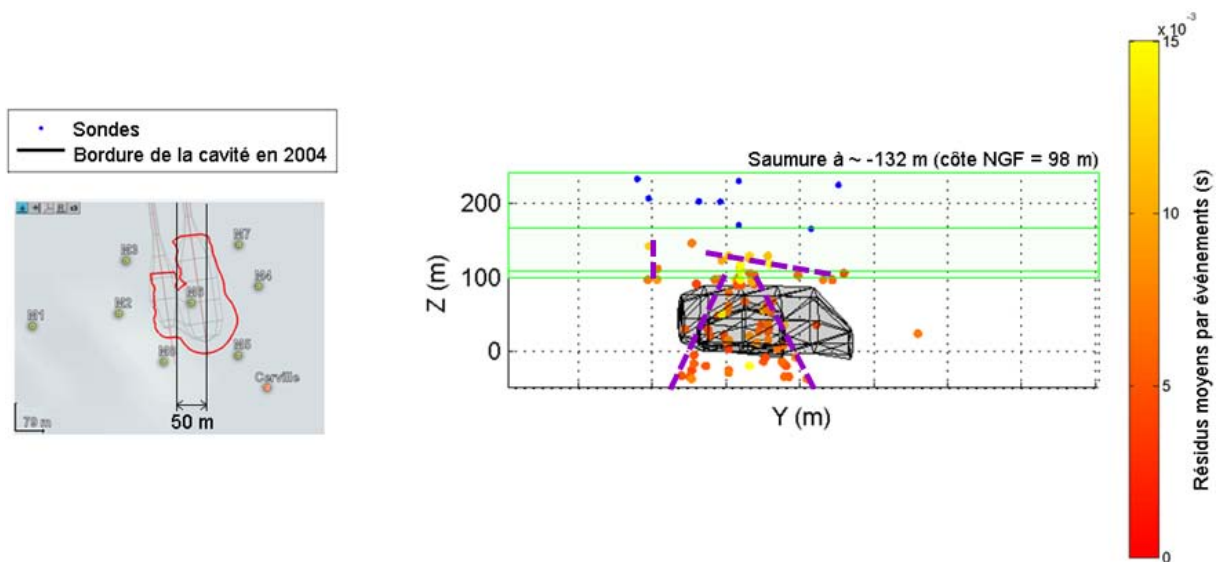


FIGURE 5.29 – Localisation des événements microsismiques, entre les deux premiers pics d'activité, sur une tranche verticale de 50 m \sim parallèle à l'axe des pistes, au niveau du centre de la cavité. Les directions préférentielles de rupture observées sont figurées, de même que la confiance relative sur la position des foyers. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.

5.5.2.3 Entre les 2ème et le 3ème pics d'activité

La Figure 5.30 montre l'évolution des positions des foyers, dans les trois directions de l'espace et les Figures 5.31 et 5.32 présentent tous les événements localisés en profil et en plan, le 12 Février entre 09h TU et 20h TU, en supposant le toit de la cavité à 132 m ou 123 m de profondeur (i.e. en considérant ou non la présence du banc de Dolomie).

Aussi, la disparition complète ou non du banc raide peut être envisagée à partir du deuxième pic d'activité grâce aux variations des mesures telles que l'accélération de l'affaissement en surface ou encore du fait que les capteurs implantés dans ce dernier, n'étaient plus opérationnels (cf. Chapitre 3).

La répartition des foyers, en particulier en profondeur, est totalement différente, selon le modèle de vitesse utilisé. Ainsi :

- en considérant que le banc de Dolomie est encore présent :
 - une partie des microséismes se concentrent dans celui-ci ;
 - les événements localisés au-dessus sont dispersés un peu partout ;
 - en-dessous, les foyers semblent encore plus concentrés à l'Est qu'à l'Ouest ;
- en supprimant le banc de Dolomie :
 - la plupart des événements se bloquent en bas de l'espace de recherche ;
 - très peu sont positionnés dans le recouvrement restant, ces derniers ne montrant pas d'orientation particulière ;
 - les foyers localisés en profondeurs, se répartissent principalement dans une sorte de "cône", se rétrécissant en allant vers le haut ;
 - le nuage de foyers est un peu moins large latéralement.

Remarques :

- la sonde M6.3 ayant disparue, l'incertitude sur la profondeur des événements est plus élevée que dans les étapes précédentes ;
- une certaine concentration des événements est toujours constatée dans le banc de Dolomie au niveau de la cavité pour tous les modèles où il est encore considéré. Ce biais s'expliquant numériquement par les vitesses élevées de cette couche par rapport aux autres ;
- le fait que les foyers semblent se borner à environ 60 m de profondeur, à l'interface entre les Marnes irisées et les couches supérieures pourrait être un effet du modèle de vitesse. Notons néanmoins, qu'imposer des vitesses homogènes (à 2700 m/s ou 3000 m/s, Annexe C.4.3) dans le recouvrement, n'entraîne pas une remontée de ces derniers vers la surface.

⇒ Maintenir le banc raide, tout au long de cette phase, qui plus est avec des vitesses aussi élevées, paraît inapproprié. Si ce dernier est encore présent au moment même du deuxième pic d'activité, voire maintenu encore quelques heures après, il est sûrement très dégradé au niveau de la cavité. À l'inverse, la suppression complète de ce banc est une hypothèse forte, puisque la majorité des événements ne sont ici plus contraints. En outre, dans la réalité, s'il finit par disparaître au-dessus de la cavité, il continue cependant à subsister, intact, tout autour, entraînant des déviations dans les trajectoires des rais sismiques. Notons de même que la diminution des vitesses dans la Dolomie, puisqu'imposée sur toute sa longueur dans les modèles 2D, peut conduire à des biais dans les localisations (Annexe C.4.3).

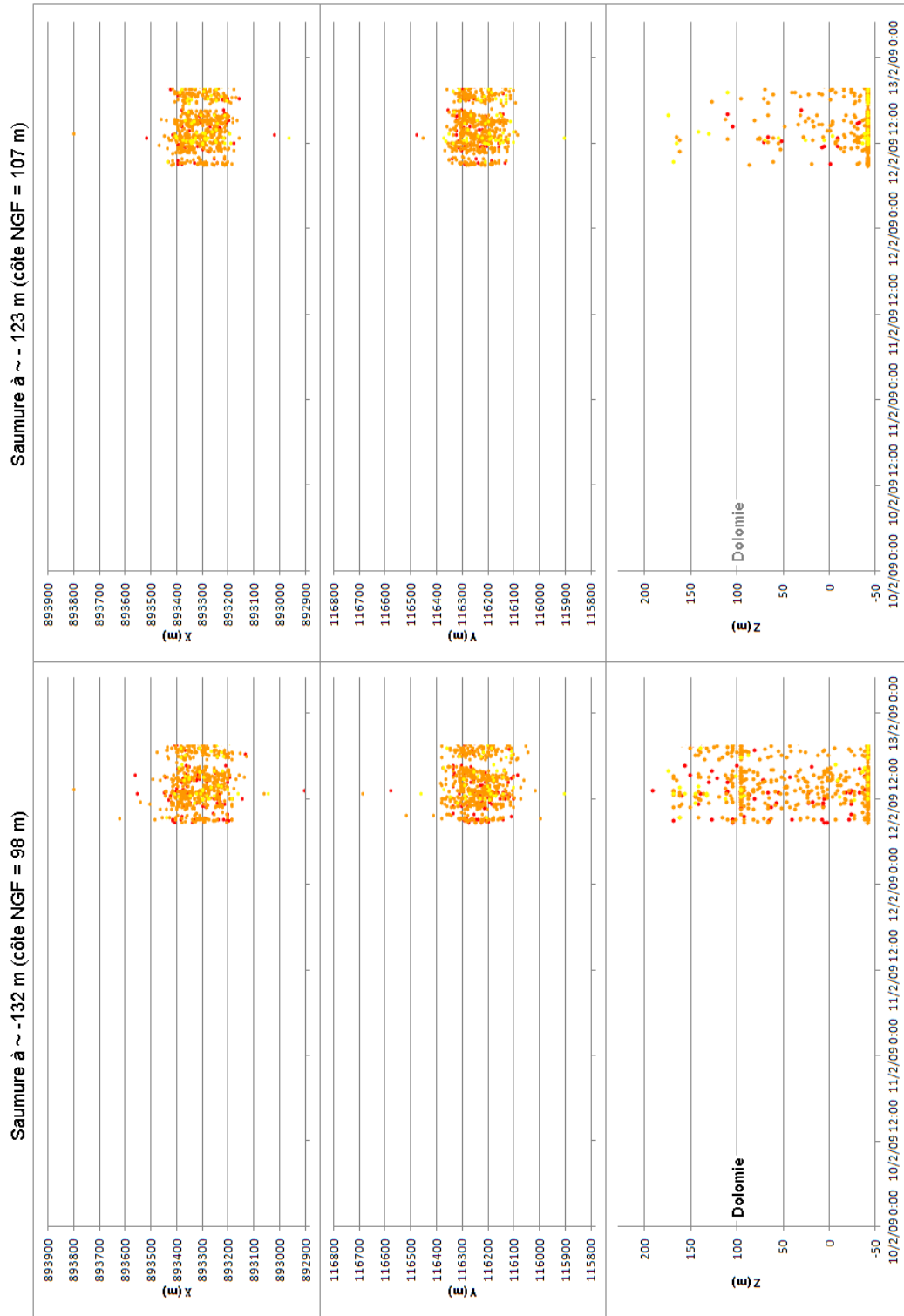


FIGURE 5.30 – Évolution de la position des foyers microsismiques, entre les deuxième et troisième pics d'activité, suivant les directions X (Est), Y (Nord) et Z (verticale). À gauche, la saumure est supposée atteindre le mur de la Dolomie de Beaumont, tandis qu'à droite, cette dernière remplace complètement le banc. La confiance relative sur les localisations est indiquée : les événements avec les résidus les plus faibles sont figurés en rouge, tandis que les plus élevés sont représentés en jaune et les intermédiaires en orange.

5.5. ANALYSE DE L'ÉVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DES FOYERS MICROSISMIQUES

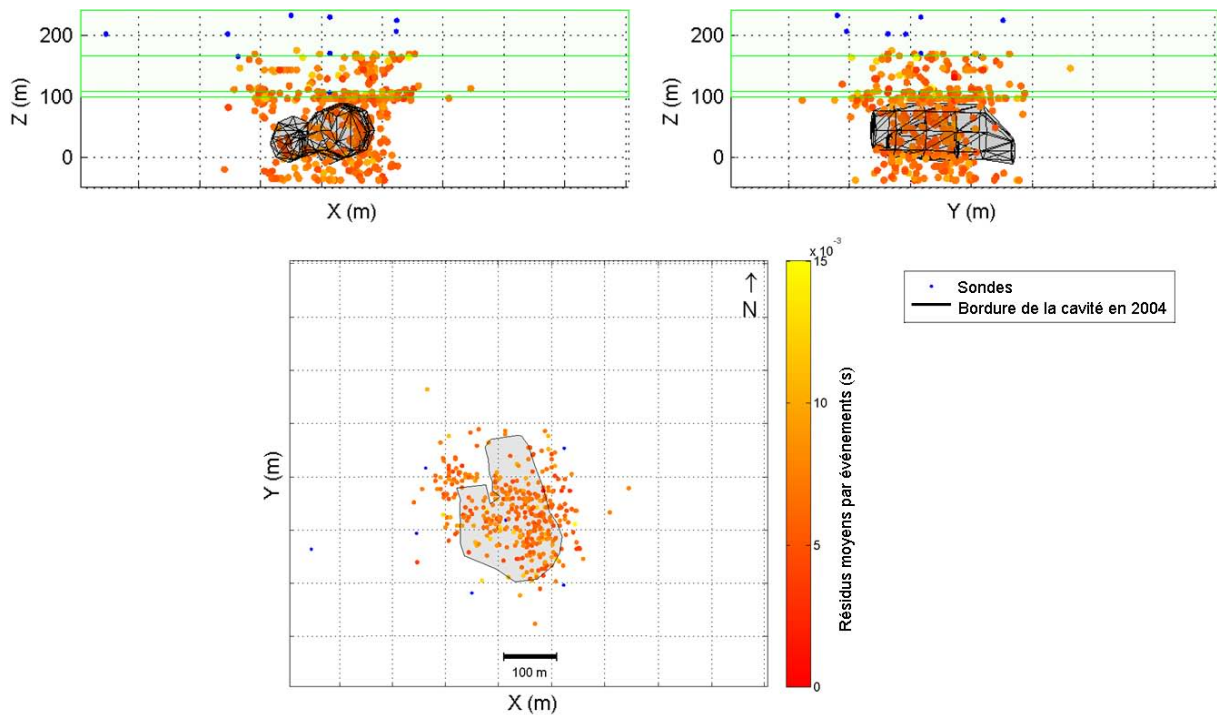


FIGURE 5.31 – Localisation des événements microsismiques entre les 2^{ème} et le 3^{ème} pics d'activité, en profil (en haut) et en plan (en bas). Une couche de saumure est considérée sous le toit de la cavité, ici directement sous le banc de Dolomie de Beaumont. La confiance relative sur la position des foyers est figurée selon un code couleur, fonction des résidus moyens par événement. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.

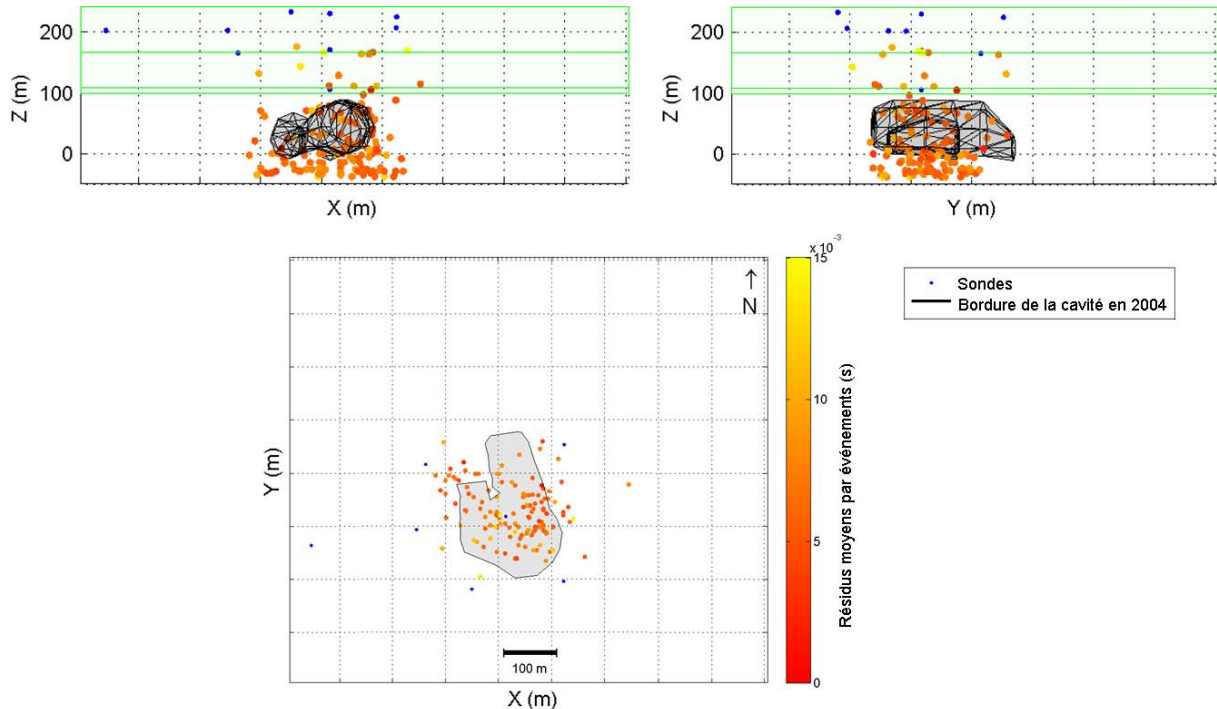


FIGURE 5.32 – Localisation des événements microsismiques entre les 2^{ème} et le 3^{ème} pics d'activité, en profil (en haut) et en plan (en bas). Une couche de saumure est considérée à partir et à la place du banc de Dolomie de Beaumont. La confiance relative sur la position des foyers est figurée selon un code couleur, fonction des résidus moyens par événement. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.

5.5. ANALYSE DE L'ÉVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DES FOYERS MICROSISMIQUES

Les Figures 5.33 et 5.34 rassemblent tous les foyers localisés entre les deuxième et troisième pics d'activité pour un toit de cavité imposé à 132 m ou à 123 m de profondeur, dans des tranches verticales de 50 m, suivant les directions X et Y.

Ainsi, dans cette phase, aucune structure préférentielle de rupture dans le recouvrement n'est vraiment discernable pour les deux modèles de vitesse.

En dessous, en considérant la Dolomie encore présente, on observe dans la direction Nord-Sud un plan subvertical. En la supprimant, ce dernier n'apparaît plus et un "cône", dont les bords se rejoignent vers la sonde M6.3, se dessine selon la coupe Est-Ouest.

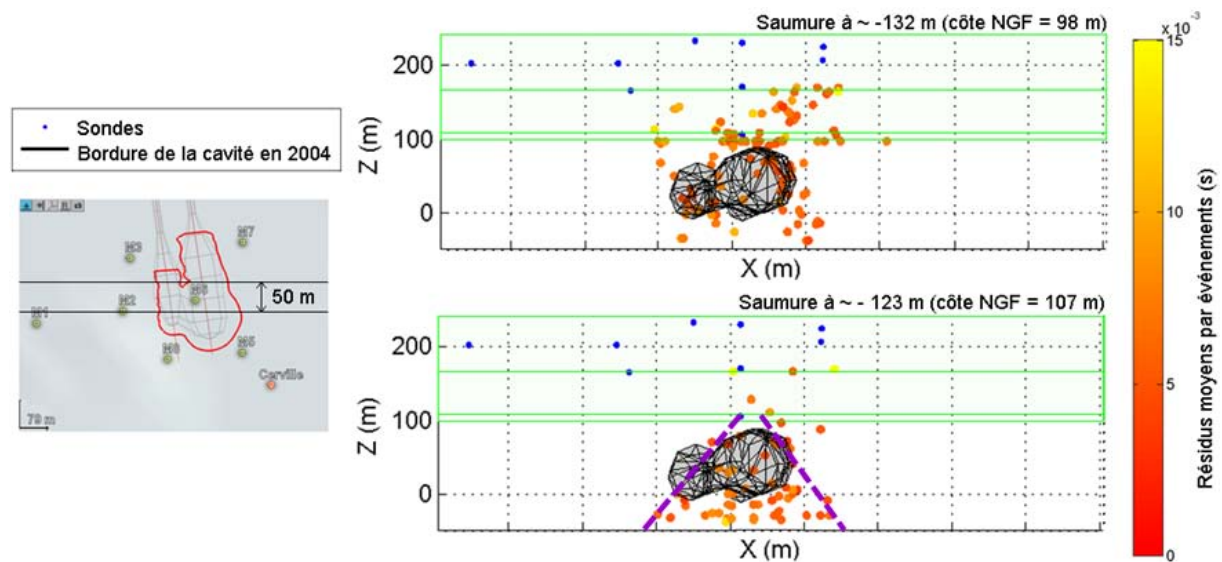


FIGURE 5.33 – Localisation des événements microsismiques, entre les deuxième et troisième pics d'activité, sur une tranche verticale de 50 m ~ perpendiculaire à l'axe des pistes et au niveau du centre de la cavité, pour les deux modèles de vitesse testés. Les directions préférentielles de rupture observées sont figurées, de même que la confiance relative sur la position des foyers. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.

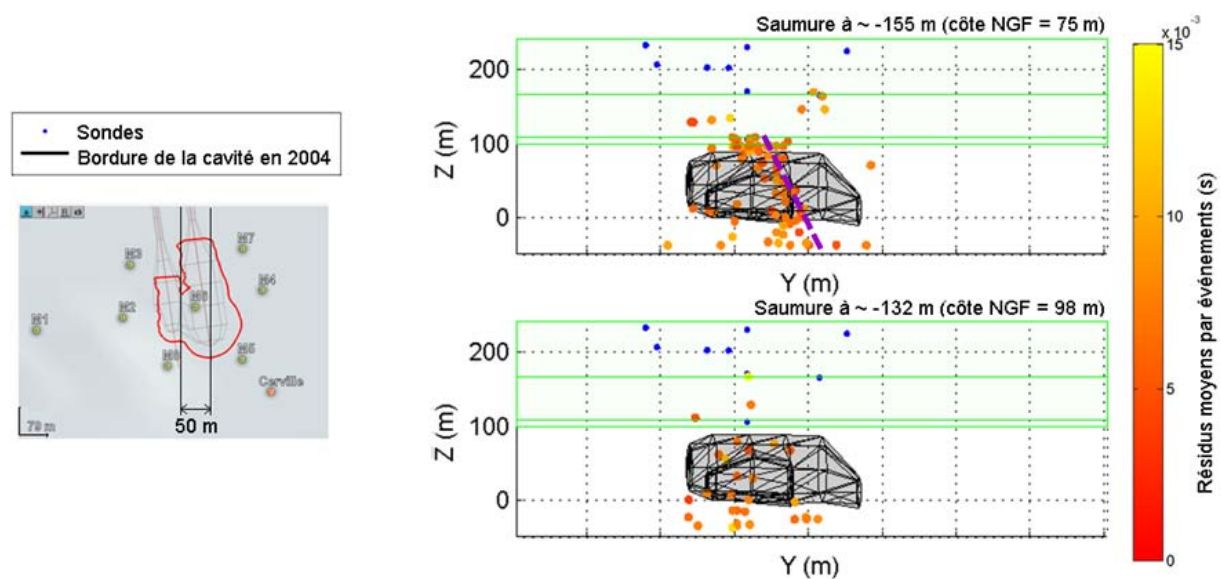


FIGURE 5.34 – Localisation des événements microsismiques, entre les deuxième et troisième pics d'activité, sur une tranche verticale de 50 m ~ parallèle à l'axe des pistes et au niveau du centre de la cavité, pour les deux modèles de vitesse testés. Les directions préférentielles de rupture observées sont figurées, de même que la confiance relative sur la position des foyers. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.

5.5.2.4 À partir du 3ème pic d'activité

La Figure 5.35 montre l'évolution des positions des foyers, dans les trois directions de l'espace et la Figure 5.36 présente tous les événements localisés en profil et en plan, à partir du troisième pic d'activité jusqu'à l'effondrement final, en supposant le toit de la cavité à 123 m de profondeur.

De fait, les mesures d'affaissement de surface atteignant alors plus d'un mètre (cf. Chapitre 3), il est très peu probable que le banc raide soit encore en place à ce moment.

Les foyers sont trouvés à toutes les profondeurs, toujours principalement vers le bas de l'espace de recherche et moins d'événements sont "mal contraints" avec ce modèle par rapport à l'étape précédente.

Ils forment un "cône" s'élargissant vers le bas et dont le sommet se situe plus ou moins au niveau de la sonde M6.2 (à 60 m de profondeur). De plus, ils sont plutôt positionnés au centre de la cavité ; le nuage est assez peu développé latéralement, en particulier suivant la direction parallèle à l'axe des pistes.

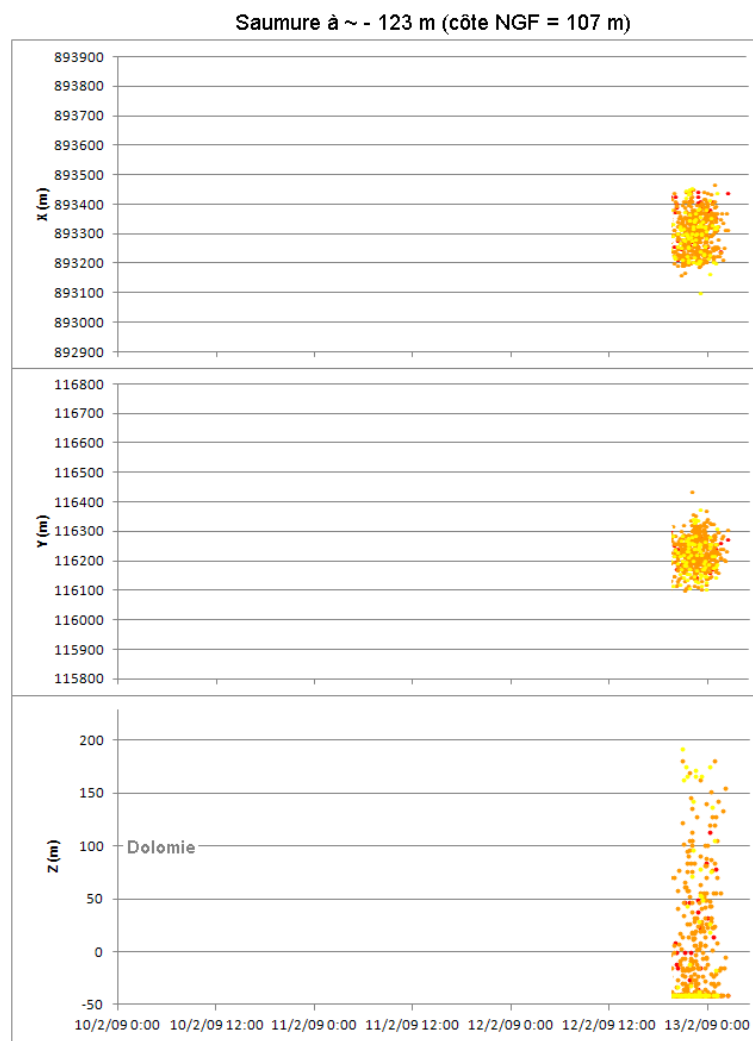


FIGURE 5.35 – Évolution de la position des foyers microsismiques, à partir du troisième d'activité, suivant les directions X (Est), Y (Nord) et Z (verticale). Le toit de la cavité est supposé se situer à la profondeur théorique du banc de Dolomie de Beaumont. La confiance relative sur les localisations est indiquée : les événements avec les résidus les plus faibles sont figurés en rouge, tandis que les plus élevés sont représentés en jaune et les intermédiaires en orange.

5.5. ANALYSE DE L'ÉVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DES FOYERS MICROSEISMQUES

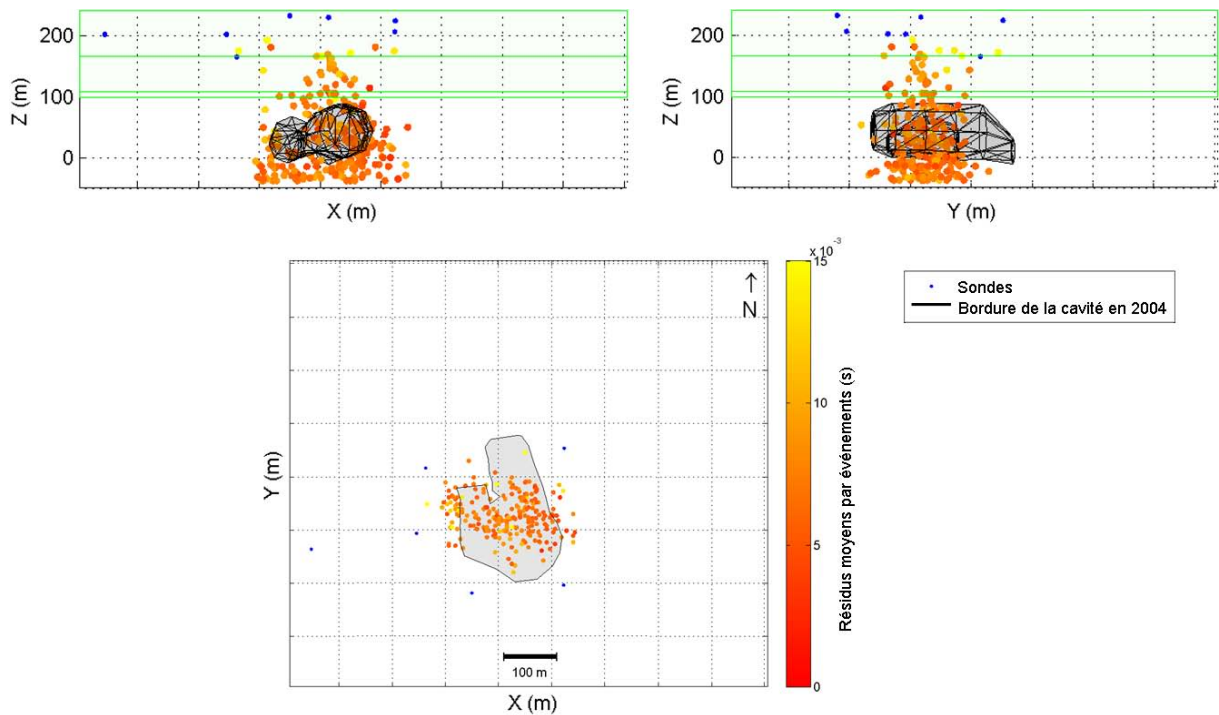


FIGURE 5.36 – Localisation des événements microsismiques à partir du troisième pic d'activité, en profil (en haut) et en plan (en bas). Une couche de saumure est considérée à partir de la profondeur théorique du banc de Dolomie de Beaumont qui a ici disparu. La confiance relative sur la position des foyers est figurée selon un code couleur, fonction des résidus moyens par événement. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.

Les Figures 5.37 et 5.38 regroupent tous les foyers localisés après le troisième pic d'activité jusqu'à l'effondrement généralisé, dans des tranches verticales de 50 m, dans les directions X et Y au niveau du centre de la cavité.

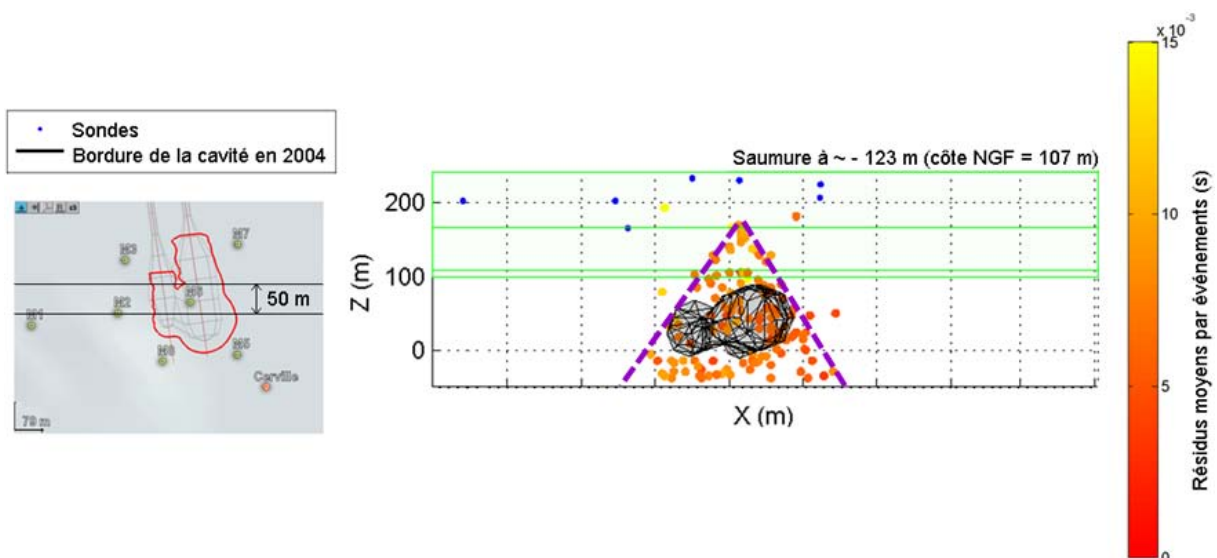


FIGURE 5.37 – Positions des foyers microsismiques, à partir du troisième pic d'activité, sur une tranche verticale de 50 m, \sim perpendiculaire à l'axe des pistes, au niveau du centre de la cavité. Les directions préférentielles de rupture observées sont figurées, de même que la confiance relative sur la position des foyers. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.

Les événements sont observés à toutes les profondeurs formant le "cône" décrit précédemment.

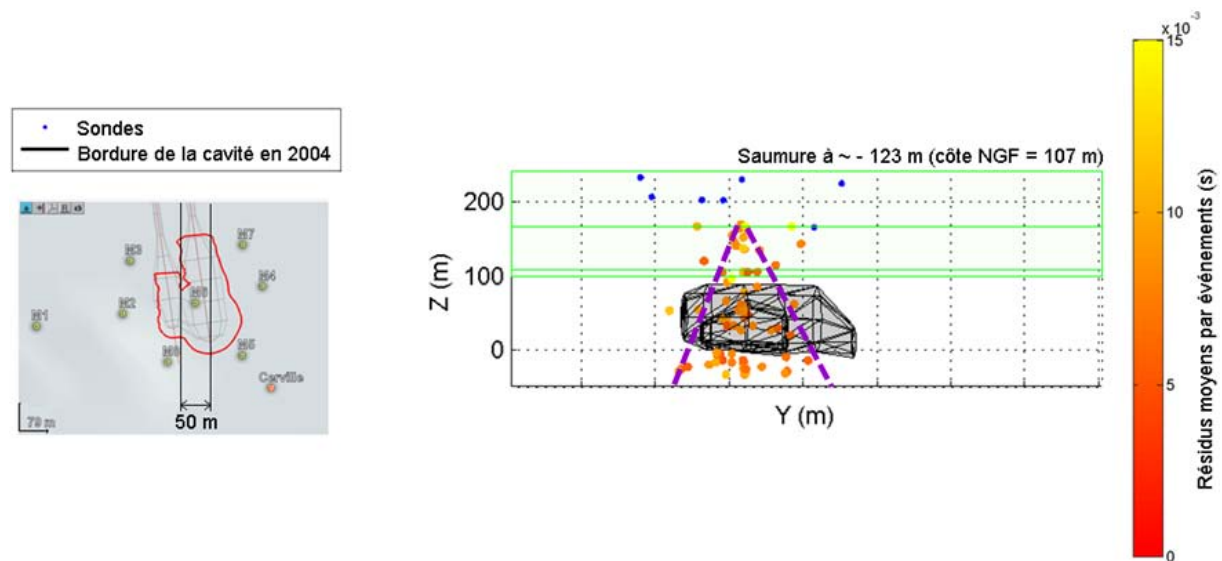


FIGURE 5.38 – Positions des foyers microsismiques, à partir du troisième pic d'activité, sur une tranche verticale de 50 m, ~ parallèle à l'axe des pistes, au niveau du centre de la cavité. Les directions préférentielles de rupture observées sont figurées, de même que la confiance relative sur la position des foyers. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.

Aucune orientation préférentielle des ruptures n'est visible dans le recouvrement, étant donné le peu d'événements localisés.

⇒ Le cratère formé après l'effondrement possède des flancs assez raides, impliquant des glissements à ce niveau. L'absence notable de foyers observés sur les bords de la cavité pourrait s'expliquer par : des erreurs de localisation dues au modèle de vitesse et/ou par le fait que les sources microsismiques provenant de ce type de rupture étaient peu énergétiques ou se déclenchaient sous forme de "rafales".

5.5.3 Synthèse sur l'analyse de l'évolution spatio-temporelle des foyers microsismiques

Sur l'ensemble de la période d'acquisition, on observe un nuage de foyers de forme cylindrique au niveau de la cavité (Figure 5.39). Ce dernier s'élargit dans les trois directions de l'espace au cours du temps, en particulier pendant l'effondrement (à partir du 1er pic d'activité), où les microséismes sont beaucoup plus nombreux dans le recouvrement au-dessus du banc de Dolomie et se positionnent sur les bords de la cavité plutôt qu'au centre.

En outre, la présence d'événements localisés en-dessous de la cavité semblent indiquer que les vitesses dans le recouvrement sont surestimées et donc que le recouvrement est dégradé, ce dès les crises de 2008.

Aussi, le modèle de vitesse choisi pour la localisation a un effet notable sur cette dernière, forçant certaines solutions dans le banc de Dolomie ou ne permettant plus de contraindre suffisamment les résultats.

La Figure 5.40 montre l'évolution temporelle des positions des foyers, dans les trois directions de l'espace, au cours de l'effondrement, avec les modèles de vitesse 2D retenus :

- ici au début des opérations de pompage, les Marnes à anhydrites ne sont pas prises en compte au toit de la cavité :
 - l'activité microsismique enregistrée après les crises de Mars-Avril 2008, pouvant être engendrée par leur chute progressive ;
 - les considérer ne changeant pratiquement pas les localisations ;

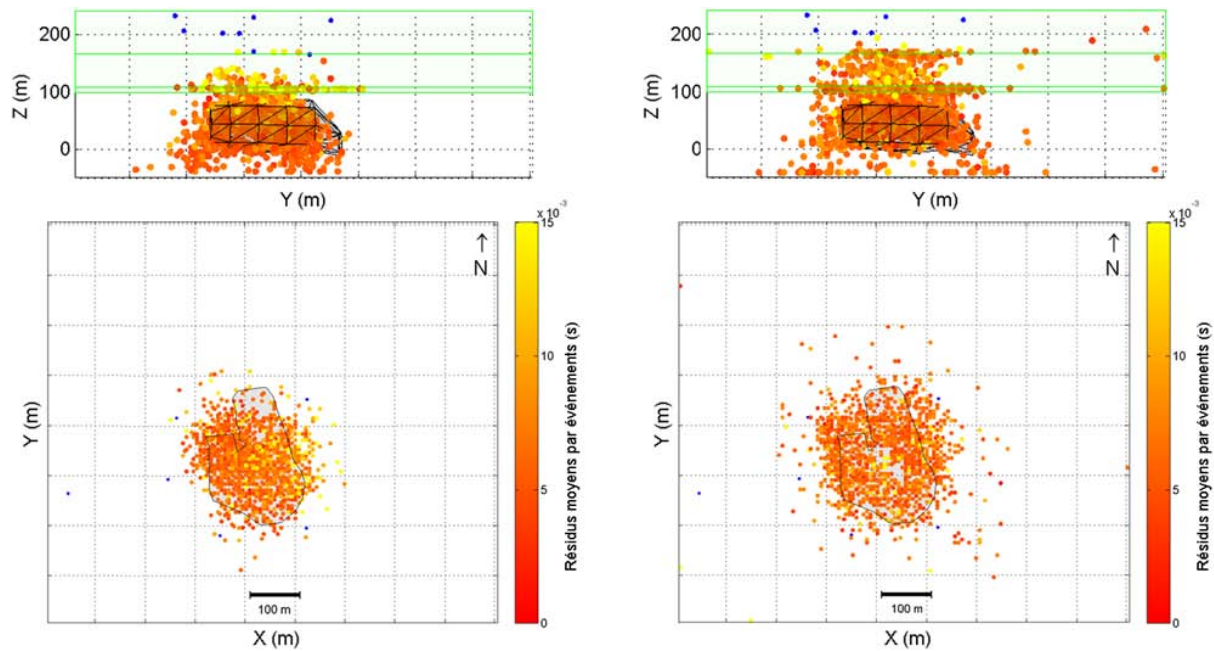


FIGURE 5.39 – Comparaison entre la localisation des événements pendant les crises de Mars-Avril 2008 (à gauche) et pour la période d'effondrement (à droite), selon une direction \sim parallèle à l'axe des pistes (en haut) et en plan (en bas). La confiance relative sur la position des foyers est figurée. La cavité est représentée dans sa configuration estimée en 2003-2004.

- la disparition du banc raide est supposée au niveau ou quelques heures après le deuxième pic d'activité :
 - les capteurs implantés au sein du banc étant perdus de façon synchrone ; ceci indique un déplacement au-delà de ce qu'eux-mêmes et leurs connections pouvaient mécaniquement supporter. En outre, l'affaissement mesuré en surface au moment de ce pic était de l'ordre de 50 cm (cf. Chapitre 3) ;
 - les localisations peuvent être biaisées en maintenant ce banc à vitesse élevée, alors qu'il est au moins fortement dégradé au niveau de la cavité ;
 - à l'inverse, le tracé des rais modélisés peut différer des trajets réels, qui devraient converger dans la Dolomie, encore présente autour de la cavité.

L'analyse des séquences de localisation montre, outre une certaine dissymétrie Est-Ouest des foyers, l'existence de plans préférentiels sur les bords de la cavité au début de l'effondrement et des foyers plutôt positionnés au centre dans la dernière phase.

Remarques :

- les localisations réalisées sans les angles de polarisation donnent des conclusions générales semblables, à ceci près que les événements ne sont pas particulièrement concentrés dans le banc raide ;
- un modèle de vitesse 3D, permettant d'intégrer la géométrie de la cavité a été testé. La méthode, encore en cours de développement, ne permettait de prendre en compte que les temps d'arrivée des ondes de volume. Les localisations obtenues bien que présentant des trajets de rais plus réalistes ne rendent pas compte des angles de polarisation, ces derniers n'étant pas optimisés.

5.5. ANALYSE DE L'ÉVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DES FOYERS MICROSISMIQUES

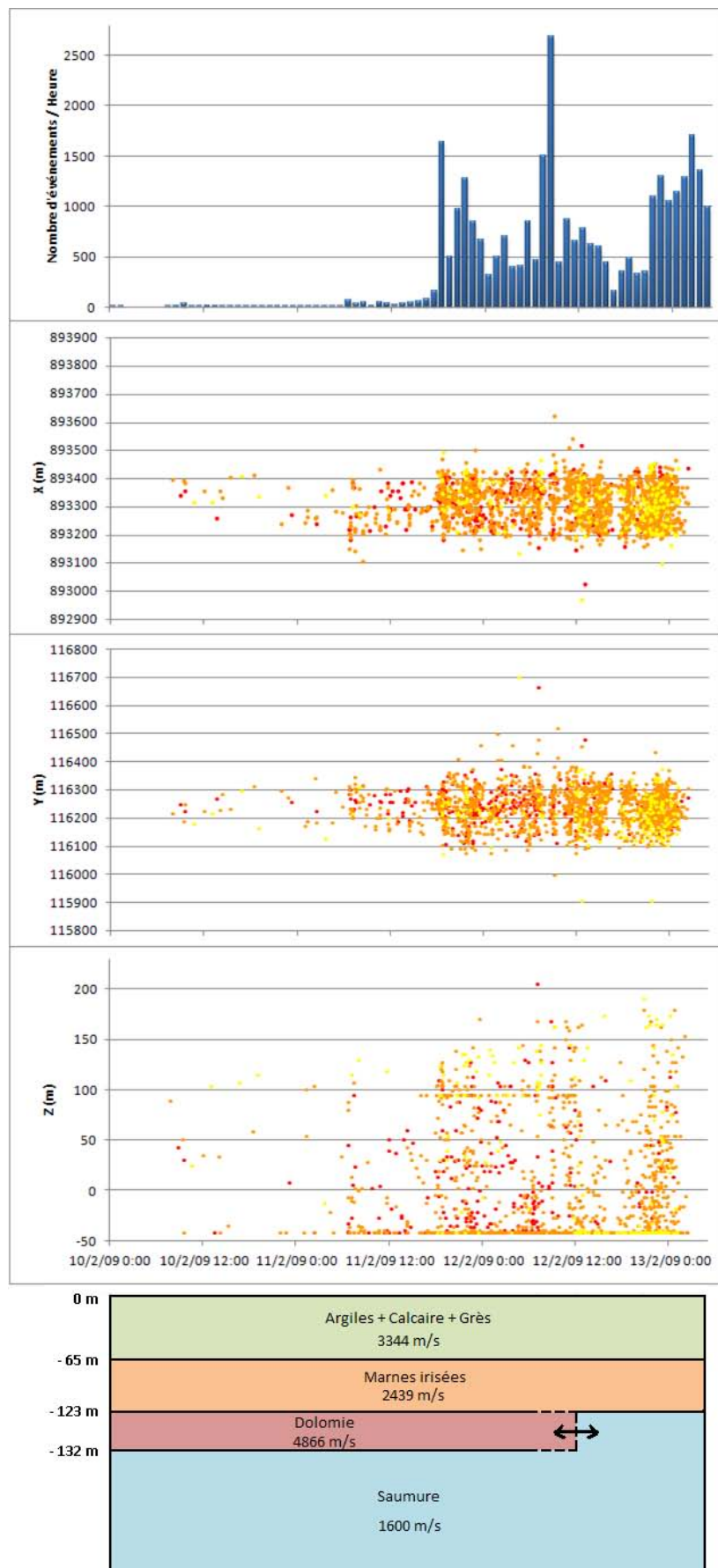


FIGURE 5.40 – Comparaison entre l'évolution du nombre d'événements détectés et les variations de position des foyers microsismiques suivant les directions X (Est), Y (Nord) et Z (verticale) et modèles de vitesse retenus associés durant la période d'effondrement. La confiance relative sur les localisations est indiquée : les événements avec les résidus les plus faibles sont figurés en rouge, tandis que les plus élevés sont représentés en jaune et les intermédiaires en orange.

5.6 Conclusions sur la localisation absolue des événements

Afin d'assurer la qualité des résultats de localisation spatiale des événements microsismiques, il a été entrepris dans un premier temps de :

1. redéfinir un modèle de vitesse initial par inversion, à l'aide de tirs de calage. Ce dernier permet de prendre en compte les angles de polarisation (azimuts et pendages) mesurés au niveau des sondes 3D ;
2. sélectionner les fichiers pour lesquels la localisation pouvait être précise. Ainsi, seuls les événements isolés sur les fenêtres d'enregistrement les plus énergétiques ont été retenus.

Par ailleurs, la stabilité des solutions trouvées a été jaugée, en faisant varier les paramètres d'entrée. Les écarts obtenus entre les positions estimées sont surtout observés dans la direction verticale, où le réseau est moins bien contraint. Ils sont de l'ordre de la trentaine à la quarantaine de mètres, i.e. trois à quatre fois supérieurs à l'épaisseur du banc raide.

Aussi, à l'issue de ces tests, il a été décidé de privilégier les localisations réalisées en tenant compte à la fois des temps d'arrivée des ondes P et des angles de polarisation. Les ondes S quant à elles, pouvant résulter de conversions d'ondes P au niveau des interfaces et non des mécanismes à la source, ont été écartés.

L'évolution spatio-temporelle des événements localisés a ensuite été étudiée, en modifiant le modèle de vitesse 2D, pour prendre en compte l'évolution même de la cavité et de son recouvrement.

Les résultats obtenus, bien que tributaires du modèle de vitesse imposé, montrent que :

- l'ensemble des événements est concentré dans un cylindre au niveau de la cavité, qui s'élargit au fil du temps ;
- le recouvrement était déjà endommagé dès les Crises de 2008 ;
- la présence de plans de rupture préférentiels, en particulier sur les bords de la cavité, est visible.

Ces analyses pourraient être améliorées et précisées, par exemple par :

- la prise en compte de modèles intermédiaires, faisant diminuer progressivement les vitesses dans le recouvrement ;
- une inversion conjointe à la fois des positions des foyers et des vitesses dans le milieu [72] ;
- l'utilisation d'un modèle 3D, permettant de modéliser la géométrie de la cavité ou encore des variations de vitesses locales, et donc le tracé plus réaliste des rais reliant les événements aux sondes ;
- la mise en place d'une localisation relative, d'événements générés par des sources microsismiques proches spatialement. Néanmoins étant donné l'évolution rapide du milieu, nous recommandons d'appliquer ce traitement principalement pour les microséismes enregistrés au cours des crises et dans les premières phases de l'effondrement ;
- la localisation des rafales (notamment avec les techniques d'antenne développées pour l'analyse des tremors volcaniques) et des événements déclenchés uniquement sur les sondes de la colonne M6. En effet, le fait d'exclure ces événements peut entraîner l'omission d'une partie des phénomènes mis en jeu.

Chapitre 6

Scénario d'évolution de la cavité : Apport des différentes mesures

6.1 Premiers stades d'évolution de la cavité : Crises microsismiques	171
6.2 Effondrement	173

Ce chapitre a pour objectif de décrire comment l'analyse croisée des mesures acquises par les différents dispositifs de surveillance, a permis d'améliorer la compréhension et la chronologie des mécanismes qui ont conduit à l'effondrement (Daupley, 2011 et Rapport du GISOS 2009). En particulier, l'apport de l'écoute microsismique.

6.1 Premiers stades d'évolution de la cavité : Crises microsismiques

Dans le contexte particulier du Bassin salifère Lorrain, les premières étapes d'évolution des cavités sont assez bien connues (Buffet, 1998, Daupley et al. 2003, Boidin, 2007).

Ainsi, une fois la totalité du gisement de sel dissous, les Marnes à anhydrites qui le surmontent se dégradent au contact de la saumure et finissent par se déliter. Ce phénomène est discontinu du fait de la tenue temporaire, puis la rupture, des horizons plus anhydritiques présents au sein de l'ensemble marneux, mécaniquement plus résistants mais présentant un caractère fragile.

Lorsque le banc de Dolomie de Beaumont, situé une soixantaine de mètres plus haut, est atteint, le processus d'ascension verticale stoppe momentanément et la cavité s'élargit horizontalement. Le banc se met alors en charge progressivement sous le poids des terrains de recouvrement. Il commence à fléchir, réagissant comme une poutre reposant sur appui, ce qui n'autorise que de faibles déformations des couches sus-jacentes :

- l'activité microsismique est entrecoupée de nombreuses crises, de quelques heures à quelques jours (les principales, en Mai 2007, Mars-Avril 2008 et Janvier 2008). La signature des événements est stable et les foyers sont localisés principalement sous, voire dans le banc de Dolomie, suivant la géométrie de la cavité ;
- les mouvements faibles mesurés en surface (< 5 cm) montrent que les terrains supérieurs ne sont que faiblement pas impactés. Le léger soulèvement à la périphérie de l'aplomb de la cavité suggère une réaction de type plaque rigide du banc de Dolomie soumis à de la "flexion" ;
- les mesures de diagraphies γ -ray ont permis de quantifier et confirmer la remontée progressive de la cavité ;
- les pics de pression dans la cavité traduisent l'effet dynamique de la chute des marnes dans un système hydraulique ouvert.



FIGURE 6.1 – Évolution de l'activité microsismique en termes de nombre d'événements, amplitude, énergie au capteur, fréquence apparente, paramètre β et localisation dans les directions X, Y et Z, ainsi que de l'affaissement mesuré en surface, entre les crises de Mars-Avril 2008 et l'effondrement. Des schémas des configurations successives de la cavité sont représentés.

La Figure 6.1 compare l'affaissement mesuré par le GPS avec les résultats principaux obtenus de l'analyse de la microsismicité, i.e. :

- la répartition temporelle des enregistrements ;
- l'évolution de la signature des événements, en termes de maxima en amplitude, énergie au capteur et fréquence fondamentale apparente ;
- les variations du paramètre β ;
- la localisation des foyers sismiques.

Des schémas montrant l'évolution successive de la cavité et la réponse du banc de Dolomie sont aussi dessinés.

6.2 Effondrement

La Figure 6.2 met en relation les principales mesures des différents dispositifs déployés sur le site de Cerville-Buissoncourt durant les trois jours qui ont précédé l'effondrement généralisé, en comparaison avec l'activité microsismique enregistrée.

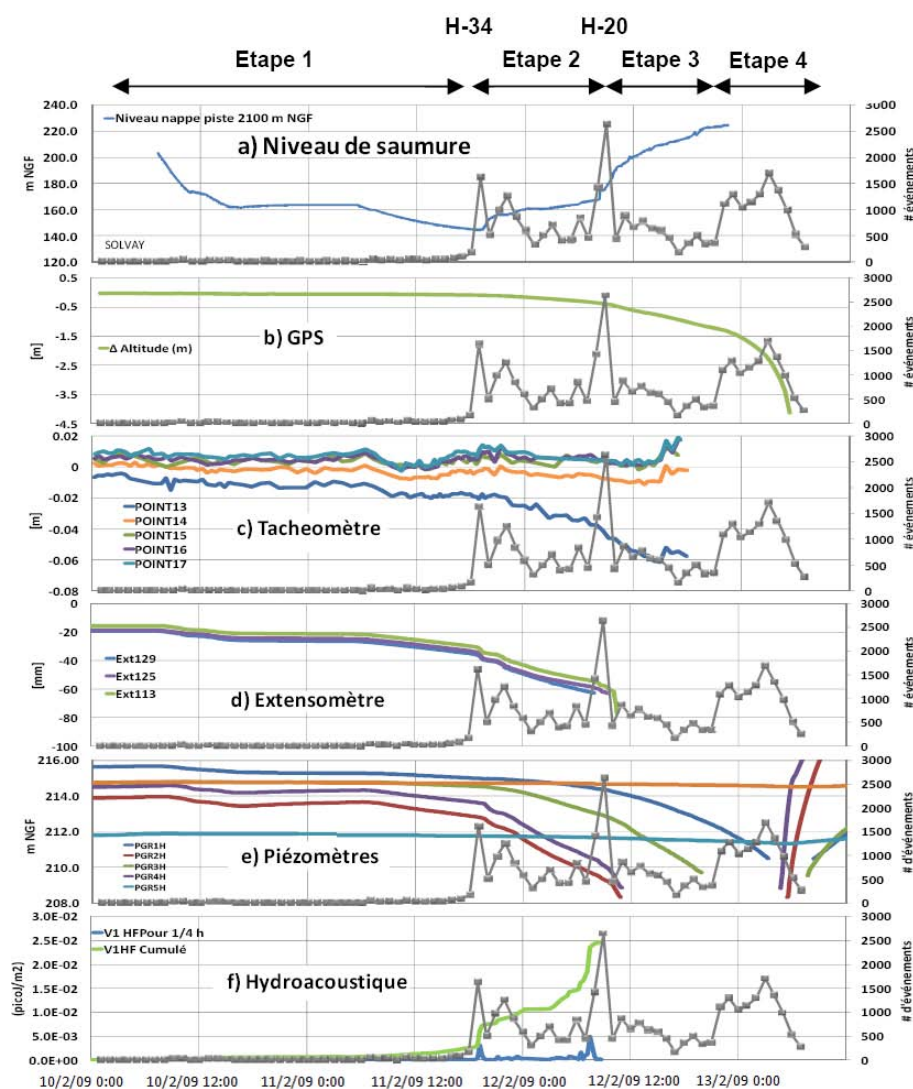


FIGURE 6.2 – Représentation synchrone du suivi multi-paramètres de la cavité de Cerville lors des opérations de rabattement.

Étape 1 : Réponse élastique du banc raide :

Durant les premières heures de rabattement de la saumure, le banc de Dolomie répond de manière globalement élastique ; les terrains qui le surmontent accompagnant sa flexion (Figure 6.3):

- les activités microsismique et hydrophonique sont faibles ;
- l'affaissement mesuré en surface et les déformations en forages sont inférieurs à 10 cm.

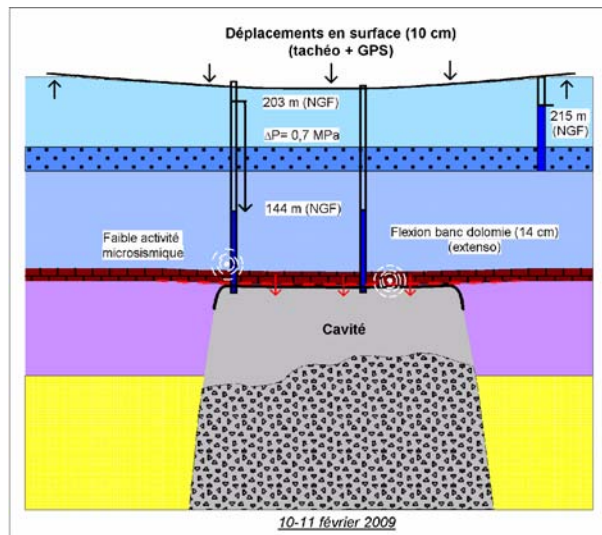


FIGURE 6.3 – Représentation schématique des processus et mécanismes en jeu durant les premières heures de pompage.

Étape 2 : Première rupture significative du banc raide :

Alors que la pression dans la cavité n'est plus que de 0.2 MPa, le banc raide rompt une première fois, probablement à ses appuis, mais reste encore en place (Figure 6.4).

On peut envisager que l'ensemble des terrains de recouvrement situés à l'aplomb de la cavité forment un "cylindre" qui coulisse vers le bas et dont le déplacement est contrôlé (limité) par la pression de

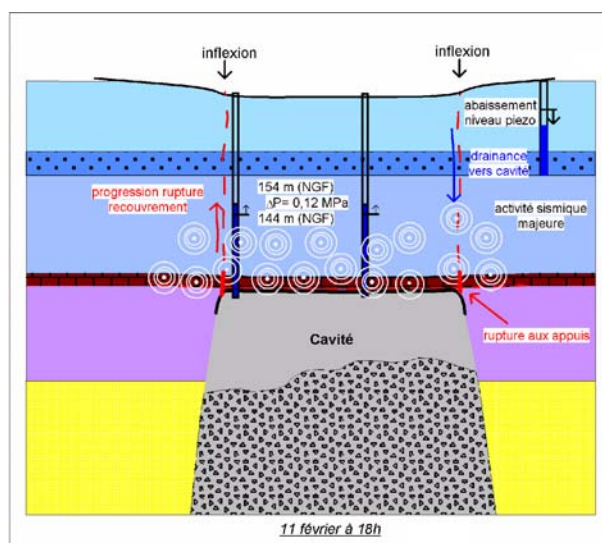


FIGURE 6.4 – Représentation schématique des processus et mécanismes en jeu au moment du premier pic d'activité, d'après Daupley, 2011.

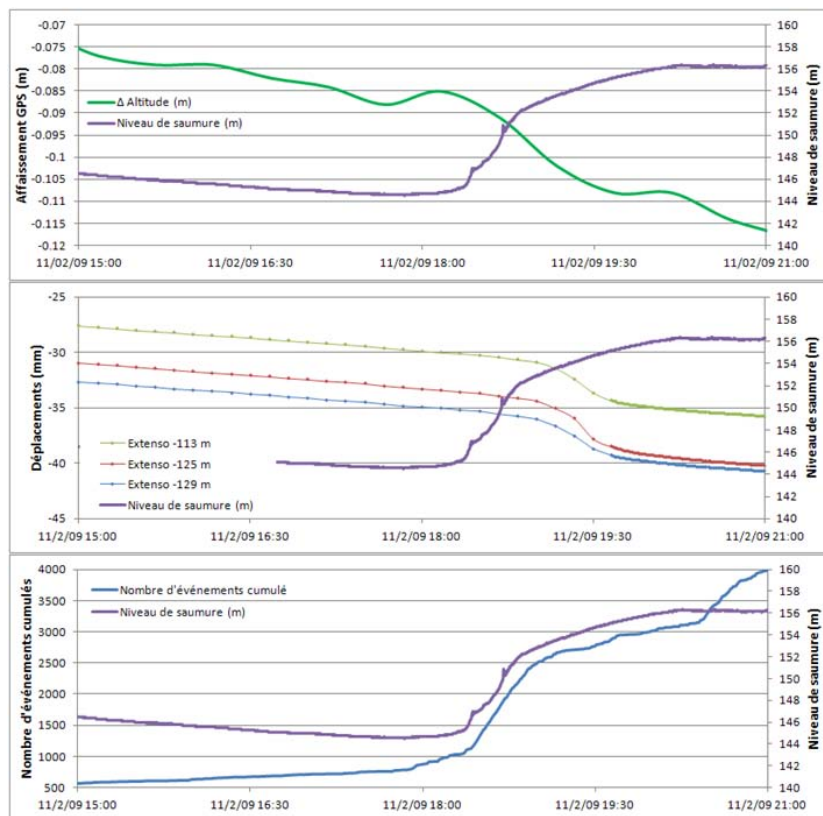


FIGURE 6.5 – De haut en bas : comparaison entre les variations du niveau de saumure et de l’affaissement en surface mesurée par le GPS, des déplacements déterminés par les extensomètres et du nombre cumulé d’événements microsismiques, autour du premier pic d’activité.

saumure dans la cavité et les frottements à son pourtour :

- le niveau de saumure hausse de 9 m de manière quasi-instantanée. À partir de ce moment, le dispositif de pompage n’arrivera plus à compenser la diminution de volume dans la cavité et ce niveau va constamment augmenter ;
- les déplacements mesurés en surface, atteignant alors 8-9 cm, accélèrent de manière synchrone et une inflexion marquée de la cuvette d’affaissement à l’aplomb des bords présumés de la cavité est observée (Figure 6.5) ;
- le banc de Dolomie enregistre ~ 5 mm de mouvement supplémentaire par rapport à la surface, légèrement après la remontée brutale du niveau de saumure (Figure 6.5) ;
- l’activité microsismique (et hydro-acoustiques) quant à elle s’amplifie d’abord avant, puis pendant la hausse du niveau de saumure, entraînant l’enregistrement d’un pic, sans commune mesure avec ceux décelés lors des crises précédentes. La sonde, M6.3, située dans le banc de Dolomie sature en amplitude et fréquence apparente. Les localisations quant à elles montrent clairement des ruptures préférentielles sur les bords de la cavité et quelques-unes près de la M6.3 ;
- les modélisations numériques prédictives indiquaient (cf. Chapitre 3) : des valeurs critiques de flexion du banc raide < 10 cm, ainsi qu’un mode de rupture principalement en traction due à la flexion, s’initiant à la fois aux appuis et dans la partie inférieure du banc, au niveau de son centre ;
- l’aquifère dans les Grès du Rhétien (à ~ 60 m du banc raide) change de comportement : une diminution brusque du niveau piézométrique, s’accroissant dans les heures qui vont suivre, est constatée, traduisant une perte d’étanchéité de la cavité. En outre, la pression hydrostatique régnant au sein de celle-ci est alors largement inférieure à celle de l’aquifère, autorisant un drainage vertical par le biais de fracturations ;
- les instruments associés au banc de Dolomie (extensomètres, hydrophone et sonde M6.3) sont toujours fonctionnels.

Étape 3 : Poursuite de la rupture du banc raide :

Les ruptures se sont généralisées au sein du banc de Dolomie (Figure 6.6) :

→ le niveau de saumure remonte quasi instantanément puis de manière continue;

→ l'affaissement en surface, s'élevant alors 40 cm à l'aplomb de la cavité s'accroît de nouveau (Figure 6.7) ;

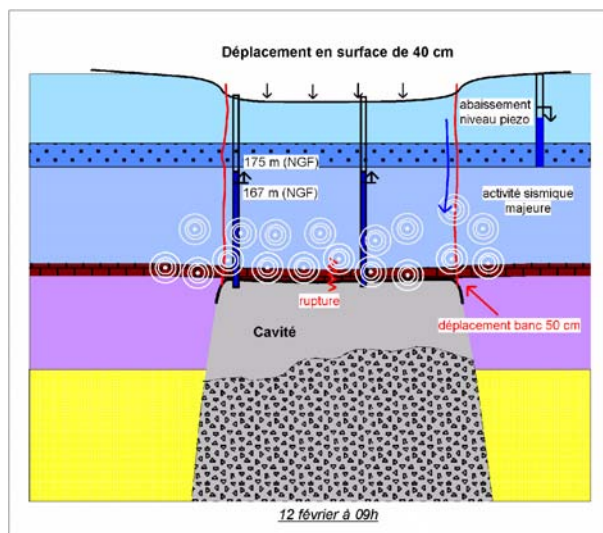


FIGURE 6.6 – Représentation schématique des processus et mécanismes en jeu au moment du second pic d'activité, d'après Daupley, 2011.

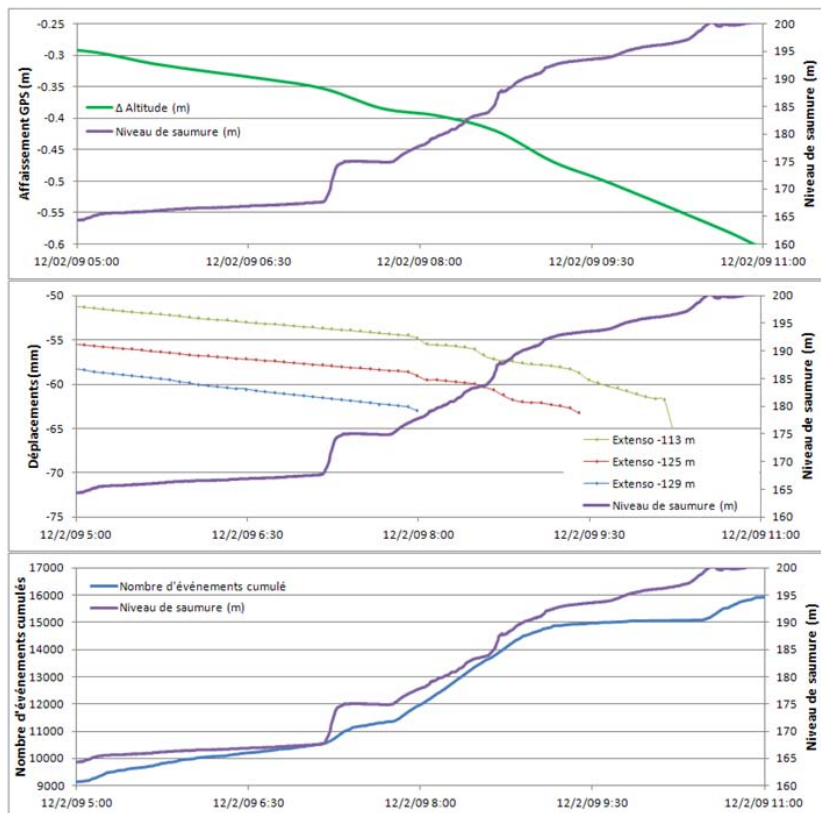


FIGURE 6.7 – De haut en bas : comparaison entre les variations du niveau de saumure et de l'affaissement en surface mesurée par le GPS, des déplacements déterminés par les extensomètres et du nombre cumulé d'événements microsismiques, autour du second pic d'activité.

- les déplacements du banc raide, estimés à 50 cm, semblent accélérer par "à-coups" (Figure 6.7) ;
- un deuxième pic d'activité microsismique (et hydro-acoustique), 1.5 fois plus important que le précédent est détecté. Les capteurs implantés dans le recouvrement saturent en amplitude et l'énergie des événements atteint son paroxysme. Les événements se dispersent un peu plus dans le recouvrement. Dans les heures qui suivent l'activité se réduit ;
- les mesures piézométriques enregistrent une nouvelle accélération ;
- des coups sourds sont entendus sur le site ;
- tous les capteurs positionnés au sein du banc raide sont petit à petit perdus.

Étape 4 : Évolution terminale de la cavité vers l'effondrement :

Durant les heures qui ont précédé l'ouverture en surface du cratère d'effondrement, le banc de Dolomie, puis progressivement les Marnes irisées qui le surmontent tombent dans la cavité. La hauteur du "cylindre" formé par les terrains encore en place diminue ainsi progressivement. La mobilisation du frottement à son pourtour s'atténue. Dans cette hypothèse, l'apparition du cratère se produit alors ces dernières deviennent insuffisantes pour retenir les derniers mètres de terrain encore en place (Figure 6.8) :

- à l'inverse des pics précédents, l'activité microsismique reprend de façon continue et soutenue pendant les 9 heures qui vont précéder l'effondrement généralisé. Les localisations, bien que présentant de fortes incertitudes, semblent montrer des ruptures préférentiellement au centre de la cavité. La sonde M6.2, située à ~ 60 m du banc raide (ainsi que celles connectées au même coffret de jonction) est perdue environ deux heures avant l'effondrement généralisé (soit ~ 23 h après la M6.3), et n'enregistre des fréquences plus élevées qu'à ce moment-là ;
- les vitesses d'affaissement en surface augmentent de manière continue ;
- la pression dans la cavité ne diminue pas, mais au contraire augmente constamment et une partie des sondages connectés à la cavité a fini par déborder ;
- l'ouverture du cratère en surface n'a pas été précédé et ni accompagné de mises en pression importantes de la saumure, incompatible avec la rupture dans son ensemble d'un seul bloc correspondant aux 120 mètres de terrains surmontant le banc de Dolomie.

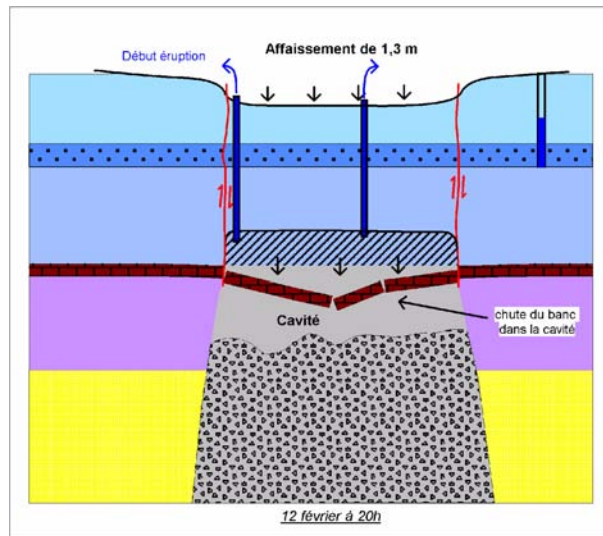


FIGURE 6.8 – Représentation schématique du mécanisme d'évolution en piston après rupture du banc de Dolomie, d'après Daupley, 2011.

Le suivi expérimental in situ d'une cavité saline aura été riche en enseignements concernant les mécanismes mis en jeu lors de l'évolution de la cavité jusqu'à son effondrement. Nous retiendrons plusieurs points, certains étaient déjà connus et ont été confirmés par l'expérimentation, d'autres n'ont été envisagés qu'en confrontant les différentes acquisitions et observations.



FIGURE 6.9 – Vues aériennes du cratère d’effondrement, au printemps 2009. (Sources : www.geoportail.fr et Solvay S.A.)

Conclusions Générales et Perspectives

L'expérimentation de Cerville-Buissoncourt confirme l'intérêt et l'efficacité de l'écoute microsismique continue pour la surveillance des instabilités gravitaires.

Parmi les différentes techniques de télémessure et d'observation mises en œuvre sur le site, elle s'est révélée comme étant la plus fine en termes de résolution et précision. Ainsi, elle a permis de percevoir plusieurs jours à plusieurs mois à l'avance les premiers signes d'instabilité de la cavité, avant que ceux-ci ne soient décelés par les déplacements en surface. De plus, cette méthode apporte une vision volumétrique et continue du comportement du massif, contrairement aux autres mesures plus ponctuelles dans le temps et dans l'espace (pression hydrostatique, extensométrie ou encore diagraphies).

Scénario d'évolution

La concordance des différentes mesures acquises met en évidence trois principales étapes d'évolution du site permettant d'appréhender et de décrire un scénario de rupture généralisé :

- entre Mai 2007 et Mars-Avril 2008, le délitage important des marnes située au toit accompagnent l'activité de dissolution dans la cavité qui avait déjà de grandes dimensions. Ce délitage est montré par la localisation des foyers microsismiques et les mesures de diagraphie en forage ;
- ce phénomène entraîne la mise en flexion progressive du banc de Dolomie de Beaumont, sous le poids des terrains de recouvrement. Ceci se traduit par une microsismicité localisée principalement sous et dans le banc raide. Les terrains supérieurs ne sont quasiment pas impactés (peu de mouvements en surface). On note un bruit de fond microsismique accru. La cavité a atteint ses dimensions critiques ; le banc de Dolomie joue alors un rôle d'armature ;
- en Février 2009, les opérations de pompage volontaires commencent par induire une baisse de pression dans la cavité, occasionnant une sollicitation accrue du banc de Dolomie. Il finit par se rompre totalement et entraîne la rupture généralisée des terrains qui le surmontent (activité microsismique plus intense que lors des crises, accélération de l'affaissement en surface GPS, etc.). Pour finir, la rupture généralisée du cylindre de terrains surimcombants se produit lorsque son poids ne peut plus être équilibré par les forces de frottement mobilisées sur ses parois (apparition d'un cratère avec des parois subverticales à la surface, modélisations numériques).

Comparaison entre les périodes de crises et d'effondrement

L'inter-comparaison des mesures montre que :

- le nombre d'événements enregistré pendant les pics d'activité lors l'effondrement est plus de 3 fois plus important que lors des crises. Ce nombre augmente suivant une loi en puissance pendant l'effondrement ;
- les pics d'activité microsismique au cours des crises sont corrélés à des pics de pression de saumure dans la cavité, alors que les mouvements mesurés en surface sont faibles. Les pics de pression sont suivis d'un retour à la normale après quelques heures. Lors de l'effondrement, les pics d'activités coïncident non seulement avec des remontées brutales du niveau de saumure mais aussi avec des

accélération de l'affaissement en surface. La pression de saumure ne diminue jamais (le pompage n'arrivant plus à compenser l'augmentation de pression induite par la diminution du volume de la cavité) ;

- les valeurs maximales atteintes en amplitude, énergie au capteur sont assez stables au cours des crises, les sauts marqués durant l'effondrement, permettent de présumer de son imminence ;
- la fréquence fondamentale apparente ne montre des variations qu'au niveau de la sonde la plus proche des phénomènes (M6.3). Les autres, plus éloignées, subissent le filtrage des hautes fréquences par les terrains et n'enregistrent pas ces fluctuations que ce soit pendant les crises ou lors de l'effondrement ;
- le paramètre β apparent, bien que souvent difficile à interpréter, a pu être associé à des hausses du niveau piézométrique dans la saumure au cours des crises, ainsi qu'à de petites accélérations de l'affaissement mesuré en surface au début de la période d'effondrement ;
- les localisations des foyers microsismiques se concentrent sous et dans le banc de Dolomie pendant les crises. Lors de l'effondrement, on observe une remontée des ruptures dans le recouvrement.

Localisation des événements microsismiques

Les travaux de localisation des foyers microsismiques mettent en évidence la difficulté de cet exercice dans un milieu en destruction, rendant impossible l'utilisation d'un modèle de vitesse constant dans le temps. Il a donc été entrepris d'établir des modèles de vitesse différents en fonction des périodes d'évolution de la cavité.

Les distributions spatio-temporelles des foyers ainsi localisés montrent l'existence de structures préférentielles de rupture et soulignent le rôle majeur du banc raide.

Pour améliorer ces localisations, il serait intéressant d'inverser simultanément les positions des foyers et les vitesses, pour mieux prendre en compte l'évolution temporelle du milieu.

Une analyse du bruit enregistré en continu, pendant l'effondrement permettrait de quantifier l'évolution des fonctions de Green et par là-même des vitesses dans le milieu.

La mise en œuvre de la localisation 3D, par la prise en compte de la géométrie de la cavité, permettrait de mieux modéliser les trajets de rais et donc d'améliorer la localisation. Des travaux préliminaires ont été entrepris et sont en cours de validation.

Notons que l'utilisation d'algorithmes par double différences, par cross-corrélation, censés améliorer la précision des localisations, sera probablement rendue difficile dans ce contexte. En effet, au cours de l'effondrement, on ne s'attend pas forcément à voir fonctionner des structures géologiques de manière répétitive et régulière, comme cela pourrait être le cas d'une faille tectonique. Les signaux associés au glissement des terrains du cylindre surincombant pourraient toutefois faire l'objet d'une telle étude, si tant est qu'on puisse les identifier.

Dans le cadre de la surveillance d'un site similaire, on pourrait préconiser la réalisation de tirs de calage en forage assez profonds pour autoriser une tomographie régulière du milieu.

Par ailleurs, cette étude montre que les enregistrements de type "rafale" peuvent représenter jusqu'à 80% du nombre de signaux enregistrés pendant les pics d'activité (pour 50% en moyenne pour la période d'écoute). Or ces signaux étant écartés de l'analyse de localisation, une partie des informations ne sont pas prises en compte pour la compréhension des phénomènes. Ces rafales nécessitent donc une stratégie de traitement adaptée. Notons néanmoins que les traitements de type antenne (ou "beam-forming"), largement utilisés pour la localisation des tremors volcaniques, pourraient être inappropriés, si les rafales proviennent de plusieurs ruptures quasi simultanées survenant à des endroits différents.

Mécanismes à la source

Les mécanismes à la source n'ont pas été étudiés dans cette thèse. Cette analyse indispensable permettrait de caractériser l'orientation et le mode des fractures et faciliterait le lien avec les modélisations mécaniques. Pour ce type d'analyse, dans le cas d'un effondrement, il sera nécessaire de pouvoir modéliser non seulement les mécanismes en cisaillement (double-couple) classiquement observés en sismologie globale, mais aussi les modes de rupture en traction.

En effet, l'analyse préliminaire montre un faible pourcentage d'ondes S observées sur les signaux localisés ($\sim 38\%$).

On peut s'attendre à ce que les ondes S observées soient reliées au mécanisme de glissement du cylindre surincombant. Cependant, ces dernières peuvent être générées aux interfaces géologiques, et nous n'avons pas la certitude qu'elles traduisent un mécanisme de cisaillement à la source. D'autre part, les faibles distances entre sources et récepteurs peuvent rendre difficile la distinction entre les phases P et S, l'hypothèse de champ lointain n'étant pas respectée. Enfin pour les rafales, il paraît difficile d'identifier la part due au cisaillement de celle due à la traction/compression.

⇒ Ces conclusions et perspectives ont permis de définir un point de départ pour de nouveaux programmes de recherche, autour du site de Cerville-Buissoncourt, et plus généralement sur l'amélioration des méthodes de surveillance des instabilités de cavités souterraines, de cinétiques rapides ou lentes.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] État des lieux et premières pistes de réflexion sur la surveillance microsismique d'Angevillers. Rap. tech., INERIS, 2010.
- [2] Expertise géotechnique de l'affaissement survenu à Angevillers en octobre 2009. Rapport d'avancement. Rap. tech., GEODERIS, 2010.
- [3] M.-K. Abdul-Wahed. Étude de la microsismicité induite à partir des sismogrammes tridirectionnels. Thèse de doctorat, INPL, 2001.
- [4] M. K. Abdul-Wahed, G. Senfaute et P. J. P. Source location estimation using single three-component seismic station. *Eurock 2001, 3-7 juin 2001, Espoo, Finlande*, 2001.
- [5] K. Aki et P. G. Richards. Quantitative Seismology. *Freeman and Co., New York*, 1980.
- [6] J. Albright et C. Pearson. Microseismic Activity observed during depressurisation of an oil storage cavern in rock salt. *Proc. of the 3rd Conf. in Acoustic Emission Microseismic Activity in Geological Structures and Materials*, vol. 8.
- [7] R. Allen. Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 68, p. 1521–1532, 1978.
- [8] R. Allen. Automatic phase pickers: their present use and future prospects. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 72, p. S225–S242, 1982.
- [9] D. Amitrano. Brittle-ductile transition and associated seismicity: Experimental and numerical studies and relationship with the b value. *J. Geophys. Res.*, vol. 108, 2003. doi:10.1029/2001JB000680.
- [10] D. Amitrano, S. Gaffet, J. P. Malet et O. Maquaire. Understanding mudslides through microseismic monitoring: the Super-Sauze (South-East French Alps) case study. *Bulletin De La Societe Geologique De France* 178 (2), p. 149–157, 2007.
- [11] P. Augliera, M. Cattaneo et C. Eva. Seismic multiplets analysis and its implication in seismotectonics. *Tectonophysics*, vol. 248, p. 219–234, 1995.
- [12] G. Backus et M. M.. Moment tensors and other phenomenological descriptions of seismic sources. I Continuous displacements. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, vol. 46, p. 341–361, 1976.
- [13] C. Balland et I. Contrucci. Investigations géophysiques complémentaires sur le site d'Angevillers : rapport technique. Rap. tech., INERIS, 2011.
- [14] T. Bardainne. Étude de la sismicité de Lacq et analyse des formes d'ondes par décomposition en chirplets. Thèse de doctorat, Université de Pau, 2005.
- [15] M. Bennani, J. P. Josien et P. Bigarré. Surveillance des risques d'effondrement dans l'Après-Mine, Besoins, Méthodes. *Après-mines 2003, 5-7 Février 2003, Nancy*.
- [16] S. Bernadie, G. J. P., F. Lebert et H. Fabriol. High-Frequency Hydroacoustic Monitoring in an Underground Iron Mine. *Pure and Applied Geophysics*, vol. 164, p. 177–197, 2007.
- [17] K. Besnard, G. Senfaute et A. Thoraval. Synthèse des études et travaux menés dans le contexte du bassin ferrifère lorrain. Rap. tech., INERIS, 2006.

- [18] I. Bishop, P. Styles et M. Allen. Mining-induced seismicity in the Nottinghamshire Coalfield. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, vol. 26, p. 253–279, 1993. doi:10.1144/GSL.QJEGH.1993.026.004.03.
- [19] E. Boidin. Interactions Roches / Saumures en contexte d'abandon d'exploitations souterraines de sel. Thèse de doctorat, INPL, 2007.
- [20] B. T. Brady. Anomalous Seismicity prior to Rock Bursts : Implications for Earthquake Prediction. *PAGEOPH*, vol. 115, p. 357–374, 1977.
- [21] E. Brückl et S. Mertl. eismic Monitoring of Deep-Seated Mass Movements. In *Proc. of International Symposium "Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides"*, Tokyo, Japon, 2006.
- [22] P. Bérest, B. Brouard, B. Feuga et M. Karimi-Jafari. The 1873 collapse of the Saint-Maximilien panel at the Varangéville salt mine. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 45, p. 1025–1043, 2008.
- [23] A. Buffet. The Collapse of Compagnie des Salins SG4 and SG5 Drillings. *SMRI Fall 1998 Meeting, 4-7 October 1998, Rome, Italy*, p. 79–105, 1998.
- [24] J. P. Busby, J. C. Gourry, G. Senfaute, S. Pedersen et R. Mortimore. Can we predict coastal cliff failure with remote, indirect measurements? *McInnes, R. & Jakeways, J. (eds): Instability, planning and management. London: Thomas Telford*, p. 203–208, 2002.
- [25] M. Cai, P. K. Kaiser et C. D. MARTIN. A tensile model for the interpretation of microseismic events near underground openings. *Pure Appl. Geophys.*, vol. 153, p. 67–92, 1998.
- [26] N. T. Cao. Sélection d'un échantillon d'événements et re-paramétrage du pointé automatique des ondes P et de la fin des événements enregistrés sur le site de Cerville-Buissoncourt. Rap. tech., INERIS, 2009.
- [27] N.-T. Cao, I. Contrucci, E. Klein et P. Bigarré. Evolution of microseismic activity prior to a salt cavern collapse. *EGU2011-11769*, 2011.
- [28] N.-T. Cao, E. Klein, I. Contrucci, P. Bigarré et X. Daupley. Large-scale salt cavern collapse: Multi-parameter monitoring from precursor signs to general failure. *ISRM, Eurock*, 2010.
- [29] R. Castellanza, E. Gerolymatou et R. Nova. An Attempt to Predict the Failure Time of Abandoned Mine Pillars. . *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 41.
- [30] Z. Chen, R. Stewart, H. Bland et J. Thurston. Microseismic activity and location at Turtle Mountain, Alberta. *2005 Canadian Society of Exploration Geophysicists National Convention, May 16-19. Calgary, Alberta*, p. 443–447, 2005.
- [31] C. Clément, V. Merrien-Soukatchoff, C. Dünner et J. Sausse. Écoute microsismique appliquée aux versants rocheux instables, exemple des Rochers de Valabres (06). *Actes des journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur 2006, 27-29 juin 2006, Lyon*, 2006.
- [32] Y. F. Contoyiannis, P. G. Kapiris et K. A. Eftaxias. Monitoring of a preseismic phase from its electromagnetic precursors. *Physical Review E.*, vol. 71, 2005.
- [33] I. Contrucci, N.-T. Cao, E. Klein, X. Daupley et P. Bigarré. Real-time monitoring of a salt solution mining cavern: view from microseismic and levelling monitoring. *EGU2010-12256*, 2010.
- [34] I. Contrucci, E. Klein, P. Bigarré, A. Lizeur, A. Lomax et M. Bennani. Management of Post-mining Large-scale Ground Failures: Blast Swarms Field Experiment for Calibration of Permanent Microseismic Early-warning Systems. *Pure and Applied Geophysics*, vol. 167, p. 43–62, 2009.
- [35] I. Contrucci, E. Klein, N.-T. Cao, X. Daupley et P. Bigarré. Multi-parameter monitoring of a solution mining cavern collapse: First insight of precursors. *C.R. Geosciences*, vol. 343, 2010. doi:10.1016/j.crte.2010.10.007.
- [36] S. Couffin, P. Bigarré, M. Bennani et J. P. Josien. Permanent real time microseismic monitoring of abandoned mines for public safety. *Field Measurements in Geomechanics - Proceedings of the 6th International Symposium, Oslo, Norway, 23-26 September 2003*, p. 437–444, 2003.

- [37] N. Cuenot, M. Frogneux, C. Dorbath et M. Calo. Induced Microseismic Activity During Recent Circulation Tests at the EGS Site of Soultz-sous-Forêts (France). *Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 31 - February 2, 2011*.
- [38] X. Daupley, R. Fabriol, I. Contrucci, S. Bernardie, N. T. Cao, P. Jousset, E. Kein, F. Lebert et B. Bazargan. Multiparameter monitoring of a salt cavern collapse (Cerville-Buissoncourt site, France). *EGU2010-12256*, 2010.
- [39] X. Daupley, R. Fabriol, I. Contrucci, S. Bernardie, N. T. Cao, F. Lebert, L. Cauvin, P. Jousset, E. Kein et B. Bazargan. Suivi expérimental multi-paramètres de l'effondrement d'une cavité saline : site de Cerville-Buissoncourt. *Actes des journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG 2010), 7-9 juillet 2010b, Grenoble. Grenoble : Grenoble-INP, 2010, tome I*, p. 411–418.
- [40] X. Daupley, F. Laouafa et I. Contrucci. Analyse des mécanismes conduisant à l'effondrement d'une cavité saline - Retour d'expérience du suivi expérimental multiparamètres de la cavité de Cerville-Buissoncourt. *Article Tome III Méca. Roche.*, 2011.
- [41] X. Daupley et F. Laouafa. Auscultation microsismique, tachéométrique et suivi des émissions de gaz de la cavité saline de Cerville-Buissoncourt (Concession de la société Solvay, 54). *Rap. tech., INERIS*, 2007.
- [42] O. Deck. Étude des conséquences des affaissements miniers sur le bâti. Propositions pour une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité du bâti. Thèse de doctorat, INPL, 2002.
- [43] D. Didier. La politique française de prévention des risques liés à l'après-mine. 2007.
- [44] M. S. Diederichs, P. K. Kaiser et E. Eberhardt. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 41, p. 785–812, 2004.
- [45] P. Dight. Tactical versus strategic monitoring of open pit mines. . *Australian Centre for Geomechanics. Newsletter*, vol. 32, p. 14–15, 2009.
- [46] L. Driad-Lebeau, X. Daupley et D. E. Mercerat. Suivi d'une cavité saline jusqu'à son effondrement : analyse microsismique. *Actes des journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG 2008), 18-20 juin 2008, Nantes. Paris : LCPC*, p. 313–320, 2008.
- [47] L. Driad-Lebeau, F. Lahaie, M. Al-Heib, J. P. Josien, P. Bigarré et J. F. Noirel. Seismic and geotechnical investigations following a rockburst in a complex French mining district. . *International Journal of Coal Geology*, vol. 64, p. 66–78, 2005.
- [48] J. Eisenblätter, G. Manthei et D. Meister. Monitoring of Micro-crack Formation around Galleries in Salt Rock. *Proc. Sixth Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, Pennsylvania State University, University Park, PA., USA, Ed. H.R. Hardy Jr., Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, S.*, p. 227–243, 1998.
- [49] EOST Strasbourg. Prédiction sismique, Document pédagogique, <http://eost.unstrasbg.fr/pedago/Accueil.html>. *Rap. tech.*
- [50] B. Feuga. Le sel, un matériau particulier, des accidents spectaculaires. *Géosciences*, n° 9, p. 86–95, 2009.
- [51] B. Feuga. Les effondrements dus à l'exploitation du sel. *Revue du BRGM*, n° 9, p. 86–95, 2009.
- [52] E. Fortier, C. Maisons et P. Renoux. Seismic monitoring of underground storage in salt cavity in a seismo-tectonic context. *Proc. of Solution Mining Research Institute, Brussel, Belgium*, 2006.
- [53] J. Fougeron. Affaissement et effondrement des mines de fer de Lorraine. Apport de la modélisation numérique. Thèse de doctorat, INPL, 2007.
- [54] J. Fréchet. Sismogénèse et doublet sismique. Thèse de doctorat, Université J. Fourier, Grenoble, 1985.

- [55] V. Frid et K. Vozoff. Electromagnetic radiation induced by mining rock failure. *In International Journal of Coal Geology*, vol. 64, p. 57–65, 2005.
- [56] R. Fritschen. Mining-induced Seismicity in the Saarland, Germany. *Pure and Applied Geophysics*, vol. 167, p. 77–89, 2010.
- [57] S. J. Gibowicz. Seismic doublets and multiplets at Polish coal and copper mines. *Acta Geophysica*, vol. 54, p. 142–157, 2006.
- [58] S.-J. Gibowicz et A. Kijko. *An Introduction to Mining Seismology*. International geophysics series. Academic Press, 1994.
- [59] J. L. Got, J. Fréchet et F. W. Klein. Deep fault plane geometry inferred from multiplet relative relocation beneath the south flank of Kilauea. *J. Geophys. Res.*, vol. 99, p. 15375–15386, 1994.
- [60] B. Gutenberg et C. F. Richter. Seismicity of the earth and associated phenomena. *Princeton, University Press*, 1954.
- [61] A. Helmstetter et S. Garambois. Seismic monitoring of Séchilienne rockslide (French Alps): Analysis of seismic signals and their correlation with rainfalls. *J. Geophys. Res.*, vol. 115, 2010. doi:201010.1029/2009JF001532.
- [62] C. Henry, J. H. Woodhouse et S. Das. Stability of earthquake moment tensor inversions: effect of the double-couple constraint. *Tectonophysics*, vol. 356, p. 115–124, 2002.
- [63] O. Hernandez. Recollement des données d'entrée pour le traitement automatique des données microsismiques de Cerville sur SYTMISAuto. Rap. tech., INERIS, 2008.
- [64] C. Hibert, G. Grandjean, A. Bitri, J. Travelletti et J. P. Malet. Characterizing landslides through geophysical data fusion: Example of the La Valette landslide (France). *Engineering Geology. ENGEO-03229*, 2011.
- [65] F. Homand. Caractérisation physique et mécanique du sondage Cerville 3129. Rap. tech., LAEGO-ENSG. LG.FH.SOL.PSI.RPRE.02.05.12A, 2003.
- [66] M. Hossaini et S. Behraftar. Geotechnical Risk Assessment in Kerman Coal Mine - Central Iran. *Underground Coal Operators' Conference. University of Wollongong. 12-13 February 2009*, p. 320–328.
- [67] M. Hudyma, M. Pfitzner et U. Singh. Monitoring cave related seismicity at Ridgeway Gold Mine. *Australian Centre For Geomechanics Newsletter*, p. 10–12, 2004.
- [68] S. Husen, E. Kissling, N. Deichmann, S. Wiemer, D. Giardini et M. Baer. Probabilistic earthquake location in complex three-dimensional velocity models: Application to Switzerland. *J. Geophys. Res.*, vol. 108, 2003. doi:10.1029/2002JB001778.
- [69] A. T. Iannacchione, G. S. Esterhuizen et T. S. Bajpayee. Characteristics of Mining-Induced Seismicity Associated with Roof Falls and Roof Caving Events. *Proceedings of the 40th U.S. Symposium on Rock Mechanics, ARMA/USRMS paper 05-678, Anchorage, AK, June 27-29, 2005*.
- [70] K. S. Johnson. Subsidence hazards due to evaporite dissolution in the United States. *Environmental Geology*, vol. 48, p. 395–409, 2005. doi:10.1007/s00254-005-1283-5.
- [71] J. P. Josien. Surveillance de la stabilité d'une excavation par des mesures de déformation. Choix d'une méthode d'alarme. *Annales des Mines*, 1977.
- [72] E. Kissling, W. L. Ellsworth, D. Eberhart-Phillips et U. Kradolfer. Initial reference models in local earthquake tomography. *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*, vol. 99, p. 19635–19646, 1994. doi:10.1029/93JB03138.
- [73] E. Klein, I. Contrucci, N.-T. Cao et P. Bigarré. Real-time monitoring of a salt solution mining cavern: from precursory signs to signs to general collapse. *AGU, 90(52), Fall Meet. Suppl., Abstract S32B-06*, 2009.

- [74] E. Klein, I. Contrucci, X. Daupley, O. Hernandez, P. Bigarré, C. Nadim et L. Cauvin. Experimental monitoring of a solution-mining Cavern in Salt: identifying and analyzing early-warning signals prior to collapse. *SMRI Fall 2008 Technical Conference, 12-15 October 2008, Galveston (Austin), Texas, USA*, p. 135–146, 2008.
- [75] P. Knoll, G. Kowalle, K. Rother, B. Schreiber et I. Paskaleva. Analysis of microtremors within the Providia region near a salt leaching mine. *Pure Appl. Geophys.*, vol. 147.
- [76] R. Kobayashi et I. Nakanishi. Application of genetic algorithms to focal mechanism determination. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 21, p. 729–732, 1994.
- [77] N. Köhler, T. Spies et T. Dahm. Seismicity patterns and variation of the frequency-magnitude distribution of microcracks in salt. *Geophysical Journal International*, vol. 179, p. 489–499, oct. 2009. doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04303.x.
- [78] G. Kwiatek. A search for sequences of mining-induced seismic events at the Rudna Copper Mine in Poland. *Acta Geophysica Polonica*, vol. 52, p. 155–171, 2004.
- [79] X. P. Lai, M. F. Cai et M. W. Xie. In situ monitoring and analysis of rock mass behavior prior to collapse of the main transport roadway in Linglong Gold Mine, China. . *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 43, p. 640–646, 2006.
- [80] X. L. Lei et T. Satoh. Indicators of critical point behavior prior to rock failure inferred from pre-failure damage. *Tectonophysics*, vol. 431, p. 97–111, 2007.
- [81] R. Lippitsch, R. White et H. Soosalu. Precise hypocentre relocation of microearthquakes in a high-temperature geothermal field: The Torfajökull central volcano, Iceland. *Geophys. J. Int.*, vol. 160, p. 370–387, 2005.
- [82] R. F. Liu, J. P. Dang, S. D. Fang et P. Chen. Linear inversion of seismic moment tensors of general point source by using generalized ray theory. *Acta Seismologica Sinica*, vol. 10, p. 253–259, 1997.
- [83] A. Lizeur. Rapport de développement informatique - SYTMISView version 2.40. Rap. tech., INERIS, 2006.
- [84] A. Lizeur. Revue de conception relative à l'implémentation d'un algorithme de localisation 3d sur le logiciel SYTMISauto v6.00. Rap. tech., INERIS, 2011.
- [85] C.-I. Lizeur, A.. Cahier des charges pour l'implémentation d'un algorithme de localisation 3D sur le logiciel SYTMISauto v4.00. Rap. tech., INERIS, 2006.
- [86] A. Lomax et A. Curtis. Fast probabilistic earthquake location in 3D models using oct-tree importance sampling. *European Geophysical Society, Nice*, 2001.
- [87] A. Lomax, A. Zollo, P. Capuano et J. Virieux. Precise, absolute earthquake location under Somma-Vesuvius volcano using a new 3D velocity model. *Geophys. J. Int.*, vol. 146, p. 313–331, 2001.
- [88] J. Loohuis et T. Van-Eck. Simultaneous focal mechanism and stress tensor inversion using a genetic algorithm. *Phys. Chem. Earth*, vol. 21, p. 267–271, 1996.
- [89] C. Maisons, E. Fortier et M. Valette. Induced Microseismicity and Procedure for Closure of Brine Production Caverns. *Pure and Applied Geophysics*, vol. 150, p. 585–603, 1997. doi:10.1007/s000240050094.
- [90] C. Maisons, E. Fortier et M. Valette. Induced Microseismicity and Procedure for Closure of Brine Production Caverns. *Pure and Applied Geophysics*, vol. 150, p. 585–603, 1997.
- [91] T. Martin-Crespo et D. Gomez-Ortiz. Collapse hazard assessment in evaporitic materials from ground penetrating radar: a case study. *Environ. Geol.*, vol. 53, p. 57–66, 2007.
- [92] S. Maxwell. A Brief Guide to Passive Seismic Monitoring. *2005 CSEG National Convention*, 2005.
- [93] A. McGarr, J. Bicknell, E. Sembera et R. Green. Analysis of exceptionally large tremors in two gold mining districts of South Africa. *Pure Appl. Geophys.*, vol. 129.

- [94] S. D. McKinnon. Triggering of Seismicity Remote from Active Mining Excavations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 39, p. 255–279, 2006.
- [95] T. I. Melbourne et F. H. Webb. Precursory transient slip during the 2001 $M_w = 8.4$ Peru earthquake sequence from continuous GPS. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 29, 2002.
- [96] D. E. Mercerat, X. Daupley, L. Cauvin et C. Lagny. Pr evision du premier effondrement   l'amont des pistes 2100 et 2200 dans la concession de Cerville-Buissoncourt. Rap. tech., INERIS, 2003.
- [97] E. D. Mercerat. Sismicité induite et Mod elisation numérique de l'endommagement dans un contexte salin. Thèse de doctorat, INPL, 2007.
- [98] E. D. Mercerat, L. Driad-Lebeau et P. Bernard. Induced Seismicity Monitoring of an Underground Salt Cavern Prone to Collapse. *Pure and Applied Geophysics*, vol. 167, f v. 2010. doi:10.1007/s00024-009-0008-1.
- [99] J. R. Moore, J. W. Sanders, K. M. Cuffey, J. R. Haught et S. D. Glaser. Seismic Monitoring of Rockfall, Helmet Mountain, British Columbia. *Proceedings, First Canada - U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada*, vol. vol. 1, p. 895–900, May 2007.
- [100] H. Moriya, T. Fujita, H. Niitsuma, J. Eisenbl tter et G. Manthei. Analysis of fracture propagation behavior using hydraulically induced acoustic emissions in the Bernburg salt mine, Germany. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 43, p. 49–57, 2006. doi:10.1016/j.ijrmms.2005.04.003.
- [101] T. Moser, T. Van-Eck et G. Nolet. Hypocenter determination in strongly heterogeneous earth models using the shortest path method. *J. Geophys. Res.*, vol. 97, p. 6563–6572, 1992.
- [102] T. Nagao, Y. Enomoto, Y. Fujinawa, M. Hata, M. Hayakawa, Q. Huang, J. Izutsu, Y. Kushida, K. Maeda et K. Oike. Electromagnetic anomalies associated with 1995 Kobe earthquake. *J. of Geodynamics*, vol. 33, p. 401–411, 2002.
- [103] R. Nothnagel. Mod elisation des instabilités en Mécanique des Roches - Application   l'exploitation de la concession de Drouville. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2003.
- [104] H. Ogasawara, Y. Kuwabara, T. Miwa, K. Fujimori, N. Hirano et M. Koizumi. Post-seismic Effects of an M 7.2 Earthquake and Microseismicity in an Abandoned, Flooded, Deep Mine. *Pure and Applied Geophysics*, vol. 159, p. 063–090, 2002.
- [105] T. Ondoh et M. Hayakawa. Synthetic study of precursory phenomena of the M7.2 Hyogo-ken Nanbu earthquake. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 31, p. 378–388, 2006. doi:10.1016/j.pce.2006.02.017.
- [106] W. D. Ortlepp. Observation of mining-induced faults in an intact rock mass at depth. *Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 37, p. 423–436, 1999.
- [107] V. Oye, H. Bungum et M. Roth. Source parameters and scaling relations for mining-induced seismicity within the Pyh salmi Ore Mine, Finland. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 95.
- [108] W. C. Phillips, D. C. Pearson, C. L. Edwards et B. W. Stump. Microseismicity induced by a controlled, mine collapse at White Pine, Michigan. *In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 34.
- [109] J. P. Piguet et F. Wojtkowiak. Affaissements et déformations au-dessus des exploitations minières : Mécaniques et évolution dans le temps. *Mines et Carri res - Industrie Minérale*, 2001.
- [110] B. Piwakowski, L. Driad-Lebeau et A. Kosecki. High resolution seismic investigations in salt mining context. *EAGE, Near Surface, Helsinki, Finland*, 2006.
- [111] K. Plenkers, G. Kwiatek, M. Nakatani et G. Dresen. Observation of Seismic Events with Frequencies $f > 25$ kHz at Mponeng Deep Gold Mine, South Africa. *Seismological Research Letters*, vol. 81, p. 467–479, 2010. doi:10.1785/gssrl.81.3.467.

- [112] M. Plouffe, P. Mottahed, D. Lebel et M. Côté. Monitoring of large mining induced seismic events - CANMET/MRL's contribution. *Rockbursts and seismicity in mines 93: proceedings of the 3rd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, Kingston, Ontario, Canada, 16-18 August 1993*.
- [113] N. Poirot. Conséquences de l'exploitation de sel sur la concession de Cerville-Buissoncourt (54). Volet relatif aux mouvements de terrain. Rap. tech., INERIS, 2007.
- [114] Y. Potvin. High resolution microseismic monitoring is shedding new light into caving mechanisms. *Australian Centre for Geomechanics. Newsletter*, vol. 32, p. 1–4, 2009.
- [115] G. Poupinet, W. Ellsworth et J. Fréchet. Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: an application to the Calaveras fault, California. *J. Geophys. Res.*, vol. 89, p. 5719–5731, 1994.
- [116] G. Poupinet, W. L. Ellsworth et J. Fréchet. Monitoring velocity variations In the crust using earthquake doublets: an application to the Calaveras faults, California. *J. Geophys. Res.*, vol. 89, p. 5719–5731, 1984.
- [117] D. Presti, C. Troise et G. D. Natale. Probabilistic location of seismic sequences in heterogeneous media. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 94, p. 2239–2253, 2004.
- [118] S. A. Pulinets. Space technologies for short-term earthquake warning. *Advances in Space Research*, vol. 37, p. 643–652, 2006.
- [119] M. Roth, M. Dietrich, L. Blikra et I. Lecomte. Seismic monitoring of the unstable rock slope site at Åknes, Norway. *19th annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP), April 2-6 2006, Seattle, Washington, 2006*.
- [120] G. Senfaute, M. K. Abdul-Wahed, J. P. Piguet et J. P. Josien. Qualification of the microseismic monitoring technique applied to the risk of collapse or iron mines. *ISRM, Eurock*, p. 597–602, 2000.
- [121] G. Senfaute, M. K. Abdul-Wahed, J. P. Piguet et J. P. Josien. Technique d'écoute microsismique appliquée au risque d'effondrement dans les mines du bassin ferrifère lorrain. *Revue Française de Géotechnique*, vol. 92, p. 57–62, 2000.
- [122] G. Senfaute, C. Chambon et P. Bigarré. Spatial distribution of mining tremors and the relationship to rockburst hazard. *Pure Appl. Geophys.*, vol. 150, p. 451–459, 1997.
- [123] G. Senfaute, V. Merrien-Soukatchoff, J. Morel et J. C. Gourry. Microseismic monitoring applied to prediction of chalk cliffs collapses and contribution of numerical modelling. *International Conference on Fast slope movements-prediction and prevention for risk mitigation, 14th-16th May 2003, Sorrento Italy, 2003*.
- [124] G. Senfaute et J. Wassermann. Étude de l'activité microsismique enregistrée sur le site de Tresange pendant les expérimentations d'ennoyage et de dénoyage. Rap. tech., INERIS, 2003.
- [125] J. A. Sethian. Level set methods and fast marching methods. *Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1999*.
- [126] J. Sileny et A. Milev. Seismic mechanism of mining induced seismic events - Resolution of double couple and non double couple models. *Tectonophysics*, vol. 456, p. 3–15, 2008.
- [127] SOLVAY S.A. Les sondages. *Usine de Dombasle sur Meurthe, 1998*.
- [128] T. Spillmann, H. Maurer, A. G. Green, B. Heincke, H. Willenberg et S. Husen. Microseismic investigation of an unstable mountain slope in the Swiss Alps. *J. Geophys. Res.*, vol. vol. 112, 2007.
- [129] S. Spottiswoode et A. Milev. The use of waveform similarity to define planes of mining induced seismic events. *Tectonophysics*, vol. 289, p. 51–60, 1998.
- [130] C. Srinivasan, S. K. Arora et S. Benady. Precursory monitoring of impending rockbursts in Kolar gold mines from microseismic emissions at deeper levels. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 36, p. 941–948, 1999.

- [131] J. Suffert, G. Grandjean et A. Bitri. Étude d'une cavité saline par méthodes sismiques. Rap. de Stage, BRGM-EOST, RP-54531-FR, 2006.
- [132] E. Surinach, I. Vilajosana, G. Khazaradze, B. Biescas, G. Furdada et J. M. Vilaplana. Seismic detection and characterization of landslides and other mass movements. *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 5, p. 791–798, 2005.
- [133] T. Szwedzicki. Geotechnical precursors to large scale ground collapse in mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 38, p. 957–965, 2001.
- [134] T. Szwedzicki. Rock mass behaviour prior to failure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 40, p. 573–584, 2003.
- [135] T. Szwedzicki. Warning signs to geotechnical failure of mining structures. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, vol. 18, p. 150–163, 2004. doi:10.1080/13895260412331295402.
- [136] S. Talebi, T. J. Boone et J. E. Eastwood. Injection-induced microseismicity in Colorado shales. *Pure Appl. Geophys.*, vol. 153, p. 95–111, 1998.
- [137] A. Tarantola. Inverse problem theory and methods for model parameter estimation. *SIAM*, 2005.
- [138] A. Tarantola et B. Valette. Generalized Nonlinear Inverse Problems Solved Using the Least Squares Criterion. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, vol. 20, p. 219–232, 1982.
- [139] E. Tincelin et P. Sinou. Effondrements brutaux et généralisés (coups de toit). *Revue de l'Industrie Minérale*, 1962.
- [140] C. I. Trifu et V. Shumila. Microseismic Monitoring of a Controlled Collapse in Field II at Ocnele Mari, Romania. *Pure and Applied Geophysics*, vol. 167, p. 27–42, fév. 2008. doi:10.1007/s00024-009-0013-4.
- [141] A. Udías. Principles of seismology. *Cambridge University Press*, 1999.
- [142] T. I. Urbancic, C. I. Trifu, J. M. Long et R. P. Young. Space-time correlations of b values with stress release. *Pure Appl. Geophys.*, vol. 139, p. 449–462, 1992.
- [143] G. Vouille et B. Humbert. Caractéristiques Mécaniques de la Dolomie de Beaumont. Rap. tech., CGES, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1995.
- [144] W. R. Walter, F. Heuze et D. Dodge. Seismic Signals from Underground Cavity Collapses and Other Mining-Related Failures. *Research symposium on monitoring a comprehensive test ban treaty, Orlando, FL (United States), 23-25 Sep 1997*.
- [145] T. Waltham, H. D. Park, J. Suh, M. H. Yu, H. H. Kwon et K. M. Bang. Collapses of old mines in Korea. *Engineering Geology*, p. 29–36, 2010. doi:10.1016/j.enggeo.2010.11.007.
- [146] G. Wang, P. K. Kaiser et P. Vasak. Modeling of mining-induced seismicity migration. . *Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, Toronto, May 2009*. Éd. by Diederichs, M. & Grasselli, G. 11 pages.
- [147] J. Wassermann et M. Ohrnberger. Automatic hypocenter determination of volcano induced seismic transients based on wavefield coherence - an application to the 1998 eruption of Mt. Merapi, Indonesia. *J. Volcanol. Geoth. Research*, vol. 110, p. 57–77, 2001.
- [148] J. Weiss. The Role of Attenuation on Acoustic Emission Amplitude Distributions and b-Values. *BSSA*, vol. 87, p. 1362–1367, 1997.
- [149] S. A. Wessels, A. De La Pena, M. Kratz, S. Williams-Stroud et T. Jbeili. Identifying faults and fractures in unconventional reservoirs through microseismic monitoring. *In First Break*, vol. 29, p. 99–104, 2011.
- [150] J. Whyatt et F. Varley. Catastrophic Failures of Underground Evaporite Mines. *Proceedings of the 27th International Conference on Ground Control in Mining, July 29 - July 31, 2008, Morgantown, West Virginia*.

- [151] G. H. Wust-Bloch et M. Joswig. Pre-collapse identification of sinkholes in unconsolidated media at Dead Sea area by "nanoseismic monitoring" (graphical jackknife location of weak sources by few, low-SNR records). *Geophysical Journal International*, vol. 167, p. 1220–1232, 2006.
- [152] C. Yaltirak, T. Yalcin et G. Yuce. Water-level changes in shallow wells before and after the 1999 Izmit and Duzce earthquakes and comparison with long-term water-level observations (1999-2004), NW Turkey. *Turk J. Earth Sci.*, vol. 14, p. 281–309, 2005.
- [153] R. P. Young, Maxwell, T. I. S. C., Urbancic et B. Feignier. Mining-induced Microseismicity: Monitoring and Applications of Imaging and Source Mechanism Techniques. *PAGEOPH*, vol. 139, p. 697–719, 1992.
- [154] R. P. Young, S. Talebi, D. A. Hutchins et T. I. Urbancic. Analysis of Mining-Induced Microseismic Events at Strathcona Mine, Sudbury, Canada. . *PAGEOPH*, vol. 129.
- [155] B. Zmazek, M. Zivcic, L. Todorovski, S. Dzeroski, J. Vaupotic et I. Kobal. Radon in soil gas: How to identify anomalies caused by earthquakes. *Applied Geochemistry*, vol. 20, p. 1106–1119, 2005.
- [156] A. Zollo, W. Marzocchi, P. Capuano, A. Lomax et G. Iannaccone. Space and Time Behavior of Seismic Activity at Mt. Vesuvius Volcano Southern Italy. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 92, p. 625–640, 2002.

Rapports annuels du GISOS, de 2004 à 2010.

Annexes

Annexes

A	Site Pilote de Cerville-Buissoncourt	194
A.1	Log géologique	194
A.2	Caractéristiques techniques des géophones	195
B	Signature des événements microsismiques	196
B.1	Nombre de déclenchement par sonde	196
B.2	Amplitude	197
B.3	Énergie au capteur	206
B.4	Fréquences fondamentales apparentes	213
B.4.1	Parasites	213
B.4.2	Influence de la présence d'une onde S	218
B.4.3	Évolution des fréquences apparentes sur l'ensemble des enregistrements	221
B.4.4	Fréquences des signaux pointés	226
B.4.5	Comparaison entre l'évolution des Amplitudes, Énergies au capteur et Fréquences des Événements	228
B.4.6	Paramètre β	230
C	Localisation des événements microsismiques	233
C.1	Méthode de localisation absolue	233
C.1.1	Options supplémentaires pour la localisation dans le module SYT-MISauto	233
C.2	Calibrage de la localisation	235
C.2.1	Analyse de polarisation des tirs de calage	235
C.2.2	Modèles de vitesses obtenus suite aux différents tests	241
C.2.3	Modèle de vitesse retenu	244
C.3	Influence des données d'entrée pour la localisation 2D	249
C.3.1	Écarts entre les diverses localisations	249
C.3.2	Qualité des localisations	253
C.3.3	Tests sur la sonde M6.2	258
C.3.4	Tests avec les ondes S	265
C.4	Analyse de l'évolution spatio-temporelle des foyers microsismiques	266
C.4.1	Distribution des événements par rapport à l'axe radial de la cavité	266
C.4.2	Évolution du rayon quadratique du nuage d'événements	268
C.4.3	Localisations avec les modèles de vitesse évolutifs	270
C.4.4	Évolution des localisations par tranche horaire	274

A Site Pilote de Cerville-Buissoncourt

A.1 Log géologique

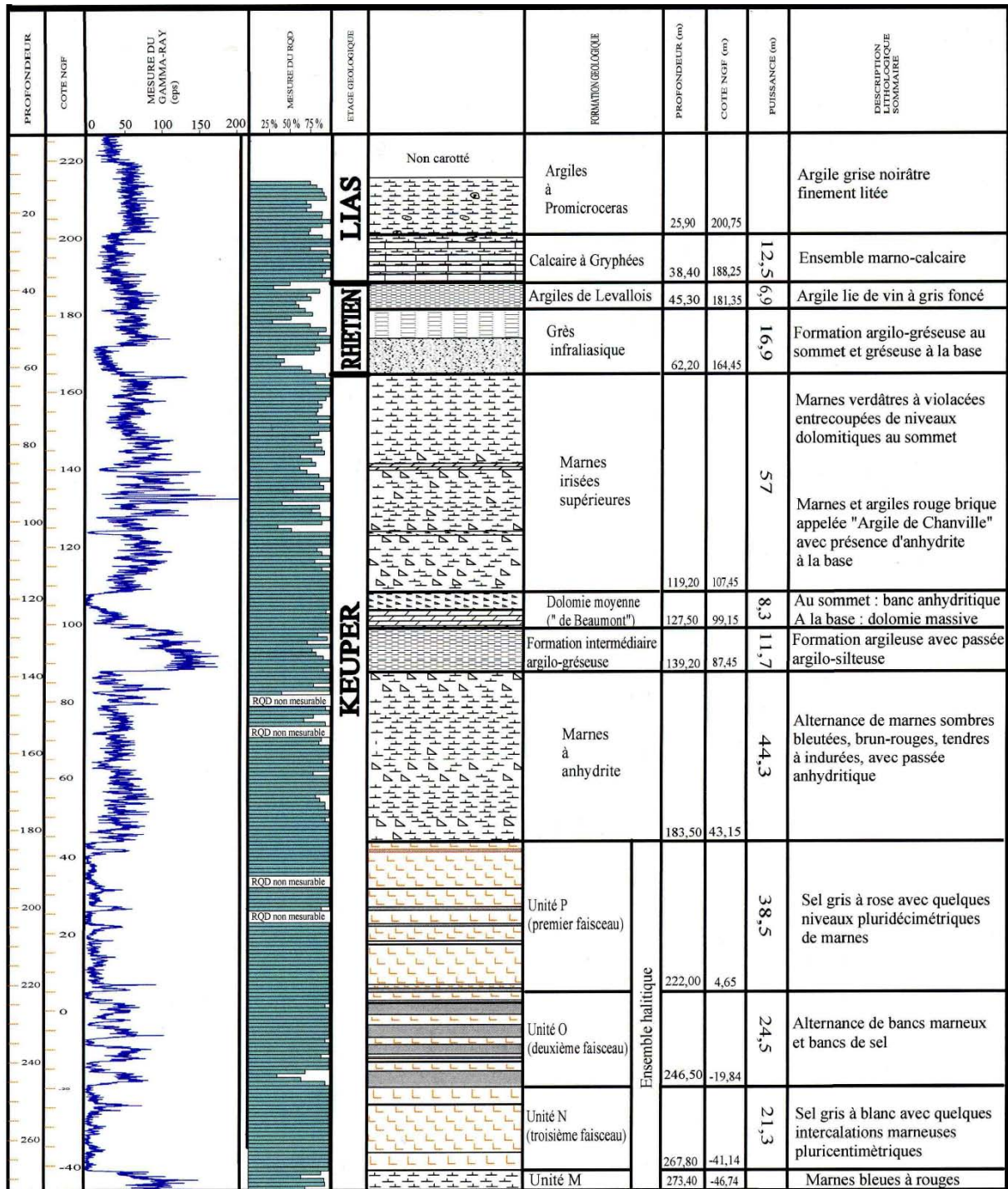


FIGURE A.1 – Log géologique issu du sondage carotté 3129, situé à 140 m de la piste 2200, et mesures gamma-ray et RQD (Rock Quality Designation) associées.

A.2 Caractéristiques techniques des géophones



GS-20DH



GS-20DH
Subminiature Geophone

- >> Clean response to 400 Hz
- >> High frequency, high output
- >> Works in any position
- >> Low cost, long life
- >> Full one year warranty

- G** The GS-20DH is a high frequency, high output, digital grade geophone designed for long life and reliable service. The Space manufacturing process includes checking of geophone operating parameters with the ATS, an automated computerized test system.
- G** Natural frequencies are 28 to 40 Hz. Coil resistances are 365, 600 and 1000 ohms. Open circuit damping is 57% for the 28 Hz unit and 40% for the 40 Hz unit. The PC-21 Land Case is used with the GS-20DH geophone.

GS-20DH Specifications	
Natural Frequency	28 and 40 Hz ±5%
Frequency Tolerance with Tilt	± 1.6 Hz @ 25° (28 Hz) ± 2.2 Hz @ 25° (40 Hz)
Typical Spurious Frequency	>400 Hz
Standard Coil Resistance @ 25°C	600 Ohms ±5%
Intrinsic Voltage Sensitivity with 600 Ohm Coil	.90 V/in/sec (.354 V/cm/sec) ±10%
Normalized Transduction Constant (V/in/sec)	.037(sq.root of Rc)
Open Circuit Damping	.57 @ 28 Hz & .40 @ 40 Hz ±10%
Optional Coil Resistances	365, 1000 Ohms ±5%
Moving Mass	7.1 g ±10%
Typical Case to Coil Motion P-P	.06 in (.15 cm)
Harmonic Distortion with driving velocity of 0.7 in/sec (1.8 cm/sec) P-P	0.2% or less @ fn
Dimensions:	
Height: (less terminals*)	1.32 in (3.35 cm)
Diameter:	1.06 in (2.69 cm)
Weight:	3.5 oz (99)
* Terminal Height is .16 inches	

B Signature des événements microsismiques

B.1 Nombre de déclenchement par sonde

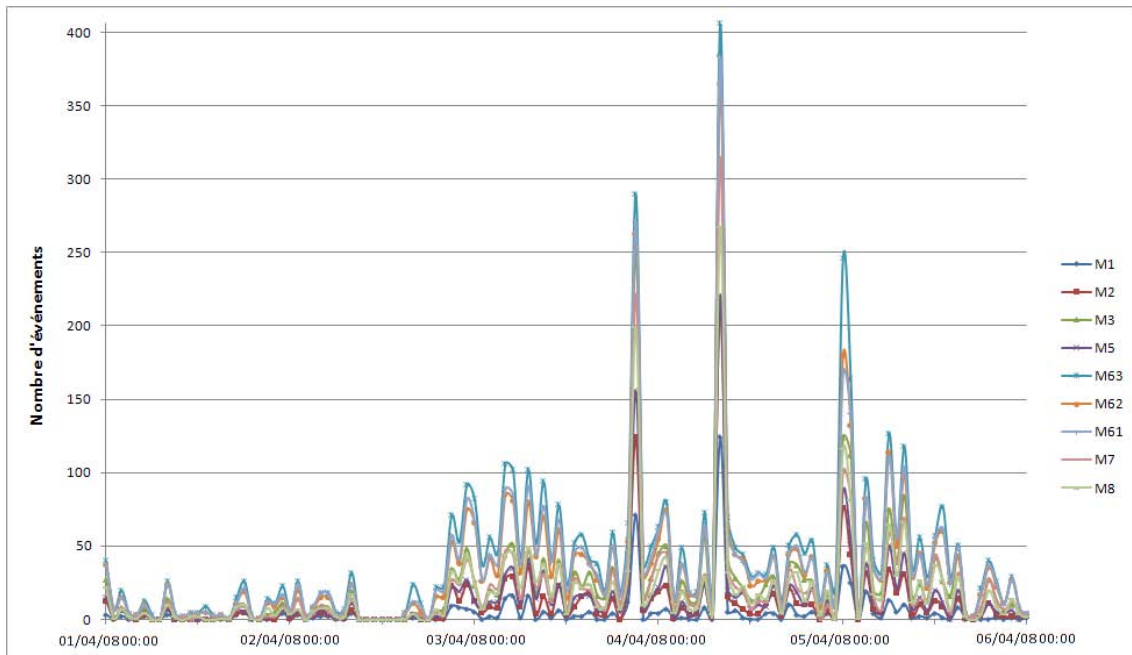


FIGURE B.2 – Nombre d'événements déclenchés par heure et par sonde entre les 01 et 06/04/08.

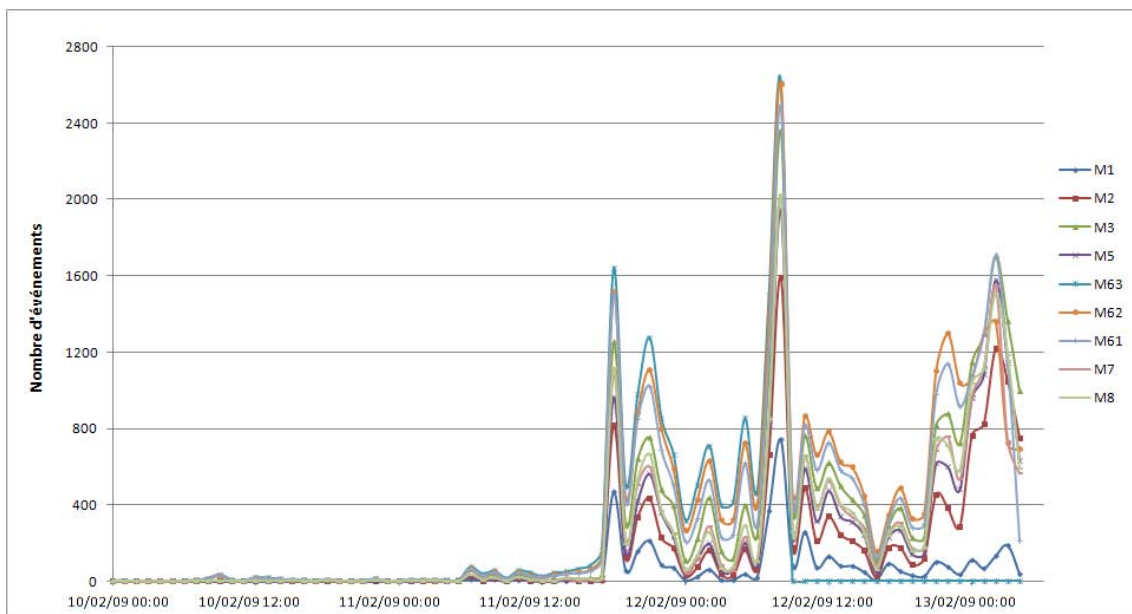


FIGURE B.3 – Nombre d'événements déclenchés par heure et par sonde entre les 10 et 13/02/09 à 05h TU. La sonde M6.3 est HS à partir du 12/02/09 à 08h43.

B.2 Amplitude

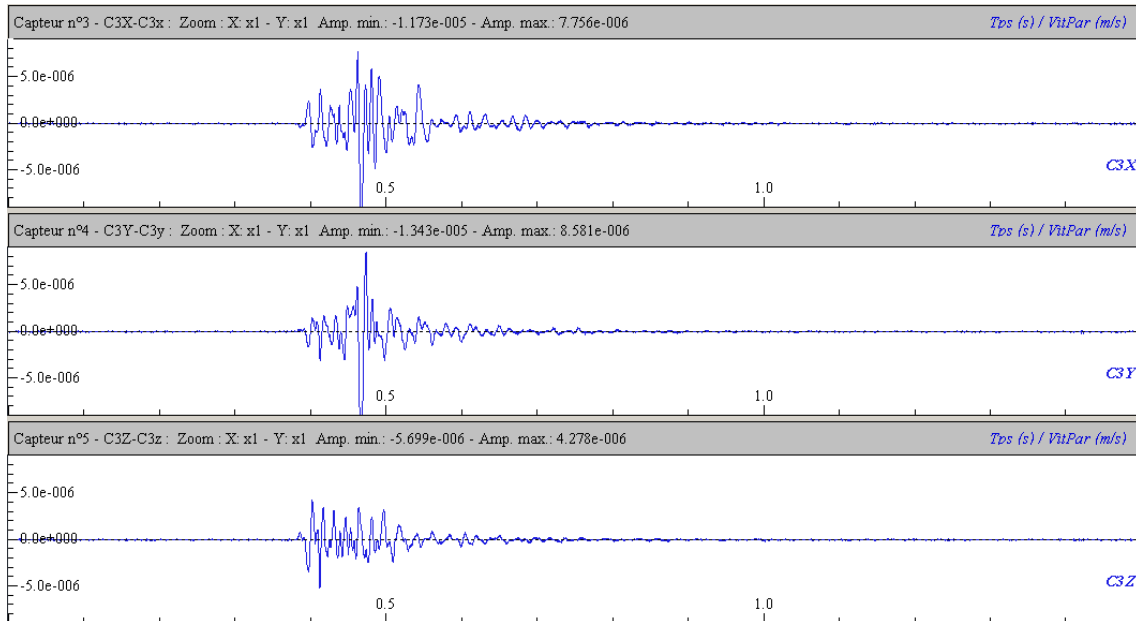


FIGURE B.4 – Exemple de signaux sur la sonde M3 : l'amplitude sur la voie verticale est deux fois plus faible que celles des voies horizontales.

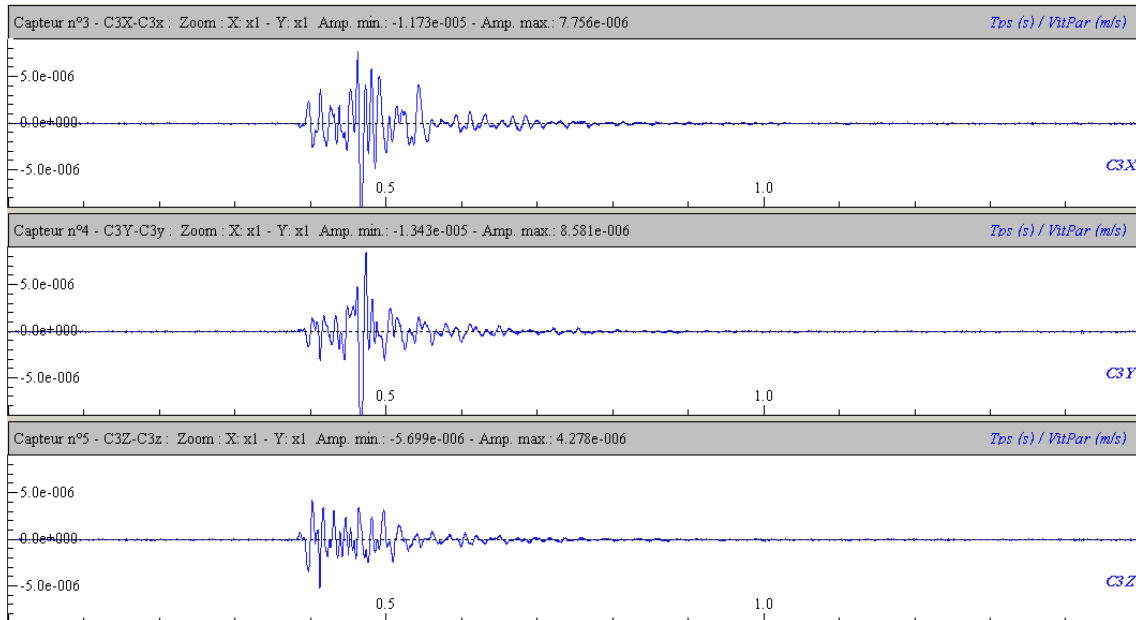


FIGURE B.5 – Exemple de signaux sur la sonde M63 : l'amplitude sur la voie verticale est ici quatre fois plus élevée que celles des voies horizontales.

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques

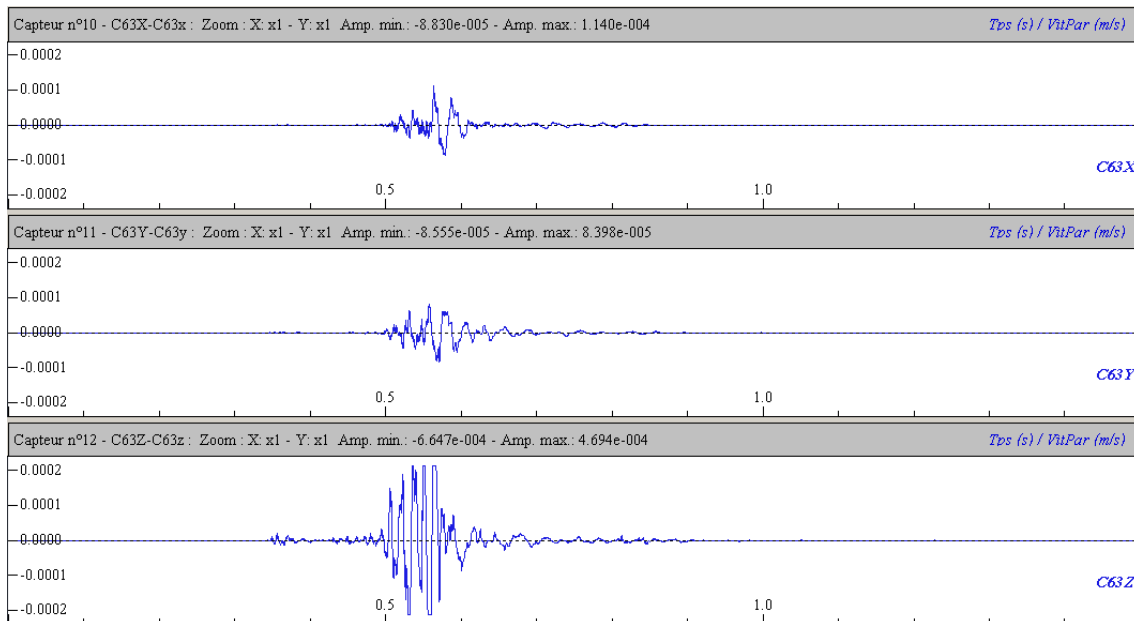


FIGURE B.6 – Événement du 10/02/09 à 19:04:08, enregistré sur la sonde M6.3.

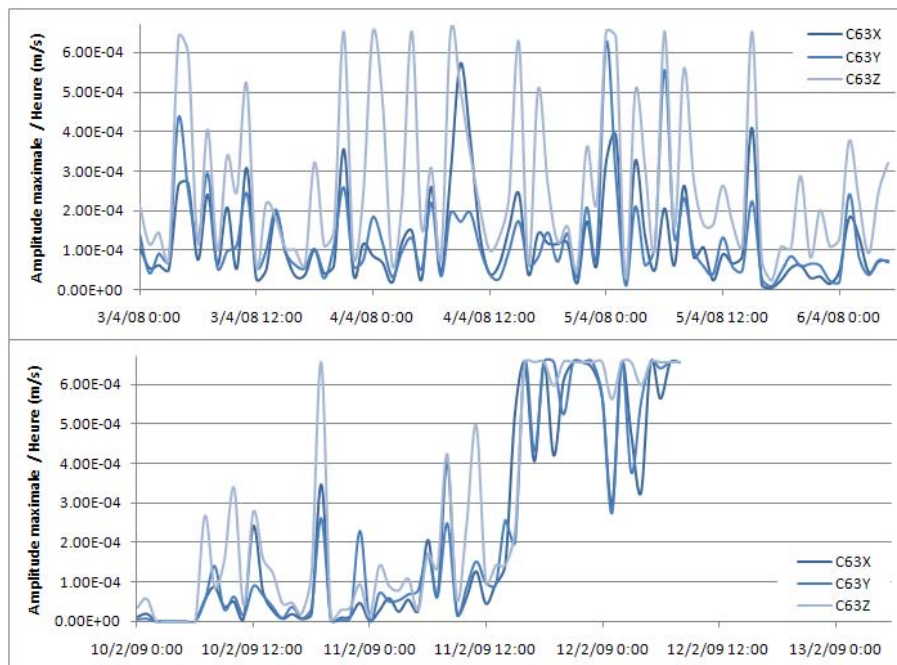


FIGURE B.7 – Évolution de l'amplitude maximale enregistrée au niveau des trois voies de la sonde M6.3 entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et du 10 au 13/02/09 (en bas).

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMIQUES

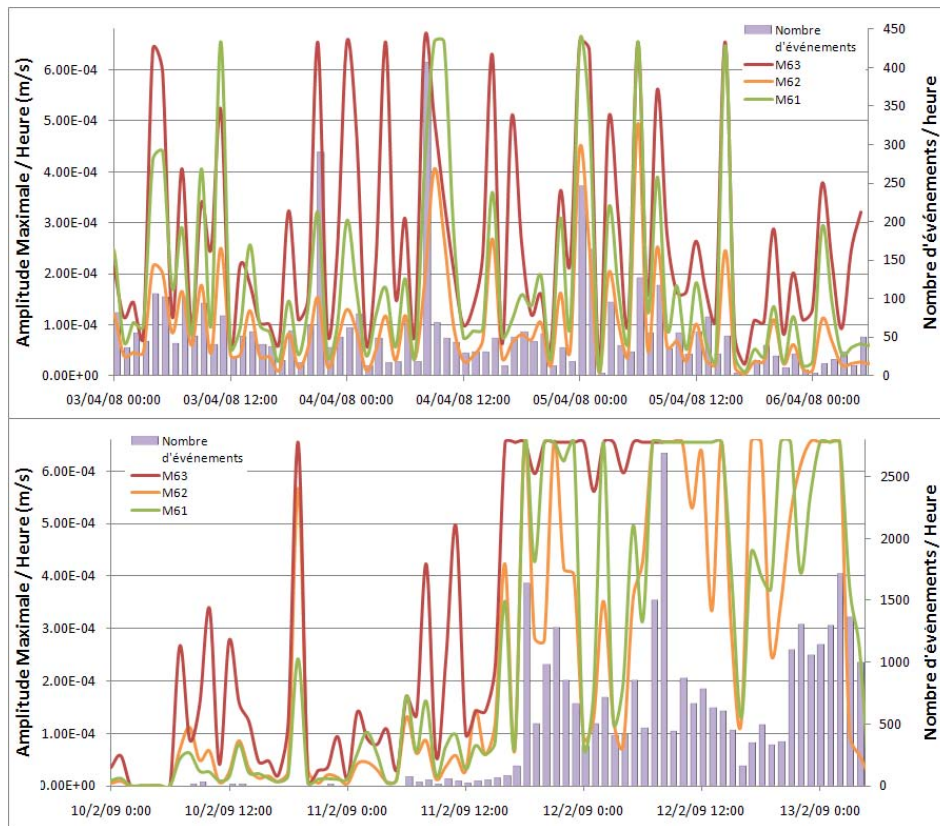


FIGURE B.8 – Évolution de l'amplitude maximale enregistrée au niveau des sondes M6 entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).

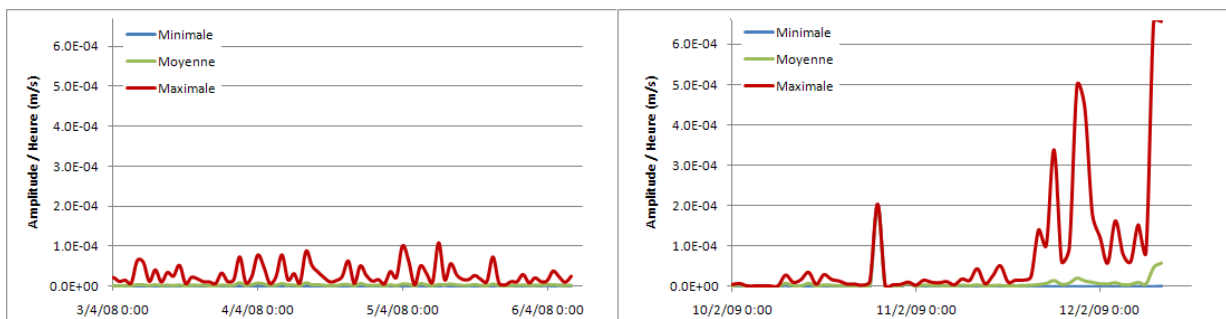


FIGURE B.9 – Évolution de l'amplitude enregistrée au niveau de la voie verticale à gain faible de la sonde M6.3, entre les 03 et 06/04/08 (à gauche) et du 10 au 13/02/09 (à droite).

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSMIQUES

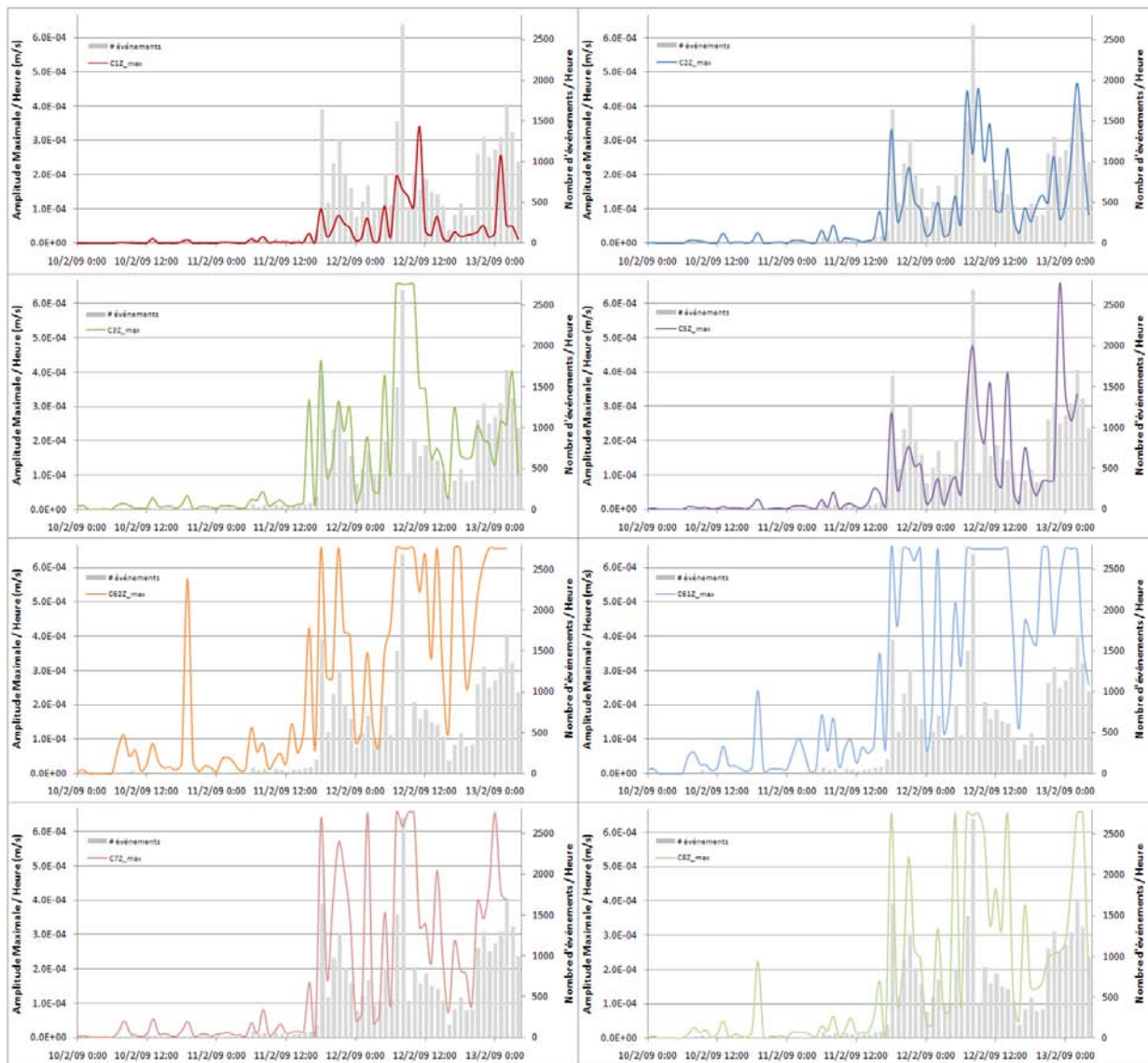


FIGURE B.10 – Évolution des amplitudes maximales observées au niveau des sondes 1D et voies verticales des sondes M3, M5 et M6.2, durant l'effondrement.

TABLE B.1 – *Comparison entre les amplitudes minimales, moyennes et maximales observées sur toute la période d'acquisition et sur les diverses crises.*

Amplitudes ($\mu\text{m/s}$)	2005-2009				08-31/05/07				Mars-Avril 08				11-17/01/09			
	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ
C1Z	0.24	2.30	617.26	5.85	0.24	3.42	132.66	9.06	0.34	1.89	66.52	3.49	0.60	2.37	32.34	3.08
C2Z	0.24	6.36	466.90	14.08	0.26	6.83	109.64	10.92	0.38	4.60	161.74	8.94	0.64	4.44	51.56	6.55
C3X	0.22	14.49	655.36	30.20	0.22	9.55	107.18	14.94	0.40	9.86	375.72	18.53	1.26	17.93	207.66	25.89
C3Y	0.22	13.21	655.34	26.59	0.22	13.09	148.06	21.62	0.40	9.45	411.94	17.86	1.46	16.82	218.00	25.44
C3Z	0.20	10.32	655.36	21.71	0.20	10.01	150.42	15.61	0.36	7.49	193.96	13.72	0.94	11.17	134.10	15.79
C5X	0.26	6.51	655.34	16.75	0.42	12.52	563.36	45.41	0.36	4.03	248.50	8.16	0.62	4.69	67.70	7.55
C5Y	0.30	8.15	655.34	20.27	0.38	13.60	318.20	32.49	0.38	5.24	309.88	11.17	0.62	5.60	110.82	10.54
C5Z	0.24	6.27	655.34	14.99	0.30	9.57	154.62	16.59	0.38	4.42	222.62	9.11	0.60	4.58	86.04	8.77
C63X	0.22	41.55	655.36	83.08	0.24	19.14	209.32	26.66	0.36	20.21	655.34	32.60	0.86	16.81	339.78	29.15
C63x	0.16	4.56	487.74	12.40	0.18	1.93	20.44	2.59	0.28	2.08	103.38	3.38	0.52	1.92	33.76	2.89
C63Y	0.24	42.01	655.36	83.83	0.24	15.78	172.72	21.20	0.90	20.91	625.40	31.16	1.12	12.00	169.50	17.19
C63y	0.16	4.57	357.00	12.03	0.16	1.64	17.30	2.10	0.30	2.14	62.74	3.10	0.50	1.43	16.94	1.66
C63Z	0.24	90.17	655.36	147.14	0.26	33.25	313.50	46.41	0.42	43.74	655.36	64.93	3.14	55.21	654.78	81.69
C63z	0.16	11.46	655.36	29.89	0.16	3.35	31.18	4.59	0.32	4.45	109.32	6.75	0.62	5.78	88.46	8.69
C62X	0.28	20.94	655.36	48.29	0.28	7.33	102.82	11.45	0.34	8.84	538.96	17.71	1.02	17.50	301.76	29.50
C62Y	0.26	22.14	655.36	48.46	0.26	8.20	81.10	11.83	0.42	9.83	655.34	19.63	0.88	10.43	137.78	15.33
C62Z	0.22	27.81	655.36	58.13	0.24	21.37	312.34	33.21	0.36	15.30	495.28	27.38	0.78	11.64	175.44	18.11
C61Z	0.02	32.67	655.36	68.81	1.24	36.14	643.90	62.15	0.02	26.11	655.36	52.86	1.12	16.04	298.22	25.22
C7Z	0.02	13.28	655.34	32.67					0.02	9.60	570.86	21.35	0.78	10.64	320.94	20.01
C8Z	0.02	13.59	655.36	31.83					0.02	10.07	388.62	20.74	0.76	9.40	161.22	16.51

TABLE B.2 – *Comparaison entre les amplitudes minimales, moyennes et maximales observées sur toute la période d'acquisition et sur les diverses crises, pour les événements isolés.*

Amplitudes ($\mu\text{m/s}$)	2005-2009				08-31/05/07				Mars-Avril 08				11-17/01/09			
	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ
C1Z	0.24	1.27	138.54	2.67	0.24	2.89	132.66	12.05	0.34	1.19	46.88	1.75	0.60	1.52	11.48	1.41
C2Z	0.24	3.13	452.10	6.02	0.26	2.36	61.00	4.36	0.38	2.85	113.90	4.64	0.64	2.75	40.74	3.53
C3X	0.22	7.33	360.14	12.73	0.22	3.49	74.82	6.28	0.40	6.27	237.84	10.71	1.26	11.25	149.12	15.06
C3Y	0.22	6.66	386.74	11.00	0.22	4.45	136.40	8.63	0.40	6.01	209.90	10.06	1.46	10.58	165.30	14.61
C3Z	0.20	5.19	655.28	9.83	0.20	3.53	96.06	6.88	0.36	4.70	131.22	7.60	0.94	6.88	101.26	9.25
C5X	0.26	3.33	655.34	12.04	0.42	16.22	563.36	63.90	0.36	2.47	87.90	4.07	0.62	2.77	41.68	3.80
C5Y	0.30	3.99	655.34	12.72	0.38	14.12	318.20	43.80	0.38	3.15	157.10	5.28	0.62	3.22	110.82	6.51
C5Z	0.24	3.00	655.34	7.11	0.30	5.41	154.62	15.05	0.38	2.80	90.80	4.77	0.60	2.64	86.04	5.18
C63X	0.22	15.44	655.34	29.73	0.24	7.39	119.14	12.64	0.36	14.04	325.38	18.17	0.86	10.47	141.28	13.92
C63x	0.16	0.70	303.76	7.39	0.18	0.01	11.64	1.21	0.28	1.46	32.50	1.80	0.52	1.28	14.10	1.32
C63Y	0.24	16.56	655.34	30.30	0.24	6.55	104.46	10.28	0.90	14.79	440.92	19.45	1.12	7.82	119.48	10.51
C63y	0.16	3.66	655.36	17.96	0.16	0.74	10.42	1.00	0.30	1.53	44.06	1.93	0.50	1.03	11.98	0.99
C63Z	0.24	34.82	655.36	60.75	0.26	13.08	281.68	21.83	0.42	29.82	655.18	38.57	3.14	36.01	598.72	53.33
C63z	0.16	8.28	421.20	30.25	0.16	1.37	27.96	2.14	0.32	3.03	78.72	3.90	0.62	3.75	60.54	5.36
C62X	0.28	8.86	631.98	18.16	0.28	2.66	84.82	4.97	0.34	5.61	306.04	9.79	1.02	10.15	160.88	14.33
C62Y	0.26	10.18	655.34	19.92	0.26	3.14	45.28	4.70	0.42	6.16	395.22	11.06	0.88	6.56	85.66	8.84
C62Z	0.22	12.82	655.36	25.33	0.24	7.65	165.32	14.42	0.36	10.18	330.88	15.78	0.78	7.15	140.20	10.74
C61Z	0.02	15.20	655.34	30.39	1.24	12.04	252.60	21.64	0.02	16.31	602.62	29.32	1.12	1.44	154.42	12.61
C7Z	0.02	5.97	655.24	14.33					0.02	5.80	327.84	11.38	0.78	5.87	99.76	8.21
C8Z	0.02	6.31	655.30	12.70					0.02	6.16	176.36	10.64	0.76	5.15	88.44	7.28

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSEISMQUES

TABLE B.3 – Comparaison entre les amplitudes minimales, moyennes et maximales observées sur toute la période d'acquisition et sur les diverses crises, pour les événements "en rafale".

Amplitudes ($\mu\text{m/s}$)	2005-2009			08-31/05/07			Mars-Avril 08			11-17/01/09						
	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ				
C1Z	0.38	3.86	340.72	7.31	0.38	3.92	31.96	4.58	0.38	3.88	66.52	5.74	0.68	4.30	32.34	4.59
C2Z	0.44	11.35	466.90	20.18	0.44	11.12	109.64	13.34	0.50	9.63	161.74	14.60	0.94	8.28	51.56	9.52
C3X	0.40	25.56	655.36	43.21	0.40	15.36	107.18	18.18	0.68	20.13	375.72	29.25	2.58	33.11	207.66	36.68
C3Y	0.56	23.30	655.34	37.99	0.56	21.39	148.06	26.54	0.84	19.27	411.94	28.47	2.16	30.98	218.00	36.66
C3Z	0.40	0.25	655.36	30.76	0.40	16.22	150.42	18.79	0.56	15.47	193.96	21.80	1.92	20.93	134.10	22.00
C5X	0.38	11.53	655.34	21.30	0.86	8.98	54.60	9.85	0.52	8.46	248.50	13.53	0.80	9.05	67.70	11.23
C5Y	0.44	14.75	655.34	27.10	1.02	13.10	119.30	15.09	0.44	11.23	309.88	18.81	0.80	10.99	108.74	15.00
C5Z	0.52	11.46	474.42	21.36	0.70	13.57	99.52	17.01	0.54	9.07	222.62	15.02	0.72	8.98	84.92	12.76
C63X	0.46	84.03	655.36	124.15	0.46	30.41	209.32	31.30	2.10	37.84	655.34	52.35	1.98	31.21	339.78	45.18
C63x	0.22	9.44	487.74	19.81	0.22	3.01	20.44	3.05	0.34	3.84	103.38	5.53	0.62	3.26	33.76	4.44
C63Y	0.64	85.25	655.36	125.15	0.64	24.64	172.72	24.87	1.86	38.41	625.40	47.46	1.82	21.49	169.50	24.22
C63y	0.22	9.45	357.00	19.08	0.26	2.50	17.30	2.49	0.34	3.88	62.74	4.74	0.58	2.32	16.94	2.36
C63Z	0.44	185.89	655.36	205.92	0.44	52.59	313.50	54.77	5.32	83.55	655.36	99.40	7.74	98.82	654.78	112.40
C63z	0.26	25.49	655.36	47.13	0.42	5.25	31.18	5.44	0.64	8.50	109.32	10.50	0.98	10.17	88.46	12.06
C62X	0.36	40.05	655.36	70.02	0.52	11.81	102.82	13.87	0.48	0.07	538.96	28.67	2.28	34.20	301.76	44.50
C62Y	0.50	41.06	655.36	69.65	0.50	13.05	81.10	14.31	0.70	20.31	655.34	31.46	1.38	19.21	137.78	21.92
C62Z	0.48	51.53	655.36	82.41	0.48	34.52	312.34	40.11	1.26	29.94	495.28	43.51	2.16	21.85	175.44	25.71
C61Z	0.84	60.29	655.36	97.55	2.66	59.25	643.90	77.64	1.00	54.12	655.36	85.26	2.32	31.03	298.22	37.36
C7Z	0.52	24.69	655.34	46.91					0.58	20.48	570.86	35.06	1.36	21.47	320.94	31.43
C8Z	0.68	24.67	655.36	45.90					0.84	21.23	388.62	34.18	1.06	19.05	161.22	25.24

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMIQUES

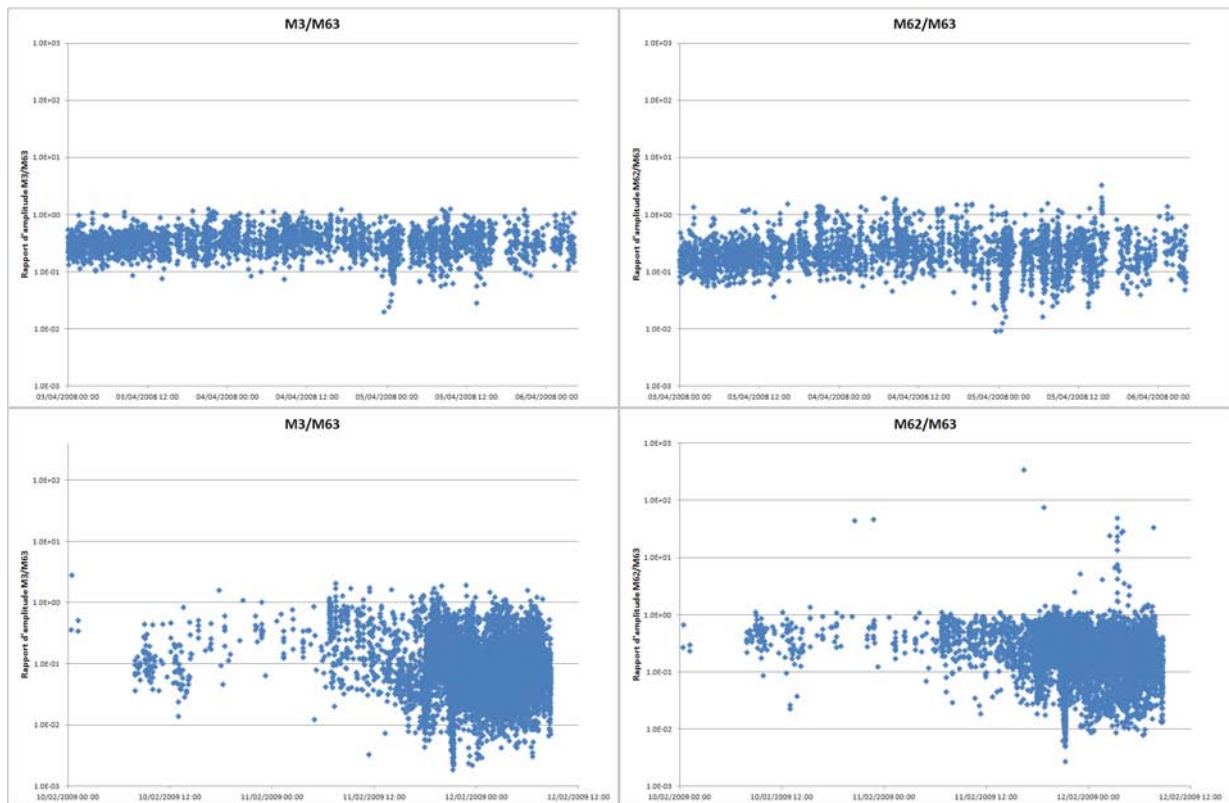


FIGURE B.11 – Évolution des rapports d'amplitude des événements isolés, à la sonde M6.3, entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).

TABLE B.4 – Comparaison entre les rapports d'amplitude des événements isolés à la sonde M6.3 du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.

Rapport d'amplitude	03-06 Avril 08				10-13 Février 2009			
	Minimum	Moyen	Maximum	Écart-Type	Minimum	Moyen	Maximum	Écart-Type
M1	3.38E-03	7.68E-02	3.89E+00	6.22E-02	1.33E-03	4.30E-02	1.16E+00	4.71E-02
M2	9.39E-03	1.52E-01	1.16E+00	8.64E-02	1.59E-03	7.03E-02	1.09E+00	6.56E-02
M3	9.25E-03	3.47E-01	3.41E+00	2.84E-01	1.85E-03	1.59E-01	2.82E+00	1.83E-01
M5	9.11E-03	1.74E-01	1.57E+02	1.51E+00	1.63E-03	7.95E-02	1.48E+00	7.59E-02
M62	1.99E-02	4.24E-01	9.61E+01	8.34E-01	2.80E-03	4.00E-01	3.43E+02	4.30E+00
M61	7.62E-04	7.50E-01	7.85E+00	4.27E-01	3.00E-03	3.18E-01	6.47E+00	2.99E-01
M7	7.62E-04	2.93E-01	2.26E+00	2.00E-01	1.40E-03	1.20E-01	1.27E+00	1.39E-01
M8	7.62E-04	3.11E-01	1.91E+00	1.86E-01	1.72E-03	1.17E-01	1.47E+00	1.09E-01

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMIQUES

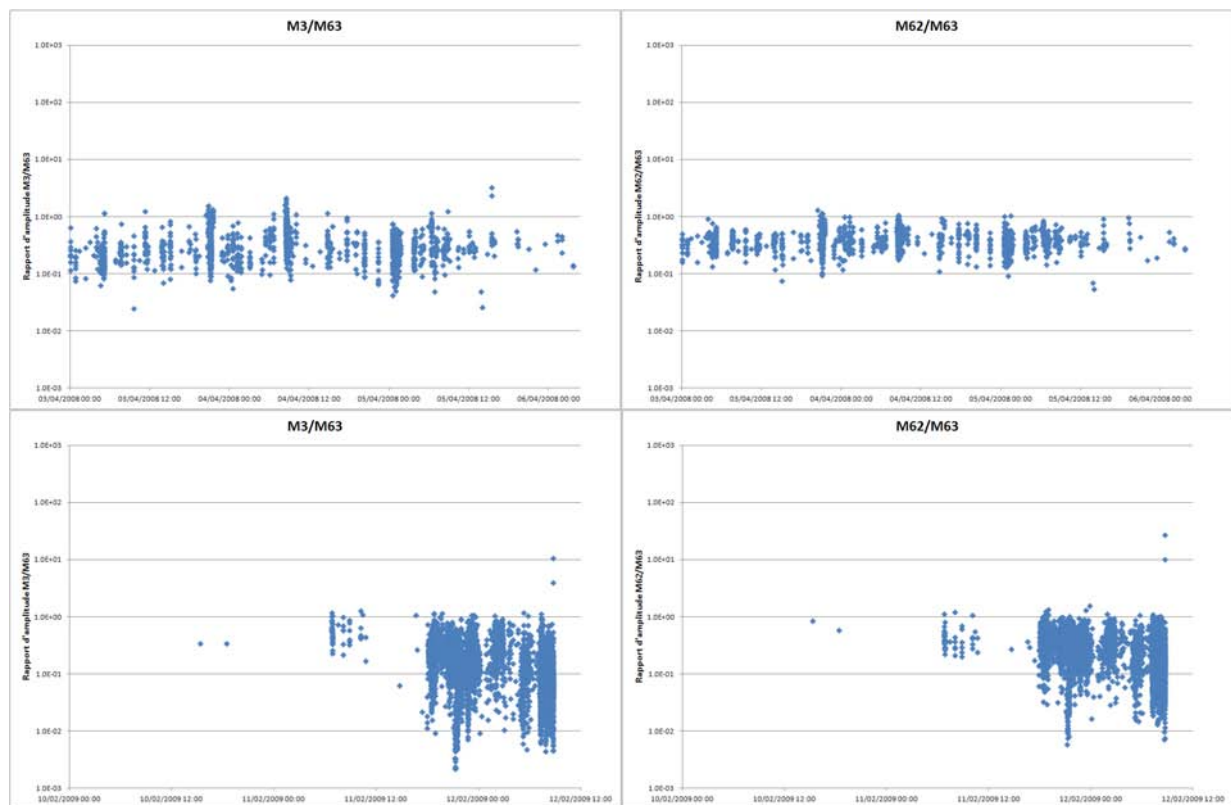


FIGURE B.12 – Évolution des rapports d'amplitude des rafales, à la sonde M6.3, entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).

TABLE B.5 – Comparaison entre les rapports d'amplitude des rafales à la sonde M6.3 du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.

Rapport d'amplitude	03-06 Avril 08				10-13 Février 2009			
	Minimum	Moyen	Maximum	Écart-Type	Minimum	Moyen	Maximum	Écart-Type
M1	2.37E-03	8.85E-02	1.22E+00	7.90E-02	1.11E-03	3.29E-02	2.68E+00	4.55E-02
M2	5.17E-03	1.85E-01	1.16E+00	1.17E-01	1.60E-03	7.53E-02	4.65E+00	8.86E-02
M3	2.43E-02	3.95E-01	3.26E+00	2.65E-01	2.16E-03	1.74E-01	1.05E+01	2.10E-01
M5	4.23E-03	2.51E-01	3.67E+01	7.17E-01	1.55E-03	8.32E-02	8.02E+00	1.31E-01
M62	5.37E-02	4.71E-01	3.87E+00	2.91E-01	5.79E-03	2.72E-01	2.70E+01	3.95E-01
M61	2.04E-02	8.83E-01	5.61E+00	4.91E-01	3.87E-03	3.97E-01	3.28E+01	5.44E-01
M7	9.71E-03	3.60E-01	2.03E+00	2.16E-01	1.71E-03	1.57E-01	7.46E+00	1.95E-01
M8	7.16E-03	3.68E-01	1.93E+00	2.10E-01	2.12E-03	1.53E-01	2.00E+01	2.95E-01

B.3 Énergie au capteur

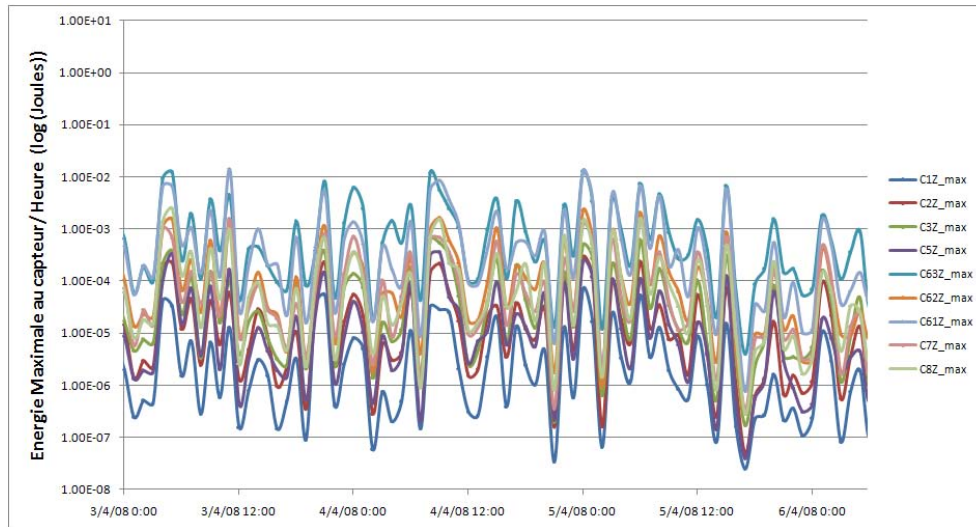


FIGURE B.13 – Évolution de l'énergie au capteur maximale par heure et par événement entre les 03 et 06/04/08.

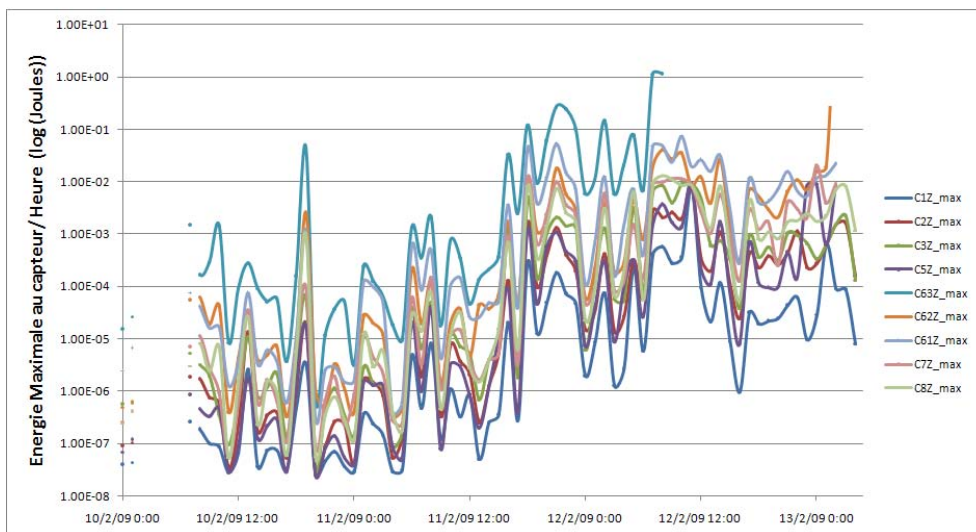


FIGURE B.14 – Évolution de l'énergie au capteur maximale par heure et par événement entre les 10 et 13/02/09.

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMIQUES

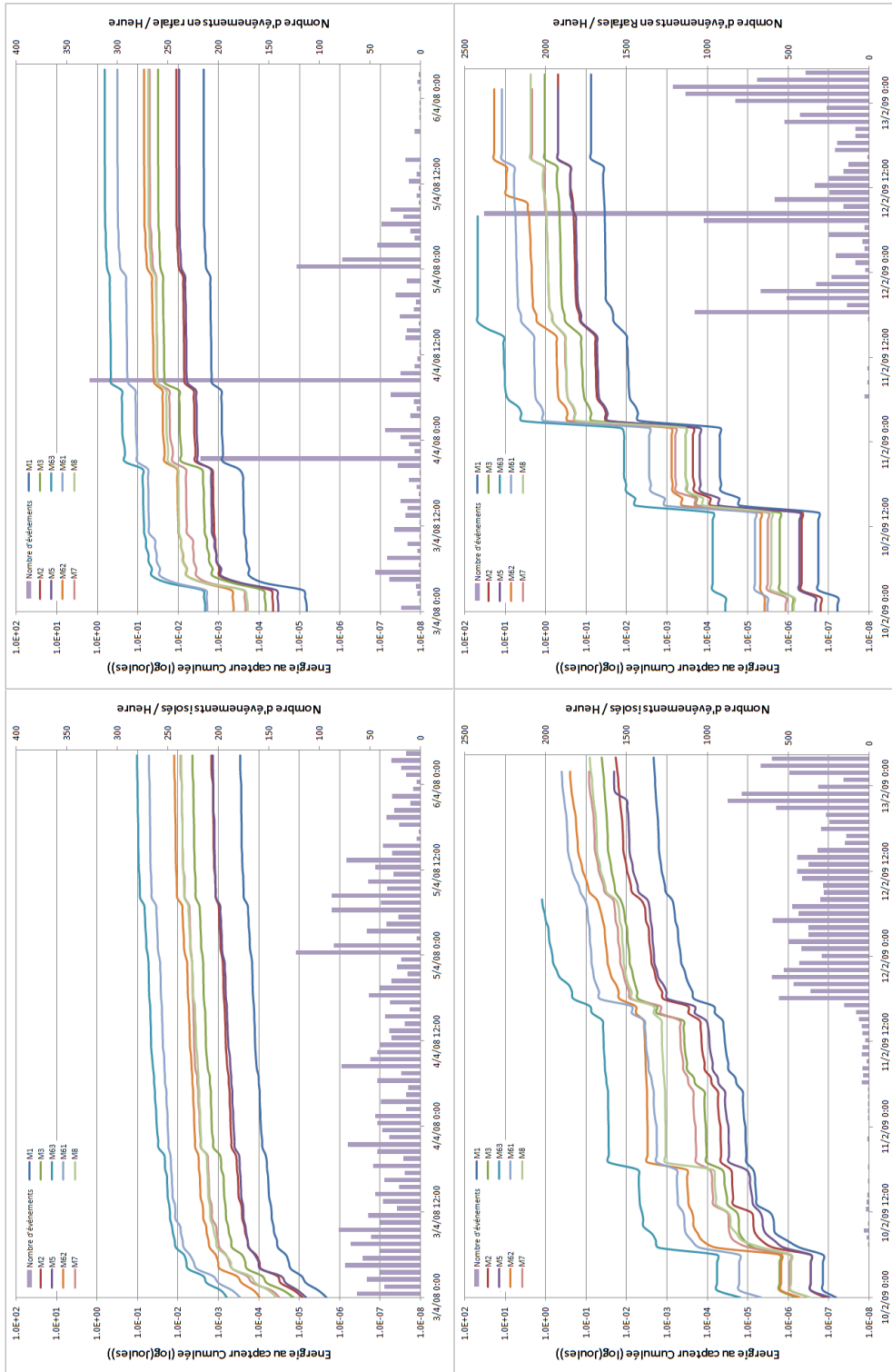


FIGURE B.15 – Évolution de l'énergie cumulée au capteur, pour les événements isolés (à gauche) et "en rafale" (à droite), entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et du 10 au 13/02/09 (en bas).

TABLE B.6 – *Comparaison entre les énergies minimales, moyennes et maximales observées sur toute la période d'acquisition et sur les diverses crises.*

Énergies (J)	2005-2009				08-31/05/07				Mars-Avril 08				11-17/01/09			
	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ
C1Z	2.36e-9	9.58e-7	7.82e-3	3.52e-5	2.60e-9	7.76e-7	2.52e-5	2.57e-6	2.86e-9	5.38e-7	1.39e-4	3.73e-6	2.23e-8	6.19e-7	2.39e-5	2.20e-6
C2Z	2.37e-9	5.79e-8	8.32e-3	6.05e-5	3.58e-9	5.43e-6	2.87e-4	1.97e-5	1.06e-8	2.82e-6	5.57e-4	1.85e-5	2.66e-8	2.04e-6	6.68e-5	7.16e-6
C3X	2.26e-9	2.45e-5	2.28e-2	2.22e-4	2.29e-9	8.33e-6	2.29e-4	2.58e-5	4.53e-9	1.05e-5	1.95e-3	6.08e-5	6.70e-8	2.54e-5	1.14e-3	9.09e-5
C3Y	2.48e-9	2.10e-5	1.68e-2	1.74e-4	2.56e-9	1.58e-5	5.37e-4	5.30e-5	1.08e-8	1.04e-5	2.25e-3	6.60e-5	8.16e-8	2.23e-5	1.18e-3	8.90e-5
C3Z	2.40e-9	1.34e-5	9.20e-3	1.22e-4	2.40e-9	9.28e-6	3.47e-4	2.98e-5	3.79e-9	6.61e-6	1.28e-3	3.86e-5	3.58e-8	1.02e-5	4.64e-4	3.67e-5
C5X	2.65e-9	7.52e-6	1.77e-2	1.61e-4	5.98e-9	3.56e-6	8.07e-5	1.05e-5	1.08e-8	2.27e-6	8.64e-4	1.70e-5	2.34e-8	3.04e-6	1.44e-4	1.25e-5
C5Y	2.36e-9	1.07e-5	1.73e-2	1.68e-4	4.77e-9	6.48e-6	3.09e-4	2.20e-5	2.36e-9	3.99e-6	1.63e-3	3.24e-5	2.19e-8	4.56e-6	2.97e-4	2.18e-5
C5Z	2.61e-9	6.55e-6	9.58e-3	1.24e-4	3.72e-9	5.68e-6	2.98e-4	2.18e-5	4.56e-9	2.55e-6	8.58e-4	2.10e-5	2.02e-8	3.03e-6	1.70e-4	1.42e-5
C63X	2.70e-9	2.00e-4	8.64e-2	1.46e-3	2.72e-9	2.64e-5	1.03e-3	8.27e-5	3.79e-9	3.01e-5	8.23e-3	2.05e-4	3.75e-8	2.54e-5	2.00e-3	1.26e-4
C63Y	2.38e-9	1.45e-3	2.90e-1	8.59e-3	2.75e-9	1.88e-5	5.26e-4	5.78e-5	2.85e-8	2.83e-5	4.41e-3	1.48e-4	4.45e-8	1.23e-5	6.39e-4	4.59e-5
C63Z	2.75e-9	2.05e-4	6.56e-2	1.38e-3	2.74e-9	7.78e-5	2.51e-3	2.50e-4	2.38e-9	1.21e-4	1.54e-2	6.00e-4	1.86e-7	2.29e-4	1.18e-2	9.37e-4
C62X	2.38e-9	2.36e-4	4.89e-1	7.96e-3	2.62e-9	5.40e-6	2.94e-4	1.85e-5	2.38e-9	9.45e-6	3.00e-3	6.50e-5	4.29e-8	3.07e-5	1.51e-3	1.27e-4
C62Y	2.32e-9	1.68e-4	4.75e-1	6.46e-3	2.32e-9	6.09e-6	1.93e-4	1.84e-5	1.21e-8	1.20e-5	8.52e-3	1.02e-4	2.98e-8	1.20e-5	6.63e-4	4.99e-5
C62Z	2.41e-9	2.05e-4	4.96e-1	6.71e-3	2.41e-9	2.96e-5	1.16e-3	1.01e-4	3.55e-9	1.92e-5	4.12e-3	1.27e-4	3.04e-8	1.48e-5	6.37e-4	5.52e-5
C61Z	4.83e-10	1.68e-4	7.48e-2	1.30e-3	9.15e-8	1.15e-4	4.41e-3	4.18e-4	4.83e-10	9.42e-5	3.05e-2	7.85e-4	5.56e-8	3.56e-5	2.01e-3	1.38e-4
C7Z	4.83e-10	3.15e-5	2.02e-2	2.84e-4	4.83e-10	1.34e-5	3.85e-3	1.06e-4	4.83e-10	1.34e-5	3.85e-3	1.06e-4	2.64e-8	1.57e-5	1.48e-3	7.90e-5
C8Z	4.83e-10	3.02e-5	1.31e-2	2.49e-4	4.83e-10	1.50e-5	3.67e-3	1.12e-4	4.83e-10	1.50e-5	3.67e-3	1.12e-4	3.36e-8	1.20e-5	5.71e-4	5.19e-5

TABLE B.7 – *Comparaison entre les énergies minimales, moyennes et maximales observées sur toute la période d'acquisition et sur les diverses crises, pour les événements isolés.*

Énergies (J)	2005-2009				08-31/05/07				Mars-Avril 08				11-17/01/09			
	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ
C1Z	2.36e-9	1.20e-7	2.81e-4	1.79e-6	2.60e-9	8.46e-8	3.11e-6	3.44e-7	2.86e-9	1.15e-7	3.29e-5	7.69e-7	2.23e-8	1.33e-7	4.33e-6	3.81e-7
C2Z	2.37e-9	8.55e-7	2.57e-3	1.62e-5	3.58e-9	4.07e-7	6.18e-5	2.99e-6	1.06e-8	6.10e-7	2.07e-4	4.53e-6	2.66e-8	4.58e-7	3.09e-5	2.03e-6
C3X	2.26e-9	3.39e-6	2.90e-3	3.09e-5	2.29e-9	6.89e-7	4.59e-5	3.25e-6	4.52e-9	2.56e-6	6.41e-4	1.77e-5	6.70e-8	4.95e-6	1.90e-4	1.75e-5
C3Y	2.48e-9	2.86e-6	3.61e-3	3.12e-5	2.56e-9	1.40e-6	2.34e-4	1.12e-5	1.08e-8	2.46e-6	7.40e-4	1.73e-5	8.16e-8	4.68e-6	3.32e-4	2.08e-5
C3Z	2.40e-9	1.95e-6	3.91e-3	2.91e-5	2.40e-9	1.00e-6	1.33e-4	6.82e-6	3.79e-9	1.47e-6	3.98e-4	9.88e-6	3.58e-8	1.96e-6	1.06e-4	7.88e-6
C5X	2.65e-9	1.75e-6	1.03e-2	9.90e-5	5.98e-9	1.30e-6	7.48e-5	6.80e-6	1.08e-8	5.04e-7	1.90e-4	3.92e-6	2.34e-8	6.26e-7	5.59e-5	3.38e-6
C5Y	2.36e-9	2.30e-6	1.11e-2	1.08e-4	4.77e-9	1.07e-6	4.65e-5	4.15e-6	2.36e-9	7.96e-7	4.24e-4	6.77e-6	2.19e-8	1.01e-6	1.69e-4	8.78e-6
C5Z	2.61e-9	9.46e-7	8.37e-3	5.01e-5	3.72e-9	4.60e-7	6.04e-5	3.00e-6	4.56e-9	5.23e-7	1.76e-4	3.82e-6	2.02e-8	7.02e-7	1.14e-4	6.17e-6
C63X	2.70e-9	1.12e-5	1.72e-2	1.31e-4	2.72e-9	2.34e-6	2.78e-4	1.41e-5	3.79e-9	6.86e-6	1.87e-3	3.90e-5	3.75e-8	4.70e-6	3.39e-4	2.10e-5
C63Y	2.75e-9	1.34e-5	2.58e-2	2.28e-4	2.75e-9	1.71e-6	1.65e-4	8.95e-6	2.85e-8	7.44e-6	2.03e-3	4.35e-5	4.45e-8	2.91e-6	1.48e-4	1.33e-5
C63Z	2.38e-9	7.18e-5	6.14e-2	7.46e-4	2.74e-9	7.80e-6	1.40e-3	6.50e-5	2.38e-9	2.82e-5	6.92e-3	1.67e-4	1.86e-7	5.04e-5	4.48e-3	2.92e-4
C62X	2.38e-9	8.09e-6	3.33e-2	2.22e-4	2.62e-9	5.67e-7	1.42e-4	6.44e-6	2.38e-9	2.35e-6	1.18e-3	2.28e-5	4.29e-8	5.36e-6	3.87e-4	2.50e-5
C62Y	2.32e-9	7.04e-6	7.28e-3	7.58e-5	2.32e-9	5.18e-7	2.50e-5	2.20e-6	1.21e-8	2.93e-6	2.05e-3	3.35e-5	2.98e-8	2.39e-6	9.87e-5	9.49e-6
C62Z	2.41e-9	1.03e-5	2.38e-2	1.66e-4	2.41e-9	2.36e-6	1.33e-4	1.21e-5	3.55e-9	4.45e-6	1.30e-3	3.01e-5	3.04e-8	3.17e-6	3.45e-4	1.99e-5
C61Z	4.83e-10	2.23e-5	2.40e-2	2.89e-4	9.15e-8	8.01e-6	9.22e-4	4.89e-5	4.83e-10	1.99e-5	7.93e-3	1.76e-4	5.56e-8	6.51e-6	5.37e-4	3.19e-5
C7Z	4.83e-10	4.50e-6	1.15e-2	9.08e-5					4.83e-10	2.89e-6	2.07e-3	2.84e-5	2.64e-8	2.41e-6	2.23e-4	1.24e-5
C8Z	4.83e-10	3.98e-6	1.09e-2	7.20e-5					4.83e-10	3.11e-6	9.60e-4	2.37e-5	3.36e-8	2.05e-6	1.72e-4	1.03e-5

TABLE B.8 – *Comparison entre les énergies minimales, moyennes et maximales observées sur toute la période d'acquisition et sur les diverses crises, pour les événements "en rafale".*

Énergies (J)	2005-2009					08-31/05/07					Mars-Avril 08					11-17/01/09				
	Min	Moy	Max	σ		Min	Moy	Max	σ		Min	Moy	Max	σ		Min	Moy	Max	σ	
C1Z	5.50e-9	2.24e-6	7.82e-3	5.61e-5		5.50e-9	1.44e-6	2.52e-5	3.45e-6		1.24e-8	1.75e-6	1.39e-4	7.07e-6		2.97e-8	1.72e-6	2.39e-5	3.71e-6	
C2Z	4.70e-9	1.41e-5	8.32e-3	9.39e-5		4.70e-9	1.02e-5	2.87e-4	2.66e-5		1.69e-8	9.13e-6	5.57e-4	3.47e-5		5.05e-8	5.64e-6	6.68e-5	1.18e-5	
C3X	3.30e-9	5.70e-5	2.28e-2	3.49e-4		3.30e-9	1.57e-5	2.29e-4	3.45e-5		2.32e-8	3.33e-5	1.95e-3	1.13e-4		2.81e-7	7.17e-5	1.14e-3	1.52e-4	
C3Y	3.73e-9	4.90e-5	1.68e-2	2.73e-4		3.73e-9	2.97e-5	5.37e-4	7.07e-5		2.62e-8	3.31e-5	2.25e-3	1.24e-4		2.57e-7	6.24e-5	1.18e-3	1.50e-4	
C3Z	3.29e-9	3.11e-5	9.20e-3	1.89e-4		3.29e-9	1.72e-5	3.47e-4	3.96e-5		2.16e-8	2.13e-5	1.28e-3	7.19e-5		1.14e-7	2.88e-5	4.64e-4	6.13e-5	
C5X	6.32e-9	1.67e-5	1.77e-2	2.27e-4		2.89e-8	5.74e-6	8.07e-5	1.28e-5		1.49e-8	7.30e-6	8.64e-4	3.23e-5		3.36e-8	8.51e-6	1.44e-4	2.10e-5	
C5Y	1.65e-8	2.39e-5	1.73e-2	2.33e-4		3.64e-8	1.17e-5	3.09e-4	2.90e-5		1.65e-8	1.31e-5	1.63e-3	6.17e-5		3.59e-8	1.26e-5	2.97e-4	3.59e-5	
C5Z	1.07e-8	1.54e-5	9.58e-3	1.88e-4		2.49e-8	1.07e-5	2.98e-4	2.95e-5		1.83e-8	8.37e-6	8.58e-4	4.01e-5		3.24e-8	8.33e-6	1.70e-4	2.32e-5	
C63X	4.29e-9	5.67e-4	8.64e-2	2.45e-3		4.29e-9	4.95e-5	1.03e-3	1.10e-4		1.29e-7	9.67e-5	8.23e-3	3.91e-4		1.67e-7	7.25e-5	2.00e-3	2.19e-4	
C63Y	4.20e-9	5.78e-4	6.56e-2	2.30e-3		4.20e-9	3.53e-5	5.26e-4	7.70e-5		1.05e-7	8.81e-5	4.41e-3	2.73e-4		1.22e-7	3.37e-5	6.39e-4	7.63e-5	
C63Z	4.33e-9	4.14e-3	2.90e-1	1.43e-2		4.33e-9	1.45e-4	2.51e-3	3.31e-4		5.05e-7	3.85e-4	1.54e-2	1.10e-3		1.90e-6	6.34e-4	1.18e-2	1.56e-3	
C62X	3.70e-9	5.96e-4	4.89e-1	1.28e-2		3.70e-9	1.00e-5	2.94e-4	2.43e-5		1.70e-8	2.97e-5	3.00e-3	1.20e-4		2.39e-7	8.82e-5	1.51e-3	2.15e-4	
C62Y	3.71e-9	4.22e-4	4.75e-1	1.04e-2		3.71e-9	1.14e-5	1.93e-4	2.45e-5		2.13e-8	3.78e-5	8.52e-3	1.90e-4		8.14e-8	3.38e-5	6.63e-4	8.51e-5	
C62Z	3.77e-9	5.14e-4	4.96e-1	1.08e-2		3.77e-9	5.58e-5	1.16e-3	1.35e-4		4.38e-8	6.15e-5	4.12e-3	2.40e-4		1.79e-7	4.11e-5	6.37e-4	8.98e-5	
C61Z	3.03e-8	3.97e-4	7.48e-2	2.03e-3		3.59e-7	2.18e-4	4.41e-3	5.65e-4		8.48e-8	3.07e-4	3.05e-2	1.49e-3		1.68e-7	1.02e-4	2.01e-3	2.32e-4	
C7Z	1.78e-8	7.37e-5	2.02e-2	4.37e-4							1.89e-8	4.34e-5	3.85e-3	2.00e-4		9.91e-8	4.57e-5	1.48e-3	1.37e-4	
C8Z	6.61e-9	7.01e-5	1.31e-2	3.82e-4							3.33e-8	4.91e-5	3.67e-3	2.13e-4		6.31e-8	3.48e-5	5.71e-4	8.85e-5	

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMIQUES

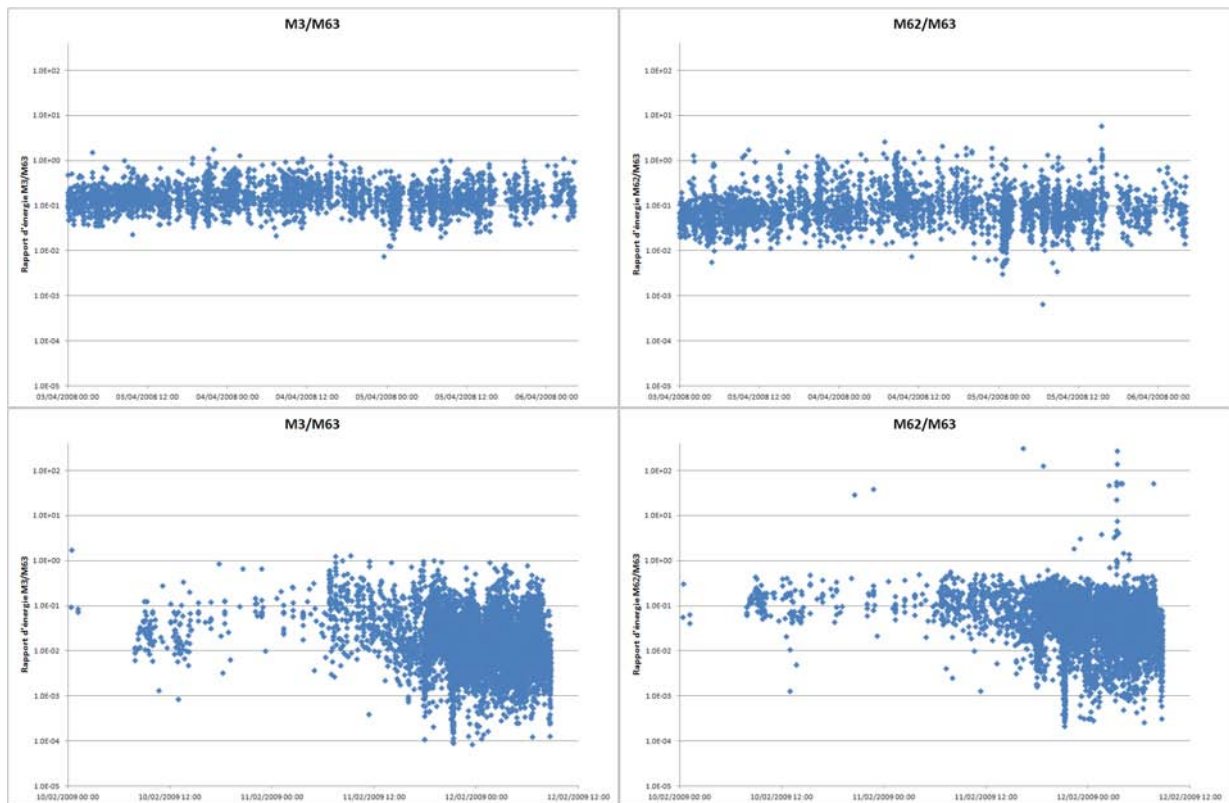


FIGURE B.16 – Évolution des rapports d'énergie des événements isolés, à la sonde M6.3, entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).

TABLE B.9 – Comparaison entre les rapports d'énergie des événements isolés à la sonde M6.3 du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.

Rapport d'énergie	03-06 Avril 08				10-13 Février 2009			
	Minimum	Moyen	Maximum	Écart-Type	Minimum	Moyen	Maximum	Écart-Type
M1	1.06E-04	2.00E-02	1.05E+00	2.76E-02	1.55E-05	8.15E-03	7.61E-01	2.55E-02
M2	9.88E-04	4.63E-02	1.14E+00	4.16E-02	4.56E-05	1.22E-02	1.30E+00	3.06E-02
M3	6.56E-04	1.92E-01	6.19E+00	2.97E-01	8.35E-05	3.92E-02	7.31E+00	1.15E-01
M5	1.06E-03	7.39E-02	2.22E+02	2.23E+00	3.77E-05	1.37E-02	8.17E+00	9.91E-02
M62	7.55E-03	2.37E-01	1.49E+02	1.27E+00	2.13E-04	2.63E-01	3.15E+02	5.72E+00
M61	3.82E-05	9.04E-01	8.96E+01	1.41E+00	2.26E-04	1.60E-01	1.33E+02	1.62E+00
M7	3.82E-05	1.54E-01	3.95E+01	4.71E-01	5.06E-05	2.63E-02	4.90E+00	7.35E-02
M8	3.82E-05	1.62E-01	1.74E+00	1.41E-01	9.70E-05	2.68E-02	6.52E+00	8.88E-02

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMIQUES

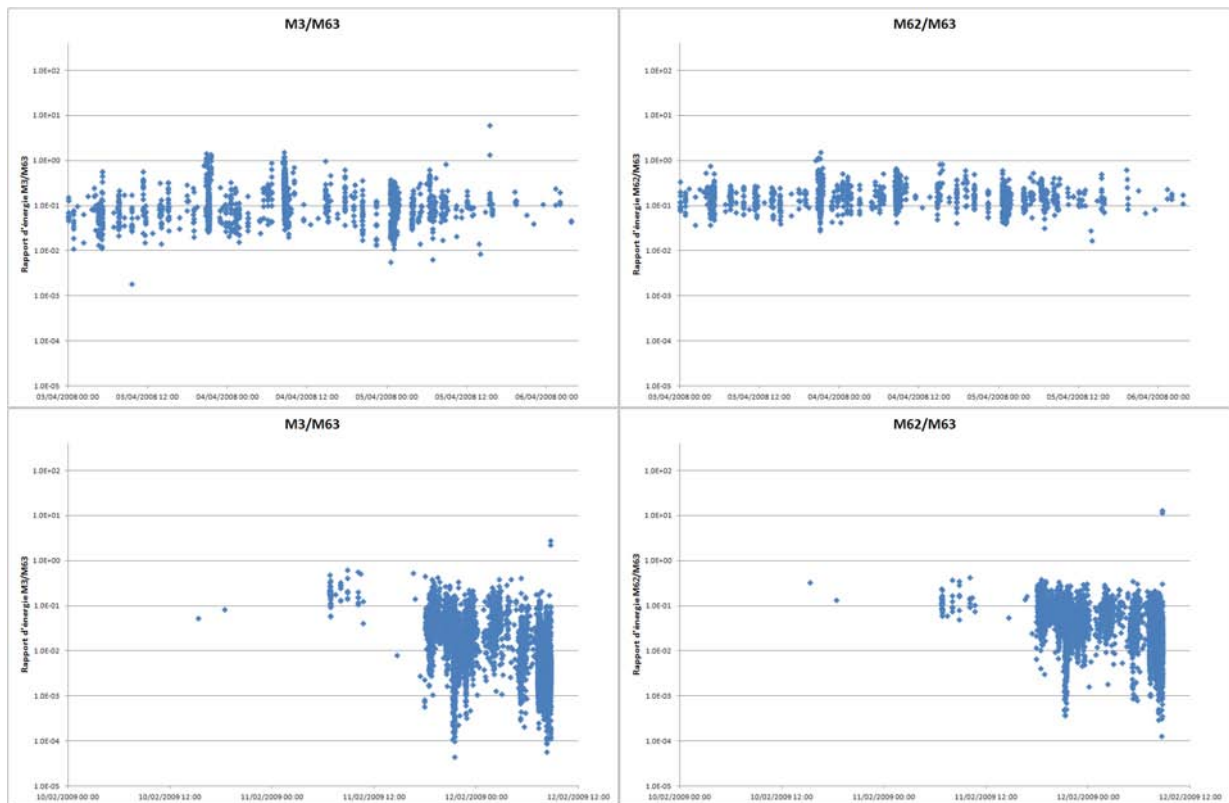


FIGURE B.17 – Évolution des rapports d'énergie des rafales, à la sonde M6.3, entre les 03 et 06/04/08 (en haut) et entre les 10 et 13/02/09 (en bas).

TABLE B.10 – Comparaison entre les rapports d'énergie des rafales à la sonde M6.3 du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.

Rapport d'énergie	03-06 Avril 08				10-13 Février 2009			
	Minimum	Moyen	Maximum	Écart-Type	Minimum	Moyen	Maximum	Écart-Type
M1	2.37E-03	8.85E-02	1.22E+00	7.90E-02	1.14E-06	1.44E-03	1.78E-01	3.48E-03
M2	5.17E-03	1.85E-01	1.16E+00	1.17E-01	8.40E-06	5.88E-03	5.78E-01	1.25E-02
M3	2.43E-02	3.95E-01	3.26E+00	2.65E-01	4.42E-05	2.75E-02	2.77E+00	5.99E-02
M5	4.23E-03	2.51E-01	3.67E+01	7.17E-01	2.51E-05	6.38E-03	1.45E+00	2.31E-02
M62	5.37E-02	4.71E-01	3.87E+00	2.91E-01	1.29E-04	5.34E-02	1.28E+01	2.16E-01
M61	2.04E-02	8.83E-01	5.61E+00	4.91E-01	2.81E-04	1.44E-01	1.95E+01	3.85E-01
M7	9.71E-03	3.60E-01	2.03E+00	2.16E-01	4.61E-05	2.51E-02	2.14E+00	5.18E-02
M8	7.16E-03	3.68E-01	1.93E+00	2.10E-01	5.32E-05	2.43E-02	6.57E+00	1.16E-01

B.4 Fréquences fondamentales apparentes

B.4.1 Parasites

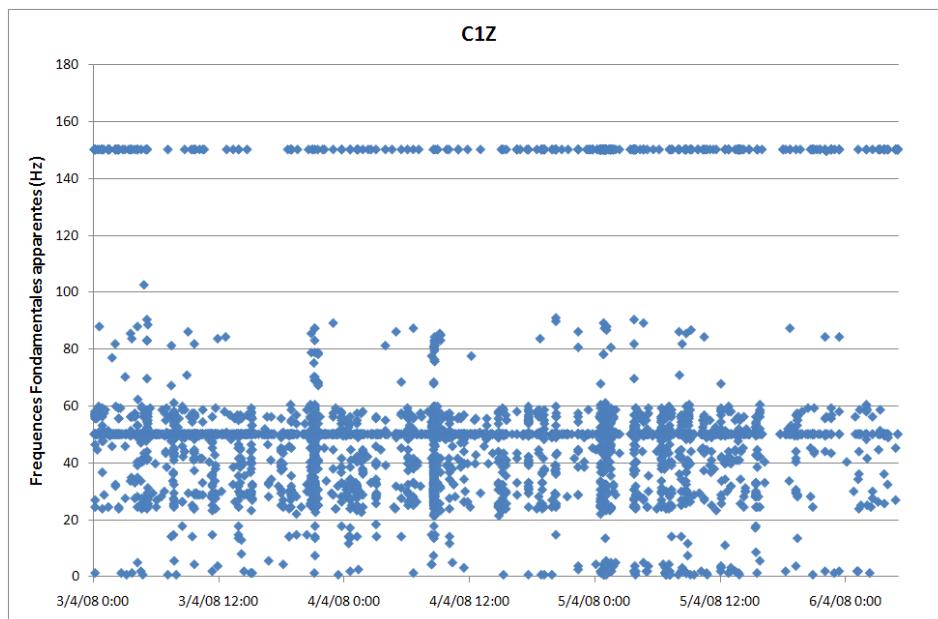


FIGURE B.18 – Évolution des fréquences fondamentales apparentes enregistrées au niveau de la sonde M1, entre les 03 et 06 Avril 2008. Des alignements inexpliqués ressortent, vers 0, 50 et 150 Hz.

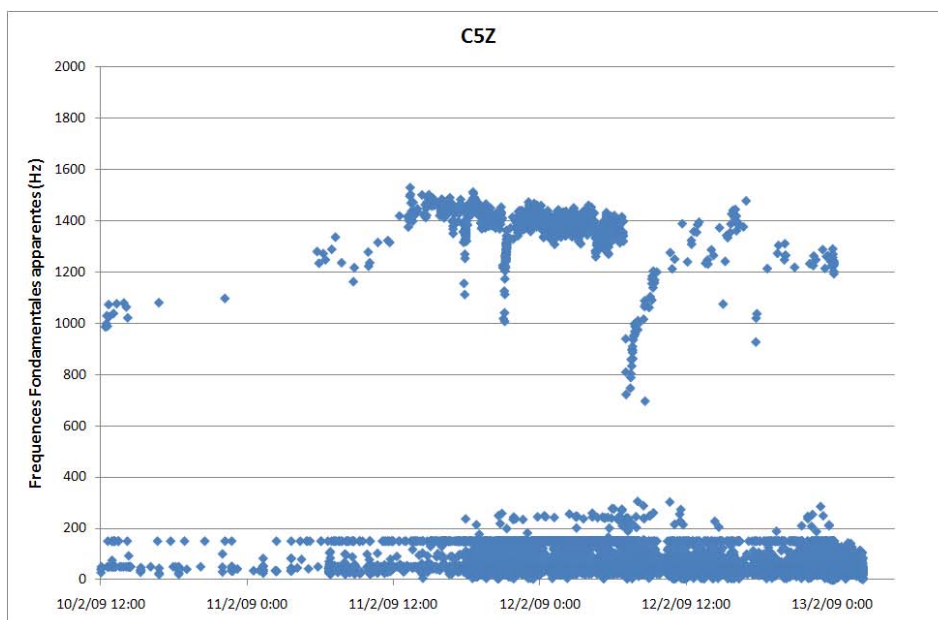


FIGURE B.19 – Évolution des fréquences fondamentales apparentes enregistrées au niveau de la voie Z de la sonde M5, entre les 10 et 13 Février 2009. Un groupe d'événements avec des fréquences supérieures à 600 Hz, se démarquant des autres, sont observées.

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSEISMQUES

Les Tableaux suivants montrent les pourcentages d'enregistrements où des parasites masquent les fréquences fondamentales des événements, pour l'ensemble des événements d'une part, et uniquement pour les événements déclenchant de l'autre, pour les périodes de crise et d'effondrement. On observe que :

- dans l'ensemble, les pourcentages diminuent d'une période à l'autre ;
- les fréquences déterminées pour la sonde la sonde M1, où peu d'événements enregistrés sont émergents, sont faussées pour la moitié des événements ;
- la sonde M6.3, qui déclenche sur la majorité des événements, voit quant à elle moins de 5% de ses enregistrements perturbés par des fréquences parasites ;
- la quantité des enregistrements avec des fréquences fondamentales égales à des fréquences parasites, diminue de façon notable en ne prenant en compte que les événements déclenchants. En outre, en ne considérant que les signaux pointés, ces fréquences parasites disparaissent complètement.

TABLE B.11 – *Pourcentages d'enregistrements présentant des fréquences fondamentales égales à des fréquences parasites du 03 - 06 Avril 2008.*

%	Tous les événements				Événements déclenchants			
	0.610 Hz	50 Hz	150 Hz	> 400 Hz	0.610 Hz	50 Hz	150 Hz	> 400 Hz
C1Z	2.47	40.99	7.57	0	0	2.03	0	0
C2Z	1.85	22.07	3.75	0	0.08	2.68	0	0
C3X	1.6	4.73	3.71	0	0	1.43	0	0
C3Y	0.8	9.22	2.63	0	0	2.03	0.04	0
C3Z	1.56	10.32	2.58	0.02	0	1.05	0	0
C5X	7.07	9.06	4.87	0.25	0	1.13	0	0
C5Y	2.79	17.27	1.33	0.09	0	2.85	0	0
C5Z	1.3	42.18	0	0.02	0.09	5.51	0	0
C63X	0.07	2.72	1.83		0.05	1.94	1.28	
C63Y	0.02	2.97	1.88		0	2.29	1.44	
C63Z	0	1.69	0.85		0	1.65	0.83	
C62X	0.3	7.94	6.63	0	0	0.99	0.25	0
C62Y	0.09	7.3	6.04	0	0	1.31	0.25	0
C62Z	0.02	2.29	3.73	0	0	0.68	0.58	0
C61Z	0	2.77	0.05	0.02	0	2.66	0.03	0
C7Z	0.71	4.6	2.4	0	0	1.05	0	0
C8Z	1.88	4.19	0.41	0.09	0	1.66	0	0

TABLE B.12 – *Pourcentages d'enregistrements présentant des fréquences fondamentales égales à des fréquences parasites du 10 - 13 Février 2009.*

%	Tous les événements				Événements déclenchants			
	0.610 Hz	50 Hz	150 Hz	> 400 Hz	0.610 Hz	50 Hz	150 Hz	> 400 Hz
C1Z	0.39	5.67	36.72	0.04	0.03	3.2	0	0
C2Z	0.08	3.65	14.45	0.05	0.03	1.96	0.01	0
C3X	0	3.18	5.36	0.04	0	1.01	0.07	0
C3Y	0.01	3.34	5.78	0.05	0	1.25	0.15	0
C3Z	0.01	3.17	7.68	0.12	0.01	1.87	0.06	0
C5X	0.18	9.95	9.35	0.23	0.22	2.28	0.26	0
C5Y	0.16	6.17	11.06	0.44	0.18	2.77	0.52	0.03
C5Z	0.32	8.99	6.19	3.62	0.14	2.36	0.11	0.04
C63X	0.01	1.02	1.33		0.01	0.84	1.08	
C63Y	0	1.38	1.32		0	1.27	1.08	
C63Z	0	0.81	0.57		0	0.8	0.49	
C62X	0.13	3.11	4.38	0.06	0.06	3.1	4.38	0.06
C62Y	0.12	7.07	2.89	0.06	0.05	7.05	2.89	0.06
C62Z	0.14	4.62	2.78	0.01	0.06	4.61	2.78	0.01
C61Z	0.1	3.47	1.26	0	0.06	2.2	0.09	0
C7Z	0.11	5.06	5.7	0	0.06	0.46	0.06	0
C8Z	4.4	2.49	2.06	0.19	0.07	1.26	0.08	0

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMIQUES

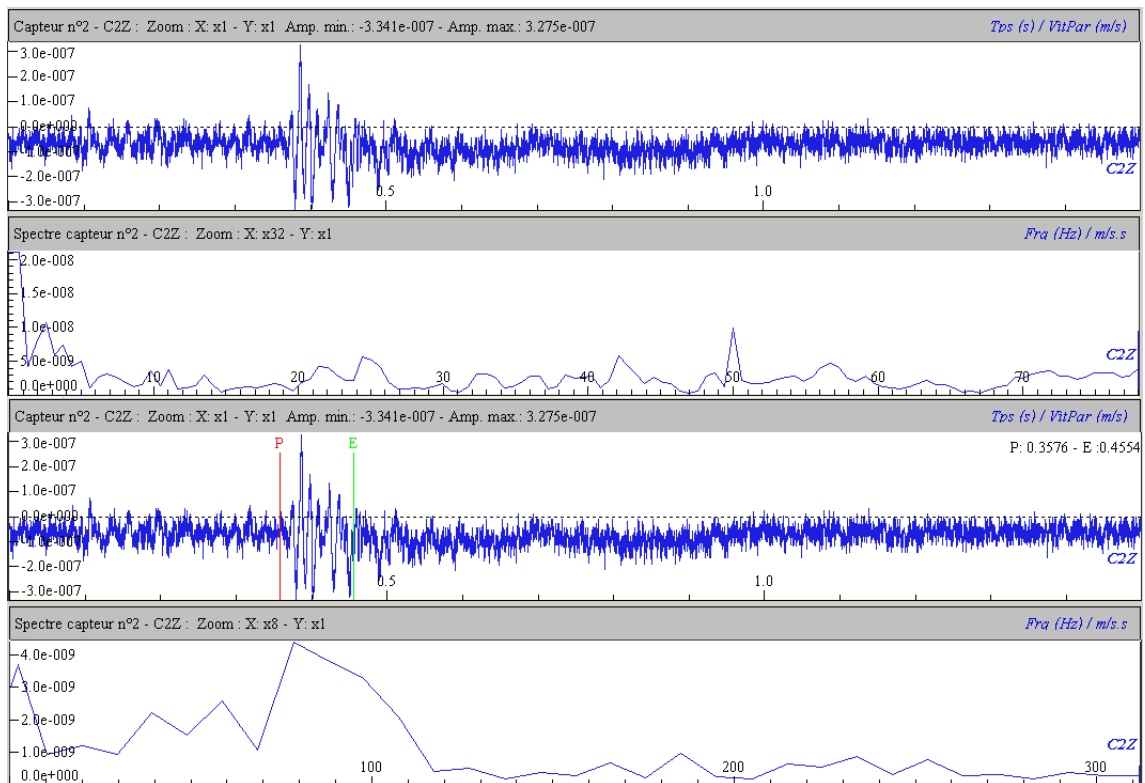


FIGURE B.20 – Exemple de parasite à 0.610352 Hz sur la sonde M2.

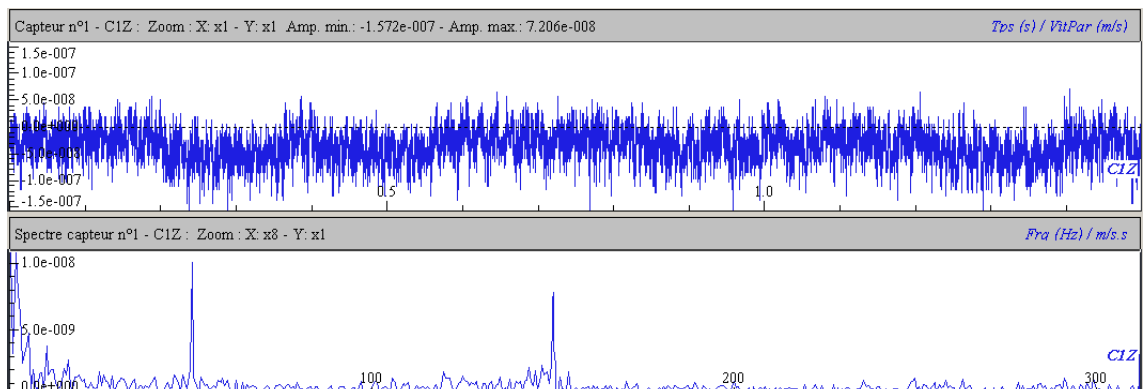


FIGURE B.21 – Exemple de parasite à 50.0488 Hz sur la sonde M1.

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMIQUES

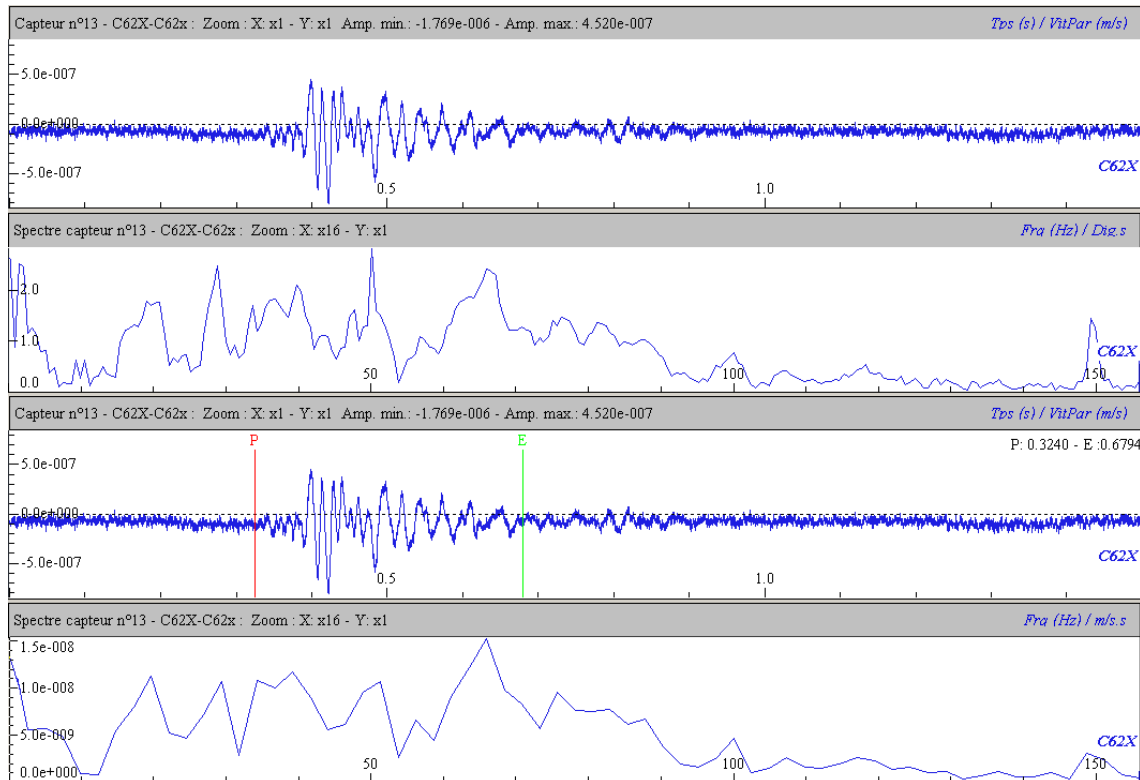


FIGURE B.22 – Exemple de parasite à 50.0488 Hz sur la voie Y sonde M6.2. Le pointage grossier de l'événement permet de réduire influence des parasites.

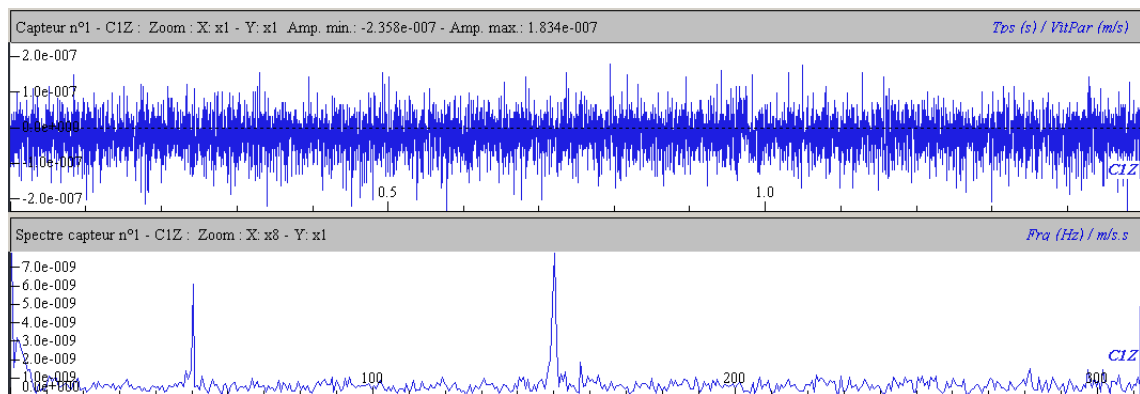


FIGURE B.23 – Exemple de parasite à 150.146 Hz sur la sonde M1.

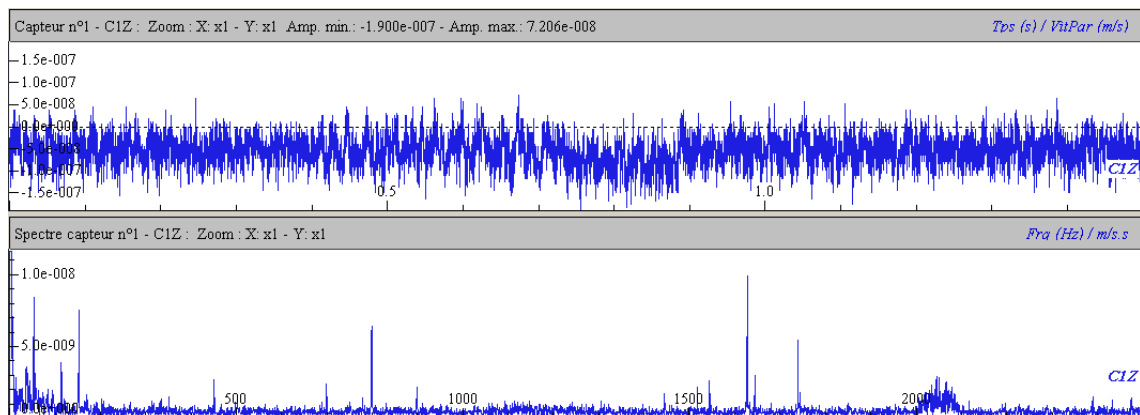


FIGURE B.24 – Exemple de parasite à 1629.64 Hz sur la sonde M1.

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSEISMQUES

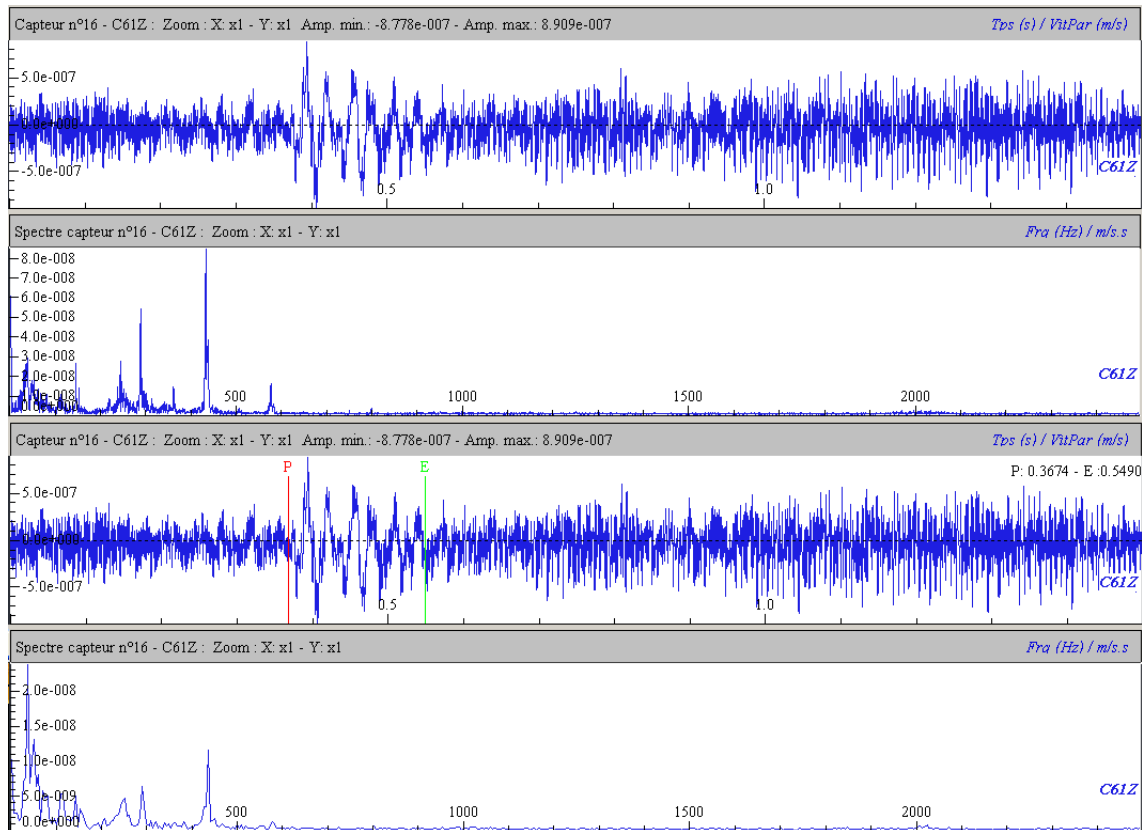


FIGURE B.25 – Exemple de parasite à 431.519 Hz sur la sonde M61. Le pointage grossier de l'événement permet de réduire l'influence des parasites.

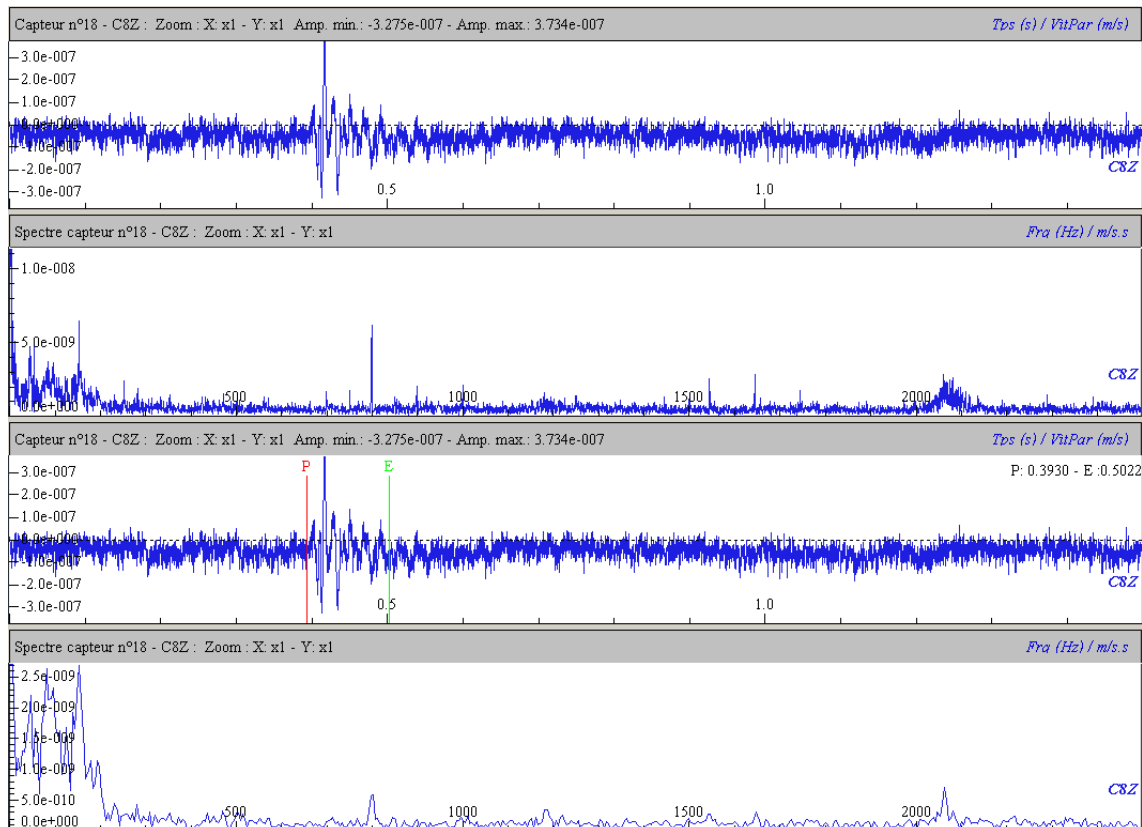


FIGURE B.26 – Exemple de parasite à 798.34 Hz sur la sonde M8.

B.4.2 Influence de la présence d'une onde S

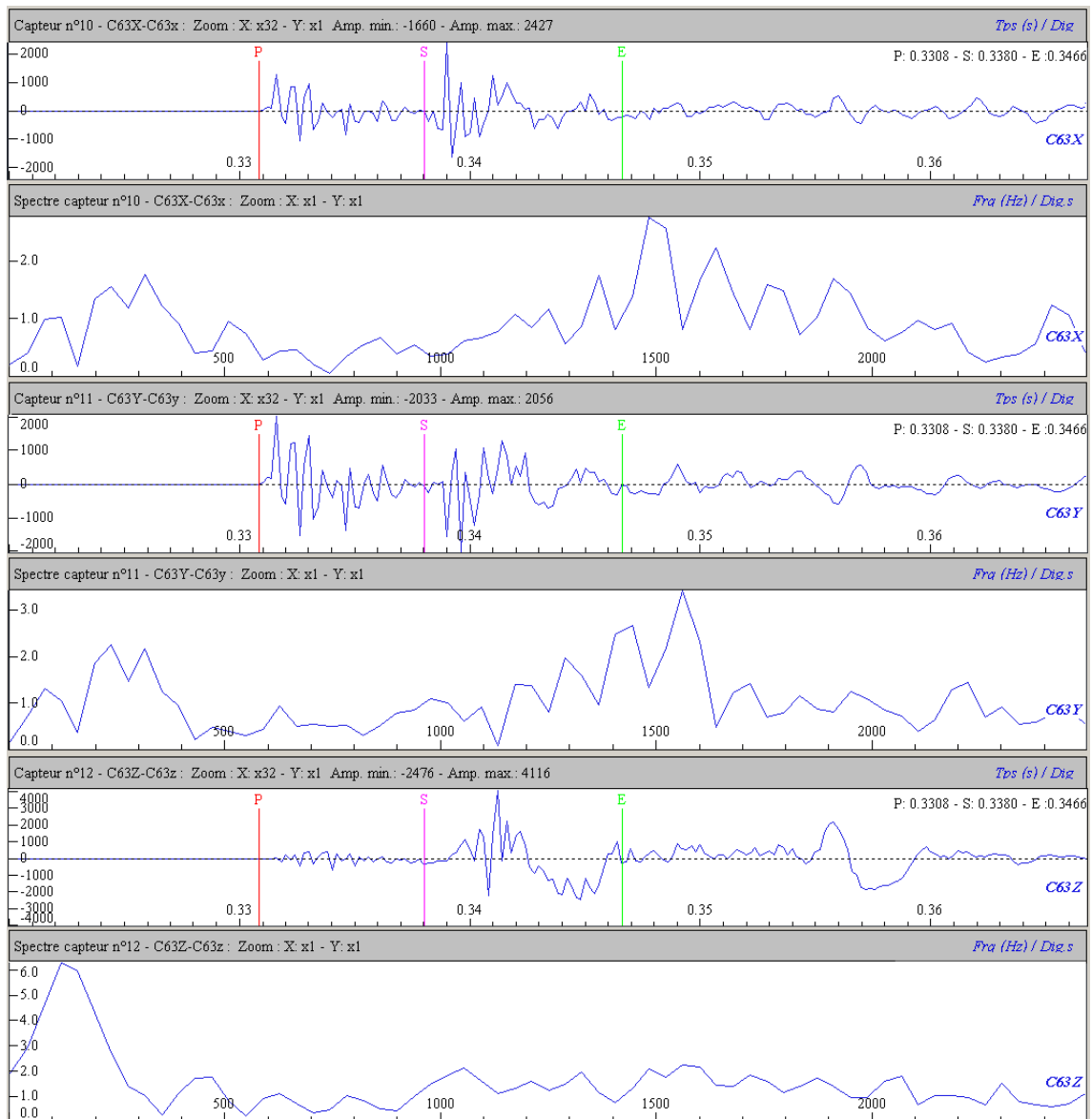


FIGURE B.27 – Exemple d'un événement avec une fréquence fondamentale supérieure à 1000 Hz sur les voies horizontales de la sonde M6.3, et inférieure à 200 Hz sur la voie verticale. L'analyse spectrale est ici effectuée entre les pointés P et E.

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSEISMQUES

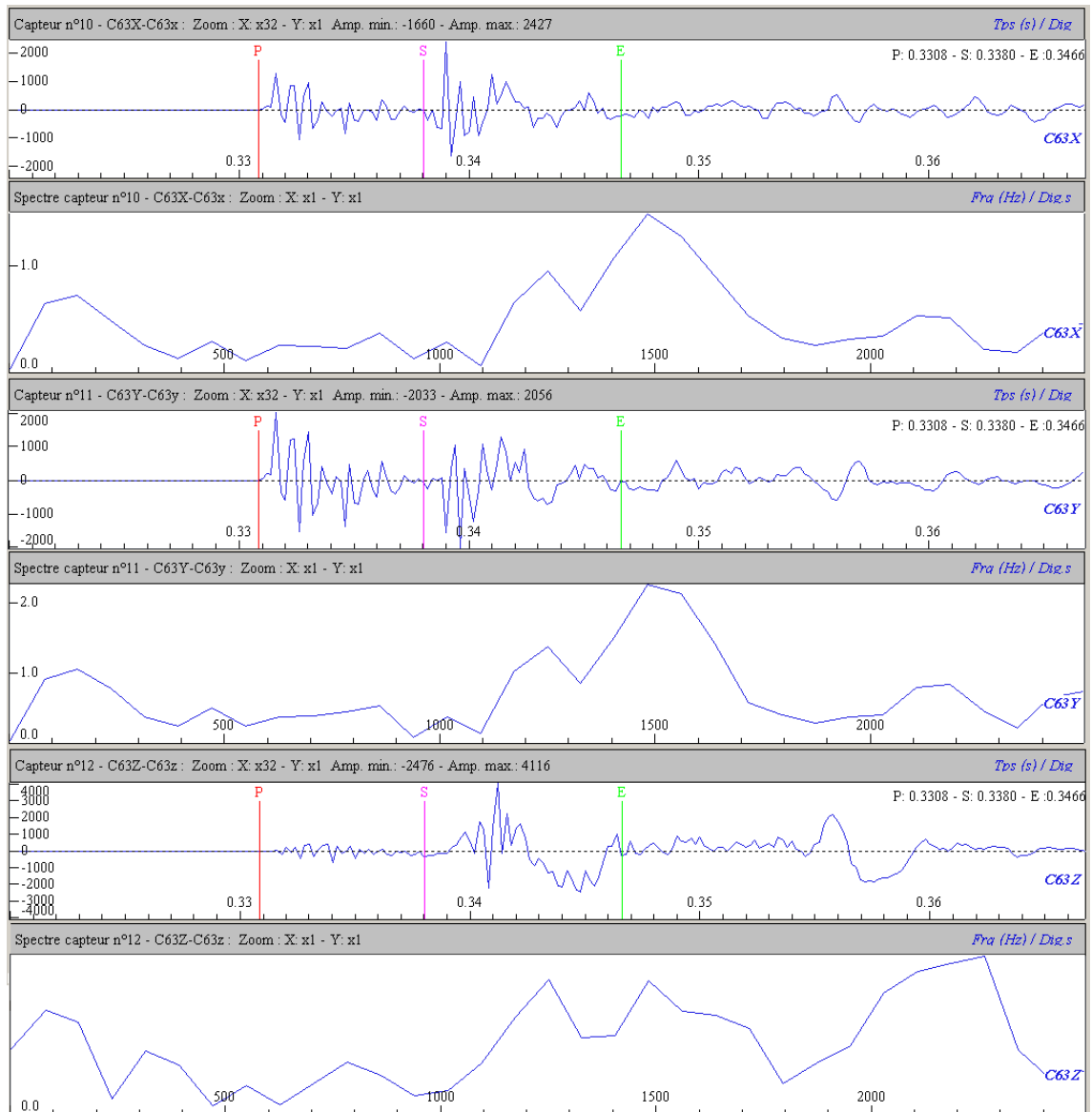


FIGURE B.28 – Le même événement, avec une analyse spectrale effectuée entre les temps d'arrivée des ondes P et S. Le spectre de la voie verticale est ici modifié et ressemble plus à celui des voies horizontales.

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMIQUES

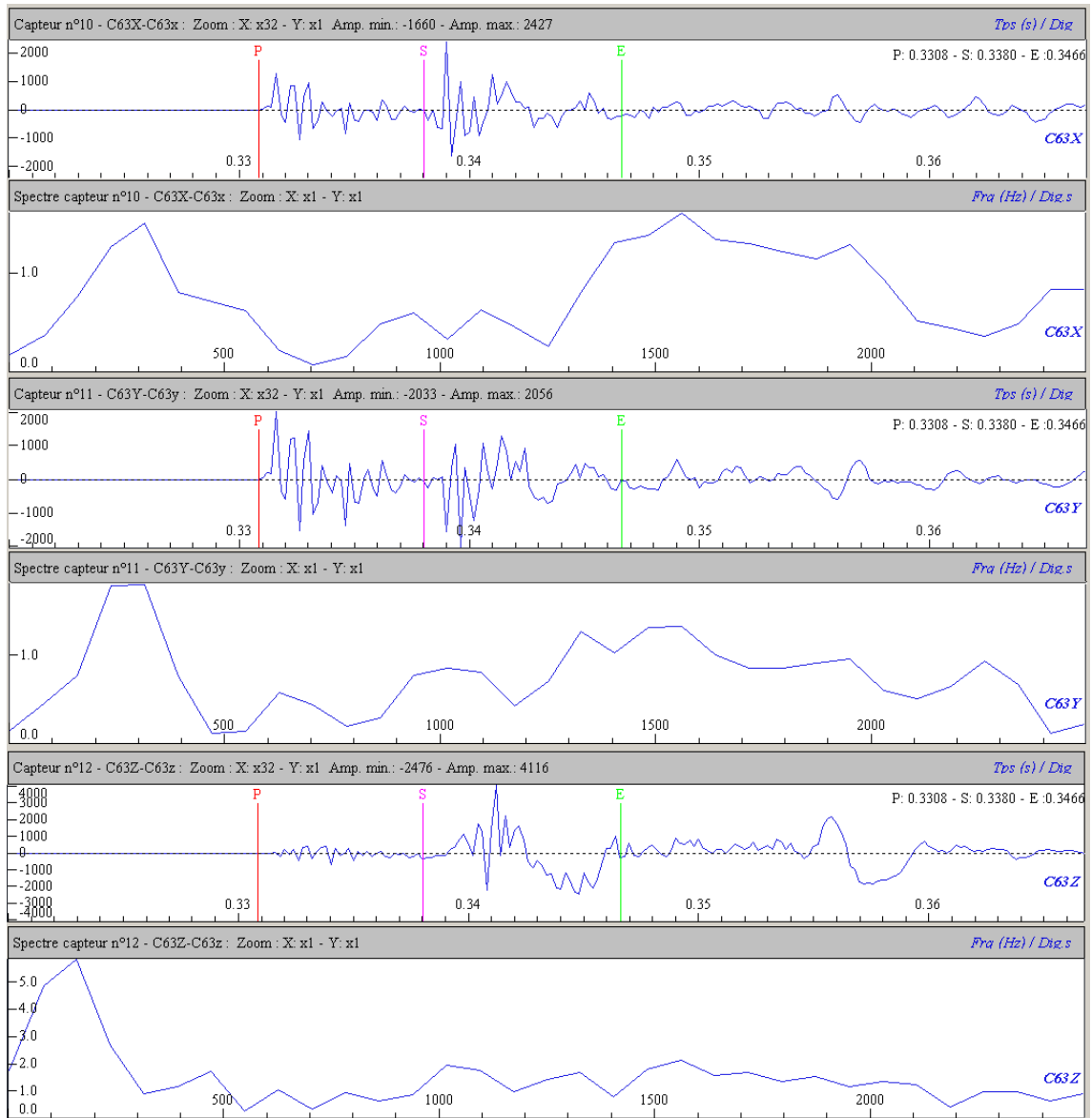


FIGURE B.29 – Le même événement, avec une analyse spectrale effectuée entre les pointés S et E. Les spectres des voies horizontales sont modifiés par rapport à ceux déterminés entre les pointés P et E.

→ Dans cet exemple, les fréquences des ondes S dominant pour la voie verticale, à l'inverse des voies horizontales où ce sont les ondes P.

B.4.3 Évolution des fréquences apparentes sur l'ensemble des enregistrements

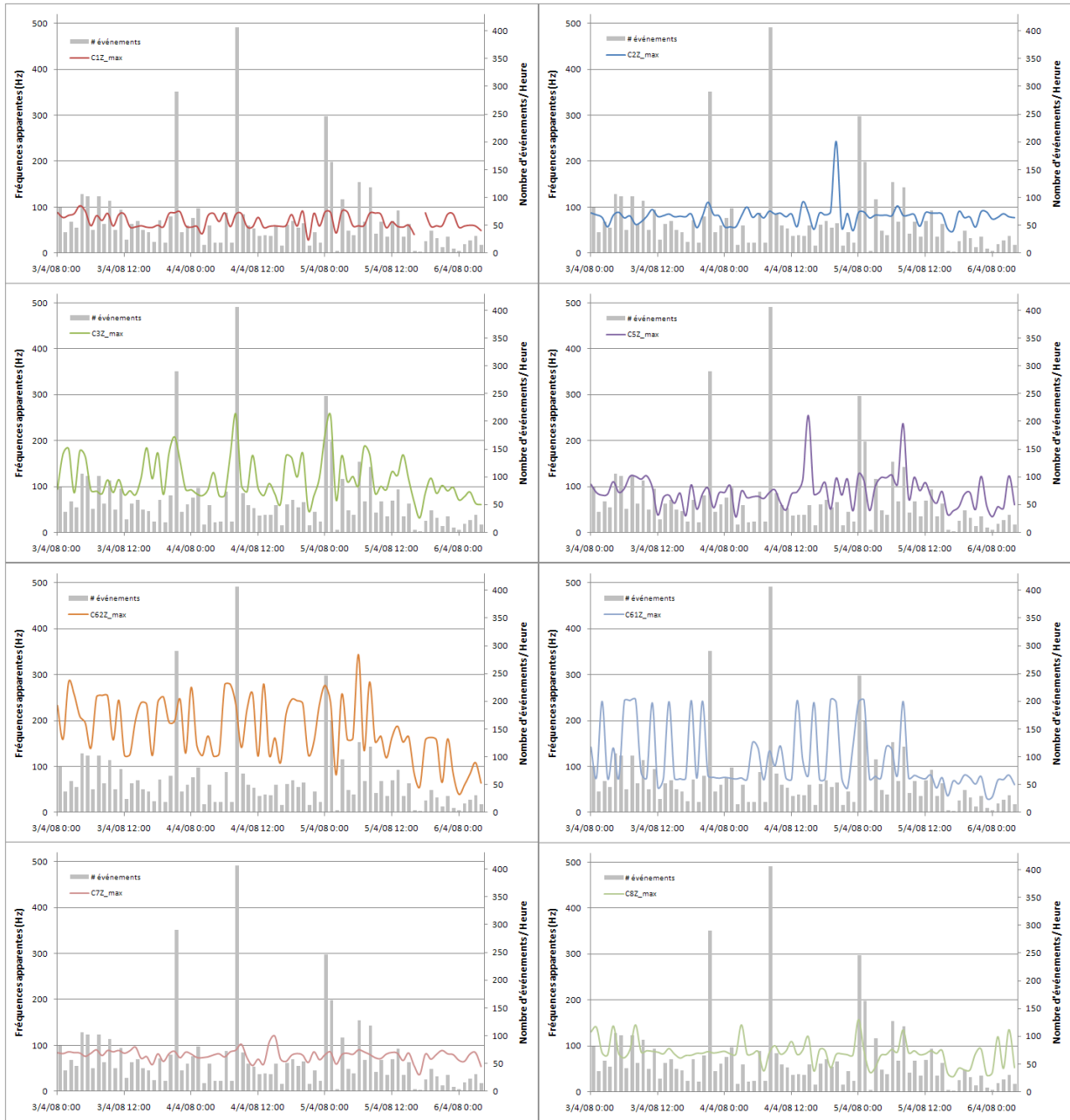


FIGURE B.30 – Évolution des fréquences fondamentales maximales observées au niveau des sondes 1D et voies verticales des sondes M3, M5 et M6.2, du 03 au 06 Avril 2008.

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSMIQUES

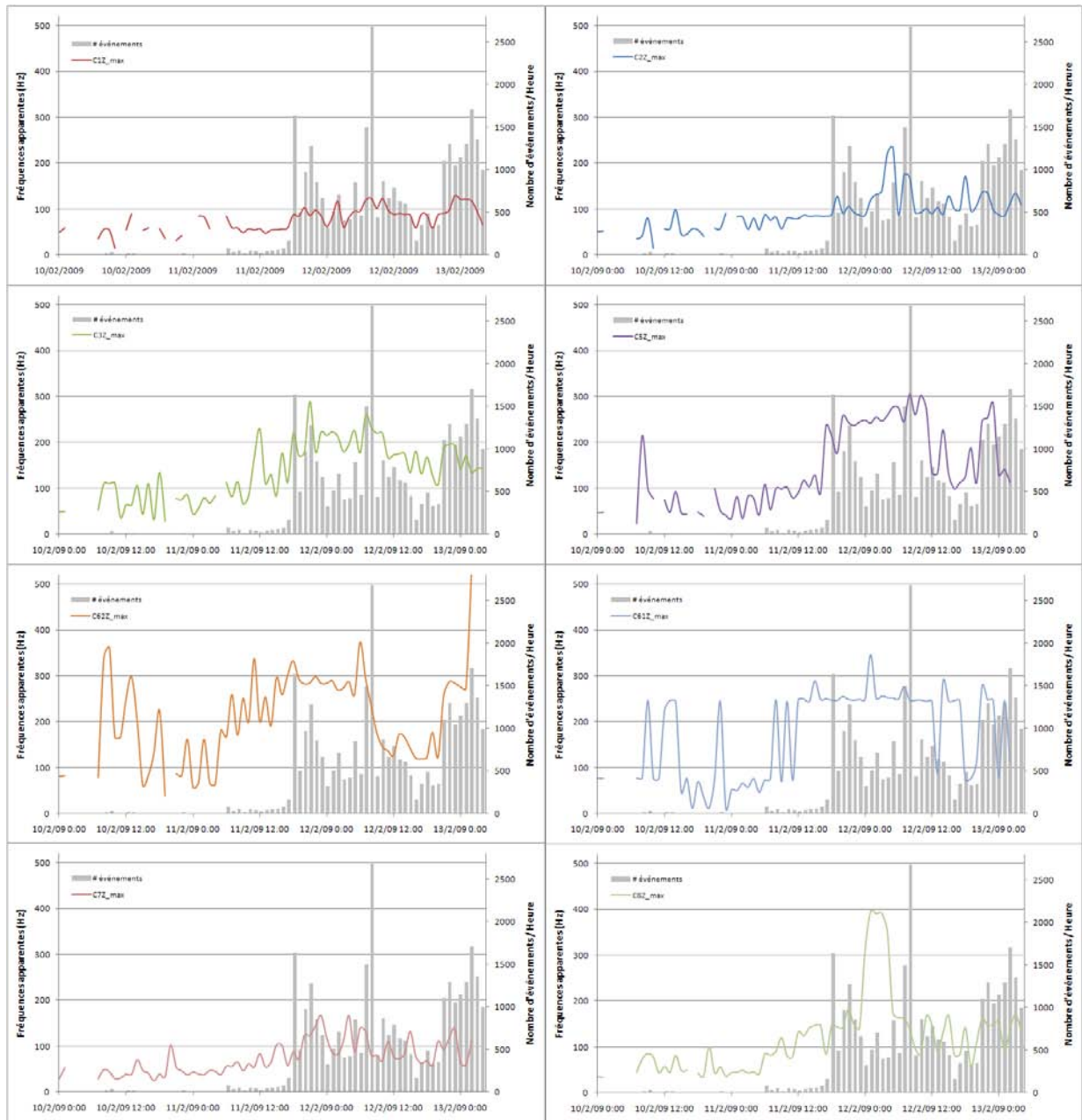


FIGURE B.31 – Évolution des fréquences fondamentales maximales observées au niveau des sondes 1D et voies verticales des sondes M3, M5 et M6.2, durant l'effondrement.

TABLE B.13 – *Comparaison entre les fréquences apparentes minimales, moyennes et maximales observées sur toute la période d'acquisition et sur les diverses crises.*

Fréquences (Hz)	2005-2009				08-31/05/07				Mars-Avril 08				11-17/01/09			
	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ
C1Z	4.27	42.04	360.11	14.37	4.88	44.31	134.28	16.81	4.27	42.95	134.89	15.07	7.32	39.8	102.54	13.69
C2Z	4.27	47.17	322.27	13.91	4.88	49.01	322.27	22.15	4.27	47.4	242.92	15.2	4.27	46.71	166.63	16.91
C3X	4.88	50.08	368.65	21.27	4.88	43.95	368.65	25.58	6.71	49.97	196.53	22.33	9.16	44.98	119.63	19.49
C3Y	6.1	51.01	343.02	22.46	6.1	45.5	343.02	27.44	6.1	50.06	200.81	23.55	15.87	47.15	109.25	18.44
C3Z	4.27	50.47	360.11	22.21	7.32	47.66	296.63	23.79	4.27	50.93	275.27	24.79	10.38	54.89	301.51	28.06
C5X	4.27	44.08	347.29	18.03	4.88	42.88	213.62	19.61	4.27	40.51	238.65	16.99	6.1	37.21	109.25	14.12
C5Y	4.27	47.09	369.87	21.39	4.88	49.52	185.55	29.18	4.27	42.75	244.75	20.41	7.93	41.43	153.81	16.64
C5Z	4.27	45.36	305.18	21.6	4.88	55.81	272.22	28.51	4.27	44.37	289.31	21.5	4.27	36.26	251.47	15.55
C63X	6.1	150.26	2500	210.26	15.87	107.87	2098.39	162.05	7.93	86	1074.83	84.82	15.26	47.78	321.05	28.99
C63Y	7.32	142.14	2500	199.57	7.32	101.26	1488.04	152.86	7.93	87.87	1022.95	85.73	18.92	50.91	326.54	31.9
C63Z	8.54	106.29	2500	170.06	9.77	94.87	2174.07	164.44	14.65	84.42	905.76	64.29	22.58	64.65	327.76	40.26
C62X	4.27	52.6	682.37	30.79	4.88	46.55	386.96	30.48	4.27	41.26	242.92	20.91	9.16	35	106.81	12.44
C62Y	4.88	52.35	591.43	29.58	4.88	47.07	231.93	25.23	4.88	41.81	246.58	21.95	7.93	36.23	117.8	15.97
C62Z	4.88	59.75	521.85	34.03	7.32	70.89	277.1	35.46	10.38	64.63	343.63	37.15	10.99	44.4	133.06	20.81
C61Z	4.88	43.56	357.67	29.82	15.87	52.26	357.67	45.36	7.32	40.94	270.39	23.15	16.48	35.73	234.99	18.55
C7Z	4.27	38.83	166.02	11.91					4.27	40.54	139.77	15.62	13.43	37.39	98.88	9.64
C8Z	4.27	41.9	396.12	14.64					4.27	42.59	175.17	15.51	7.93	38.44	111.69	8.62

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSEISMQUES

TABLE B.14 – Comparaison entre les fréquences apparentes minimales, moyennes et maximales observées sur toute la période d'acquisition et sur les diverses crises, pour les événements isolés.

Fréquences (Hz)	2005-2009				08-31/05/07				Mars-Avril 08				11-17/01/09			
	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ
C1Z	4.27	42.29	360.11	15.76	4.88	44.68	134.28	18.41	4.27	43.07	116.58	14.99	12.21	40.34	102.54	14.19
C2Z	4.27	47.36	322.27	15.33	4.88	50.71	322.27	28.09	4.27	47.38	242.92	15.6	4.27	47.69	166.63	17.94
C3X	4.88	50.72	368.65	22.25	4.88	45.73	368.65	32.94	6.71	50.94	196.53	22.92	9.16	45.39	119.63	20.32
C3Y	6.1	51.4	343.02	23.44	7.32	50.18	343.02	36.37	6.1	50.98	200.81	24.38	15.87	48.09	109.25	19.05
C3Z	4.27	50.91	360.11	23.62	7.32	49.52	296.63	28.77	4.27	51.3	275.27	25.23	10.38	55.65	301.51	30.06
C5X	4.27	43.62	347.29	18.98	4.88	43.15	213.62	22.62	4.27	40.78	238.65	17.43	6.1	38.29	109.25	15.34
C5Y	4.27	46.9	369.87	22.87	4.88	50.31	185.55	31.05	4.27	43.26	244.75	21.33	7.93	42.52	153.81	17.33
C5Z	4.27	46.2	302.73	23.56	4.88	55.94	272.22	30.97	4.27	45.38	289.31	22.92	4.27	36.93	251.47	17.93
C63X	6.1	155.95	2500	221.61	15.87	138.27	2098.39	223.19	7.93	91.96	1074.83	92.75	15.26	50.65	321.05	33.14
C63Y	7.32	148.96	2500	209.77	7.32	132.82	1488.04	208.12	7.93	94.37	1022.95	93.57	18.92	53.35	326.54	36.33
C63Z	8.54	106.46	2500	172.19	9.77	123.7	2174.07	224.75	15.26	87.42	905.76	68.8	22.58	67.7	327.76	42.98
C62X	4.27	51.96	497.44	30.47	4.88	49.76	386.96	37.98	4.27	42.12	242.92	21.87	9.16	36.13	105.59	13.4
C62Y	4.88	51.88	585.33	29.3	4.88	49.04	231.93	29.13	4.88	42.9	246.58	22.77	7.93	37.78	117.8	17.85
C62Z	4.88	62.52	373.54	37.56	7.32	71.73	277.1	42.81	10.38	66.49	343.63	39.18	10.99	47.42	133.06	22.09
C61Z	4.88	46.25	357.67	35.43	15.87	61.5	357.67	61.01	7.32	41.94	270.39	25.37	17.09	37.12	234.99	22.05
C7Z	4.27	39.59	166.02	13.04					4.27	41.01	139.77	15.85	13.43	37.82	98.88	10.19
C8Z	4.27	42.74	396.12	17.08					4.27	43.21	175.17	16.2	7.93	38.87	111.69	9.65

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMQUES

TABLE B.15 – Comparaison entre les fréquences apparentes minimales, moyennes et maximales observées sur toute la période d'acquisition et sur les diverses crises, pour les événements "en rafale".

Fréquences (Hz)	2005-2009				08-31/05/07				Mars-Avril 08				11-17/01/09			
	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ	Min	Moy	Max	σ
C1Z	4.27	41.87	156.25	13.3	4.88	44	87.89	15.35	4.27	42.8	134.89	15.17	7.32	38.95	74.46	12.86
C2Z	4.27	46.97	251.47	12.12	4.88	47.53	251.47	15.07	4.27	47.45	166.02	14.4	15.87	44.68	92.16	14.39
C3X	4.88	49.2	144.65	19.81	4.88	42.29	107.42	15.65	15.87	47.49	130.62	20.55	16.48	44.06	114.75	17.49
C3Y	6.1	50.5	231.93	21.06	6.1	41.19	111.08	13.79	15.87	47.82	191.04	21.22	15.87	45.01	83.62	16.86
C3Z	7.32	49.88	258.79	20.19	9.77	45.96	175.78	17.91	9.77	50.04	257.57	23.68	14.04	53.17	163.57	22.89
C5X	4.88	44.6	241.7	16.79	6.1	42.63	163.57	16.55	4.88	39.97	138.55	16.03	6.1	35.08	75.07	11.07
C5Y	4.88	47.31	249.02	19.43	4.88	48.83	168.46	27.45	5.49	41.65	166.02	18.25	7.93	39.08	152.59	14.82
C5Z	4.27	44.44	305.18	19.15	4.88	55.7	125.73	26.47	4.27	42.7	211.79	18.83	20.14	34.9	70.8	8.78
C63X	7.93	139.81	2362.06	187.17	18.31	78.9	549.32	46.27	18.31	69.96	765.99	55.24	15.26	41.23	111.08	13.93
C63Y	8.54	129.64	1934.81	178.67	18.31	70.78	604.25	47.46	18.92	70.44	742.19	56.24	19.53	45.45	169.68	17.27
C63Z	9.77	106.04	2497.56	166.03	21.97	67.8	946.05	59.47	14.65	76.02	316.77	48.58	25.02	57.67	198.98	32.26
C62X	4.88	53.48	682.37	31.22	7.32	43.56	183.11	20.81	6.1	39.29	177	18.39	15.87	32.48	106.81	9.53
C62Y	4.88	53	591.43	29.94	4.88	45.27	179.44	20.93	4.88	39.21	152.59	19.64	16.48	32.88	73.85	10.16
C62Z	7.32	55.73	521.85	27.65	10.99	70.09	161.13	26.65	10.99	59.76	256.35	30.7	10.99	37.68	126.34	15.73
C61Z	6.71	39.45	261.84	17.38	18.31	43.36	239.26	17.23	11.6	38.14	250.86	14.86	16.48	32.6	47.61	3.23
C7Z	4.88	37.8	131.84	10.06					10.38	39.3	95.83	14.95	17.7	36.45	73.85	8.26
C8Z	4.27	40.76	172.73	10.29					6.1	40.95	157.47	13.37	21.97	37.47	49.44	5.52

B.4.4 Fréquences des signaux pointés

La détermination des fréquences parasites peut être fastidieuse, ces dernières pouvant différer d'une sonde à l'autre et évoluer au cours du temps (comme pour la M6.2 par exemple). Or, on peut s'affranchir de cette contrainte en utilisant uniquement les signaux pointés.

Les événements pointés automatiquement sont des événements isolés ayant rapport signal sur bruit élevé (≥ 10). Ils font parti des événements retenus, ayant des fréquences fondamentales apparentes différentes de fréquences parasites, mais sont moins nombreux du fait que le seuil STA/LTA peut être dépassé plusieurs fois alors qu'il n'existe qu'un seul événement sur la fenêtre d'enregistrement. Aussi, les résultats obtenus pour les fichiers pointés automatiquement (P et E) ont été examinés.

Pour les périodes du 03 au 06 Avril 2008 et d'effondrement, on observe que (Tableau et Figure suivants) :

- les remarques effectuées pour l'ensemble des événements sont aussi valables ici ;
- en moyenne, les valeurs déterminées sont similaires à celles déterminées pour l'ensemble des événements. Néanmoins, les minima sur chaque période ont tendance à être légèrement supérieurs, tandis que les maxima sont inférieurs à ceux calculés pour tous les événements ;
- les courbes d'évolution sont similaires à celles tracées précédemment, notamment la courbe des maxima de la sonde M6.3 pour la période d'effondrement est quasiment identique à celle définie pour tous les événements. (Les fréquences enregistrées par cette sonde pour les périodes de crise sont quant à elles systématiquement inférieures.)

TABLE B.16 – *Comparaison entre les fréquences minimales, moyennes et maximales des événements pointés observées du 03 au 06 Avril 2008 et sur la période d'effondrement.*

Fréquence (Hz)	03-06 Avril 08				10-13 Février 2009			
	Minimum	Moyenne	Maximum	σ	Minimum	Moyenne	Maximum	σ
C1Z	11.6	45.72	87.89	12.7	9.77	42.28	85.45	12.64
C2Z	12.82	46.62	87.89	12.26	7.32	47.13	112.3	11.3
C3X	15.87	49.95	109.86	22.06	15.87	51.63	161.74	21.54
C3Y	7.32	50.23	128.17	22.21	15.87	53.57	225.22	23.4
C3Z	15.87	49.95	109.86	22.06	10.99	52.64	288.7	23.76
C5X	4.27	46.13	166.02	23.9	5.49	48.55	244.14	23.46
C5Y	8.54	45.91	237.43	21.99	9.77	51.56	249.02	27.48
C5Z	4.88	46.15	237.43	17.36	5.49	48.55	244.14	23.46
C63X	21.36	88.23	784.3	104.16	15.26	331.4	2500	328.08
C63Y	22.58	89.88	817.87	96.06	18.31	305.58	2500	312.64
C63Z	20.75	85.61	672	77.43	21.36	190.28	2500	315.4
C62X	6.71	45.61	233.76	28.17	14.65	68.78	497.44	41.49
C62Y	6.71	46.03	184.33	27.38	14.65	66.06	585.33	39.24
C62Z	12.21	64.01	283.81	40.64	4.88	69.7	373.54	46.25
C61Z	11.6	42.36	246.58	20.31	4.88	47.43	249.02	30.51
C7Z	9.77	41.18	90.33	14.28	6.1	37.89	166.02	10.69
C8Z	21.97	43.5	145.87	15.04	17.09	42.25	170.9	14.9

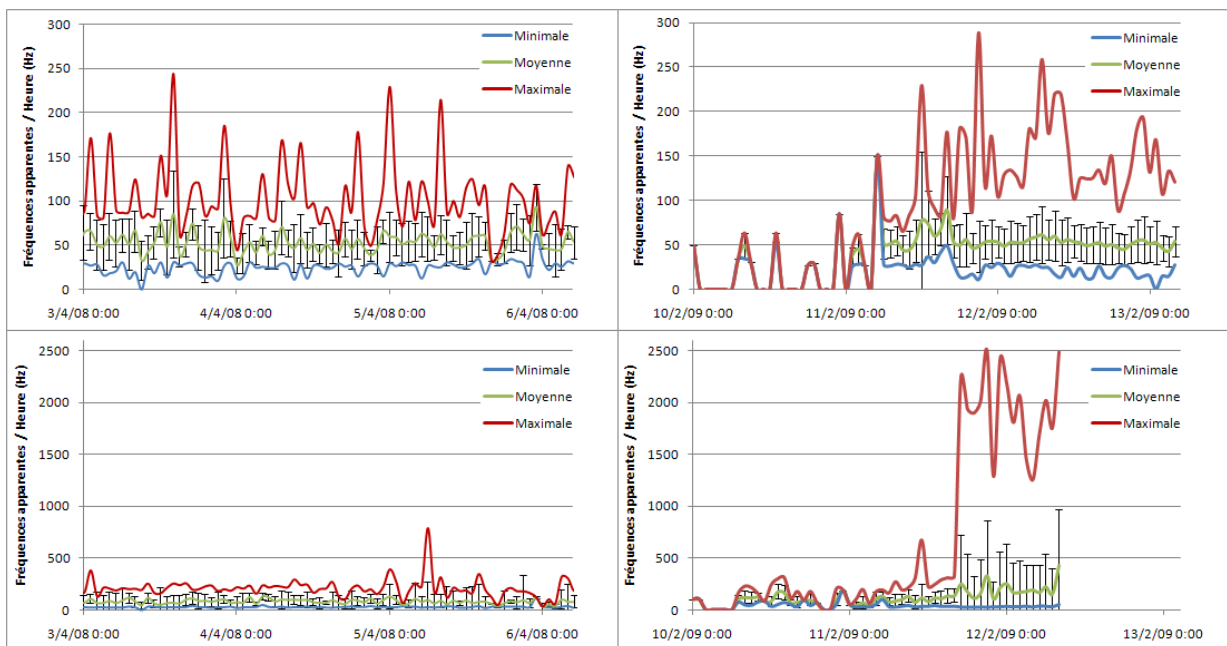


FIGURE B.32 – Évolution des fréquences fondamentales apparentes minimales, moyennes et maximales des signaux pointés enregistrées au niveau des voies verticales des sondes M3 (en haut) et M6.3 (en bas), entre les 03 et 06/04/08 (à gauche) et du 10 au 13/02/09 (à droite). Notons que l'échelle en énergie a été multipliée par un peu plus de 8 entre les graphes des deux sondes.

B.4.5 Comparaison entre l'évolution des Amplitudes, Énergies au capteur et Fréquences des Événements

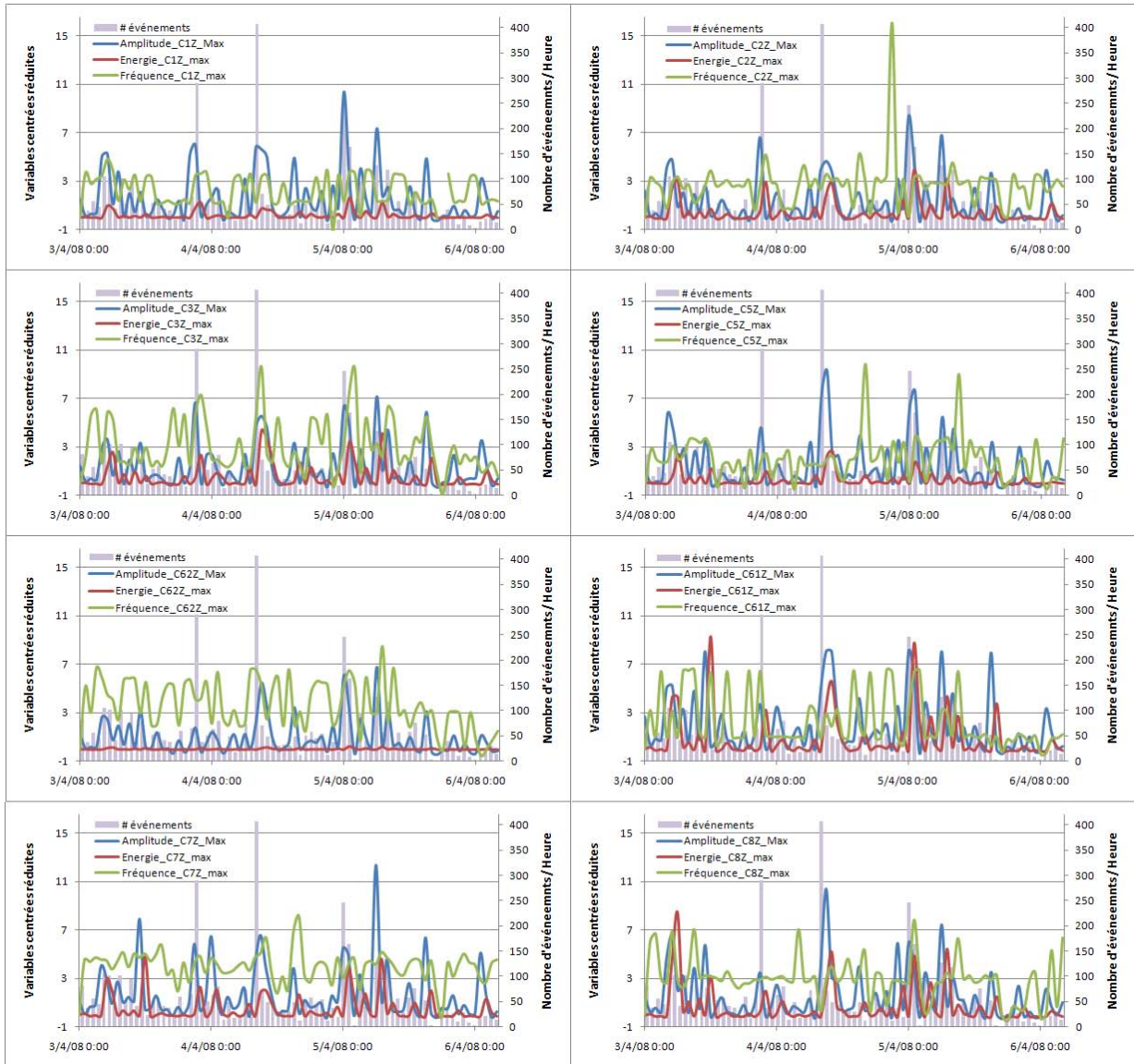


FIGURE B.33 – Comparaison entre les variations en amplitude, énergies et fréquences maximales, au niveau des sondes 1D et voies verticales des sondes M3, M5 et M6.2, du 03 au 06 Avril 2008.

B. SIGNATURE DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMIQUES

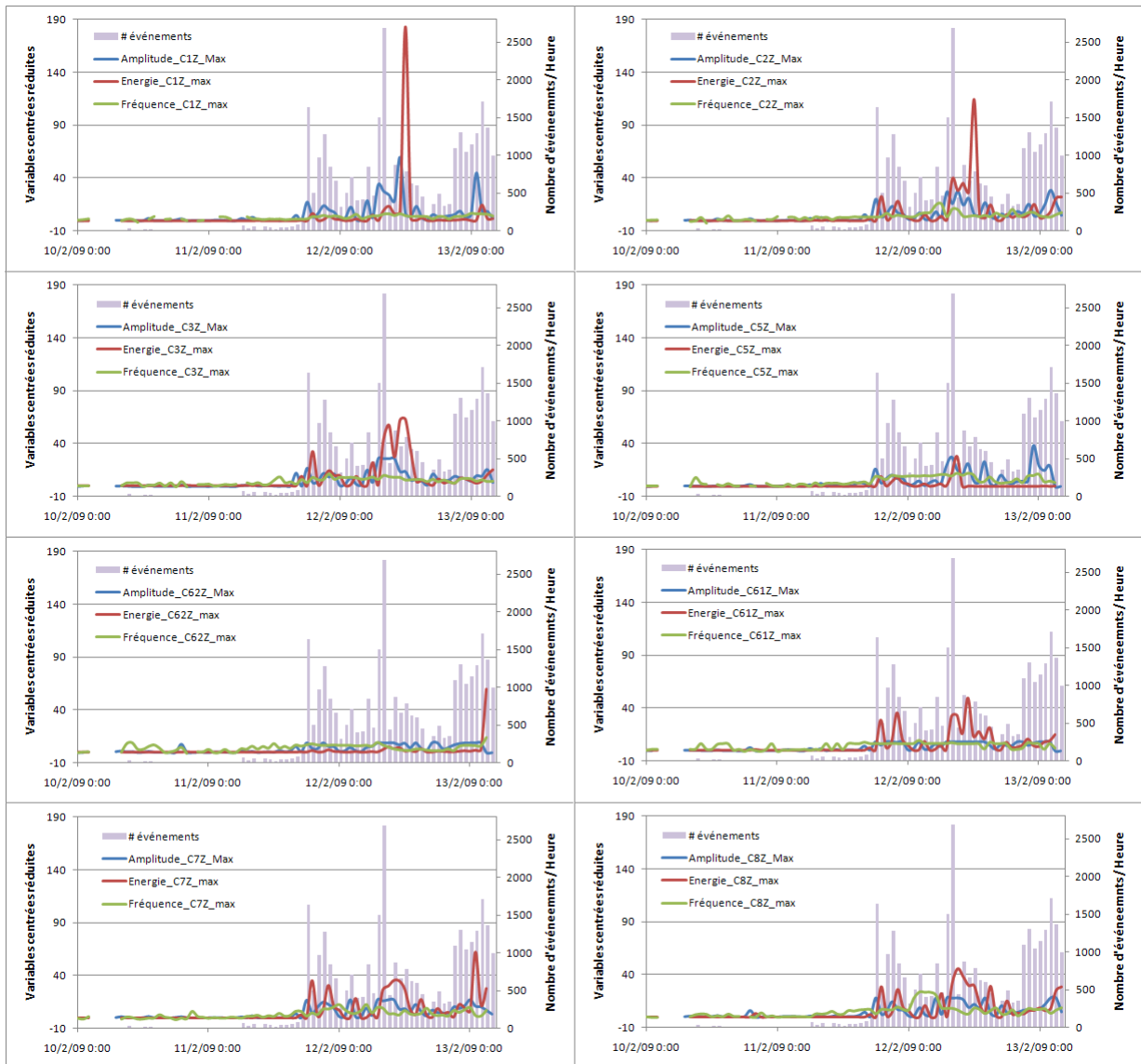


FIGURE B.34 – Comparaison entre les variations en amplitude, énergies et fréquences maximales, au niveau des sondes 1D et voies verticales des sondes M3, M5 et M6.2, du 10 au 13 Février 2009. Notons que l'échelle a été multipliée par 10 par rapport à la figure précédente.

B.4.6 Paramètre β

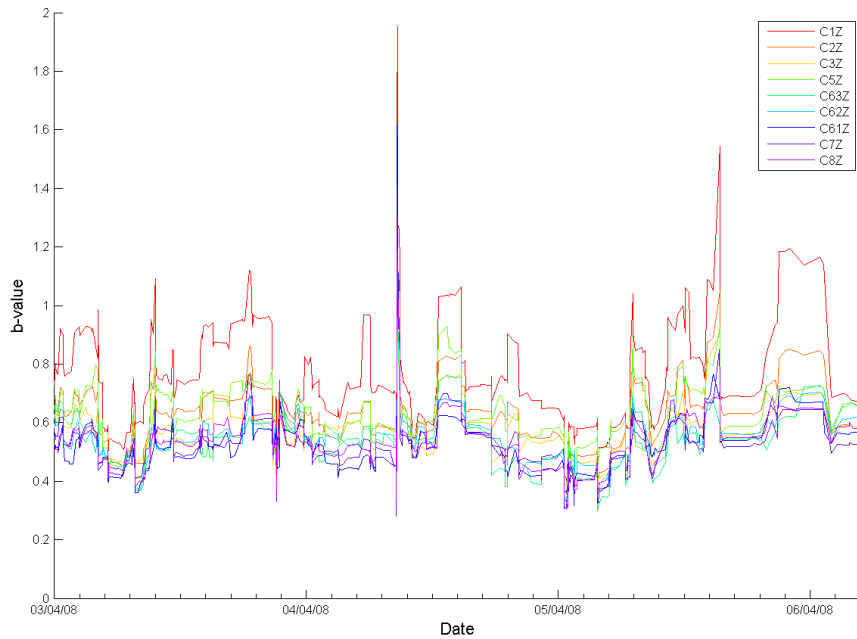


FIGURE B.35 – Comparaison entre l'évolution du paramètre β , calculé sur des fenêtres de 100 événements, pour chaque sonde, du 03 au 06 Avril 2008.

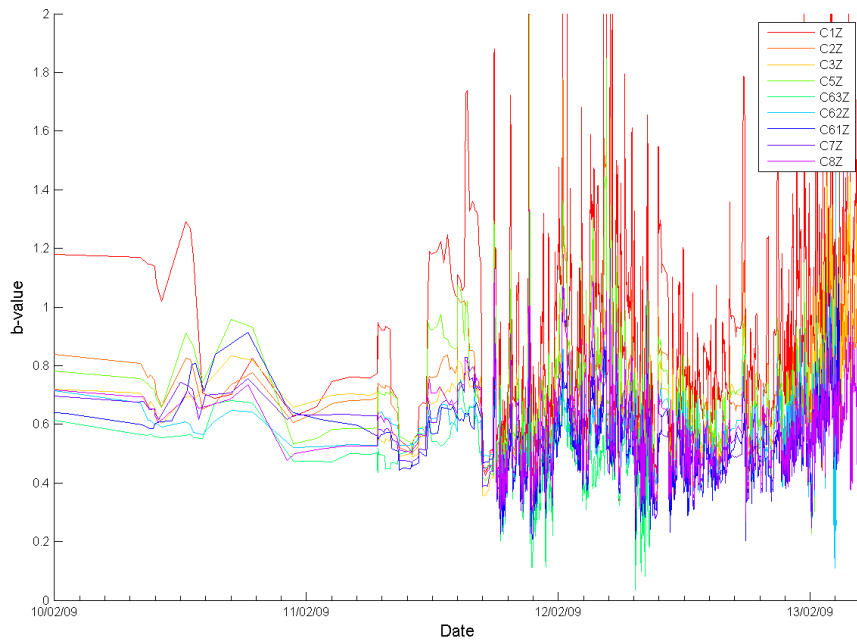


FIGURE B.36 – Comparaison entre l'évolution du paramètre β , calculé sur des fenêtres de 100 événements, pour chaque sonde, pendant l'effondrement.

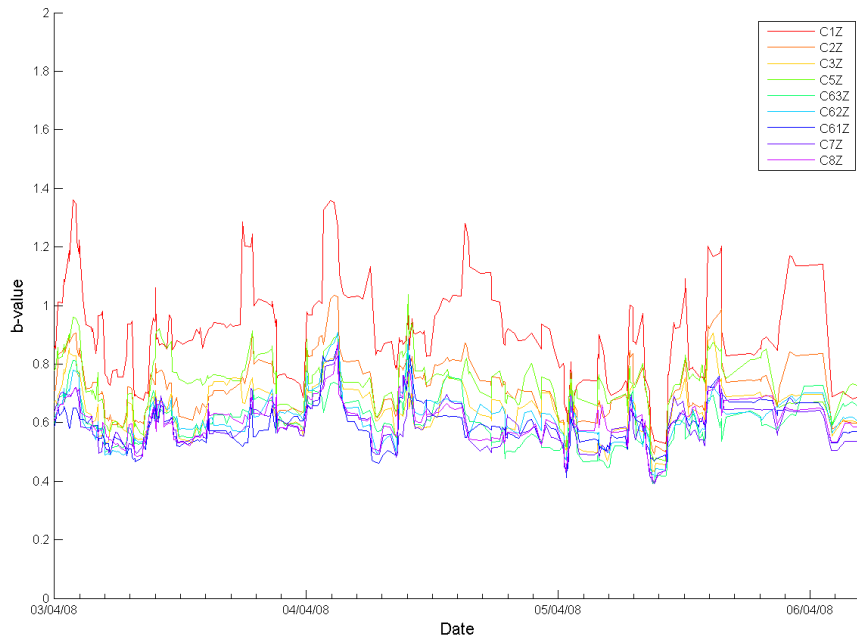


FIGURE B.37 – Comparaison entre l'évolution du paramètre β , calculé avec les événements isolés, sur des fenêtres de 100 événements, pour chaque sonde, du 03 au 06 Avril 2008.

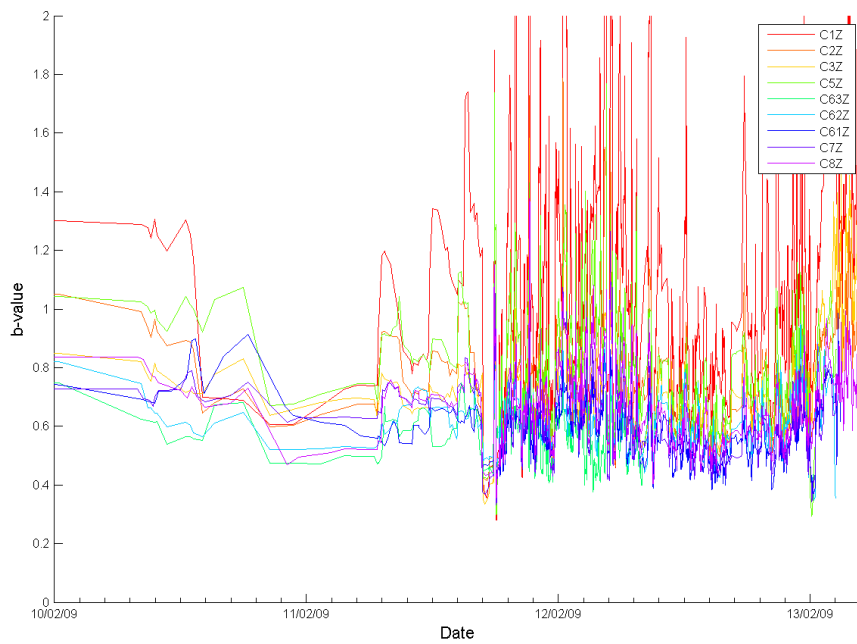


FIGURE B.38 – Comparaison entre l'évolution du paramètre β , calculé avec les événements isolés, sur des fenêtres de 100 événements, pendant l'effondrement.

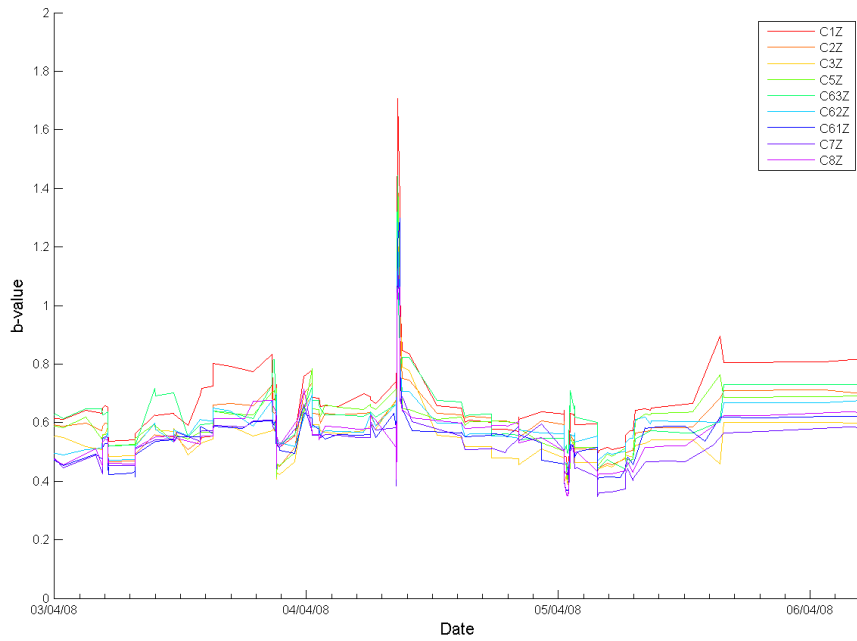


FIGURE B.39 – Comparaison entre l'évolution du paramètre β , calculé avec les événements de type rafale, sur des fenêtres de 100 événements, pour chaque sonde, du 03 au 06 Avril 2008.

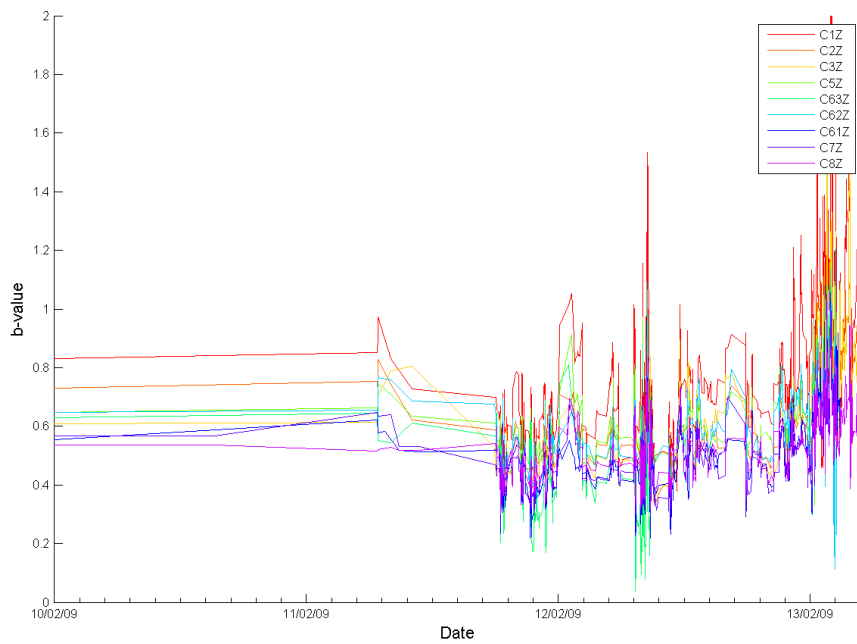


FIGURE B.40 – Comparaison entre l'évolution du paramètre β , calculé avec les événements de type rafale, sur des fenêtres de 100 événements, pendant l'effondrement.

C Localisation des événements microsismiques

C.1 Méthode de localisation absolue

C.1.1 Options supplémentaires pour la localisation dans le module SYTMISauto

Alternative à l'inversion par 8-Tree : Méthode C.H.E.A.P.

La méthode de *C.H.E.A.P.*, ou *Calcul Hypocentral avec Établissement Automatique de Probabilité*, est une méthode inverse itérative linéaire, dont la fonction objectif est une fonction pondérée au sens des moindres carrés.

Elle s'appuie sur un algorithme d'optimisation, la *descente par gradient*, dont le principe est de partir d'un point donné ou aléatoire de la fonction objectif, évalué localement, puis de se déplacer dans la direction de plus forte pente.

En appliquant un certain nombre d'itérations, l'algorithme devrait converger vers une solution qui est un minimum de cette fonction.

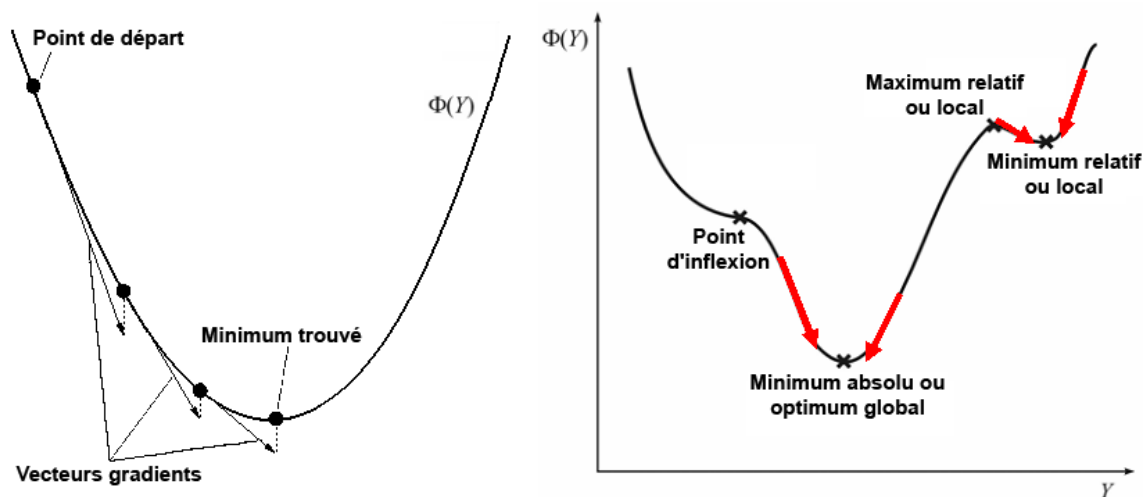


FIGURE C.41 – Illustration du principe de la descente de gradient, dans le cas d'une fonction à une variable.

Ceci équivaut à partir d'une position connue dans l'espace de recherche, de calculer la différence entre les temps de trajet théoriques jusqu'aux sondes et les données observées, et ensuite d'avancer de proche en proche en comparant les valeurs obtenues avec celles qui seraient trouvées au niveau des points voisins.

En outre, la méthode C.H.E.A.P. a pour avantage d'être efficace et rapide si le foyer *a priori* est proche de la solution : en se concentrant sur les environs de ce dernier, la minimisation par descente de gradient permet de ne pas tester tous les jeux de paramètres.

Néanmoins, cette approche se heurte aux problèmes des minima locaux. En effet, il arrive fréquemment que le minimum global de la fonction soit masqué par un minimum local (cf Fig. C.41). En l'atteignant, l'algorithme reste piégé, du fait que toute variation de la fonction objectif implique une augmentation de sa valeur, et donc une dégradation de la solution.

De plus, les critères définis pour arrêter l'algorithme tels qu'un nombre maximal d'itérations, un seuil minimal de la fonction ou une variation minimale du gradient à atteindre, peuvent présenter le défaut de stopper l'algorithme trop tôt, notamment si la fonction ne converge pas encore ou si elle présente des "plateaux".

Les résultats dépendront ainsi fortement du modèle initial.

Par ailleurs, on retiendra que la méthode C.H.E.A.P. permet de prendre en compte l'erreur due à la méconnaissance du modèle de vitesse, ce point se traduisant par le fait que chaque donnée est décrite avec une matrice de covariance des erreurs de mesure. La densité de probabilité, ainsi que les erreurs de localisation des foyers *a posteriori* calculées auront une distribution gaussienne, et les ellipsoïdes d'erreurs seront centrés sur les hypocentres déterminés.

Alternative à la norme L2 : norme EDT

La fonction de vraisemblance, utilisée dans la méthode 8-Tree peut être exprimée sous la forme *EDT* (= Equal Differential Time) :

$$pdf(x) \propto k \times \left[\sum_{obs_a, obs_b} \frac{1}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}} \times \exp \left[-\frac{[(d_{obs_a}(x) - d_{obs_b}(x)) - (d_{calca}(x) - d_{calcb}(x))]^2}{\sigma_a^2 + \sigma_b^2} \right] \right]^N$$

où :

- d représente les données observées ou calculées ;
- σ correspond aux erreurs sur ces dernières ;
- N est le nombre total d'observations.

Le calcul s'effectue en prenant en compte toutes les paires possibles d'observations de même nature (i.e. temps d'arrivée avec temps d'arrivée, angles avec angles).

Cette formulation permet d'atténuer les données aberrantes et de s'affranchir des temps d'origine T_0 . Néanmoins, à cause du lissage des données, les solutions obtenues sont souvent moins précises.

C.2 Calibrage de la localisation

C.2.1 Analyse de polarisation des tirs de calage

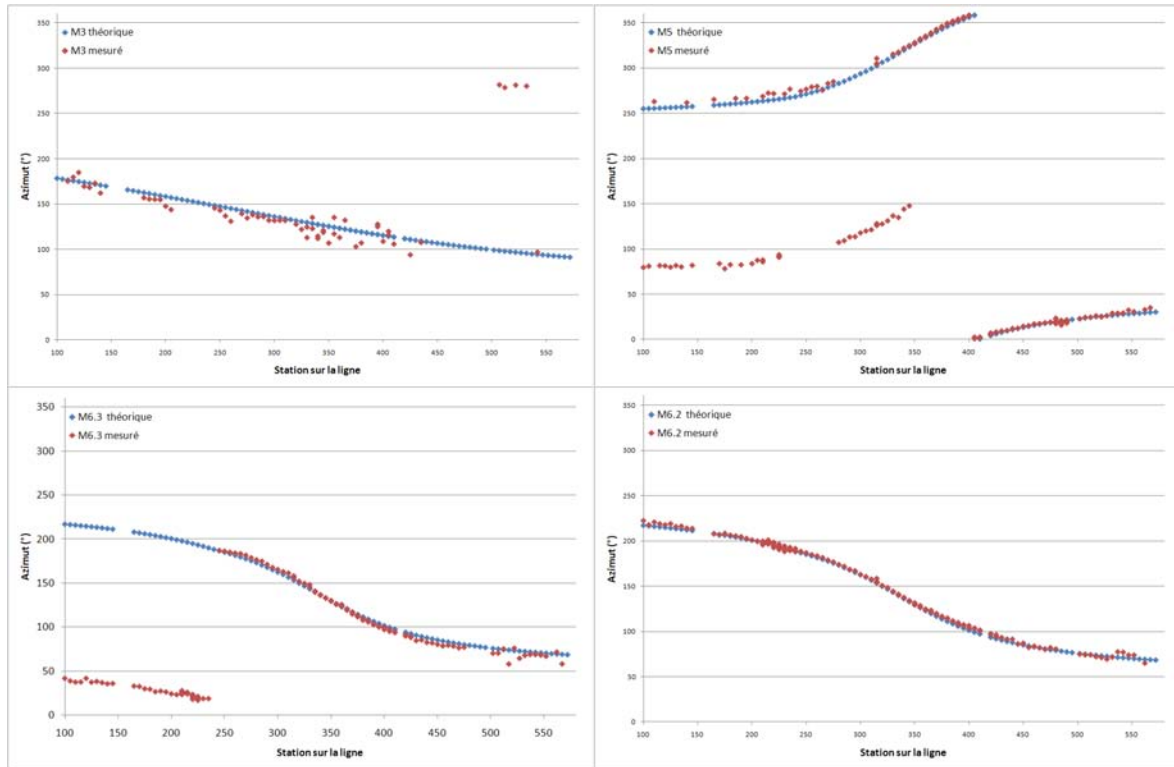


FIGURE C.42 – Comparaison entre les Azimuts des tirs calculés et théoriques.

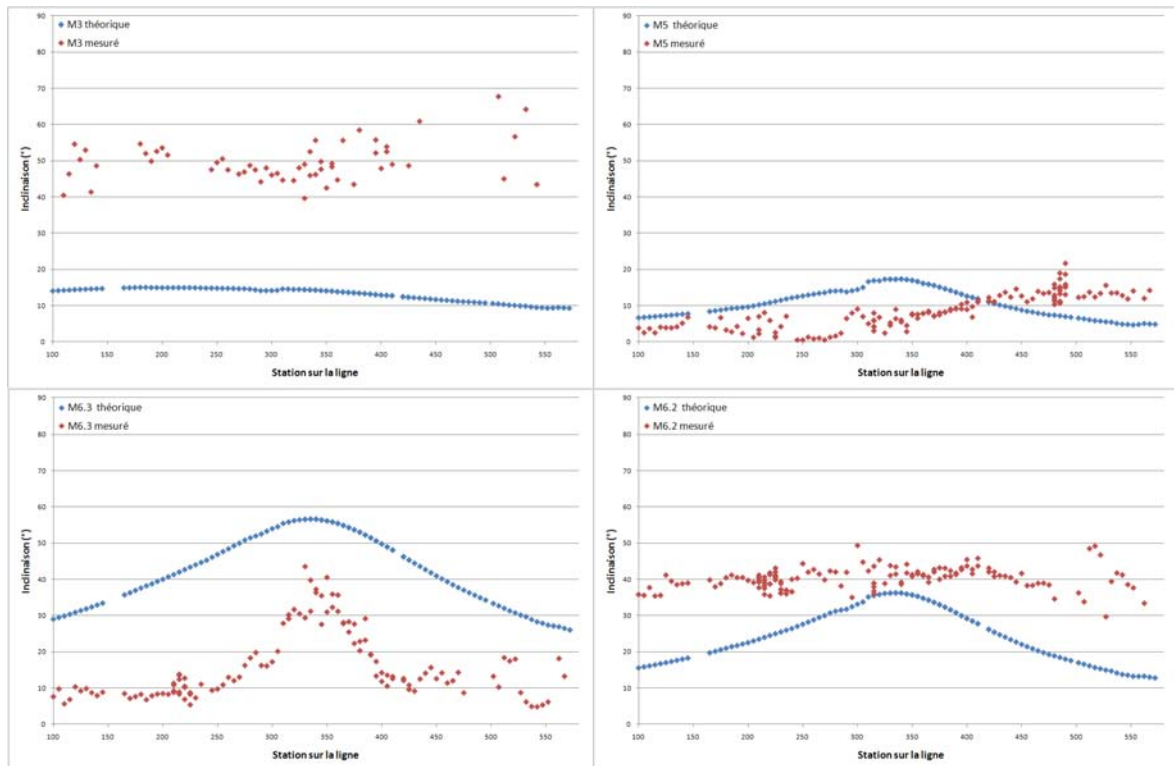


FIGURE C.43 – Comparaison entre les Azimuts des tirs calculés en rais droits et théoriques.

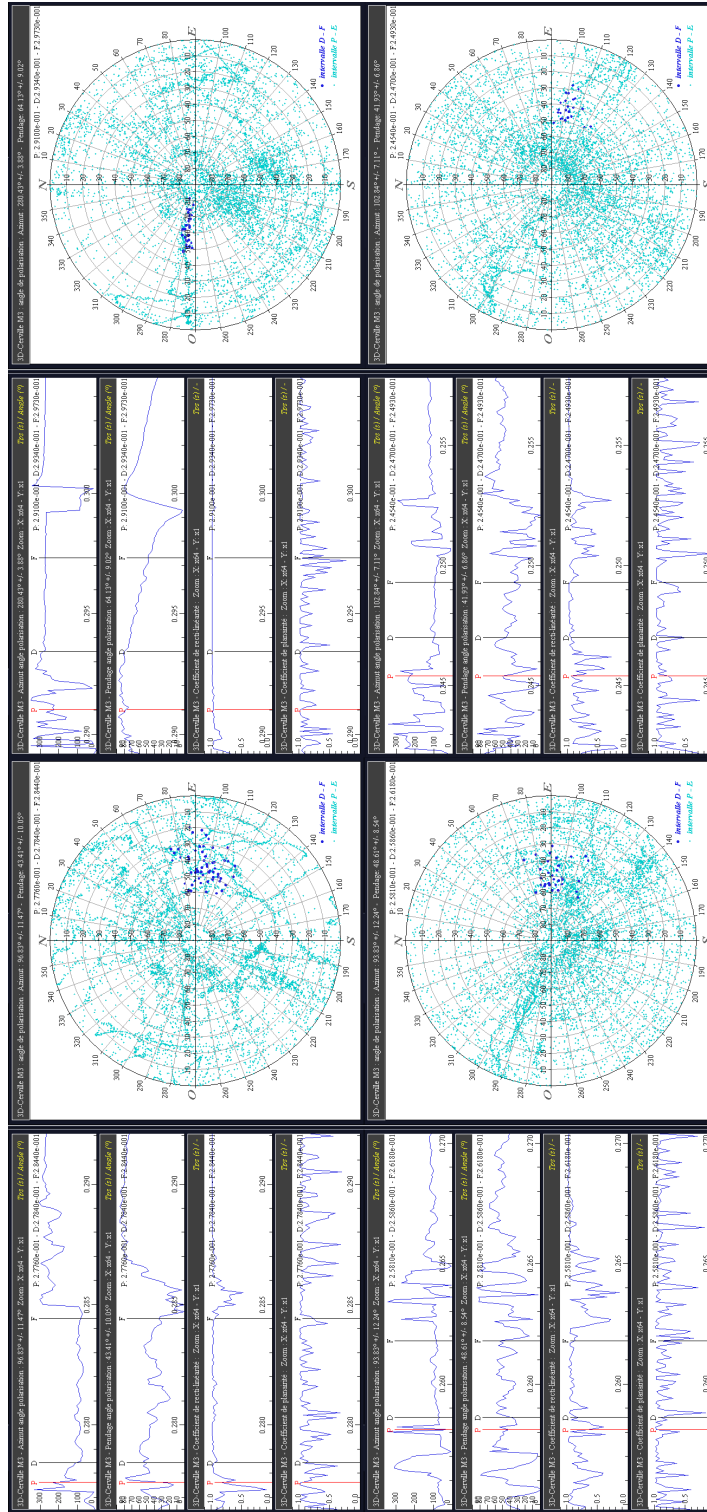


FIGURE C.44 – Polarisation au niveau de la sonde M3 pour les tirs 041014, 1354918, 041014, 1313766 (en haut), 041013, 7293863 et 041013, 7020421 (en bas) .

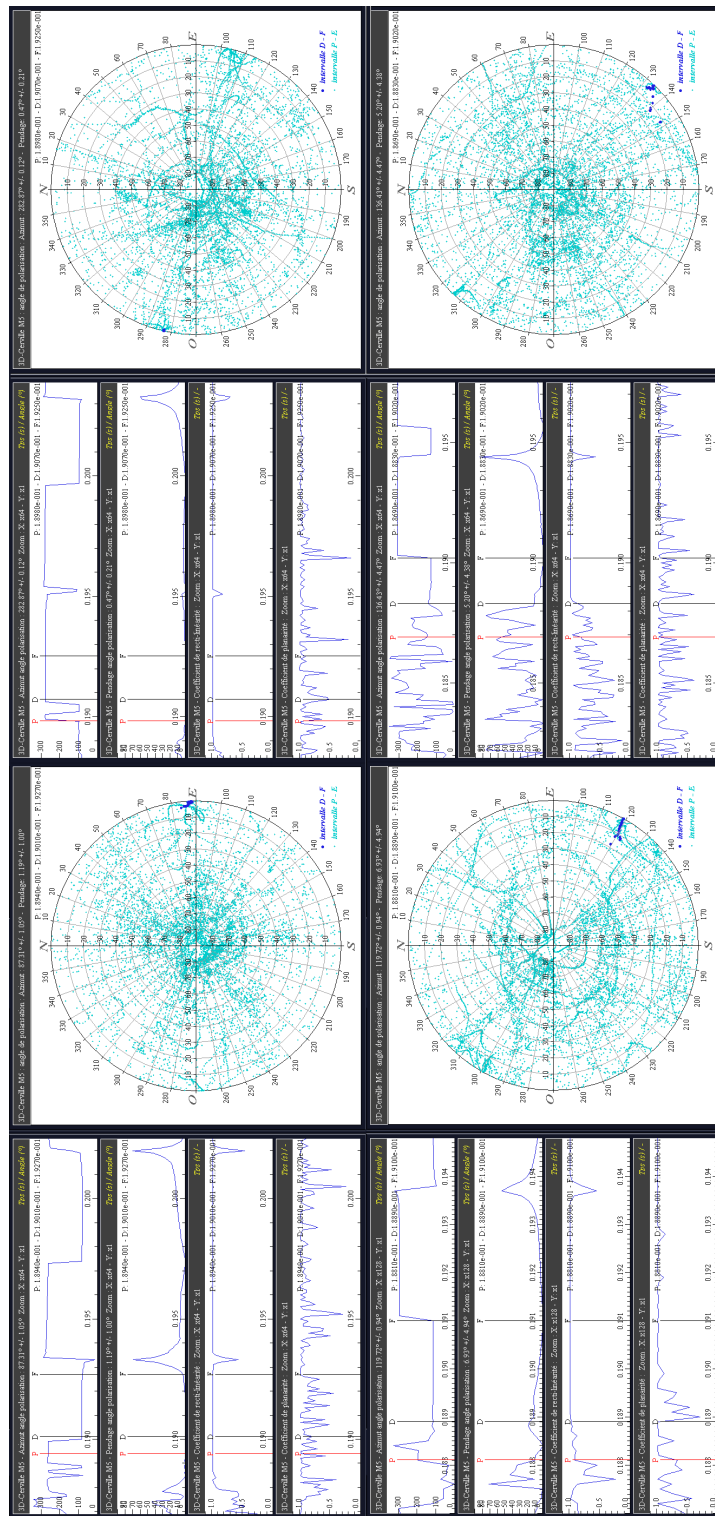


FIGURE C.45 – Polarisation au niveau de la sonde M5 pour les tirs 041013_1500919, 041013_4273223 (en haut), 041013_4450856 et 041013_5090948 (en bas).

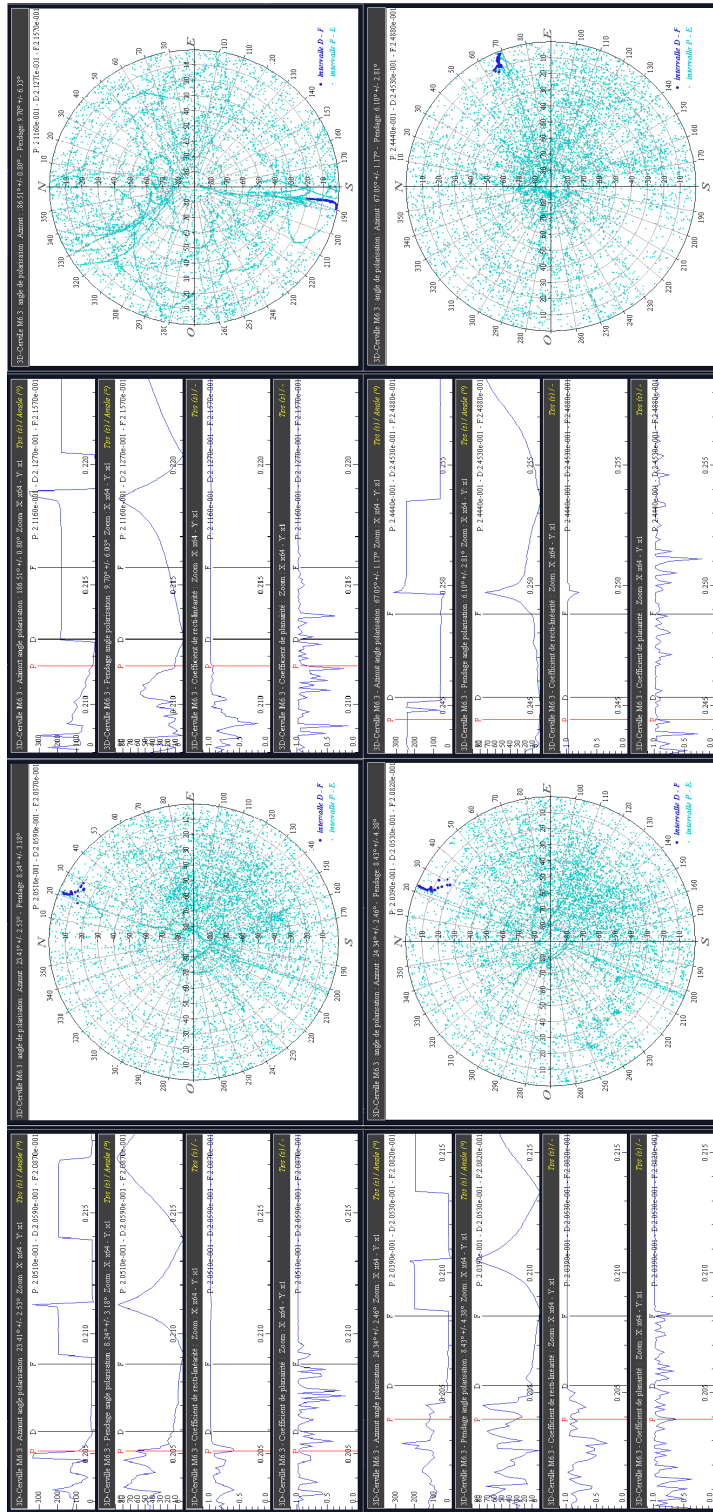


FIGURE C.46 – Polarisation au niveau de la sonde M6.3 pour les tirs 041013₁4113350, 041013₁1500919 (en haut), 041013₁1482898 et 041014₁4084251 (en bas).

C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMQUES

TABLE C.17 – Sens de premier mouvement observés pour les tirs de calage.

Fichier *.cvl	C1Z	C2Z	C4Z	C3X	C3Y	C3Z	C5X	C5Y	C5Z	C63X	C63Y	C63Z	C62X	C62Y	C62Z
041012_17180196	?	+	~+	+	+	-	-	+	~+	~+	+	+	-	+	-
041012_18030465	?	+	~+	+	+	-	-	+	~+	~+	+	+	-	+	-
041012_18133796	~+	+	+	+	+	-	-	+	?	-	+	+	-	+	-
041012_18230294	?	+	+	+	+	-	-	+	~+	-	+	+	-	+	-
041012_18304417	~+	+	~+	+	+	-	-	+	~+	-	+	+	-	+	-
041012_18381387	?	+	+	+	+	-	-	+	~+	-	+	+	-	+	-
041012_18415273	?	+	+	+	+	-	-	+	~+	-	+	+	-	+	-
041012_18443900	?	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-
041012_18463813	~+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-
041012_18485002	?	+	+	?	+	-	-	+	~+	-	+	+	-	+	-
041013_11315659	?	+	~+	?	+	-	-	+	?	-	+	+	-	+	-
041013_11371158	?	+	+	?	+	-	-	+	~+	-	+	+	-	+	-
041013_11393922	?	+	+	?	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-
041013_11414257	?	+	+	+	+	-	-	+	~+	-	+	+	-	+	-
041013_11432185	?	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-
041013_11445603	?	?	?	+	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-
041013_11463714	?	?	?	-	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-
041013_11482898	?	+	+	-	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-
041013_11500919	?	?	?	-	+	-	-	+	~+	-	+	+	-	+	-
041013_12015660	?	?	?	?	?	-	-	+	?	-	+	+	-	+	-
041013_12085077	?	?	~+	?	?	?	-	+	?	-	+	+	-	+	-
041013_12172743	?	?	?	?	?	?	-	+	~+	-	+	+	-	+	-
041013_12201494	?	~+	?	?	?	?	-	+	~+	-	+	+	-	+	-
041013_12243327	?	?	?	?	?	?	-	+	~+	-	+	~+	-	+	-
041013_12305615	?	?	?	?	?	~+	-	+	~+	-	+	?	-	+	~+
041013_12352700	?	?	?	?	?	?	-	+	?	-	+	~+	-	+	~+
041013_14065930	~+	+	-	~+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-
041013_14113350	?	+	-	~+	+	-	-	+	?	-	+	-	-	+	-
041013_14145759	?	+	-	~+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-
041013_14173550	?	+	~+	~+	+	~+	-	+	?	-	+	-	-	+	-
041013_14260404	?	~+	?	~+	~+	-	-	+	?	-	+	-	-	+	-
041013_14273223	?	+	~+	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	-
041013_14285139	?	+	~+	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	-
041013_14302660	?	?	-	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	-
041013_14322365	?	+	-	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	-
041013_14384638	?	+	-	-	+	-	~+	+	~+	-	+	-	-	+	-
041013_14403440	?	+	-	-	+	-	+	+	~+	-	+	-	-	+	-
041013_14425082	?	+	-	-	+	-	+	+	~+	-	+	-	-	+	-
041013_14450856	?	+	-	-	+	-	+	+	~+	-	+	-	-	+	-
041013_14463949	?	?	-	-	+	-	+	+	+	-	+	-	-	+	-
041013_14561165	?	?	?	?	?	?	+	+	~+	-	+	-	~+	-	-
041013_15034099	?	?	~+	-	+	-	+	+	~+	-	+	-	-	+	-
041013_15061577	?	?	-	-	+	-	+	+	+	-	+	-	-	+	-
041013_15090948	?	?	-	-	+	-	+	+	+	-	+	-	-	+	-
041013_15204958	?	+	+	-	+	-	+	+	?	+	+	-	+	+	-
041013_15313287	?	?	?	-	~+	-	+	+	?	~+	-	-	+	-	-
041013_15403298	?	?	-	-	+	-	+	+	?	~+	-	-	+	-	-
041013_15460258	~+	+	-	-	+	-	+	+	+	~+	+	-	+	-	-
041013_16411075	?	?	-	?	~+	-	+	+	?	-	+	-	-	+	-
041013_16425748	?	?	-	-	+	-	+	+	+	-	+	-	-	+	-
041013_16460347	?	~+	-	?	?	-	+	+	?	-	+	-	-	+	-
041013_16475279	?	~+	-	~+	~+	-	+	+	?	-	~+	-	-	+	-
041013_16493618	?	?	-	?	~+	-	+	+	?	-	?	-	-	+	-
041013_16520590	?	?	-	~+	~+	-	+	+	?	-	-	-	-	+	-
041013_16581464	?	~+	-	~+	~+	-	+	+	?	-	-	-	-	+	-
041013_16593898	?	~+	-	~+	~+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	-
041013_17020421	?	~+	-	~+	~+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	-
041013_17073687	?	~+	-	~+	~+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	-
041013_17133304	?	~+	-	~+	~+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	-
041013_17152888	?	~+	-	?	?	~+	+	+	?	-	-	-	-	+	-

Suite à la page suivante ...

C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMQUES

Fichier *.cvi	C1Z	C2Z	C4Z	C3X	C3Y	C3Z	C5X	C5Y	C5Z	C63X	C63Y	C63Z	C62X	C62Y	C62Z
041013_17170869	?	~+	-	?	?	~-	+	+	?	-	-	-	-	-	-
041013_17191763	~-	~-	-	~-	~+	~-	+	+	?	-	-	-	-	-	-
041013_17231628	?	~+	-	~-	~+	~-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
041013_17245583	?	~+	-	~-	~+	~-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
041013_17273294	-	~-	-	~-	?	~-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
041013_17293863	-	~-	-	?	?	~-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
041014_10021888	?	~+	-	?	?	?	+	+	+	-	-	-	-	-	-
041014_10034926	?	~+	-	?	?	~-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
041014_10052062	?	?	-	?	?	?	+	+	+	-	-	-	-	-	-
041014_10065599	?	?	-	?	?	?	+	+	?	-	-	-	~-	-	-
041014_10114436	?	?	-	?	?	~-	+	+	+	-	-	-	~-	-	-
041014_10172562	?	~+	-	?	?	?	+	+	?	-	-	-	~-	-	-
041014_10201275	?	?	-	~-	?	~-	+	+	+	-	-	-	~-	-	-
041014_10214761	~-	?	-	?	?	?	+	+	+	-	-	-	~-	-	-
041014_10241348	~-	~+	-	?	?	?	+	+	?	-	-	-	?	-	-
041014_10330129	~-	?	-	?	?	?	+	+	?	-	-	-	?	-	-
041014_10412950	?	?	-	?	?	?	+	?	?	-	-	~-	?	~-	~-
041014_10482829	?	?	-	?	?	?	+	?	?	?	?	?	?	?	?
041014_10555359	?	~+	-	~-	?	?	+	?	?	~-	~-	?	?	?	?
041014_11011141	?	?	-	?	?	?	+	?	?	~-	~-	?	?	?	?
041014_11092881	?	~+	-	?	?	?	+	?	?	-	-	-	?	-	-
041014_11115622	?	?	-	?	+	~+	+	~-	-	-	-	-	~+	-	-
041014_11133395	?	?	-	~-	~+	+	+	~-	-	-	-	-	?	-	-
041014_11161250	?	~+	-	-	+	+	+	~-	?	-	-	-	~+	-	-
041014_11184987	?	?	-	~-	~+	+	+	~-	-	-	-	-	?	-	-
041014_11222407	?	~+	-	?	?	?	+	~-	?	-	-	~-	~+	-	-
041014_11313766	?	?	-	-	+	+	+	~-	-	-	-	-	~+	-	~-
041014_11333350	~-	?	-	-	~+	?	+	~-	?	-	-	-	?	-	-
041014_11354918	~-	?	-	-	~+	~-	+	~-	+	-	-	-	~+	-	-
041014_11382657	~-	~+	~-	~-	?	~-	+	~-	?	-	-	-	+	-	-
041014_14084251	?	~+	-	~-	?	~-	+	~-	?	-	-	-	+	-	-
041014_14111461	?	?	-	-	+	?	+	~-	?	-	-	-	?	-	-
041014_14123026	?	?	-	?	?	?	+	?	?	-	-	?	?	?	?
041014_14154414	?	+	-	~-	~+	?	+	~-	?	-	-	~-	?	-	~-
041014_14225131	?	?	~-	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
041014_15413327	?	~+	-	~-	~+	~-	+	+	?	-	-	-	-	-	-
041014_15452473	?	~+	-	~-	~+	~-	+	+	?	-	-	-	-	-	-
041014_15465242	?	~+	-	~-	~+	~-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
041014_15483274	?	~+	-	-	~+	~-	+	+	?	-	-	-	-	-	-
041014_15493225	?	~+	-	~-	~+	~-	+	+	?	-	-	-	-	-	-
041014_15511111	?	?	-	~-	~+	~-	+	+	?	-	-	-	-	-	-
041014_15521518	?	~+	-	-	+	-	+	+	?	-	-	-	-	-	-
041014_15575597	?	~+	-	~-	~+	~-	+	+	?	-	-	-	-	-	-
041014_15592809	?	~+	-	~-	~+	~-	+	+	?	-	-	-	-	-	-
041014_16002454	?	~+	-	~-	~+	~-	+	+	?	-	-	-	-	-	-
041014_16013518	?	?	-	~-	~+	~-	+	+	?	-	-	-	-	-	-
041014_16023291	?	?	-	~-	~+	~-	+	+	?	-	-	-	-	-	-
041014_16033381	?	~-	-	~-	~+	~-	+	+	?	-	-	-	-	-	-
041014_16045015	?	?	-	~-	~+	~-	+	+	?	-	-	-	-	-	-
041014_16062194	?	?	-	?	?	~-	+	+	-	-	+	-	-	-	-
041014_16080891	?	?	-	~-	~+	~-	+	+	?	-	+	-	-	-	-
041014_16085543	?	?	-	~-	~+	~-	+	+	-	-	+	-	-	-	-
041014_16100485	?	?	-	-	+	-	+	+	~+	-	+	-	-	-	-
041014_16112412	?	?	-	~-	~+	~-	+	+	-	-	+	-	-	-	-

- + : Mouvement observé vers le haut ;
- : Mouvement observé vers le bas ;
- ~ : Mouvement observé inverse à celui attendu.

C.2.2 Modèles de vitesses obtenus suite aux différents tests

Modèles de vitesse définis sans les angles de polarisation :

TABLE C.18 – *Modèles de vitesse définis sans les angles de polarisation.*

		Argiles P (26 m)	Calcaires (12.5 m)	Argiles L (7 m)	Grès (17 m)	Marnes (57 m)	Dolomie (9 m)	
6 couches	V_P (m/s)	2994	2075	841	3683	3152	928	
	Erreur (m/s)	86	478	623	634	495	1268	
5 couches	A	V_P (m/s)	2980		660	3763	3209	1000
		Erreur (m/s)	79		437	639	435	1623
	B	V_P (m/s)	2990	2759		1369	3950	506
		Erreur (m/s)	98	463		601	350	1117
	C	V_P (m/s)	3011	1766	2197		3919	503
		Erreur (m/s)	92	551	609		639	2102
	D	V_P (m/s)	3011	1991	747	3809		569
		Erreur (m/s)	88	505	371	154		869
4 couches	A	V_P (m/s)	3115			1307	4006	500
		Erreur (m/s)	85			382	330	1160
	D	V_P (m/s)	3002		1664		3943	502
		Erreur (m/s)	81		229		161	418
3 couches	V_P (m/s)	3161				2234	6266	
	Erreur (m/s)	71				213	1713	
2 couches	V_P (m/s)	3149					704	
	Erreur (m/s)	73					594	
1 couche	V_P (m/s)	3175						
	Erreur (m/s)	77						

TABLE C.19 – *Résidus sur les temps d'arrivée des ondes P, pour des modèles de vitesse définis sans les angles de polarisation.*

Résidus moyens (s)		M2	M3	M4	M5	M6.3	M6.2
6 couches		0.0042	0.0034	0.0031	0.0027	0.0048	0.0036
5 couches	A	0.0043	0.0032	0.0027	0.0031	0.0046	0.0036
	B	0.0047	0.0028	0.0033	0.0036	0.0034	0.0034
	C	0.0047	0.0031	0.0028	0.0032	0.0041	0.0031
	D	0.0051	0.0033	0.0034	0.0038	0.0042	0.0041
4 couches	A	0.0046	0.0028	0.0027	0.0031	0.0012	0.0039
	D	0.0047	0.0033	0.003	0.0028	0.0027	0.0035
3 couches		0.0039	0.0039	0.0026	0.0034	0.0017	0.0033
2 couches		0.0047	0.0032	0.003	0.0031	0.0027	0.0036
1 couche		0.005	0.0033	0.0032	0.0033	0.0046	0.0032

Modèles de vitesse définis en utilisant la sonde M1 :

TABLE C.20 – *Modèles de vitesse définis en utilisant les temps d'arrivée de la sonde M1.*

		Argiles P (26 m)	Calcaires (12.5 m)	Argiles L (7 m)	Grès (17 m)	Marnes (57 m)	Dolomie (9 m)
6 couches	V_P (m/s)						
	Erreur (m/s)						
3 couches	A	V_P (m/s)	3318			2576	4763
		Erreur (m/s)	88			165	220

C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMQUES

TABLE C.21 – Résidus moyens pour des modèles définis avec les temps d'arrivées des ondes P de la sonde M1 et les angles de polarisation de la sonde M5.

Résidus	Pointés P (s)	Azimuths (°)	Pendages (°)
M1	0.0144	–	–
M2	0.0058	–	–
M3	0.0069	8.96	13.99
M4	0.0086	–	–
M5	0.0076	5.12	16.55
M6.3	0.0081	4.89	8.66
M6.2	0.0091	5.61	3.75

Modèles de vitesse définis en utilisant les angles de la sonde M5 :

TABLE C.22 – Modèles de vitesse définis avec les angles de polarisation de la sonde M5.

		Argiles P (26 m)	Calcaires (12.5 m)	Argiles L (7 m)	Grès (17 m)	Marnes (57 m)	Dolomie (9 m)	
6 couches	V_P (m/s)	3760	2980	1637	2983	3163	6858	
	Erreur (m/s)	131	785	922	101	192	327	
5 couches	A	V_P (m/s)	3744		1110	2915	3758	6085
		Erreur (m/s)	72		185	100	142	256
	B	V_P (m/s)	3705	2809		2832	3052	6856
		Erreur (m/s)	75	188		97	178	318
	C	V_P (m/s)	3752	1921	2887		3700	5960
		Erreur (m/s)	74	273	96		191	335
	D	V_P (m/s)	3619	1644	3870	3021		5341
		Erreur (m/s)	304	820	988	83		121
4 couches	A	V_P (m/s)	3527			2696	3026	6991
		Erreur (m/s)	69			90	196	347
	B	V_P (m/s)						
		Erreur (m/s)						
	C	V_P (m/s)	3721	2368	2971			5221
		Erreur (m/s)	72	304	89			119
	D	V_P (m/s)						
		Erreur (m/s)						
	E	V_P (m/s)	3708		1477	2991		5309
		Erreur (m/s)	75		312	93		124
	F	V_P (m/s)	3686	2915		2938		5042
		Erreur (m/s)	68	187		186		175
3 couches	A	V_P (m/s)	3673				2899	5221
		Erreur (m/s)	71				71	121
	B	V_P (m/s)	3405	3001				6999
		Erreur (m/s)	69	152				209

C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMIQUES

TABLE C.23 – Résidus sur les temps d'arrivée des ondes P, pour des modèles de vitesse définis avec les angles de polarisation de la sonde M5.

Résidus moyens (s)		M2	M3	M4	M5	M6.3	M6.2
6 couches		0.0057	0.006	0.0057	0.0043	0.0041	0.0047
5 couches	A	0.0056	0.006	0.0056	0.0043	0.0043	0.0046
	B	0.0057	0.0057	0.0058	0.0045	0.004	0.0041
	C	0.0052	0.0058	0.0057	0.0043	0.0053	0.0051
	D	0.0059	0.0063	0.0058	0.0043	0.0028	0.0048
4 couches	A	0.005	0.0057	0.0056	0.0044	0.0053	0.0054
	C	0.0053	0.0064	0.0058	0.0044	0.0029	0.0057
	E	0.0057	0.0063	0.0057	0.0044	0.0027	0.0048
	F	0.0055	0.006	0.0059	0.0045	0.003	0.0049
3 couches	A	0.0047	0.006	0.0057	0.0045	0.0067	0.0062
	B	0.0056	0.0063	0.0058	0.0044	0.0028	0.005

TABLE C.24 – Résidus sur les azimuts et pendages, pour des modèles de vitesse définis avec les angles de polarisation de la sonde M5.

Résidus (°)		Azimuts				Pendages			
		M3	M5	M6.3	M6.2	M3	M5	M6.3	M6.2
6 couches		7.88	3.04	3.71	2.24	13.1	12.86	13.86	2.54
5 couches	A	7.88	3.04	3.71	2.24	11.72	16.25	12.96	3.01
	B	7.88	3.04	3.71	2.24	8.57	16.25	12.83	4.96
	C	7.88	3.04	3.71	2.24	6.92	13.55	13.28	7.35
	D	7.88	3.04	3.71	2.24	13.88	16.61	7.36	2.83
4 couches	A	7.88	3.04	3.71	2.24	7.19	16.25	13.13	8.02
	C	7.88	3.04	3.71	2.24	11.03	13.55	8.51	3.03
	E	7.88	3.04	3.71	2.24	13.97	16.25	7.29	2.73
	F	7.88	3.04	3.71	2.24	14.43	16.25	6.66	2.92
3 couches	A	7.88	3.04	3.71	2.24	12.69	16.25	7.76	2.53
	B	7.88	3.04	3.71	2.24	14.75	16.25	13.07	15.04

Modèles de vitesse définis en séparant les types de sources :

TABLE C.25 – Modèles de vitesse 3A définis en séparant les types de sources.

		Argiles P (26 m)	Calcaires (12.5 m)	Argiles L (7 m)	Grès (17 m)	Marnes (57 m)	Dolomie (9 m)
Explosifs	V_P (m/s)	3204				2391	4894
	Erreur (m/s)	65				99	162
Chutes	V_P (m/s)	3662				2891	5204
	Erreur (m/s)	67				67	110

TABLE C.26 – Résidus moyens pour les modèles 3A définis en séparant le type de source.

Résidus	Explosifs			Chutes de poids		
	Pointés P (s)	Azimuts (°)	Pendages (°)	Pointés P (s)	Azimuts (°)	Pendages (°)
M2	0.0052	—	—	0.0058	—	—
M3	0.0052	4.71	3.4	0.0064	—	—
M4	0.0049	—	—	0.0056	—	—
M5	0.0023	—	—	0.0045	—	—
M6.3	0.0026	0.76	1.82	0.0028	4.18	8.55
M6.2	0.004	1.83	3.76	0.0053	4.54	2.73

Modèles de vitesse définis en utilisant seulement 10 tirs de calage, avec les angles de polarisation :

TABLE C.27 – *Modèles de vitesse définis en utilisant uniquement 10 tirs de calage, avec les angles de polarisation.*

		Argiles P (26 m)	Calcaires (12.5 m)	Argiles L (7 m)	Grès (17 m)	Marnes (57 m)	Dolomie (9 m)
3 couches	V_P (m/s)	2878				2160	3617
	Erreur (m/s)	135				232	503
2 couches	V_P (m/s)	2917					4042
	Erreur (m/s)	132					541
1 couche	V_P (m/s)	2916					
	Erreur (m/s)	134					

TABLE C.28 – *Résidus sur les temps d'arrivée des ondes P, pour des modèles de vitesse définis en utilisant uniquement 10 tirs de calage.*

Résidus moyens (s)	M1	M2	M3	M4	M5	M6.3	M6.2
3 couches	0.0067	0.0051	0.0041	0.0039	0.004	0.0019	0.0062
2 couches	0.0067	0.0061	0.0042	0.0045	0.0042	0.0055	0.0046
1 couche	0.0067	0.006	0.0042	0.0045	0.0042	0.0052	0.0047

TABLE C.29 – *Résidus sur les azimuts et pendages, pour des modèles de vitesse définis en utilisant uniquement 10 tirs de calage.*

Résidus (°)	Azimuts				Pendages			
	M3	M5	M6.3	M6.2	M3	M5	M6.3	M6.2
3 couches	3.37	2.89	39.04	1.84	4.32	18.21	5.12	6.11
2 couches	3.37	2.89	39.04	1.84	29.65	18.21	4.97	6.11
1 couche	3.37	2.89	39.04	1.84	29.65	18.21	17.04	6.11

C.2.3 Modèle de vitesse retenu

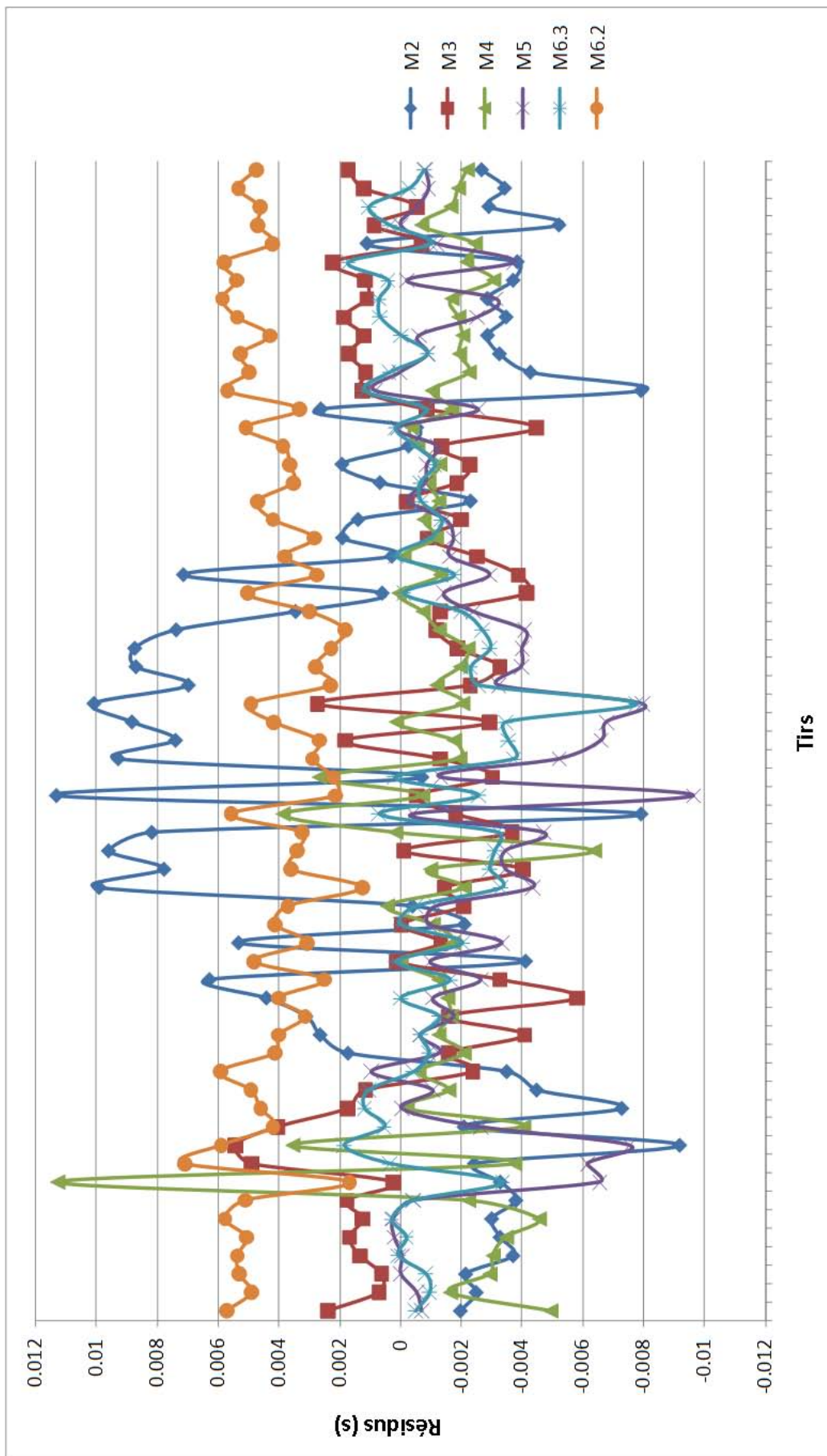


FIGURE C.47 – Résidus sur les temps d'arrivée des ondes P pour le modèle de vitesse sélectionné.

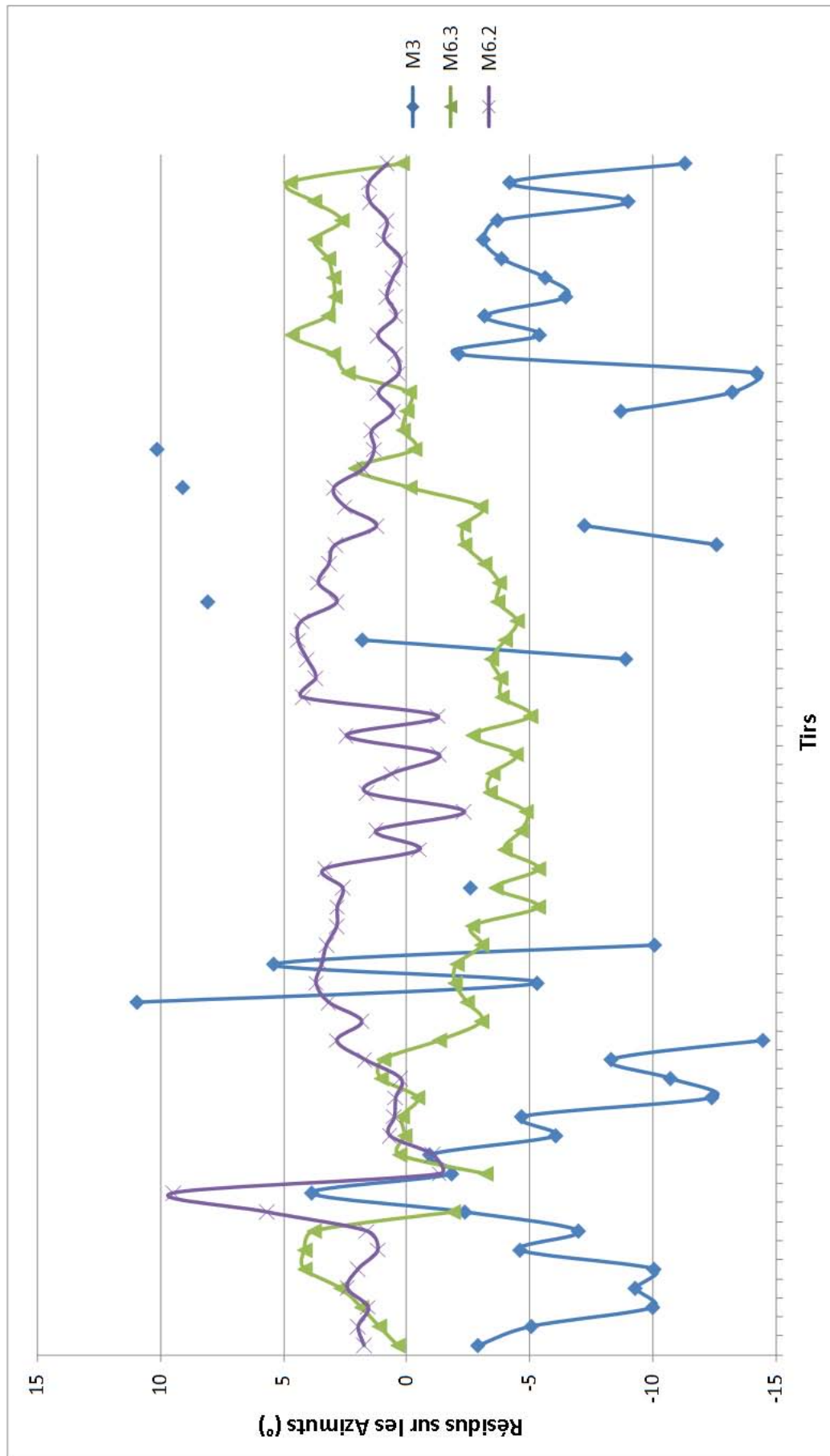


FIGURE C.48 – Résidus sur les azimuts pour le modèle de vitesse sélectionné.

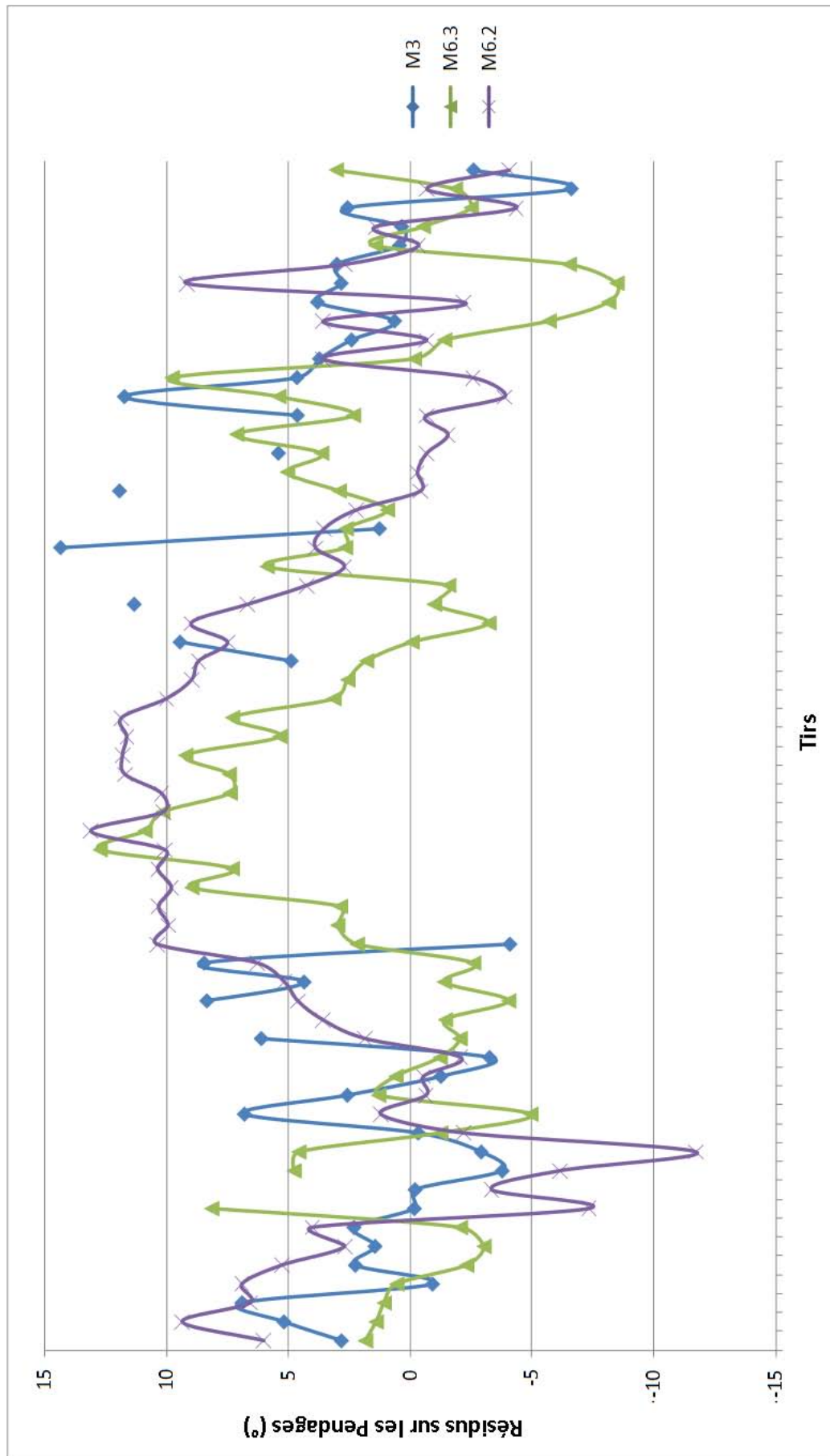


FIGURE C.49 – Résidus sur les pendages pour le modèle de vitesse sélectionné.

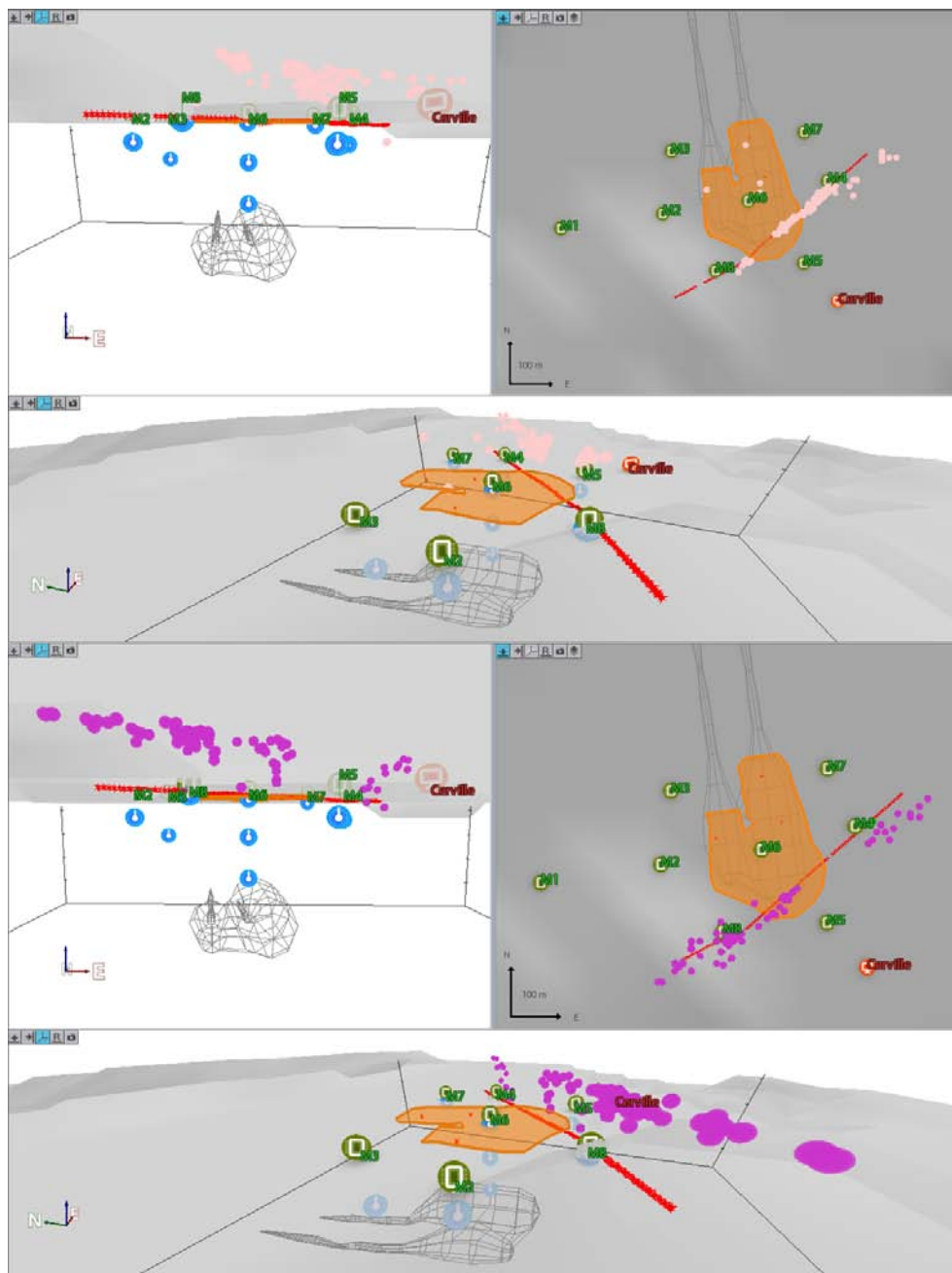


FIGURE C.50 – Comparaison entre les localisations des tirs sans/avec "anomalie" de polarisation (respectivement en haut et en bas) effectuées avec l'ancien modèle de vitesse (rose) et le nouveau (vert). La position des tirs de calage, des sondes microsismiques ainsi que le contour relatif de la cavité sont indiqués.

C.3 Influence des données d'entrée pour la localisation 2D

C.3.1 Écarts entre les diverses localisations

TABLE C.30 – Comparaisons avec les positions des foyers déterminées en utilisant les temps d'arrivée des ondes P pointés manuellement, en prenant en compte tous les événements (avec ceux aux bords de l'espace de recherche).

Écarts avec P manuel (m)		X	Y	Z	Distances
P automatique	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	30.08	28.82	37.3	65.72
	Maximum	555.47	525	262.5	640.89
	Écart-type	54.31	49.93	44.27	78.79
	Médiane	14.06	12.5	19.69	39.92
P + angle de polarisation	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	23.79	21.03	30.53	51.16
	Maximum	397.27	371.88	210	539.97
	Écart-type	33.84	33.87	32.31	51.56
	Médiane	14.06	12.5	19.69	38.48
P sans M6.3	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	7.5	5.87	14.81	20.36
	Maximum	309.38	162.5	185.94	320.25
	Écart-type	14.95	10.02	22.74	27.13
	Médiane	7.03	3.13	6.56	12.6
P + azimut	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	24.49	21.88	21.55	44.95
	Maximum	397.27	371.88	183.75	539.97
	Écart-type	34.15	33.6	28.78	51.44
	Médiane	14.06	12.5	10.94	31.33
uniquement angle	Minimum	0	0	0	2.19
	Moyen	68.56	52.86	55.87	117.47
	Maximum	611.72	512.5	249.38	717.69
	Écart-type	81.24	67.47	41.75	98.55
	Médiane	42.19	31.25	48.13	88.69
P + S ($V_S = V_P/\sqrt{3}$)	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	31.44	30.52	49.12	76.82
	Maximum	457.03	459.38	210	669.11
	Écart-type	70.61	57.55	49.27	95.68
	Médiane	10.55	12.5	32.81	44.46
P + S ($V_S = 80\% V_P/\sqrt{3}$)	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	20.84	22.3	57.17	72.16
	Maximum	457.03	459.38	207.81	599.19
	Écart-type	37.42	35.17	45.8	61.04
	Médiane	14.06	12.5	49.77	58.24
P + S ($V_S = 120\% V_P/\sqrt{3}$)	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	65.83	76.72	58.69	135.04
	Maximum	499.22	531.25	210	718.66
	Écart-type	109.63	111.13	51.67	149.87
	Médiane	21.09	31.25	45.94	80.43
P sans M6.2	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	23.85	20.96	38.79	57.78
	Maximum	400.78	359.38	253.75	494.7
	Écart-type	38.74	33.45	38.38	57.14
	Médiane	14.06	12.5	28.44	42.24

C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMQUES

TABLE C.31 – Comparaisons avec les positions des foyers déterminées en utilisant les pointés P et les angles de polarisation, en prenant en compte tous les événements (avec ceux aux bords de l'espace de recherche.

Écarts avec P + angles (m)		X	Y	Z	Distances
P + angles sans M6.3	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	5.54	4.75	26.96	30.26
	Maximum	119.53	93.75	192.5	192.91
	Écart-type	8.83	6.95	29.44	29.27
	Médiane	3.52	3.13	15.31	20.91
P + azimut	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	3.63	3	27.14	28.99
	Maximum	312.89	203.13	210	373.31
	Écart-type	14.68	10.75	30.69	34.52
	Médiane	0	0	15.31	17.5
uniquement angle	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	49.05	39	33.56	81.53
	Maximum	611.72	537.5	204.53	717.48
	Écart-type	78.82	64.28	32.81	99.12
	Médiane	21.09	12.5	24.06	48.1
P + S ($V_S = V_P/\sqrt{3}$)	Minimum	0	0	0	4.83
	Moyen	41	36.51	53.83	88.62
	Maximum	478.13	462.5	203.44	665.39
	Écart-type	68.43	53.93	45.62	87.9
	Médiane	21.09	21.88	40.47	63.14
P + S ($V_S = 80\% V_P/\sqrt{3}$)	Minimum	0	0	0	2.19
	Moyen	26.5	21.72	43.94	61.77
	Maximum	390.23	190.63	197.97	427.1
	Écart-type	30.07	21.37	35.1	43.38
	Médiane	21.09	15.63	36.09	52.01
P + S ($V_S = 120\% V_P/\sqrt{3}$)	Minimum	0	0	0	7.36
	Moyen	74.95	84.91	74.23	155.96
	Maximum	527.34	528.13	210	718.41
	Écart-type	112.74	109.49	44.72	143.89
	Médiane	28.13	43.75	76.56	107.72
P sans M6.2	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	21.54	16.41	24.58	42.86
	Maximum	414.84	468.75	211.09	527.92
	Écart-type	33.35	29.5	29.05	48.24
	Médiane	14.06	6.25	15.31	29.31

C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMQUES

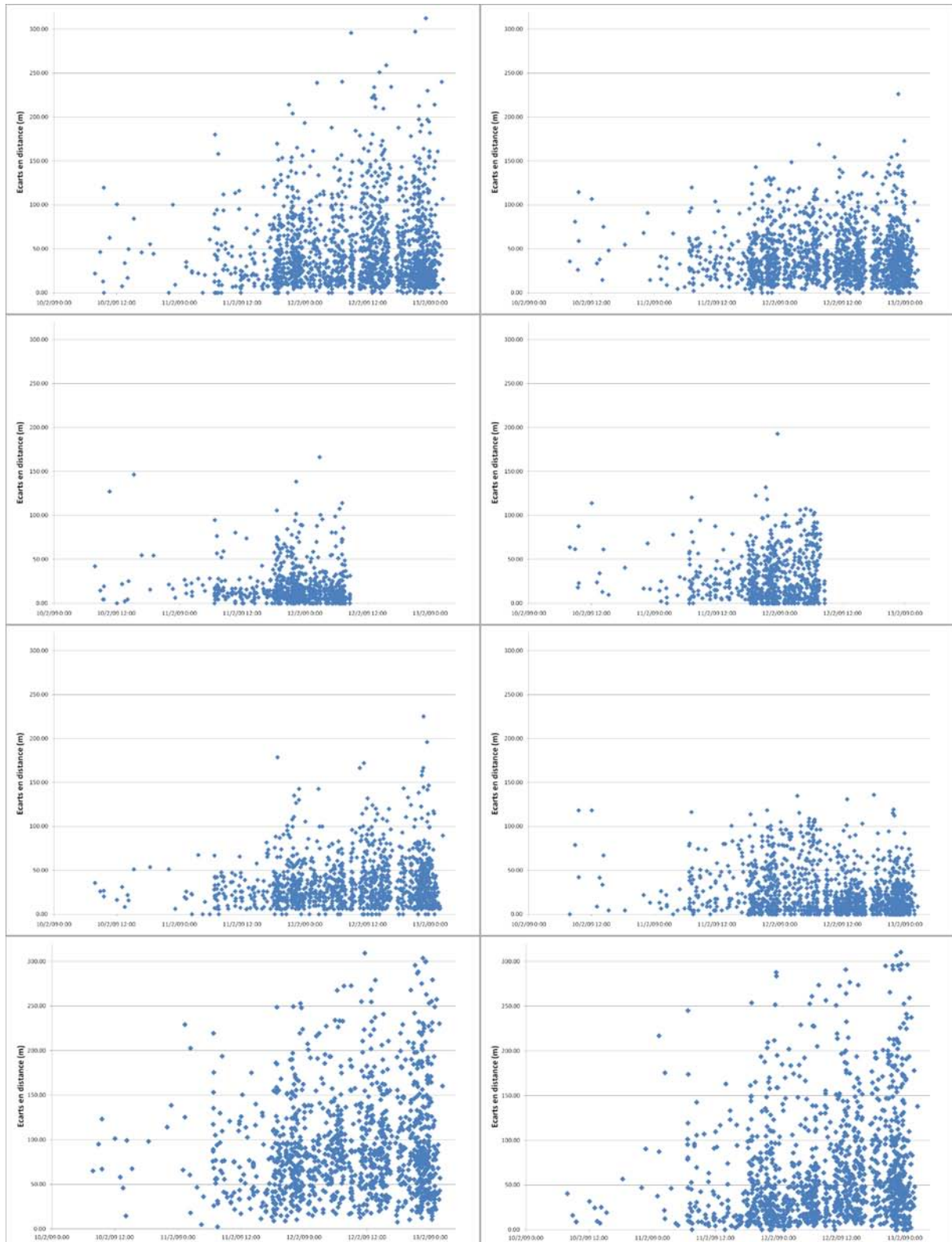


FIGURE C.51 – Évolution des écarts entre les localisations, de haut en bas et de gauche à droite : *P* automatiques / *P* manuel ; *P* / *P* + angles ; *P* / *P* sans M6.3 ; *P* + angles / *P* + angles sans M6.3 ; *P* / *P* + Azimut ; *P* + angles / *P* + Azimut ; *P* / uniquement angles ; *P* + angles / uniquement angles.

C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMQUES



FIGURE C.52 – Évolution des écarts entre les localisations, de haut en bas et de gauche à droite : $P / P + S$ ($V_S = 80\% V_P / \sqrt{3}$); $P + \text{angles} / P + S$ ($V_S = 80\% V_P / \sqrt{3}$); $P / P + S$ ($V_S = V_P / \sqrt{3}$); $P + \text{angles} / P + S$ ($V_S = V_P / \sqrt{3}$); $P / P + S$ ($V_S = 120\% V_P / \sqrt{3}$); $P + \text{angles} / P + S$ ($V_S = 120\% V_P / \sqrt{3}$); P manuel / P manuel sans M6.2; $P + \text{angles} / P + \text{angles}$ sans M6.2.

C.3.2 Qualité des localisations

TABLE C.32 – Résidus de localisation sur les temps d'arrivée des ondes P.

Résidus (s) / Sonde		M1	M2	M3	M5	M6.3	M6.2	M6.1	M7	M8	Moyens
P automatique	Moyen	0.0057	0.0017	-0.0016	-0.0008	-0.0073	-0.0138	0.0063	0.0048	0.0057	
	Moy abs	0.0066	0.0049	0.0051	0.0058	0.0078	0.0139	0.0076	0.0058	0.0075	0.0074
	σ	0.0089	0.0072	0.0073	0.0091	0.008	0.0075	0.0067	0.0069	0.0083	0.0040
	Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0003
	Max	0.0917	0.0534	-0.0573	0.108	-0.0558	-0.0714	-0.0553	0.0455	-0.0698	0.0459
P manuel	Moyen	0.0041	0.0005	-0.0014	-0.0013	-0.0056	-0.0123	0.0062	0.0042	0.0053	
	Moy abs	0.0054	0.0034	0.004	0.0044	0.0061	0.0123	0.0066	0.0049	0.0063	0.0061
	σ	0.0067	0.0051	0.0053	0.0055	0.0067	0.0053	0.0041	0.0055	0.0059	0.0024
	Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0003
	Max	0.0462	-0.0431	0.0435	0.0366	-0.048	-0.0411	0.0319	0.0494	0.048	0.0286
P + angle de polarisation	Moyen	0.0029	-0.001	-0.0022	-0.0007	-0.0047	-0.0114	0.0067	0.005	0.0046	
	Moy abs	0.0062	0.005	0.0058	0.0053	0.0058	0.0115	0.0072	0.0071	0.0067	0.0069
	σ	0.0085	0.0067	0.0072	0.007	0.0069	0.0058	0.0048	0.0081	0.0071	0.0025
	Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0007
	Max	0.0472	-0.0433	0.0435	0.042	-0.048	-0.0428	0.0319	0.0494	0.048	0.0286
P sans M6.3	Moyen	0.0029	0.0002	-0.0018	-0.0019		-0.0106	0.0056	0.003	0.0045	
	Moy abs	0.0043	0.0032	0.0036	0.0039		0.0107	0.0061	0.0037	0.0056	0.0053
	σ	0.0052	0.0048	0.0046	0.0044		0.005	0.0038	0.0042	0.0054	0.0020
	Min	0	0	0	0		0	0	0	0	0.0003
	Max	0.0236	0.0257	0.024	0.0233		-0.0359	-0.0214	0.0227	0.0429	0.0179
P + angles sans M6.3	Moyen	0.0023	-0.0012	-0.0024	-0.0008		-0.0119	0.0062	0.0048	0.0045	
	Moy abs	0.0057	0.0048	0.0054	0.0051		0.012	0.0068	0.0069	0.0066	0.0068
	σ	0.0075	0.0063	0.0065	0.0067		0.0057	0.0047	0.0081	0.007	0.0024
	Min	0	0	0	0		0	0	0	0	0.0007
	Max	0.0301	-0.0433	0.0381	0.042		-0.0389	0.0319	0.0502	0.0429	0.0286
P + azimut	Moyen	0.0023	-0.001	-0.0029	-0.0007	-0.0049	-0.0112	0.0069	0.0053	0.0049	
	Moy abs	0.0055	0.0046	0.0054	0.0052	0.0056	0.0113	0.0072	0.0069	0.0067	0.0067
	σ	0.0075	0.0062	0.0063	0.0068	0.0067	0.0053	0.0043	0.0075	0.0068	0.0024
	Min	0	0	0	0	0	-0.0002	0	0	0	0.0007
	Max	0.0325	-0.0431	0.0435	0.0376	-0.048	-0.0426	0.0319	0.0494	0.048	0.0286
P + S ($V_S = V_P/\sqrt{3}$)	Moyen	0.005	0.0005	-0.001	-0.0021	-0.0061	-0.0127	0.0055	0.0045	0.0048	
	Moy abs	0.0064	0.0036	0.0044	0.0054	0.0067	0.0128	0.0065	0.0053	0.0062	0.0064
	σ	0.0075	0.0054	0.0062	0.0067	0.0071	0.0057	0.0051	0.0059	0.0062	0.0026
	Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0003
	Max	0.0462	-0.0431	0.0732	0.0429	-0.048	-0.0414	0.0453	0.067	0.048	0.0352
P + S ($V_S = 80\% \cdot V_P/\sqrt{3}$)	Moyen	0.0043	0.001	-0.0009	-0.0021	-0.005	-0.0116	0.0071	0.0042	0.0052	
	Moy abs	0.0058	0.0038	0.0044	0.0053	0.0059	0.0117	0.0077	0.0052	0.0065	0.0065
	σ	0.0073	0.0054	0.0062	0.0065	0.007	0.0061	0.0052	0.0063	0.0063	0.0023
	Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0021
	Max	0.0462	-0.0431	0.0735	0.046	-0.048	-0.0411	0.0457	0.0673	0.048	0.0354
P + S ($V_S = 120\% \cdot V_P/\sqrt{3}$)	Moyen	0.0052	0	-0.0014	-0.0025	-0.0078	-0.0138	0.0044	0.0047	0.0043	
	Moy abs	0.0068	0.0042	0.0053	0.006	0.0082	0.0139	0.0061	0.0056	0.0063	0.0078
	σ	0.0078	0.006	0.0072	0.0077	0.0077	0.0061	0.0058	0.0067	0.0067	0.0031
	Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0020
	Max	0.0462	-0.0431	0.0729	0.0341	-0.048	-0.0471	0.0451	0.0668	0.048	0.0350
P sans M6.2	Moyen	0.004	-0.0006	-0.0018	-0.0026	-0.008		0.0011	0.0024	0.0032	
	Moy abs	0.0051	0.0032	0.0037	0.0042	0.0083		0.0034	0.0034	0.0049	0.0041
	σ	0.006	0.0047	0.005	0.0048	0.0068		0.0045	0.0042	0.0054	0.0025
	Min	0	0	0	0	0		0	0	0	0.0001
	Max	0.041	-0.0442	0.0422	-0.0358	-0.0523		0.0304	0.0374	0.0435	0.0310
P + angles sans M6.2	Moyen	0.0031	-0.0012	-0.0026	-0.0029	-0.0067		0.0031	0.0017	0.0033	
	Moy abs	0.0054	0.0039	0.0049	0.0049	0.0075		0.0047	0.0049	0.0057	0.0051
	σ	0.0073	0.0053	0.006	0.0057	0.0077		0.0052	0.0067	0.0064	0.0023
	Min	0	0	0	0	0		0	0	0	0.0005
	Max	0.041	-0.0443	0.0422	0.0383	-0.0523		-0.0339	0.0374	0.0435	0.0239

TABLE C.33 – Résidus de localisation sur les angles de polarisation.

Résidus (s) / Sonde		Azimuts					Pendages				
		M3	M5	M6.3	M6.2	Moyens	M3	M5	M6.3	M6.2	Moyens
P + angle de polarisation	Moyen	3.98	-1.82	-0.44	1.03		6.07	9.97	5.31	-5.6	
	Moy abs	8.92	6.39	5.71	8.67	7.92	8.57	13.91	11.23	9.48	10.67
	Écart-type	11	8.4	8.5	12.06	5.86	9.34	13.74	12.42	11.85	6.89
	Minimum	0.01	0	0.01	0	0.04	0	0	-0.09	0	0.04
	Maximum	59.88	-43.19	-49.76	55.77	43.19	50.34	-54.19	-55.38	-67.22	65.08
P + angles sans M6.3	Moyen	3.08	-1.81		0.28		4.38	9.6		-5.33	
	Moy abs	8.92	6.38		8.21	6.36	8.78	14.46		9.16	9.85
	Écart-type	10.97	8.41		11.48	4.96	9.58	14.02		12.83	8.43
	Minimum	-0.01	0		0	0.04	-0.01	0		0.03	0.14
	Maximum	59.88	-43.19		55.77	43.15	50.35	-54.19		-70.07	69.53
P + azimut	Moyen	4.25	-1.37	-0.34	1.17						
	Moy abs	8.99	6.12	5.56	8.67	7.93					
	Écart-type	10.97	8.02	8.48	12.07	5.41					
	Minimum	-0.01	0	-0.05	-0.01	0.19					
	Maximum	63.34	-39.18	49.52	58.62	37.01					
uniquement angle	Moyen	1.69	0.07	-0.3	-0.24		5.54	9.12	3.09	-4.54	
	Moy abs	4.2	4.25	5.56	3.35	3.78	8.17	12.14	6.91	7.19	8.56
	Écart-type	6.1	6.33	8.55	5.54	3.53	9.19	12.33	7.91	8.8	4.52
	Minimum	0	0	-0.01	-0.01	0.05	-0.02	0.01	0.12	0	0.12
	Maximum	45.31	42.03	-46.24	42.49	37.01	50.33	46.49	-43.78	54.29	37.94
P + angles sans M6.2	Moyen	1.59	0.36	-0.02			5.28	7.93	5.03		
	Moy abs	8.16	5.9	4.16		6.93	8.99	13.2	10.25		10.89
	Écart-type	10.73	8.02	5.52		5.70	10.23	13.93	11.57		6.78
	Minimum	0	-0.02	0.01		0.01	-0.01	-0.09	-0.32		0.01
	Maximum	-65.93	58.91	22.99		65.93	47.47	77.7	-54.79		77.70

TABLE C.34 – Résidus de localisation sur les temps d'arrivée des ondes S.

Résidus (s) / Sonde		M3	M5	M6.3	M6.2	Événement
P + S ($V_S = V_P/\sqrt{3}$)	Moyen	0.002	0.0094	-0.0006	-0.0056	
	Moy abs	0.005	0.01	0.0058	0.0063	0.0061
	Écart-type	0.0143	0.0081	0.008	0.0057	0.0108
	Minimum	0	0	0.0001	0	0
	Maximum	-0.2665	0.0474	-0.0263	-0.0225	0.2665
P + S ($V_S = 80\% V_P/\sqrt{3}$)	Moyen	-0.0056	-0.0009	0.0021	-0.0065	
	Moy abs	0.0068	0.0047	0.0052	0.0071	0.0058
	Écart-type	0.0143	0.007	0.0063	0.005	0.0106
	Minimum	0	0	0.0003	0	0
	Maximum	-0.2691	-0.046	0.0159	-0.0202	0.2691
P + S ($V_S = 120\% V_P/\sqrt{3}$)	Moyen	0.0104	0.021	-0.0016	-0.0027	
	Moy abs	0.0121	0.0212	0.0057	0.006	0.0127
	Écart-type	0.0161	0.0113	0.008	0.0081	0.0128
	Minimum	-0.0003	0.0003	0.0001	0	0
	Maximum	-0.2647	0.0806	-0.0285	0.0383	0.2647

C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMQUES

TABLE C.35 – Volume et orientation des ellipsoïdes d'erreur et distances des foyers au centre du réseau.

Ellipsoïde d'erreur :		Axes (m)			Pendage absolu axe A (°)	Volume (m ³)	Dispersion (m)
		A	B	C			
P automatique	Minimum	24.74	22.15	9.14	0	2.76E+04	5.02
	Moyen	123.5	73.68	57.28	40.43	2.91E+06	134.35
	Maximum	405.71	187.48	135.78	89.71	2.54E+07	691.58
	Écart-type	56.92	23.81	16.57	30.47	3.19E+06	89.59
	Médiane	99.3	68.97	53.06	44.84	1.41E+06	120.71
P manuel	Minimum	31.29	25.23	15.87	0	6.24E+04	5.02
	Moyen	106.84	63.85	50.08	52.97	1.87E+06	122.16
	Maximum	390.35	163.29	127.23	89.54	1.87E+07	691.58
	Écart-type	46.33	20.34	12.72	28.4	2.23E+06	74.01
	Médiane	88.14	56.38	46.62	65.55	9.60E+05	113.98
P + angles de polarisation	Minimum	15.65	10.84	5.49	0.18	3.90E+03	7.52
	Moyen	81.67	45.23	33.35	65.67	7.05E+05	100.77
	Maximum	343.27	133.86	96.14	89.77	1.26E+07	547.19
	Écart-type	37.95	15.2	9.24	25.53	1.08E+06	49.9
	Médiane	72.45	40.94	31.38	76.38	3.79E+05	95.79
P sans M6.3	Minimum	28.41	25.08	10.86	0.01	3.24E+04	11.1
	Moyen	107.84	66.47	50.67	53.99	2.02E+06	127.28
	Maximum	405.63	162.4	103.91	88.84	2.27E+07	561.39
	Écart-type	51.38	21.16	12.34	28.34	2.68E+06	59.4
	Médiane	88.7	58.52	48.97	66.71	1.03E+06	122.13
P + angles sans M6.3	Minimum	14.76	10.2	5.43	0.04	3.43E+03	18.71
	Moyen	81	45.52	32.61	68.83	6.38E+05	114.82
	Maximum	302.79	120.16	79.36	89.68	9.98E+06	327.62
	Écart-type	31.68	14.33	8.09	24.89	8.65E+05	42.88
	Médiane	73.62	41.39	31.27	79.74	3.86E+05	112.58
P + azimut	Minimum	19.48	13.15	8.51	0.01	9.13E+03	17.44
	Moyen	86.36	45.35	31.37	72.86	6.66E+05	111.39
	Maximum	438.56	168.98	76.16	89.84	1.05E+07	494.63
	Écart-type	34.45	16.77	7.52	21.75	1.05E+06	52.06
	Médiane	79.14	40.95	30.12	81.61	4.01E+05	108.66
uniquement angle	Minimum	41.48	31.11	21.2	0	1.72E+05	17.78
	Moyen	251.6	71.38	49.11	34.51	5.72E+06	108.3
	Maximum	797.93	158.71	117.21	89.86	5.60E+07	619.44
	Écart-type	219.27	22.36	18.49	37.91	7.23E+06	86.12
	Médiane	119.58	78.51	43.67	5.68	1.75E+06	84.77
P + S ($V_S = V_P/\sqrt{3}$)	Minimum	31.15	28.02	12.59	0.01	7.79E+04	6.4
	Moyen	88.71	54.77	40.65	48.45	1.09E+06	154.33
	Maximum	422.57	195.54	95.25	89.41	1.46E+07	702.1
	Écart-type	47.02	17.36	10.14	29.07	1.47E+06	107.28
	Médiane	74.02	48.82	37.98	56.39	5.63E+05	136.46
P + S ($V_S = 80\% V_P/\sqrt{3}$)	Minimum	29.31	22.57	12.62	0.08	5.78E+04	4.47
	Moyen	64.55	45.84	33.11	38.77	5.14E+05	96.77
	Maximum	275.88	125.94	65.02	88.93	6.73E+06	526.5
	Écart-type	27.79	13.94	6.58	26	5.86E+05	57.79
	Médiane	57.63	42.16	32.46	38.91	3.24E+05	87.14
P + S ($V_S = 120\% V_P/\sqrt{3}$)	Minimum	17.41	16.51	6.69	0.01	8.06E+03	19.43
	Moyen	116.48	63.35	47.75	35.95	2.09E+06	226.67
	Maximum	503.82	183.86	103.32	89.26	2.52E+07	702.1
	Écart-type	74.85	22.05	14.62	30.64	2.91E+06	164.92
	Médiane	88.04	54.66	44.08	25.08	8.30E+05	182.5
P sans M6.2	Minimum	34.92	29.67	16.22	0.02	1.02E+05	4.87
	Moyen	122.84	74	56.29	43.81	2.78E+06	168.94
	Maximum	407.3	191.35	130.67	89.83	2.50E+07	696.79
	Écart-type	55.68	22.61	15.24	31.16	2.94E+06	92.85
	Médiane	95.8	68.77	52.2	51.72	1.34E+06	155.48
P + angles sans M6.2	Minimum	20.57	14.55	7.49	0.04	9.39E+03	7.52
	Moyen	87.27	49.79	37.66	68.3	8.98E+05	116.8
	Maximum	362.81	147.41	100.83	89.9	1.19E+07	578.67
	Écart-type	36.65	16.4	9.86	25.34	1.27E+06	59.76
	Médiane	77.76	45.44	35.91	78.99	5.26E+05	110.4

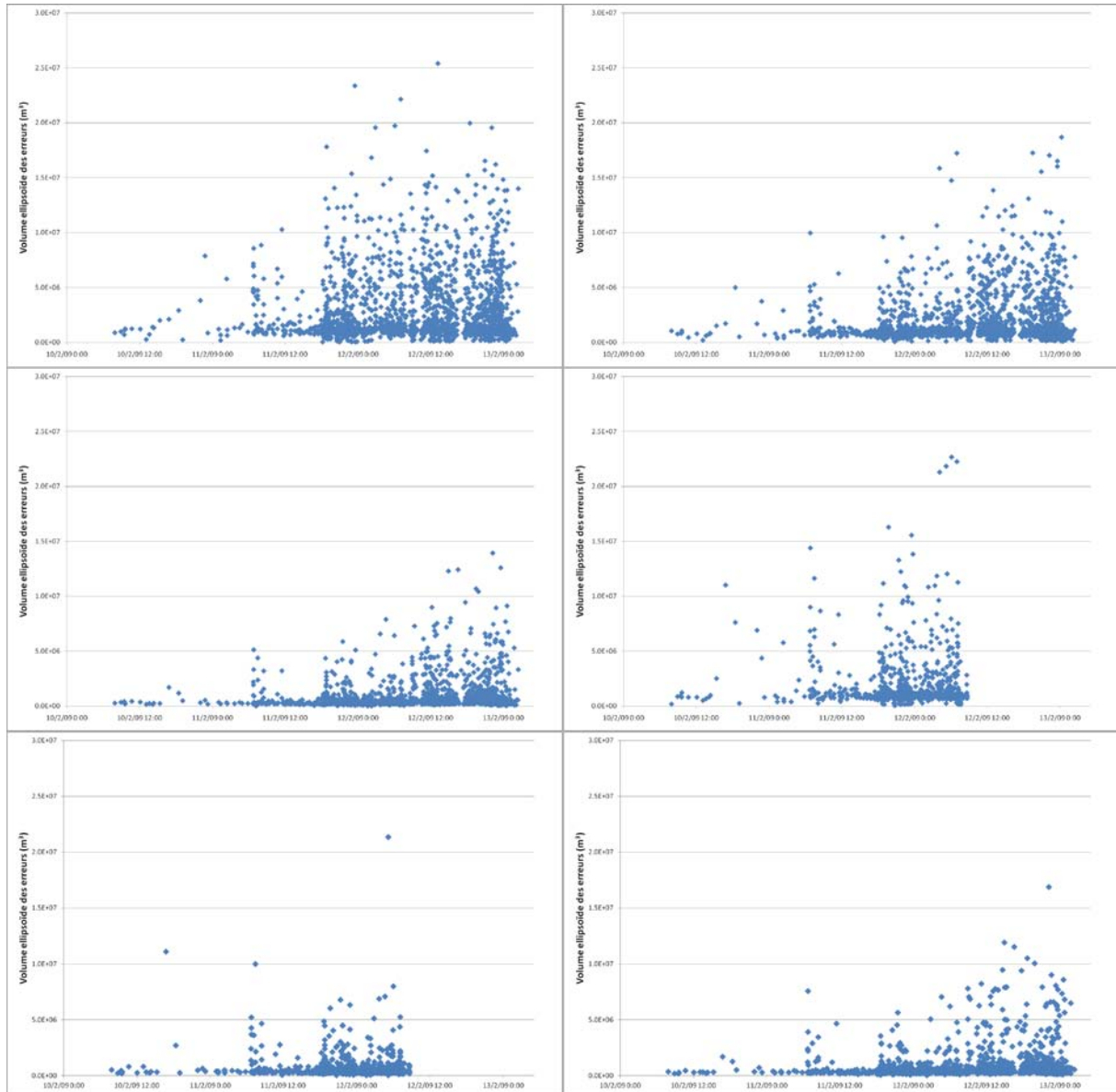


FIGURE C.53 – Évolution des ellipsoïdes d'erreur pour les localisations, de haut en bas et de gauche à droite : P automatique ; P manuel ; P + angles de polarisation ; P sans M63 ; P + angles sans M63 ; P + Azimut.

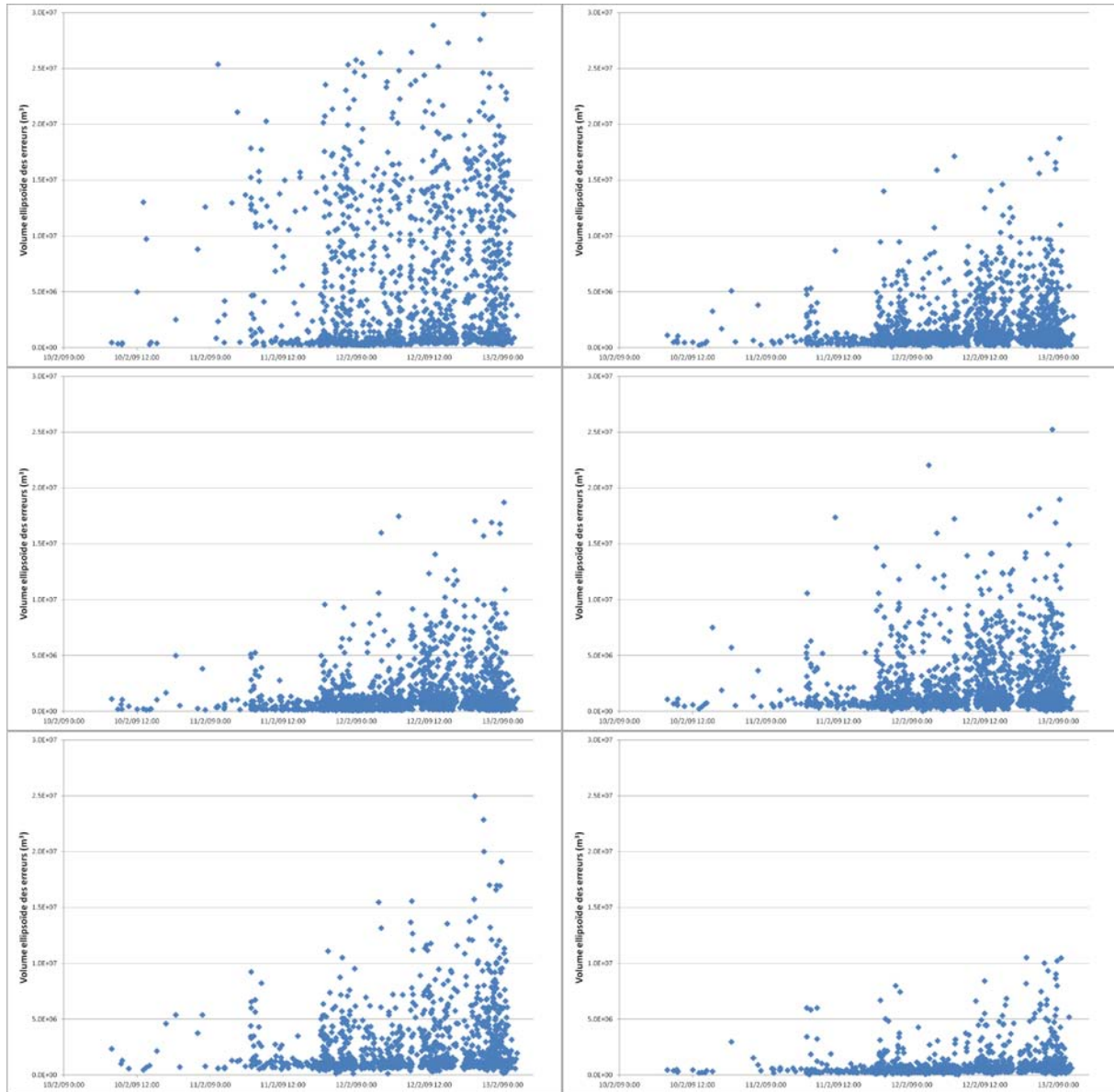


FIGURE C.54 – Évolution des ellipsoïdes d'erreur pour les localisations, de haut en bas et de gauche à droite : uniquement angles ; $P + S (V_S = V_P/\sqrt{3})$; $P + S (V_S = 80\% V_P/\sqrt{3})$; $P + S (V_S = 120\% V_P/\sqrt{3})$; P manuel sans M6.2 ; $P +$ angles sans M6.2.

C.3.3 Tests sur la sonde M6.2

TABLE C.36 – Comparaisons avec les positions des foyers déterminées en faisant en affectant des délais sur la sonde M6.2.

Écart moyen (m)	Sans Angles				Avec Angles			
	X	Y	Z	Distances	X	Y	Z	Distances
M62 -0.001s	0.04	-0.16	2.57	3.79	0.04	-0.03	0.30	0.53
M62 +0.001s	-0.11	0.09	-2.86	4.34	-0.68	0.29	-1.08	1.95
M62 +0.002s	-0.25	0.41	-5.42	7.58	-1.24	1.17	-3.17	4.98
M62 +0.003s	-0.64	0.44	-8.18	10.54	-1.35	1.39	-4.09	6.44
M62 +0.004s	-0.96	0.47	-10.95	13.80	-1.35	1.52	-4.82	7.77
M62 +0.005s	-1.56	0.82	-12.90	16.21	-1.35	1.45	-5.48	8.87
M62 +0.006s	-1.70	0.95	-14.74	18.43	-1.56	1.70	-5.39	9.14
M62 +0.007s	-4.23	3.88	-16.94	24.59	-1.78	1.96	-5.57	9.93
M62 +0.008s	-4.62	3.85	-19.78	27.53	-2.66	2.11	-6.75	11.65
M62 +0.009s	-5.11	4.23	-21.83	30.20	-2.77	2.46	-7.84	13.23
M62 +0.01s	-6.29	4.77	-24.87	34.46	-2.88	2.24	-8.39	14.52

TABLE C.37 – Comparaisons avec les positions des foyers déterminées en faisant varier les vitesses autour de la sonde M6.2.

Écart moyen (m)	Sans Angles				Avec Angles			
	X	Y	Z	Distances	X	Y	Z	Distances
Marnes irisées +100m/s	0.46	-0.16	-1.69	2.40	0.04	-0.22	0.21	1.56
Marnes irisées +200m/s	0.57	-0.44	-0.91	3.61	-0.04	-0.47	0.03	2.85
Marnes irisées +300m/s	0.50	-0.32	1.35	6.49	0.21	-0.44	0.60	3.83
Marnes irisées +400m/s	0.14	-0.76	2.30	8.13	0.25	-0.47	-0.08	5.93
Marnes irisées +500m/s	0.50	-0.63	2.65	9.43	0.32	-0.85	0.45	6.93
Marnes irisées +600m/s	0.78	-0.63	2.67	11.05	0.46	-0.73	0.65	7.45
Marnes irisées +700m/s	0.82	-0.98	4.28	12.57	0.57	-0.82	1.04	8.24
Marnes irisées +800m/s	1.14	-1.20	5.33	13.57	0.43	-0.69	1.02	8.78
Recouvrement -100m/s	0.60	-0.60	-3.37	5.79	0.32	-0.35	1.23	2.57
Recouvrement -200m/s	0.57	-1.07	-2.45	7.14	0.67	-0.85	2.35	4.61
Recouvrement -300m/s	1.17	-1.93	-1.89	10.00	0.85	-1.07	4.18	6.40

C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMQUES

TABLE C.38 – Résidus sur les temps d'arrivée des ondes P des localisations, sans les angles de polarisation, affectant des délais sur la sonde M62.

Résidus (s) / Sonde		M1	M2	M3	M5	M6.3	M6.2	M6.1	M7	M8	Moyens
M62 -0.001s	Moyen	0.0061	0.0004	0.0000	0.0010	-0.0061	-0.0104	0.0066	0.0040	0.0040	
	Moy abs	0.0079	0.0032	0.0040	0.0050	0.0064	0.0104	0.0070	0.0044	0.0060	0.0060
	σ	0.0103	0.0051	0.0073	0.0068	0.0077	0.0039	0.0040	0.0043	0.0064	0.0033
	Min	-0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0027	-0.0005	0.0000	0.0000	0.0020
	Max	0.0301	0.0227	0.0437	0.0272	-0.0478	-0.0300	0.0208	0.0168	-0.0279	0.0269
M62 +0.001s	Moyen	0.0061	0.0004	0.0001	0.0009	-0.0064	-0.0090	0.0060	0.0038	0.0037	
	Moy abs	0.0076	0.0032	0.0040	0.0050	0.0066	0.0091	0.0064	0.0043	0.0059	0.0057
	σ	0.0097	0.0051	0.0073	0.0067	0.0076	0.0038	0.0039	0.0043	0.0065	0.0033
	Min	-0.0002	0.0000	0.0002	-0.0001	0.0001	-0.0025	0.0003	0.0000	0.0001	0.0018
	Max	0.0276	0.0231	0.0433	0.0264	-0.0481	-0.0287	0.0199	0.0167	-0.0282	0.0266
M62 +0.002s	Moyen	0.0062	0.0004	0.0001	0.0008	-0.0067	-0.0083	0.0057	0.0038	0.0037	
	Moy abs	0.0076	0.0032	0.0039	0.0049	0.0068	0.0084	0.0061	0.0041	0.0058	0.0055
	σ	0.0095	0.0051	0.0073	0.0066	0.0076	0.0038	0.0039	0.0042	0.0065	0.0033
	min	-0.0001	0.0000	0.0000	0.0002	-0.0001	-0.0017	0.0002	0.0000	0.0000	0.0017
	Max	0.0275	0.0230	0.0432	0.0263	-0.0483	-0.0278	0.0198	0.0165	-0.0284	0.0264
M62 +0.003s	Moyen	0.0061	0.0003	0.0001	0.0008	-0.0069	-0.0076	0.0054	0.0036	0.0036	
	Moy abs	0.0075	0.0032	0.0040	0.0048	0.0070	0.0077	0.0059	0.0041	0.0058	0.0054
	σ	0.0095	0.0050	0.0073	0.0065	0.0076	0.0038	0.0039	0.0041	0.0065	0.0033
	Min	-0.0001	0.0000	-0.0001	0.0002	0.0003	-0.0008	0.0001	-0.0001	-0.0001	0.0015
	Max	0.0273	0.0228	0.0430	0.0262	-0.0484	-0.0269	0.0197	0.0164	-0.0286	0.0262
M62 +0.004s	Moyen	0.0060	0.0003	0.0001	0.0008	-0.0070	-0.0069	0.0051	0.0036	0.0035	
	Moy abs	0.0074	0.0032	0.0040	0.0048	0.0071	0.0070	0.0055	0.0040	0.0057	0.0053
	σ	0.0094	0.0049	0.0075	0.0065	0.0074	0.0038	0.0038	0.0040	0.0065	0.0033
	Min	-0.0001	0.0000	0.0001	0.0003	0.0001	0.0001	-0.0002	0.0001	0.0001	0.0014
	Max	0.0272	0.0228	0.0428	0.0261	-0.0486	-0.0261	0.0196	0.0156	-0.0287	0.0261
M62 +0.005s	Moyen	0.0063	0.0003	0.0002	0.0006	-0.0072	-0.0061	0.0048	0.0035	0.0034	
	Moy abs	0.0076	0.0031	0.0040	0.0049	0.0073	0.0063	0.0053	0.0039	0.0056	0.0052
	σ	0.0092	0.0049	0.0075	0.0066	0.0074	0.0038	0.0038	0.0040	0.0064	0.0033
	Min	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	-0.0001	0.0001	-0.0004	0.0000	0.0000	0.0012
	Max	0.0266	0.0227	0.0423	0.0259	-0.0496	-0.0252	0.0194	0.0155	-0.0276	0.0260
M62 +0.006s	Moyen	0.0063	0.0002	0.0001	0.0006	-0.0074	-0.0054	0.0046	0.0034	0.0033	
	Moy abs	0.0075	0.0031	0.0039	0.0048	0.0075	0.0056	0.0051	0.0038	0.0055	0.0050
	σ	0.0091	0.0049	0.0074	0.0065	0.0074	0.0037	0.0038	0.0039	0.0064	0.0033
	Min	0.0002	-0.0001	0.0000	0.0000	-0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0011
	Max	0.0265	0.0225	0.0421	0.0258	-0.0498	-0.0243	0.0193	0.0147	-0.0278	0.0259
M62 +0.007s	Moyen	0.0063	0.0003	0.0002	0.0005	-0.0077	-0.0047	0.0042	0.0034	0.0031	
	Moy abs	0.0075	0.0030	0.0038	0.0047	0.0077	0.0049	0.0050	0.0037	0.0054	0.0049
	σ	0.0091	0.0048	0.0074	0.0064	0.0074	0.0036	0.0042	0.0037	0.0064	0.0033
	Min	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0004	-0.0002	0.0003	-0.0001	0.0000	0.0009
	Max	0.0264	0.0224	0.0420	0.0250	-0.0499	-0.0234	0.0192	0.0146	-0.0280	0.0260
M62 +0.008s	Moyen	0.0062	0.0003	0.0001	0.0005	-0.0079	-0.0039	0.0039	0.0033	0.0031	
	Moy abs	0.0074	0.0031	0.0038	0.0047	0.0079	0.0042	0.0047	0.0037	0.0054	0.0048
	σ	0.0090	0.0049	0.0074	0.0064	0.0073	0.0036	0.0042	0.0037	0.0064	0.0033
	Min	0.0001	0.0000	0.0000	0.0001	0.0005	-0.0001	0.0002	0.0000	-0.0001	0.0008
	Max	0.0263	0.0223	0.0418	0.0249	-0.0501	-0.0226	0.0191	0.0145	-0.0281	0.0261
M62 +0.009s	Moyen	0.0061	0.0002	0.0001	0.0004	-0.0081	-0.0032	0.0036	0.0032	0.0029	
	Moy abs	0.0074	0.0031	0.0039	0.0046	0.0081	0.0036	0.0045	0.0036	0.0053	0.0047
	σ	0.0090	0.0048	0.0073	0.0063	0.0073	0.0036	0.0041	0.0037	0.0064	0.0033
	Min	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0001	0.0001	-0.0001	0.0001	0.0006
	Max	0.0261	0.0222	0.0416	0.0247	-0.0503	-0.0217	0.0189	0.0144	-0.0283	0.0262
M62 +0.01s	Moyen	0.0062	0.0002	0.0001	0.0004	-0.0083	-0.0024	0.0034	0.0031	0.0029	
	Moy abs	0.0072	0.0031	0.0038	0.0046	0.0083	0.0031	0.0043	0.0035	0.0052	0.0046
	σ	0.0088	0.0048	0.0072	0.0063	0.0074	0.0036	0.0042	0.0037	0.0063	0.0033
	Min	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0006
	Max	0.0260	0.0222	0.0410	0.0246	-0.0513	-0.0208	0.0188	0.0143	-0.0273	0.0262

C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMQUES

TABLE C.39 – Résidus sur les temps d'arrivée des ondes P des localisations, avec les angles de polarisation, affectant des délais sur la sonde M62.

Résidus (s) / Sonde		M1	M2	M3	M5	M6.3	M6.2	M6.1	M7	M8	Moyens	
M62 -0.001s	Moyen	0.0054	-0.0007	-0.0006	0.0007	-0.0052	-0.0098	0.0071	0.0046	0.0033		
	Moy abs	0.0084	0.0045	0.0060	0.0059	0.0060	0.0098	0.0078	0.0060	0.0062	0.0066	
	σ	0.0112	0.0063	0.0090	0.0083	0.0080	0.0044	0.0047	0.0059	0.0072	0.0033	
	Min	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0001	-0.0019	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0027
	Max	0.0283	0.0227	0.0437	-0.0335	-0.0478	-0.0318	0.0203	-0.0213	-0.0279	-0.0279	0.0269
M62 +0.001s	Moyen	0.0054	-0.0007	-0.0006	0.0004	-0.0056	-0.0082	0.0067	0.0043	0.0030		
	Moy abs	0.0083	0.0045	0.0060	0.0060	0.0063	0.0082	0.0074	0.0058	0.0061	0.0064	
	σ	0.0110	0.0063	0.0091	0.0083	0.0080	0.0044	0.0047	0.0059	0.0072	0.0033	
	Min	-0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	0.0001	0.0001	0.0025
	Max	0.0281	0.0231	0.0433	-0.0334	-0.0481	-0.0303	0.0199	-0.0218	-0.0282	-0.0282	0.0266
M62 +0.002s	Moyen	0.0053	-0.0009	-0.0007	0.0003	-0.0058	-0.0075	0.0065	0.0043	0.0029		
	Moy abs	0.0083	0.0046	0.0060	0.0058	0.0064	0.0075	0.0073	0.0057	0.0060	0.0062	
	σ	0.0110	0.0063	0.0091	0.0082	0.0079	0.0044	0.0048	0.0057	0.0071	0.0033	
	Min	-0.0003	-0.0001	-0.0001	0.0001	0.0000	-0.0007	0.0001	-0.0001	0.0000	0.0000	0.0024
	Max	0.0279	0.0230	0.0432	-0.0336	-0.0483	-0.0294	0.0198	-0.0219	-0.0284	-0.0284	0.0264
M62 +0.003s	Moyen	0.0053	-0.0010	-0.0007	0.0003	-0.0060	-0.0067	0.0062	0.0042	0.0027		
	Moy abs	0.0082	0.0047	0.0061	0.0058	0.0065	0.0068	0.0071	0.0056	0.0059	0.0061	
	σ	0.0109	0.0064	0.0092	0.0081	0.0079	0.0044	0.0048	0.0056	0.0071	0.0033	
	Min	-0.0003	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	0.0000	0.0000	-0.0002	0.0000	0.0023
	Max	0.0278	0.0228	0.0430	-0.0328	-0.0484	-0.0285	0.0196	-0.0212	-0.0286	-0.0286	0.0262
M62 +0.004s	Moyen	0.0052	-0.0011	-0.0007	0.0002	-0.0061	-0.0059	0.0060	0.0041	0.0026		
	Moy abs	0.0082	0.0047	0.0061	0.0058	0.0066	0.0061	0.0069	0.0055	0.0059	0.0060	
	σ	0.0109	0.0063	0.0093	0.0081	0.0078	0.0044	0.0049	0.0056	0.0071	0.0033	
	Min	-0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	0.0001	0.0001	0.0022
	Max	0.0277	0.0228	0.0428	-0.0329	-0.0486	-0.0277	0.0194	-0.0213	-0.0287	-0.0287	0.0261
M62 +0.005s	Moyen	0.0052	-0.0012	-0.0008	0.0001	-0.0063	-0.0051	0.0058	0.0040	0.0025		
	Moy abs	0.0083	0.0048	0.0062	0.0059	0.0068	0.0054	0.0067	0.0054	0.0058	0.0059	
	σ	0.0108	0.0064	0.0092	0.0081	0.0078	0.0044	0.0048	0.0056	0.0071	0.0033	
	Min	0.0007	0.0001	0.0000	-0.0001	-0.0001	0.0002	-0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0021
	Max	0.0276	0.0227	0.0423	-0.0331	-0.0496	-0.0268	0.0189	-0.0214	-0.0276	-0.0276	0.0260
M62 +0.006s	Moyen	0.0052	-0.0013	-0.0009	0.0000	-0.0065	-0.0043	0.0057	0.0039	0.0023		
	Moy abs	0.0081	0.0048	0.0062	0.0059	0.0069	0.0047	0.0066	0.0054	0.0058	0.0058	
	σ	0.0106	0.0063	0.0092	0.0081	0.0078	0.0043	0.0048	0.0056	0.0071	0.0033	
	Min	0.0006	0.0000	0.0000	0.0002	0.0001	0.0000	0.0002	-0.0001	0.0001	0.0001	0.0019
	Max	0.0274	0.0225	0.0421	-0.0332	-0.0498	-0.0259	0.0188	-0.0215	-0.0278	-0.0278	0.0259
M62 +0.007s	Moyen	0.0052	-0.0013	-0.0009	-0.0002	-0.0066	-0.0035	0.0055	0.0038	0.0022		
	Moy abs	0.0081	0.0048	0.0062	0.0059	0.0071	0.0041	0.0065	0.0053	0.0057	0.0057	
	σ	0.0106	0.0063	0.0092	0.0081	0.0078	0.0043	0.0049	0.0056	0.0071	0.0033	
	Min	0.0005	-0.0001	-0.0002	0.0001	0.0000	-0.0002	0.0001	0.0000	-0.0001	0.0000	0.0018
	Max	0.0273	0.0224	0.0420	-0.0333	-0.0499	-0.0250	0.0187	-0.0217	-0.0280	-0.0280	0.0260
M62 +0.008s	Moyen	0.0051	-0.0014	-0.0009	-0.0003	-0.0068	-0.0027	0.0053	0.0036	0.0021		
	Moy abs	0.0081	0.0049	0.0062	0.0059	0.0072	0.0037	0.0063	0.0052	0.0057	0.0057	
	σ	0.0106	0.0063	0.0092	0.0081	0.0078	0.0044	0.0049	0.0056	0.0071	0.0033	
	Min	0.0007	-0.0002	-0.0001	-0.0001	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.0000	0.0001	0.0001	0.0017
	Max	0.0267	0.0223	0.0418	-0.0334	-0.0501	-0.0242	0.0185	-0.0218	-0.0281	-0.0281	0.0261
M62 +0.009s	Moyen	0.0050	-0.0015	-0.0010	-0.0004	-0.0070	-0.0019	0.0051	0.0035	0.0019		
	Moy abs	0.0080	0.0049	0.0063	0.0059	0.0073	0.0033	0.0062	0.0051	0.0056	0.0056	
	σ	0.0106	0.0063	0.0092	0.0080	0.0078	0.0044	0.0049	0.0055	0.0071	0.0033	
	Min	0.0006	0.0002	0.0001	-0.0002	0.0000	0.0000	-0.0003	0.0001	-0.0001	0.0000	0.0017
	Max	0.0266	0.0222	0.0416	-0.0336	-0.0503	-0.0233	0.0184	-0.0219	-0.0283	-0.0283	0.0262
M62 +0.01s	Moyen	0.0051	-0.0016	-0.0010	-0.0005	-0.0073	-0.0011	0.0049	0.0034	0.0018		
	Moy abs	0.0080	0.0049	0.0062	0.0059	0.0075	0.0033	0.0060	0.0050	0.0056	0.0056	
	σ	0.0104	0.0063	0.0091	0.0080	0.0078	0.0043	0.0049	0.0055	0.0070	0.0033	
	Min	-0.0004	0.0001	-0.0001	-0.0003	-0.0001	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002	0.0002	0.0018
	Max	0.0265	0.0222	0.0410	-0.0337	-0.0513	-0.0224	0.0183	-0.0220	-0.0273	-0.0273	0.0262

C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMQUES

TABLE C.40 – Résidus sur les angles de polarisation des localisations, avec les angles de polarisation, affectant des délais sur la sonde M62.

Résidus (s) / Sonde		Azimuts					Pendages				
		M3	M5	M6.3	M6.2	Moyens	M3	M5	M6.3	M6.2	Moyens
M62 -0.001s	Moyen	0.59	-1.71	-0.70	1.85		4.07	11.55	5.51	-8.24	
	Moy abs	4.86	3.83	4.41	4.85	4.92	5.49	13.66	9.88	9.41	9.60
	σ	6.25	5.46	5.78	6.42	3.45	6.08	12.20	9.87	6.96	4.68
	Min	0.07	-0.01	-0.27	0.03	0.70	0.02	0.06	-0.09	0.28	1.49
	Max	19.93	-25.12	-25.10	24.89	22.28	20.28	36.08	-26.60	-25.46	26.60
M62 +0.001s	Moyen	0.63	-1.66	-0.39	2.14		4.27	11.55	5.75	-8.23	
	Moy abs	4.91	3.83	4.39	4.89	4.94	5.69	13.73	9.95	9.40	9.67
	σ	6.30	5.47	5.49	6.57	3.48	6.09	12.22	9.73	6.94	4.55
	Min	0.07	-0.01	0.43	0.03	0.70	0.02	0.06	-0.09	-0.31	1.49
	Max	19.69	-25.12	-19.35	25.21	22.28	20.28	36.08	-25.87	-25.46	24.32
M62 +0.002s	Moyen	0.60	-1.86	-0.46	1.91		4.45	11.63	5.78	-8.20	
	Moy abs	5.01	3.98	4.52	4.87	5.00	5.82	13.76	9.94	9.35	9.62
	σ	6.36	5.46	5.59	6.66	3.45	6.17	12.20	9.70	6.83	4.64
	Min	0.07	0.26	0.43	0.03	1.23	0.07	0.06	-0.06	-0.31	1.18
	Max	19.69	-25.12	-19.35	25.21	22.28	20.27	36.08	-25.87	23.37	24.32
M62 +0.003s	Moyen	0.63	-1.94	-0.54	1.98		4.44	11.68	6.42	-8.24	
	Moy abs	5.07	4.06	4.51	4.82	5.00	5.80	13.72	9.80	9.36	9.47
	σ	6.36	5.52	5.58	6.61	3.45	6.09	12.15	8.97	6.83	4.43
	Min	0.07	0.26	0.43	0.03	1.23	-0.04	0.06	-0.09	-0.28	0.16
	Max	19.69	-25.12	-19.35	25.21	22.28	20.27	36.08	-25.87	-23.50	22.24
M62 +0.004s	Moyen	0.61	-1.94	-0.51	1.98		4.39	11.70	6.47	-8.27	
	Moy abs	5.12	4.06	4.53	4.85	5.03	5.83	13.71	9.80	9.39	9.49
	σ	6.41	5.52	5.60	6.65	3.45	6.13	12.14	8.84	6.81	4.39
	Min	0.07	0.26	0.43	0.03	1.23	-0.01	0.06	-0.09	0.38	0.20
	Max	19.69	-25.12	-19.35	25.21	22.28	20.27	36.08	-23.98	-23.50	22.24
M62 +0.005s	Moyen	0.85	-1.92	-0.55	1.95		4.42	11.73	6.64	-8.20	
	Moy abs	5.37	3.99	4.44	4.85	5.05	5.86	13.70	10.02	9.35	9.52
	σ	6.57	5.44	5.51	6.64	3.46	6.13	12.11	8.97	6.78	4.38
	Min	0.07	0.26	0.43	0.03	1.23	-0.01	0.06	-0.89	0.38	0.20
	Max	19.69	-25.12	-19.35	25.21	22.28	20.27	36.08	-23.98	-23.50	22.24
M62 +0.006s	Moyen	0.88	-1.91	-0.54	1.94		4.53	11.75	6.57	-8.21	
	Moy abs	5.41	3.99	4.44	4.89	5.08	5.91	13.72	10.00	9.40	9.55
	σ	6.61	5.44	5.51	6.67	3.45	6.07	12.11	9.03	6.86	4.37
	Min	0.07	0.26	0.43	0.03	1.23	0.04	0.06	0.40	0.40	0.52
	Max	19.69	-25.12	-19.35	25.21	22.28	20.27	36.08	-23.98	-23.50	22.24
M62 +0.007s	Moyen	0.94	-1.97	-0.53	1.95		4.58	11.74	6.62	-8.25	
	Moy abs	5.39	4.04	4.49	4.89	5.11	5.95	13.70	10.05	9.44	9.57
	σ	6.61	5.46	5.56	6.65	3.44	6.09	12.09	9.07	6.89	4.35
	Min	-0.01	0.28	0.43	0.03	1.23	0.09	0.06	-0.06	0.26	0.80
	Max	19.69	-25.12	-19.35	25.21	22.28	20.27	36.08	-23.98	-23.50	22.24
M62 +0.008s	Moyen	0.85	-2.01	-0.50	2.09		4.67	11.77	6.79	-8.23	
	Moy abs	5.35	4.12	4.47	4.79	5.06	6.05	13.70	10.18	9.44	9.63
	σ	6.63	5.50	5.56	6.46	3.41	6.16	12.08	9.02	6.91	4.34
	Min	-0.01	0.28	0.30	0.03	1.43	0.09	0.06	-0.06	0.26	0.80
	Max	19.43	-25.12	-19.35	25.21	22.28	20.27	36.08	-23.98	-23.50	22.24
M62 +0.009s	Moyen	0.91	-2.00	-0.62	2.02		4.74	11.80	6.89	-8.23	
	Moy abs	5.52	4.14	4.41	4.79	5.09	6.18	13.74	10.10	9.48	9.67
	σ	6.83	5.52	5.50	6.49	3.42	6.23	12.09	8.82	6.96	4.32
	Min	-0.01	0.28	0.30	0.03	1.43	0.09	0.06	-1.78	0.40	0.80
	Max	19.43	-25.12	-19.35	25.21	22.28	20.27	36.08	-22.27	-23.50	22.24
M62 +0.01s	Moyen	0.81	-1.97	-0.64	2.04		4.85	11.95	7.05	-8.26	
	Moy abs	5.73	4.05	4.53	4.89	5.18	6.17	13.80	10.23	9.51	9.71
	σ	7.02	5.56	5.66	6.55	3.48	6.12	11.99	8.88	7.00	4.30
	Min	-0.01	0.28	0.30	0.03	1.10	0.14	0.28	0.39	0.40	1.12
	Max	19.43	-25.12	-19.35	25.21	22.28	20.27	36.08	-22.27	-23.50	22.24

C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMQUES

TABLE C.41 – Résidus sur les temps d'arrivée des ondes P des localisations, sans les angles de polarisation, faisant varier les vitesses autour de la sonde M62.

Résidus (s) / Sonde		M1	M2	M3	M5	M6.3	M6.2	M6.1	M7	M8	Moyens
Marnes irisées +100m/s	Moyen	0.0061	0.0004	0.0000	0.0010	-0.0072	-0.0088	0.0062	0.0040	0.0039	
	Moy abs	0.0077	0.0032	0.0040	0.0050	0.0073	0.0089	0.0066	0.0044	0.0060	0.0058
	σ	0.0098	0.0051	0.0074	0.0068	0.0076	0.0038	0.0039	0.0043	0.0065	0.0033
	Min	-0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0024	0.0003	0.0000	0.0000	0.0017
	Max	0.0277	0.0232	0.0435	0.0267	-0.0490	-0.0287	0.0200	0.0168	-0.0280	0.0267
Marnes irisées +200m/s	Moyen	0.0061	0.0004	0.0001	0.0012	-0.0079	-0.0086	0.0063	0.0041	0.0041	
	Moy abs	0.0078	0.0032	0.0041	0.0050	0.0080	0.0087	0.0067	0.0045	0.0061	0.0060
	σ	0.0099	0.0052	0.0074	0.0068	0.0076	0.0039	0.0039	0.0044	0.0066	0.0033
	Min	0.0001	0.0001	0.0000	0.0001	-0.0003	-0.0022	0.0004	0.0000	0.0000	0.0018
	Max	0.0279	0.0234	0.0434	0.0271	-0.0494	-0.0287	0.0206	0.0170	-0.0288	0.0269
Marnes irisées +300m/s	Moyen	0.0052	0.0005	0.0001	0.0012	-0.0087	-0.0083	0.0065	0.0043	0.0042	
	Moy abs	0.0070	0.0033	0.0042	0.0050	0.0088	0.0083	0.0068	0.0046	0.0061	0.0061
	σ	0.0087	0.0052	0.0076	0.0069	0.0079	0.0039	0.0040	0.0044	0.0064	0.0033
	Min	-0.0005	0.0000	0.0001	0.0000	0.0004	0.0016	-0.0004	-0.0002	-0.0001	0.0019
	Max	0.0239	0.0235	0.0436	0.0270	-0.0501	-0.0287	0.0207	0.0171	-0.0286	0.0271
Marnes irisées +400m/s	Moyen	0.0053	0.0006	0.0001	0.0013	-0.0094	-0.0081	0.0066	0.0043	0.0044	
	Moy abs	0.0070	0.0034	0.0043	0.0051	0.0094	0.0082	0.0069	0.0047	0.0063	0.0062
	σ	0.0086	0.0053	0.0076	0.0070	0.0078	0.0039	0.0040	0.0045	0.0065	0.0033
	Min	-0.0002	0.0000	-0.0001	-0.0002	-0.0003	0.0013	0.0000	-0.0001	0.0000	0.0020
	Max	0.0239	0.0236	0.0438	0.0273	-0.0508	-0.0287	0.0207	0.0173	-0.0284	0.0272
Marnes irisées +500m/s	Moyen	0.0054	0.0006	0.0002	0.0014	-0.0100	-0.0080	0.0067	0.0045	0.0045	
	Moy abs	0.0070	0.0034	0.0043	0.0051	0.0100	0.0081	0.0070	0.0048	0.0064	0.0063
	σ	0.0086	0.0053	0.0077	0.0069	0.0078	0.0040	0.0040	0.0044	0.0066	0.0033
	Min	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0005	0.0011	0.0001	0.0000	0.0000	0.0021
	Max	0.0240	0.0235	0.0440	0.0275	-0.0515	-0.0287	0.0208	0.0174	-0.0283	0.0274
Marnes irisées +600m/s	Moyen	0.0055	0.0006	0.0002	0.0014	-0.0105	-0.0078	0.0067	0.0046	0.0046	
	Moy abs	0.0070	0.0034	0.0043	0.0052	0.0106	0.0079	0.0071	0.0049	0.0065	0.0064
	σ	0.0087	0.0053	0.0078	0.0070	0.0078	0.0039	0.0040	0.0045	0.0066	0.0033
	Min	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0007	0.0000	0.0001	0.0001	0.0022
	Max	0.0242	0.0236	0.0443	0.0277	-0.0520	-0.0287	0.0205	0.0175	-0.0281	0.0275
Marnes irisées +700m/s	Moyen	0.0056	0.0007	0.0002	0.0015	-0.0110	-0.0077	0.0069	0.0046	0.0047	
	Moy abs	0.0071	0.0034	0.0044	0.0052	0.0110	0.0077	0.0072	0.0050	0.0066	0.0065
	σ	0.0088	0.0054	0.0079	0.0070	0.0077	0.0039	0.0040	0.0046	0.0067	0.0033
	Min	0.0002	-0.0001	-0.0001	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.0002	0.0001	0.0023
	Max	0.0244	0.0237	0.0456	0.0276	-0.0513	-0.0287	0.0212	0.0177	-0.0295	0.0274
Marnes irisées +800m/s	Moyen	0.0057	0.0007	0.0002	0.0016	-0.0115	-0.0076	0.0069	0.0047	0.0048	
	Moy abs	0.0071	0.0034	0.0045	0.0052	0.0115	0.0076	0.0073	0.0051	0.0067	0.0066
	σ	0.0089	0.0054	0.0080	0.0070	0.0077	0.0039	0.0040	0.0048	0.0068	0.0033
	Min	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0005	-0.0002	0.0001	-0.0001	-0.0003	0.0025
	Max	0.0245	0.0238	0.0458	0.0277	-0.0514	-0.0288	0.0212	0.0178	-0.0301	0.0276
Recouvrement -100m/s	Moyen	0.0061	0.0003	0.0002	0.0010	-0.0062	-0.0087	0.0058	0.0035	0.0035	
	Moy abs	0.0076	0.0032	0.0038	0.0048	0.0064	0.0088	0.0062	0.0040	0.0057	0.0055
	σ	0.0097	0.0050	0.0072	0.0067	0.0077	0.0038	0.0038	0.0041	0.0065	0.0033
	Min	-0.0002	0.0000	0.0000	0.0001	-0.0001	-0.0020	0.0000	0.0000	0.0001	0.0017
	Max	0.0275	0.0229	0.0437	0.0265	-0.0478	-0.0282	0.0200	0.0162	-0.0287	0.0265
Recouvrement -200m/s	Moyen	0.0050	0.0003	0.0005	0.0010	-0.0060	-0.0082	0.0055	0.0033	0.0032	
	Moy abs	0.0065	0.0032	0.0037	0.0048	0.0063	0.0083	0.0059	0.0037	0.0053	0.0053
	σ	0.0081	0.0051	0.0072	0.0067	0.0081	0.0040	0.0038	0.0040	0.0061	0.0033
	Min	-0.0002	-0.0001	0.0001	0.0000	-0.0002	-0.0016	-0.0004	0.0000	-0.0002	0.0015
	Max	0.0231	0.0230	0.0435	0.0262	-0.0483	-0.0278	0.0198	0.0153	-0.0279	0.0265
Recouvrement -300m/s	Moyen	0.0048	0.0003	0.0007	0.0011	-0.0057	-0.0078	0.0052	0.0030	0.0029	
	Moy abs	0.0062	0.0033	0.0037	0.0046	0.0061	0.0081	0.0057	0.0035	0.0050	0.0051
	σ	0.0080	0.0051	0.0072	0.0064	0.0081	0.0041	0.0038	0.0038	0.0060	0.0034
	Min	-0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0013	-0.0001	-0.0001	0.0000	0.0014
	Max	0.0229	0.0233	0.0433	0.0267	-0.0489	-0.0275	0.0196	0.0149	-0.0272	0.0266

C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMQUES

TABLE C.42 – Résidus sur les temps d'arrivée des ondes P des localisations, avec les angles de polarisation, faisant varier les vitesses autour de la sonde M62.

Résidus (s) / Sonde		M1	M2	M3	M5	M6.3	M6.2	M6.1	M7	M8	Moyens
Marnes irisées +100m/s	Moyen	0.0055	-0.0007	-0.0006	0.0008	-0.0062	-0.0089	0.0071	0.0046	0.0033	
	Moy abs	0.0084	0.0045	0.0060	0.0059	0.0067	0.0089	0.0077	0.0061	0.0062	0.0066
	σ	0.0112	0.0063	0.0091	0.0083	0.0079	0.0044	0.0047	0.0060	0.0072	0.0034
	Min	0.0001	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000	-0.0009	-0.0001	0.0000	-0.0001	0.0025
	Max	0.0283	0.0234	0.0434	-0.0331	-0.0484	-0.0309	0.0207	-0.0215	-0.0288	0.0269
Marnes irisées +200m/s	Moyen	0.0056	-0.0005	-0.0005	0.0009	-0.0071	-0.0087	0.0072	0.0047	0.0035	
	Moy abs	0.0084	0.0045	0.0060	0.0059	0.0075	0.0087	0.0078	0.0062	0.0063	0.0067
	σ	0.0112	0.0063	0.0092	0.0083	0.0079	0.0044	0.0047	0.0060	0.0072	0.0034
	Min	0.0002	0.0001	0.0001	-0.0001	0.0001	-0.0009	0.0000	0.0000	0.0001	0.0024
	Max	0.0284	0.0231	0.0436	-0.0330	-0.0492	-0.0308	0.0208	-0.0213	-0.0286	0.0271
Marnes irisées +300m/s	Moyen	0.0056	-0.0005	-0.0005	0.0010	-0.0078	-0.0086	0.0073	0.0048	0.0036	
	Moy abs	0.0085	0.0044	0.0060	0.0059	0.0081	0.0086	0.0079	0.0062	0.0064	0.0068
	σ	0.0112	0.0063	0.0092	0.0083	0.0079	0.0044	0.0047	0.0060	0.0072	0.0034
	Min	-0.0003	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.0000	-0.0008	0.0000	0.0000	-0.0001	0.0024
	Max	0.0286	0.0232	0.0438	-0.0328	-0.0500	-0.0305	0.0208	-0.0212	-0.0285	0.0272
Marnes irisées +400m/s	Moyen	0.0057	-0.0004	-0.0004	0.0011	-0.0085	-0.0084	0.0073	0.0049	0.0037	
	Moy abs	0.0087	0.0044	0.0061	0.0059	0.0087	0.0084	0.0079	0.0063	0.0065	0.0069
	σ	0.0113	0.0063	0.0093	0.0084	0.0079	0.0044	0.0048	0.0060	0.0072	0.0034
	Min	-0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0004	-0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0025
	Max	0.0287	0.0235	0.0439	-0.0326	-0.0507	-0.0304	0.0209	-0.0209	-0.0283	0.0274
Marnes irisées +500m/s	Moyen	0.0058	-0.0003	-0.0005	0.0013	-0.0091	-0.0083	0.0074	0.0050	0.0039	
	Moy abs	0.0087	0.0044	0.0061	0.0060	0.0094	0.0083	0.0081	0.0064	0.0066	0.0070
	σ	0.0113	0.0063	0.0092	0.0084	0.0079	0.0043	0.0047	0.0061	0.0072	0.0034
	Min	0.0000	0.0001	0.0001	-0.0001	-0.0011	-0.0004	-0.0001	-0.0001	0.0000	0.0026
	Max	0.0288	0.0236	0.0441	-0.0324	-0.0513	-0.0304	0.0209	-0.0208	-0.0281	0.0275
Marnes irisées +600m/s	Moyen	0.0059	-0.0003	-0.0004	0.0014	-0.0098	-0.0082	0.0075	0.0051	0.0040	
	Moy abs	0.0087	0.0044	0.0061	0.0060	0.0100	0.0082	0.0081	0.0065	0.0067	0.0071
	σ	0.0113	0.0064	0.0093	0.0084	0.0078	0.0043	0.0048	0.0061	0.0073	0.0034
	Min	0.0001	-0.0001	0.0001	0.0001	0.0012	-0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0027
	Max	0.0289	0.0237	0.0456	-0.0323	-0.0505	-0.0304	0.0214	-0.0206	-0.0295	0.0275
Marnes irisées +700m/s	Moyen	0.0060	-0.0002	-0.0003	0.0015	-0.0104	-0.0081	0.0075	0.0053	0.0041	
	Moy abs	0.0087	0.0044	0.0061	0.0060	0.0105	0.0081	0.0081	0.0066	0.0067	0.0072
	σ	0.0113	0.0064	0.0094	0.0084	0.0078	0.0043	0.0047	0.0062	0.0073	0.0034
	Min	0.0003	0.0000	0.0001	-0.0002	0.0006	-0.0002	0.0000	0.0001	0.0000	0.0027
	Max	0.0290	0.0238	0.0458	-0.0321	-0.0511	-0.0303	0.0214	-0.0205	-0.0294	0.0276
Marnes irisées +800m/s	Moyen	0.0061	-0.0001	-0.0001	0.0017	-0.0109	-0.0080	0.0075	0.0054	0.0042	
	Moy abs	0.0087	0.0044	0.0061	0.0060	0.0111	0.0080	0.0081	0.0067	0.0068	0.0073
	σ	0.0113	0.0064	0.0095	0.0083	0.0078	0.0044	0.0048	0.0062	0.0073	0.0034
	Min	0.0005	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	0.0028
	Max	0.0291	0.0239	0.0456	-0.0312	-0.0513	-0.0303	0.0219	-0.0196	-0.0302	0.0278
Marnes irisées +900m/s	Moyen	0.0062	0.0000	-0.0001	0.0018	-0.0115	-0.0079	0.0076	0.0054	0.0044	
	Moy abs	0.0088	0.0044	0.0061	0.0060	0.0116	0.0079	0.0082	0.0067	0.0069	0.0074
	σ	0.0113	0.0064	0.0095	0.0083	0.0079	0.0044	0.0048	0.0062	0.0073	0.0034
	Min	-0.0005	0.0001	-0.0001	0.0001	-0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.0004	0.0029
	Max	0.0292	0.0241	0.0458	-0.0311	-0.0518	-0.0303	0.0219	-0.0194	-0.0300	0.0279
Recouvrement -100m/s	Moyen	0.0052	-0.0009	-0.0004	0.0006	-0.0050	-0.0087	0.0068	0.0041	0.0028	
	Moy abs	0.0084	0.0045	0.0059	0.0059	0.0058	0.0087	0.0075	0.0058	0.0059	0.0063
	σ	0.0112	0.0063	0.0090	0.0082	0.0080	0.0044	0.0047	0.0059	0.0071	0.0034
	Min	-0.0002	0.0000	-0.0001	0.0000	-0.0001	-0.0007	0.0001	0.0001	0.0000	0.0026
	Max	0.0281	0.0231	0.0438	-0.0335	-0.0476	-0.0306	0.0198	-0.0221	-0.0285	0.0267
Recouvrement -200m/s	Moyen	0.0052	-0.0009	-0.0001	0.0006	-0.0047	-0.0083	0.0065	0.0038	0.0024	
	Moy abs	0.0083	0.0046	0.0058	0.0058	0.0056	0.0083	0.0072	0.0055	0.0057	0.0062
	σ	0.0111	0.0063	0.0090	0.0082	0.0080	0.0044	0.0046	0.0058	0.0071	0.0034
	Min	-0.0002	0.0000	-0.0002	0.0000	0.0000	-0.0003	0.0002	0.0000	-0.0001	0.0026
	Max	0.0280	0.0231	0.0436	-0.0335	-0.0482	-0.0303	0.0194	-0.0224	-0.0278	0.0267
Recouvrement -300m/s	Moyen	0.0051	-0.0009	0.0002	0.0005	-0.0043	-0.0079	0.0063	0.0034	0.0020	
	Moy abs	0.0083	0.0046	0.0055	0.0059	0.0054	0.0079	0.0071	0.0053	0.0056	0.0060
	σ	0.0110	0.0063	0.0088	0.0082	0.0081	0.0044	0.0046	0.0058	0.0070	0.0034
	Min	-0.0003	0.0000	0.0001	-0.0001	0.0002	-0.0001	-0.0001	0.0001	-0.0005	0.0027
	Max	0.0279	0.0231	0.0440	-0.0336	-0.0478	-0.0299	0.0191	-0.0227	-0.0282	0.0266

C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMQUES

TABLE C.43 – Résidus sur les angles de polarisation des localisations, avec les angles de polarisation, faisant varier les vitesses autour de la sonde M62.

Résidus (s) / Sonde		Azimuts					Pendages				
		M3	M5	M6.3	M6.2	Moyens	M3	M5	M6.3	M6.2	Moyens
Marnes irisées +100m/s	Moyen	0.59	-1.63	-0.70	1.93		3.11	10.74	5.56	-8.08	
	Moy abs	4.86	3.85	4.41	4.79	4.90	5.13	13.26	9.73	9.34	9.37
	σ	6.25	5.49	5.78	6.36	3.47	6.05	12.19	9.63	7.08	4.53
	Min	0.07	-0.01	-0.27	0.03	0.70	0.38	0.11	-0.09	0.09	1.75
	Max	19.93	-25.12	-25.10	24.89	22.28	18.91	36.08	-25.87	-25.34	24.58
Marnes irisées +200m/s	Moyen	0.57	-1.61	-0.70	1.94		2.05	10.83	5.54	-7.71	
	Moy abs	4.85	3.87	4.41	4.80	4.92	4.79	13.30	9.67	9.05	9.18
	σ	6.24	5.51	5.78	6.36	3.45	6.08	12.15	9.54	7.08	4.49
	Min	0.07	-0.01	-0.27	0.03	0.70	0.08	-0.06	-0.09	-0.12	1.62
	Max	19.93	-25.12	-25.10	24.89	22.28	17.92	36.10	-25.87	25.89	24.87
Marnes irisées +300m/s	Moyen	0.61	-1.73	-0.67	1.90		0.98	10.72	5.45	-7.45	
	Moy abs	4.86	3.89	4.37	4.91	4.96	4.71	13.24	9.55	8.89	9.08
	σ	6.23	5.50	5.76	6.42	3.43	6.12	12.20	9.55	7.19	4.53
	Min	0.08	-0.01	-0.27	0.03	0.70	0.08	0.24	-0.09	0.35	1.20
	Max	19.93	-25.12	-25.10	24.89	22.28	17.57	36.10	-25.87	26.67	25.19
Marnes irisées +400m/s	Moyen	0.69	-1.58	-0.65	1.89		0.14	10.72	5.43	-6.97	
	Moy abs	4.78	3.96	4.37	4.90	4.96	4.92	13.26	9.14	8.51	8.87
	σ	6.14	5.49	5.71	6.41	3.41	6.24	12.23	8.93	7.13	4.41
	Min	-0.03	-0.01	-0.27	0.03	0.70	-0.58	0.34	-0.09	0.89	1.40
	Max	19.93	-25.12	-25.10	24.89	22.28	17.22	36.12	-24.25	27.45	24.25
Marnes irisées +500m/s	Moyen	0.62	-1.49	-0.57	2.08		-0.96	10.77	5.34	-6.55	
	Moy abs	4.77	4.05	4.29	5.01	5.04	5.20	13.27	9.03	8.19	8.80
	σ	6.15	5.56	5.69	6.58	3.70	6.36	12.19	8.90	7.09	4.38
	Min	-0.03	-0.01	0.09	0.03	0.70	-0.14	0.43	-0.09	-0.24	1.51
	Max	19.93	-25.12	-25.10	24.89	22.28	17.24	36.11	-24.50	28.14	24.50
Marnes irisées +600m/s	Moyen	0.71	-1.51	-0.57	2.11		-2.07	10.87	5.34	-6.14	
	Moy abs	4.66	4.07	4.29	4.97	4.99	5.71	13.31	9.08	7.94	8.83
	σ	6.04	5.59	5.69	6.55	3.71	6.51	12.16	8.94	7.18	4.39
	Min	-0.03	-0.01	0.09	0.03	0.70	0.52	0.53	-0.09	-0.08	1.13
	Max	19.93	-25.12	-25.10	24.89	22.28	16.90	36.10	-24.78	28.86	24.78
Marnes irisées +700m/s	Moyen	0.75	-1.50	-0.61	2.13		-3.13	10.91	5.32	-5.76	
	Moy abs	4.56	4.06	4.34	5.00	4.99	6.24	13.40	9.17	7.64	8.87
	σ	5.92	5.61	5.70	6.57	3.71	6.64	12.19	8.98	7.29	4.41
	Min	-0.03	-0.01	0.09	0.03	0.70	0.19	-0.44	-0.09	0.08	0.70
	Max	19.93	-25.12	-25.10	24.89	22.28	16.58	36.13	-25.09	29.58	25.09
Marnes irisées +800m/s	Moyen	0.75	-1.44	-0.58	2.08		-4.23	10.96	5.92	-5.46	
	Moy abs	4.56	4.12	4.32	4.89	4.90	6.93	13.39	8.88	7.47	8.82
	σ	5.92	5.67	5.68	6.37	3.46	6.80	12.19	8.07	7.51	4.16
	Min	-0.03	-0.01	0.09	0.03	0.70	0.83	-0.12	-0.09	0.08	0.25
	Max	19.93	-25.12	-25.10	24.89	22.28	16.26	36.13	-22.90	31.38	22.24
Recouvrement -100m/s	Moyen	0.66	-1.80	-0.62	2.04		4.06	11.98	5.14	-7.59	
	Moy abs	4.83	3.89	4.30	4.91	4.95	5.48	14.32	9.49	8.84	9.39
	σ	6.24	5.47	5.37	6.65	3.55	6.09	12.49	9.69	6.85	4.71
	Min	0.07	-0.01	-0.27	0.03	0.70	0.02	0.59	-0.09	0.13	1.30
	Max	19.93	-25.12	-19.35	25.21	22.28	20.27	37.68	-25.87	-23.77	25.36
Recouvrement -200m/s	Moyen	0.64	-1.88	-0.72	2.03		4.03	13.23	4.40	-6.82	
	Moy abs	4.83	3.99	4.32	4.78	4.93	5.52	15.25	9.02	8.25	9.23
	σ	6.25	5.51	5.43	6.59	3.54	6.13	12.72	9.42	6.85	4.83
	Min	0.06	-0.01	-0.27	0.03	0.70	-0.04	-0.39	0.48	-0.04	1.40
	Max	19.93	-25.12	-19.35	25.21	22.28	20.26	39.22	-25.87	23.94	25.36
Recouvrement -300m/s	Moyen	0.57	-1.94	-0.69	2.14		3.96	14.47	4.05	-5.90	
	Moy abs	4.88	4.01	4.33	4.87	5.01	5.48	16.38	8.68	7.50	9.06
	σ	6.32	5.44	5.42	6.77	3.76	6.13	13.05	9.37	6.78	5.00
	Min	0.06	0.26	-0.27	0.03	0.70	-0.04	-0.17	0.40	0.44	0.77
	Max	19.93	-25.12	-19.35	25.21	22.28	20.26	40.73	-25.87	25.12	25.36

C.3.4 Tests avec les ondes S

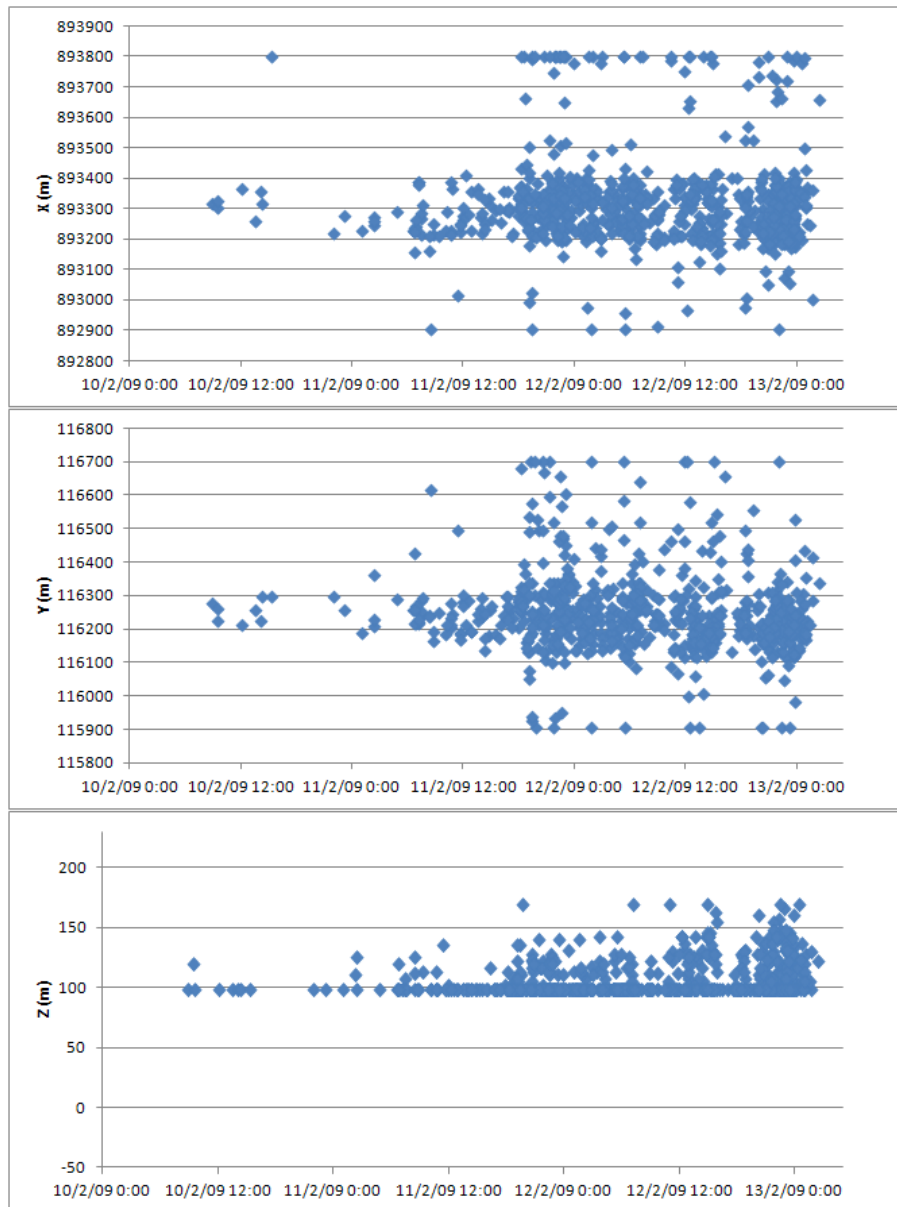


FIGURE C.55 – Localisations des événements en prenant en compte les ondes S. Ici, un niveau de saumure est imposé sous le banc de Dolomie. Les événements ne sont plus contraints du fait que les ondes S ne se propagent pas dans ce milieu.

C.4 Analyse de l'évolution spatio-temporelle des foyers microsismiques

C.4.1 Distribution des événements par rapport à l'axe radial de la cavité

Les distributions des événements par rapport à l'axe radial de la cavité, pris au niveau de la colonne M6, ont été considérées pour chaque modèle de vitesse.

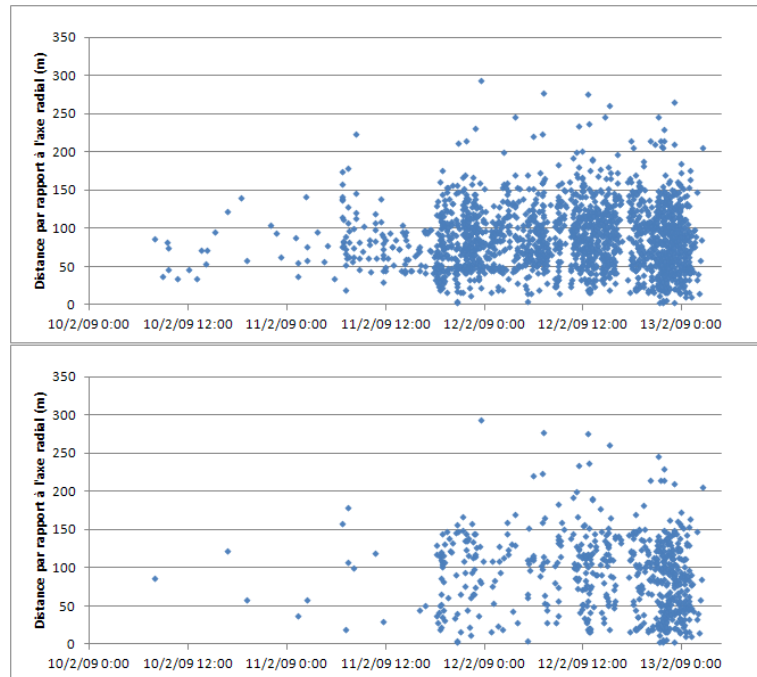


FIGURE C.56 – Évolution de la distance de tous les foyers (en haut) et de ceux positionnés au-dessus et dans le banc de Dolomie (en bas), par rapport à l'axe radial de la cavité, pour les localisations effectuées avec le modèle de vitesse initial.

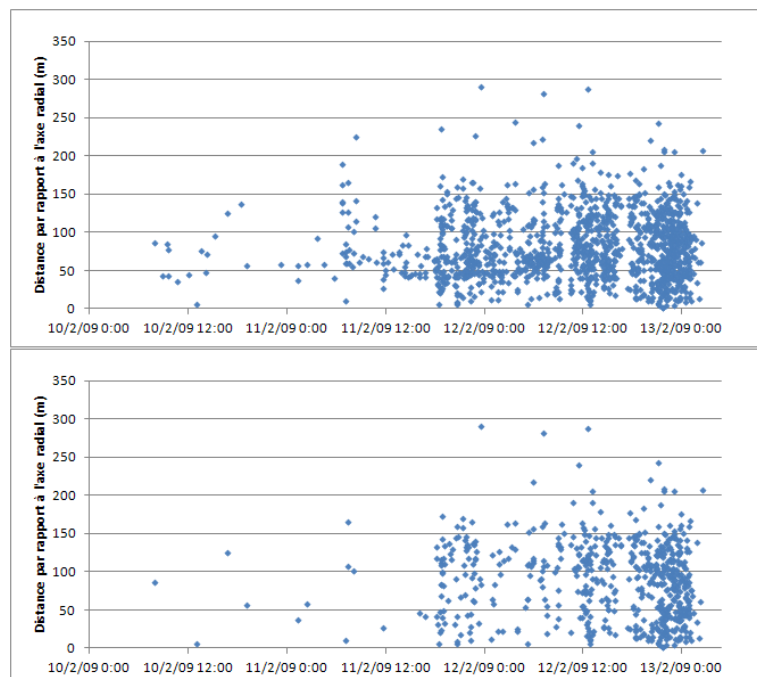


FIGURE C.57 – Évolution de la distance de tous les foyers (en haut) et de ceux positionnés au-dessus et dans le banc de Dolomie (en bas), par rapport à l'axe radial de la cavité, pour les localisations effectuées avec le modèle de vitesse considérant un niveau de saumure à -155 m.

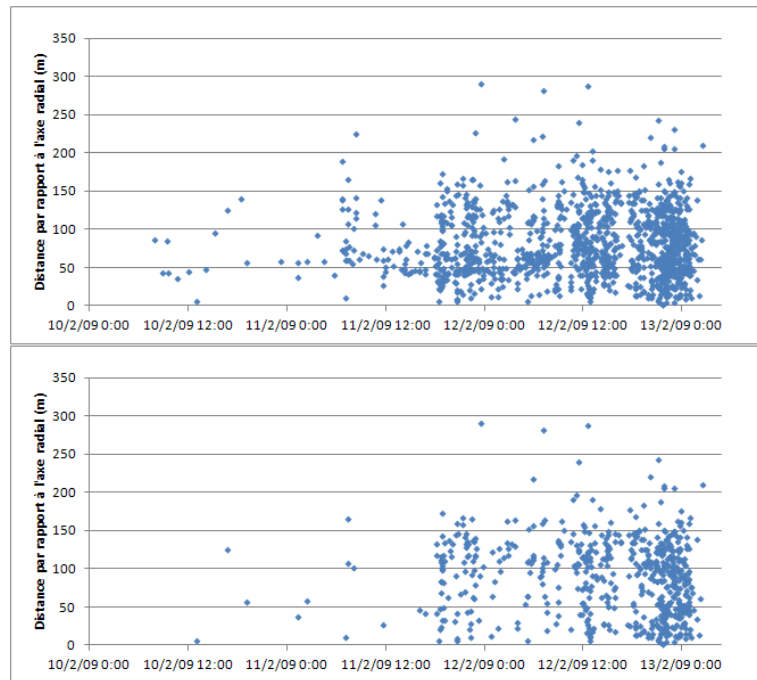


FIGURE C.58 – Évolution de la distance de tous les foyers (en haut) et de ceux positionnés au-dessus et dans le banc de Dolomie (en bas), par rapport à l'axe radial de la cavité, pour les localisations effectuées avec le modèle de vitesse considérant un niveau de saumure à -132 m.

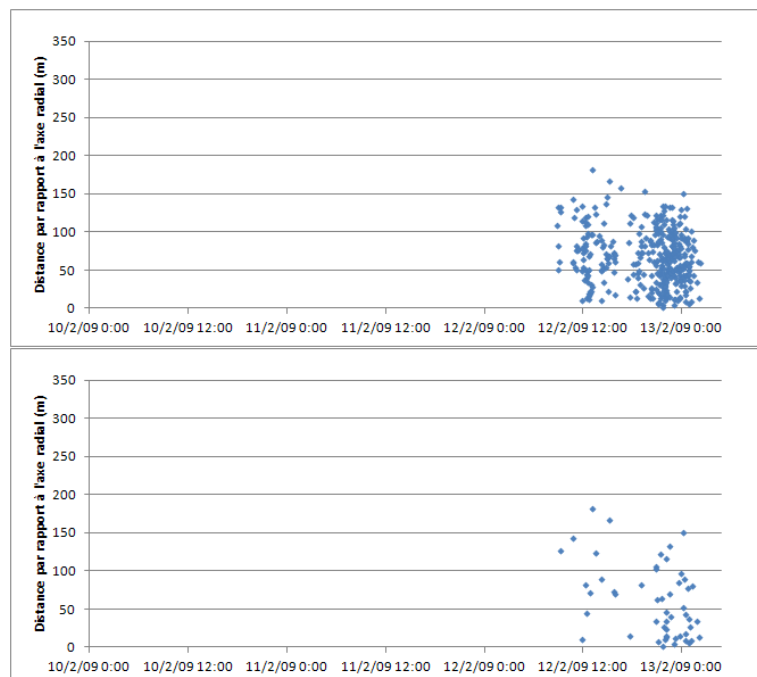


FIGURE C.59 – Évolution de la distance de tous les foyers (en haut) et de ceux positionnés au-dessus et dans le banc de Dolomie (en bas), par rapport à l'axe radial de la cavité, pour les localisations effectuées avec le modèle de vitesse considérant un niveau de saumure à -123 m.

→ La position finale du cratère d'effondrement, ainsi que les résultats de localisation montre que la cavité est décalée vers l'Est par rapport à la M6.3. Il s'agira par la suite de refaire en déterminant un centre de la cavité plus exacte.

C.4.2 Évolution du rayon quadratique du nuage d'événements

L'évolution du nuage d'événements, par tranche horaire, durant la période d'effondrement, a été estimée, en traçant les ellipsoïdes entourant les foyers (calculés selon l'algorithme de Khachiyan).

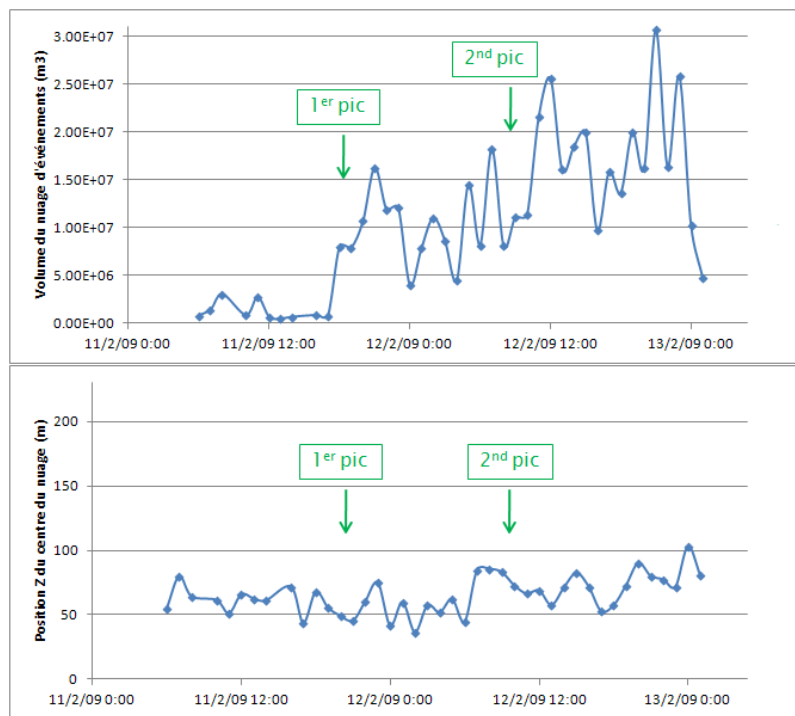


FIGURE C.60 – Évolution du volume du nuage d'événements (en haut) et de la profondeur du centre de ce nuage (en bas) par tranche horaire, pour les localisations calculées avec le modèle de vitesse initial.

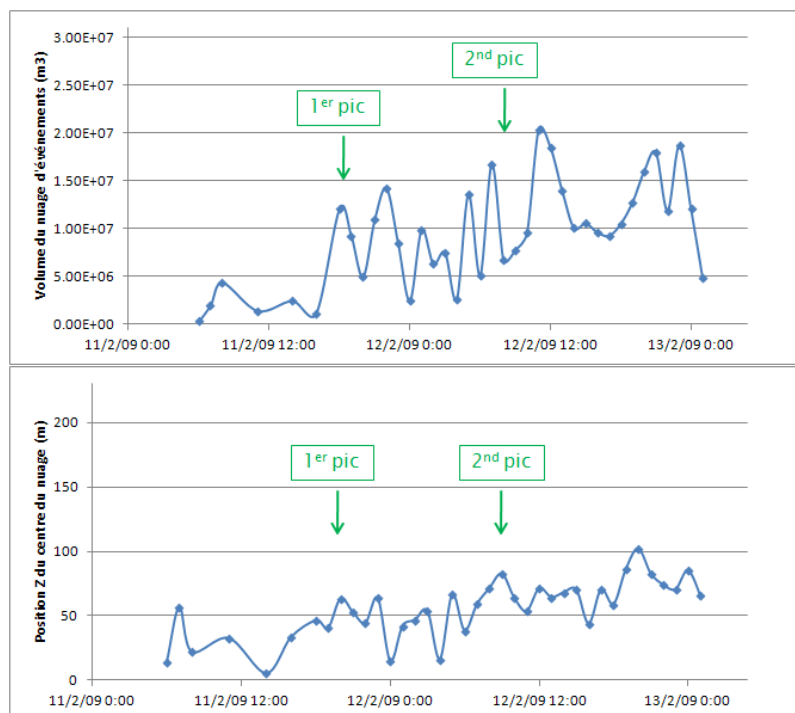


FIGURE C.61 – Évolution du volume du nuage d'événements (en haut) et de la profondeur du centre de ce nuage (en bas) par tranche horaire, pour les localisations calculées avec le modèle de vitesse considérant un niveau de saumure à -155 m.

C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMIQUES

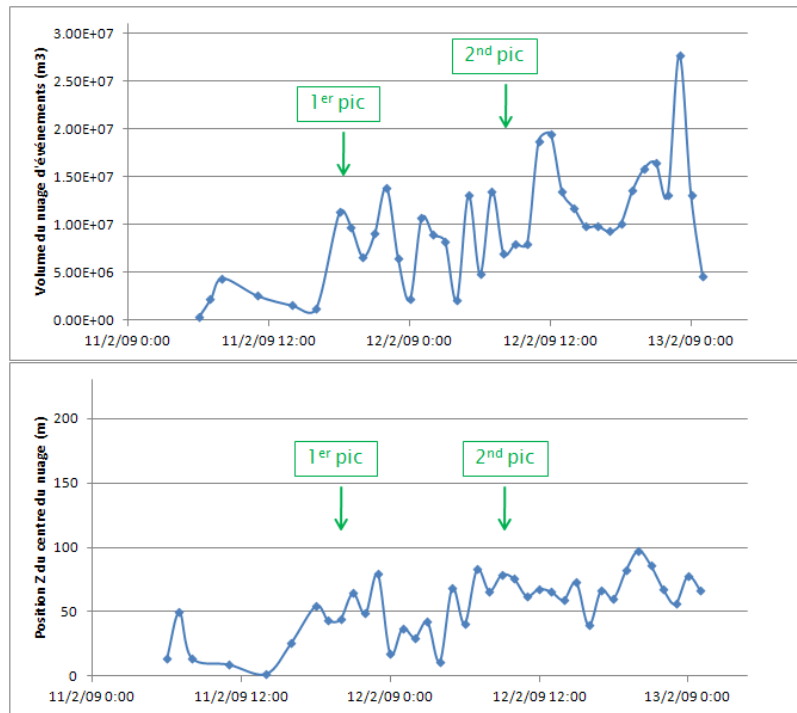


FIGURE C.62 – Évolution du volume du nuage d'événements (en haut) et de la profondeur du centre de ce nuage (en bas) par tranche horaire, pour les localisations calculées avec le modèle de vitesse considérant un niveau de saumure à -132 m

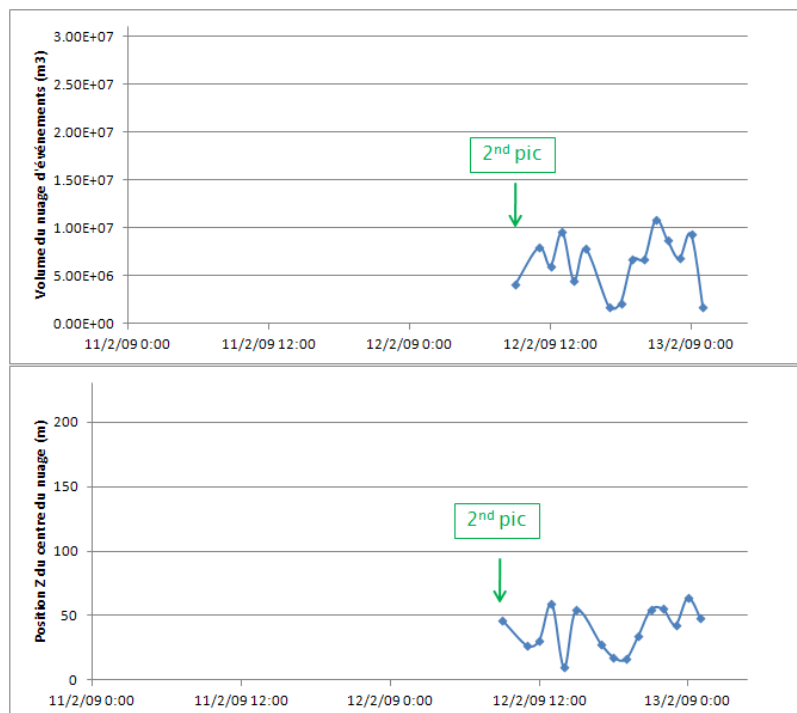


FIGURE C.63 – Évolution du volume du nuage d'événements (en haut) et de la profondeur du centre de ce nuage (en bas) par tranche horaire, pour les localisations calculées avec le modèle de vitesse considérant un niveau de saumure à -123 m.

C.4.3 Localisations avec les modèles de vitesse évolutifs

Nous avons fait évoluer le modèle de vitesse initial en remplaçant tour à tour les couches du recouvrements par de la saumure, à ~ -155 m de profondeur (côte NGF = 75), sous le banc de Dolomie de Beaumont, à ~ -132 m de profondeur (côte NGF = 98) au-dessus, à ~ -123 m de profondeur (côte NGF = 107), et au-dessus des Marnes irisées à ~ -67 m de profondeur (côte NGF = 163).

De plus, des modèles intermédiaires ont été testés, ces derniers imposant : les vitesses des Marnes à Anhydrites égales à celles des Marnes irisées ; les vitesses au fond de la cavité à 2200 m/s au lieu de 1600 m, pour essayer de tenir compte des blocs tombés ; une vitesse homogène dans le recouvrement à 2700 ou 3000 m/s, dans la dernière phase de l'effondrement, la vitesse dans le banc de Dolomie à 3866 m/s (au lieu de 4866 m/s).

TABLE C.44 – Comparaisons entre les positions des foyers déterminées en faisant varier le modèle de vitesse.

Écarts (m)		X	Y	Z	Distances
Saumure à ~ -155 m / ~ -132 m / 1282 événements	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	0.09	0.08	7.14	7.18
	Maximum	9.38	6.25	110.83	110.92
	Écart-type	0.53	0.47	8.56	8.56
	Médiane	0	0	5.83	5.83
Saumure à ~ -132 m / ~ -123 m / 373 événements	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	7.41	5.04	81.72	83.29
	Maximum	54.69	34.38	198.33	199.22
	Écart-type	8.00	5.64	48.69	47.83
	Médiane	6.25	3.13	81.67	81.67
Saumure à ~ -123 m / ~ -67 m / 148 événements	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	0.21	0.27	31.69	31.71
	Maximum	3.13	6.25	125.42	125.49
	Écart-type	0.70	0.89	16.72	16.71
	Médiane	0.	0	35.00	35.00

TABLE C.45 – Comparaisons avec les positions des foyers déterminées avec le modèle de vitesse initial.

Écarts modèle initial (m)		X	Y	Z	Distances
Saumure à ~ -155 m / 1363 événements	Minimum	0.39	0	0.36	1.16
	Moyen	3.38	3.01	30.24	32.02
	Maximum	42.58	42.19	132.34	133.63
	Écart-type	4.56	3.84	31.18	30.28
	Médiane	1.95	1.56	13.49	16.83
Saumure à ~ -132 m / 1296 événements	Minimum	0.39	0	0.36	1.16
	Moyen	3.46	3.05	33.22	34.98
	Maximum	42.58	42.19	144.74	147.87
	Écart-type	4.65	4.00	33.36	32.43
	Médiane	1.95	1.56	16.41	19.89
Saumure à ~ -123 m / 373 événements	Minimum	0.39	0	0.36	1.95
	Moyen	7.94	5.79	92.02	93.54
	Maximum	85.55	42.19	197.97	198.98
	Écart-type	9.10	6.35	47.62	46.96
	Médiane	5.47	4.69	96.61	98.36
Saumure à ~ -67 m / 149 événements	Minimum	0.39	0	0.36	1.65
	Moyen	7.58	5.26	90.55	91.98
	Maximum	56.64	42.19	186.30	186.70
	Écart-type	9.01	6.99	48.67	48.20
	Médiane	5.08	1.56	97.34	98.21
V_P Marnes irisées / à Anhydrites égales / 1647 événements	Minimum	0.39	0	0.36	1.16
	Moyen	3.15	2.87	26.75	28.33
	Maximum	42.58	42.19	120.31	121.01
	Écart-type	4.23	3.57	23.38	22.55
	Médiane	1.95	1.56	20.78	22.81
V_P en fond de cavité = 2200 m/s / 1503 événements	Minimum	0.39	0.00	0.36	7.72
	Moyen	76.95	64.63	61.85	134.83
	Maximum	373.83	284.38	206.72	456.54
	Écart-type	56.04	50.28	43.80	57.68
	Médiane	66.02	54.69	52.14	132.26
V_P homogène = 3000 m/s / XX événements	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	5.68	4.40	32.06	34.48
	Maximum	161.72	106.25	175.00	260.90
	Écart-type	10.85	8.25	26.49	27.88
	Médiane	3.52	3.13	26.25	28.69
V_P homogène = 2700 m/s / 477 événements	Minimum	0	0	0	0
	Moyen	5.73	4.72	54.42	56.03
	Maximum	49.22	62.50	183.75	184.29
	Écart-type	7.33	6.33	30.01	29.52
	Médiane	3.52	3.13	50.31	52.50
V_P Dolomie = 3866 m/s / 405 événements	Minimum	0.39	0	0.36	1.95
	Moyen	13.65	10.22	48.69	55.72
	Maximum	100.78	76.56	189.22	202.42
	Écart-type	15.45	11.13	37.01	35.89
	Médiane	7.03	6.25	41.93	50.16

C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMQUES

TABLE C.46 – Résidus de localisation sur les temps d'arrivée des ondes P, en faisant varier le modèle de vitesse.

Résidus (s) / Sonde		M1	M2	M3	M5	M6.3	M6.2	M6.1	M7	M8	Moyens
Saumure à ~ -155 m / 1369 événements	Moyen	0.0026	-0.0012	-0.0023	-0.0008	-0.0045	-0.0111	0.0069	0.0049	0.0046	
	Moy abs	0.0064	0.0051	0.0059	0.0054	0.0056	0.0113	0.0075	0.0070	0.0067	0.0070
	σ	0.0087	0.0068	0.0073	0.0071	0.0069	0.0060	0.0050	0.0081	0.0071	0.0025
	Min	0	0	0	0	0	0.0001	0	0	0	0.0007
	Max	0.0467	-0.0432	0.0431	0.0421	-0.0482	-0.0436	0.0318	0.0514	0.0481	0.0285
Saumure à ~ -132 m / 1300 événements	Moyen	0.0025	-0.0012	-0.0024	-0.0008	-0.0045	-0.0111	0.0069	0.0049	0.0046	
	Moy abs	0.0064	0.0051	0.0059	0.0054	0.0056	0.0112	0.0076	0.0070	0.0067	0.0070
	σ	0.0087	0.0068	0.0073	0.0071	0.0069	0.0060	0.0050	0.0081	0.0071	0.0025
	Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0007
	Max	0.0467	-0.0432	0.0431	0.0421	-0.0482	-0.0436	0.0318	0.0514	0.0481	0.0285
Saumure à ~ -123 m / 374 événements	Moyen	-0.0085	-0.0007	-0.0047	-0.0029		-0.0104	0.0090	0.0062	0.0057	
	Moy abs	0.0101	0.0046	0.0064	0.0058		0.0106	0.0095	0.0077	0.0077	0.0076
	σ	0.0083	0.0061	0.0067	0.0069		0.0059	0.0055	0.0078	0.0074	0.0023
	Min	0	0	0	0		0	0	0	0	0.0009
	Max	0.0295	-0.0432	0.0348	0.0423		-0.0400	0.0330	0.0422	0.0381	0.0319
Saumure à ~ -63 m / 149 événements	Moyen	-0.0086	-0.0009	-0.0048	-0.0030		-0.0117	0.0086	0.0075	0.0058	
	Moy abs	0.0104	0.0047	0.0068	0.0062		0.0118	0.0090	0.0089	0.0082	0.0081
	σ	0.0087	0.0063	0.0074	0.0075		0.0057	0.0055	0.0084	0.0083	0.0026
	Min	0	0	0	0		0.0002	0	0	0	0.0027
	Max	0.0294	-0.0432	-0.0324	0.0416		-0.0402	0.0334	0.0425	0.0380	0.0318
V_P Marnes égales / 1651 événements	Moyen	0.0027	-0.0012	-0.0023	-0.0007	-0.0045	-0.0112	0.0067	0.0049	0.0046	
	Moy abs	0.0064	0.0050	0.0059	0.0053	0.0056	0.0113	0.0073	0.0071	0.0067	0.0069
	σ	0.0086	0.0068	0.0073	0.0071	0.0069	0.0059	0.0049	0.0082	0.0071	0.0025
	Min	0	0	0	0	0	-0.0001	0	0	0	0.0007
	Max	0.0467	-0.0432	0.0431	0.0421	-0.0482	-0.0436	0.0318	0.0514	0.0481	0.0285
V_P en fond = 2200m/s / 1507 événements	Moyen	0.0026	-0.0012	-0.0023	-0.0008		-0.0112	0.0068	0.0049	0.0046	
	Moy abs	0.0064	0.0050	0.0059	0.0054		0.0113	0.0074	0.0070	0.0067	0.0070
	σ	0.0086	0.0068	0.0073	0.0071		0.0059	0.0049	0.0081	0.0071	0.0025
	Min	0	0	0	0		-0.0001	0	0	0	0.0007
	Max	0.0467	-0.0432	0.0431	0.0421		-0.0436	0.0318	0.0514	0.0481	0.0285
V_P homogène = 3000m/s / 519 événements	Moyen	-0.0026	-0.0004	-0.0023	-0.0010		-0.0099	0.0071	0.0056	0.0054	
	Moy abs	0.0056	0.0047	0.0055	0.0050		0.0101	0.0076	0.0074	0.0073	0.0070
	σ	0.0067	0.0065	0.0069	0.0067		0.0061	0.0049	0.0079	0.0072	0.0024
	Min	0	0	0	0		0	0	0	0	0.0008
	Max	0.0337	-0.0435	0.0436	0.0437		-0.0428	0.0302	0.0518	0.0505	0.0312
V_P homogène = 2700m/s / 478 événements	Moyen	-0.0083	-0.0011	-0.0010	-0.0017	-0.0024	-0.0062	0.0067	0.0036	0.0029	
	Moy abs	0.0089	0.0045	0.0048	0.0048	0.0047	0.0069	0.0071	0.0058	0.0058	0.0058
	σ	0.0069	0.0061	0.0065	0.0063	0.0065	0.0056	0.0046	0.0070	0.0068	0.0024
	Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0006
	Max	-0.0327	-0.0428	0.0408	0.0446	-0.0431	-0.0365	0.0308	0.0491	0.0471	0.0294
V_P Dolomie = 3866m/s / 405 événements	Moyen	-0.0026	0.0004	-0.0025	-0.0033	-0.0038	-0.0100	0.0082	0.0034	0.0058	
	Moy abs	0.0063	0.0037	0.0047	0.0054	0.0053	0.0102	0.0087	0.0052	0.0071	0.0064
	σ	0.0074	0.0052	0.0057	0.0059	0.0067	0.0059	0.0047	0.0064	0.0064	0.0023
	Min	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003
	Max	0.0364	-0.0432	0.0382	0.0378	-0.0455	-0.0395	0.0308	0.0441	0.0495	0.0305

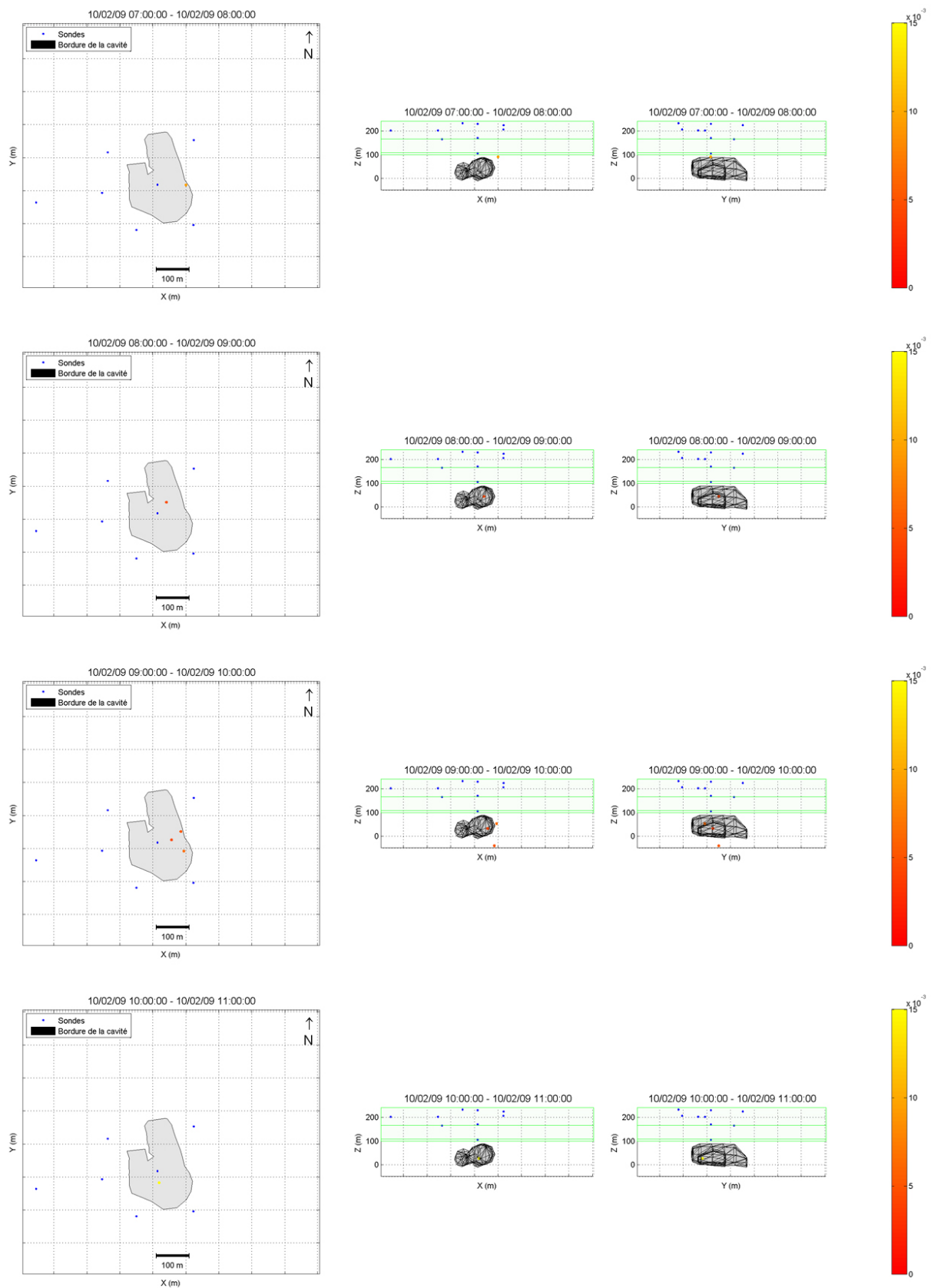
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMQUES

TABLE C.47 – Résidus de localisation sur les angles de polarisation, en faisant varier le modèle de vitesse.

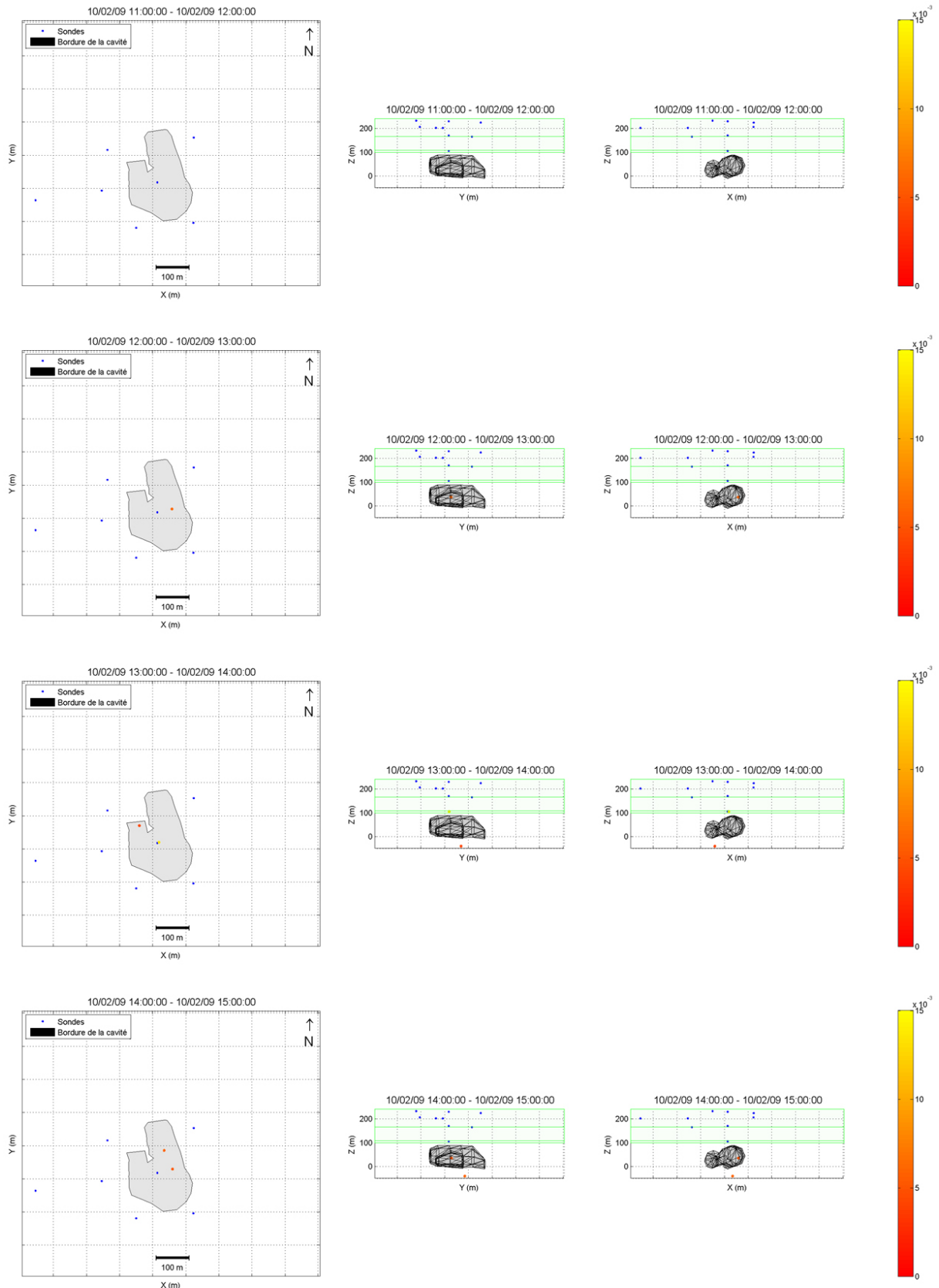
Résidus (s) / Sonde		Azimuts					Pendages				
		M3	M5	M6.3	M6.2	Moyens	M3	M5	M6.3	M6.2	Moyens
Saumure à ~ -155 m / 1369 événements	Moyen	3.90	-1.95	-0.29	1.06		6.10	9.64	1.74	-5.81	
	Moy abs	8.82	6.40	5.54	8.62	7.85	8.16	13.42	11.24	9.79	10.53
	σ	11.05	8.43	8.32	12.03	5.92	8.91	13.40	16.11	11.96	6.97
	Min	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.03
	Max	-66.88	-42.78	-49.43	54.29	43.09	50.36	-54.68	-75.33	70.34	70.34
Saumure à ~ -132 m / 1300 événements	Moyen	3.89	-1.93	-0.24	1.08		6.02	9.58	1.27	-6.07	
	Moy abs	8.82	6.40	5.55	8.62	7.86	8.11	13.38	11.20	9.95	10.56
	σ	11.05	8.43	8.33	12.04	5.92	8.93	13.41	16.53	12.01	6.99
	Min	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	-0.01	0.03	-0.03	-0.01	0.03
	Max	-66.88	-42.78	-49.43	54.29	43.09	50.36	-54.68	-75.62	70.34	70.34
Saumure à ~ -123 m / 374 événements	Moyen	3.99	-1.05		3.84		-8.89	-3.96		-5.64	
	Moy abs	9.69	7.31		11.71	9.45	11.27	8.47		12.18	10.78
	σ	11.95	9.66		14.94	6.29	9.71	10.21		14.27	6.18
	Min	0.00	-0.02		-0.09	0.00	0.00	0.07		0.01	0.01
	Max	-68.18	-41.29		60.05	41.29	-43.42	-40.77		-66.13	61.87
Saumure à ~ -67 m / 149 événements	Moyen	4.66	-1.43		2.03		-40.51	-5.57		-7.40	
	Moy abs	10.96	7.31		11.58	9.80	40.90	9.18		14.30	22.22
	σ	13.13	9.11		15.08	6.23	16.19	9.96		16.51	10.91
	Min	-0.01	-0.01		-0.02	0.02	0.62	-0.03		-0.02	0.08
	Max	62.83	-32.15		53.39	36.80	-77.80	-31.90		-47.86	60.97
V_P Marnes égales / 1651 événements	Moyen	3.93	-1.95	-0.30	1.03		6.37	9.94	3.50	-4.93	
	Moy abs	8.84	6.36	5.53	8.57	7.84	8.35	13.60	10.85	9.28	10.43
	σ	11.05	8.38	8.31	11.99	5.90	8.87	13.37	13.85	11.86	6.90
	Min	0.01	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	-0.04	0.01	0.03
	Max	-66.88	-42.78	-49.43	54.29	43.09	50.36	-54.68	-73.91	70.34	70.34
V_P en fond =2200m/s / 1507 événements	Moyen	3.93	-1.95	-0.28	1.04		6.24	9.79	2.61	-5.34	
	Moy abs	8.83	6.38	5.55	8.60	7.84	8.26	13.49	11.15	9.49	10.47
	σ	11.04	8.41	8.32	12.01	5.91	8.89	13.36	15.11	11.89	6.93
	Min	0.01	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.06	0.01	0.03
	Max	-66.88	-42.78	-49.43	54.29	43.09	50.36	-54.68	-74.56	70.34	70.34
V_P homogène =3000m/s / 519 événements	Moyen	4.03	-1.59		1.58		-13.91	6.74		-1.11	
	Moy abs	9.19	6.37		9.11	8.15	15.42	10.40		8.87	12.57
	σ	11.31	8.48		12.53	6.01	11.71	11.02		11.77	6.82
	Min	-0.02	0.00		-0.01	0.01	-0.01	0.00		0.00	0.03
	Max	-67.05	-40.91		54.36	44.32	-57.09	40.62		72.02	72.02
V_P homogène =2700m/s / 478 événements	Moyen	3.64	-1.36		1.70		-9.22	11.36		2.98	
	Moy abs	9.20	6.35		9.64	8.37	12.00	12.98		9.50	13.05
	σ	11.53	8.55		13.17	6.12	11.54	10.73		12.33	7.00
	Min	0	0		0.01	0.01	0.07	-0.10		0.01	0.05
	Max	-68.31	-39.44		52.95	46.88	59.26	47.09		80.04	80.04
V_P Dolomie = 3866m/s / 405 événements	Moyen	1.16	1.01				-0.09	-0.50			
	Moy abs	7.59	5.99			6.83	6.04	8.39			7.01
	σ	10.53	8.22			6.17	8.10	10.59			5.42
	Min	0.00	-0.01			0.00	0.00	0.00			0.02
	Max	-68.60	67.15			68.60	57.40	73.69			73.69

C.4.4 Évolution des localisations par tranche horaire

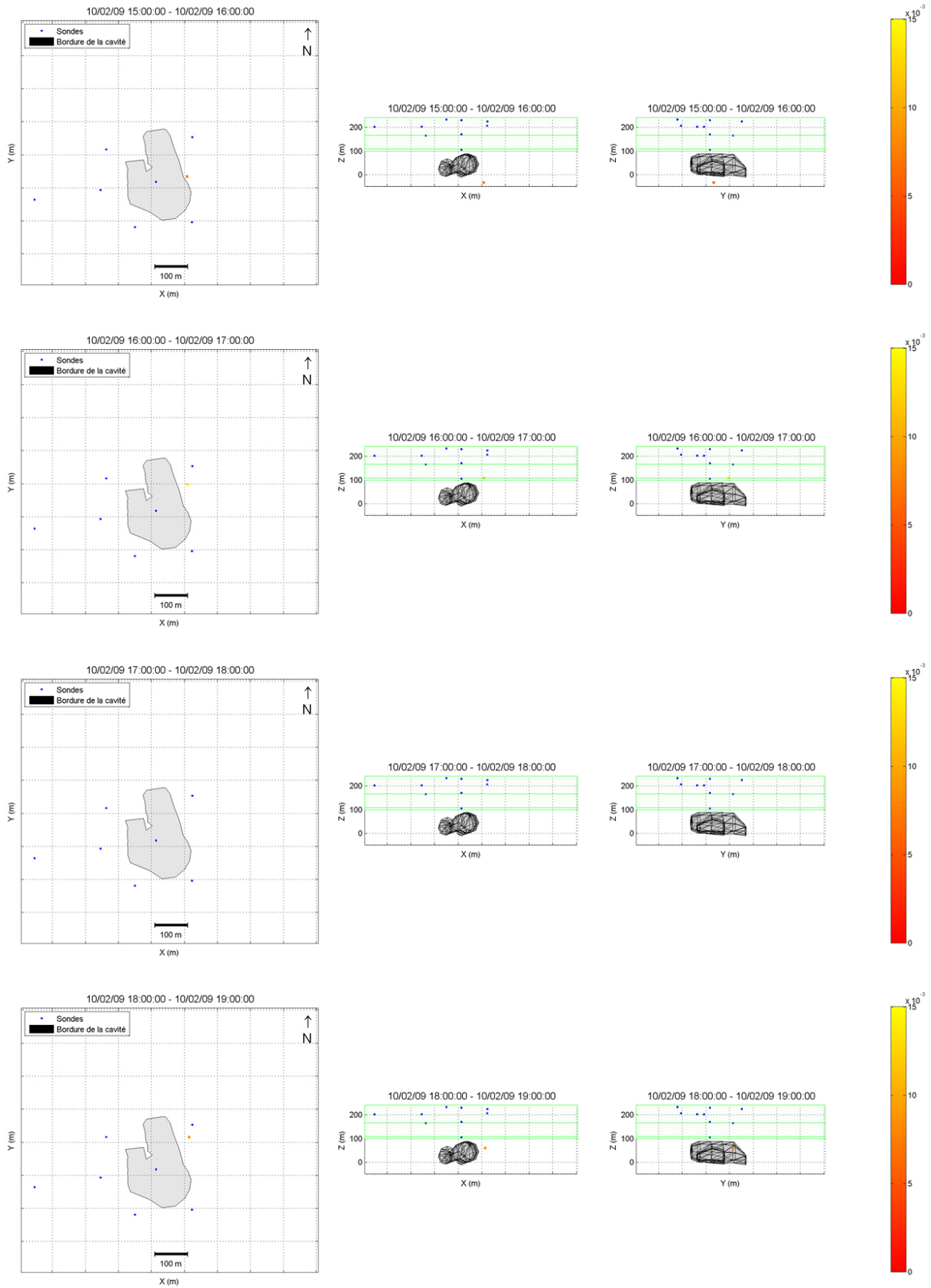
Localisations calculées avec le modèle de vitesse considérant un niveau de saumure à -132 m :



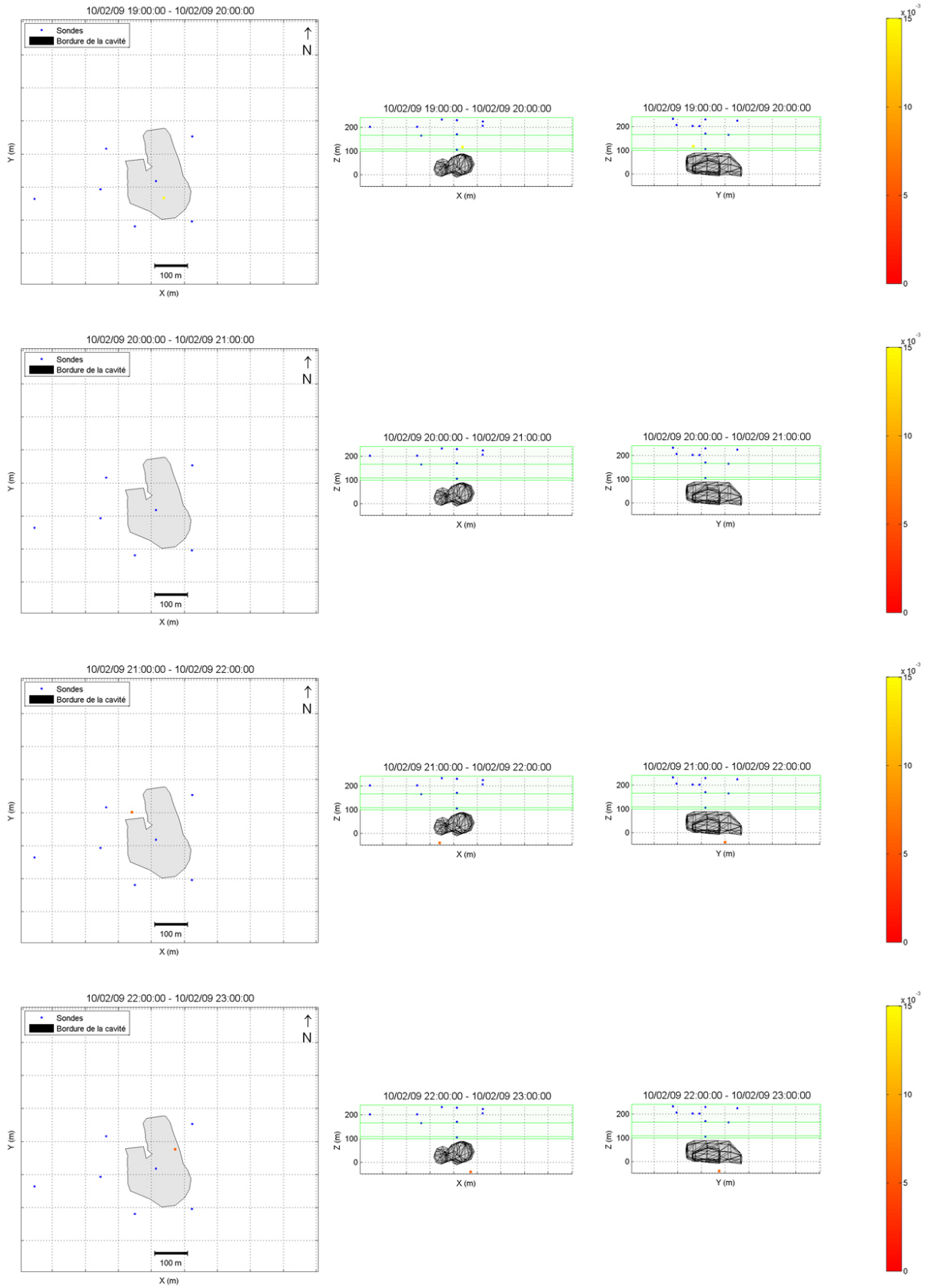
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



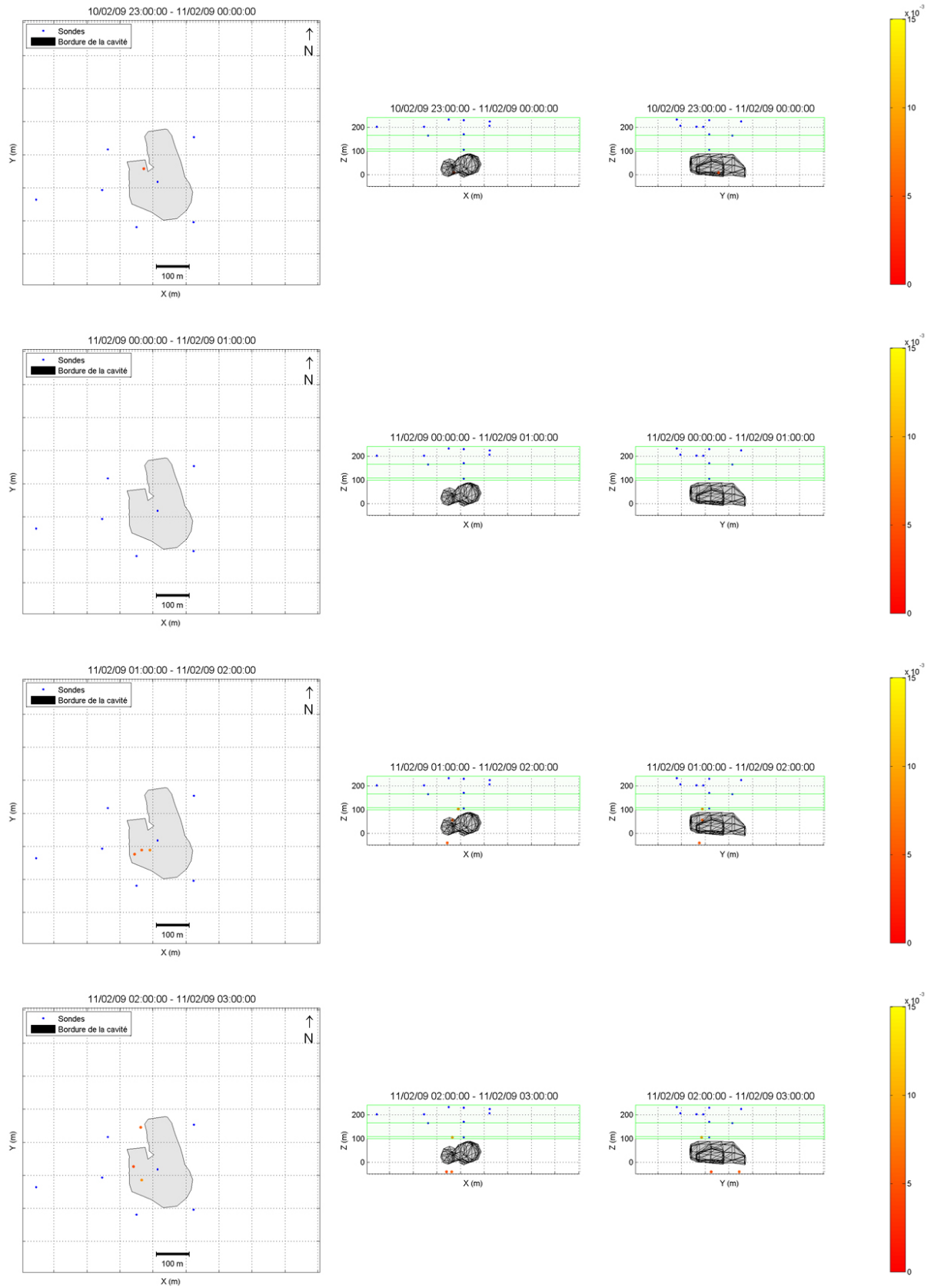
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



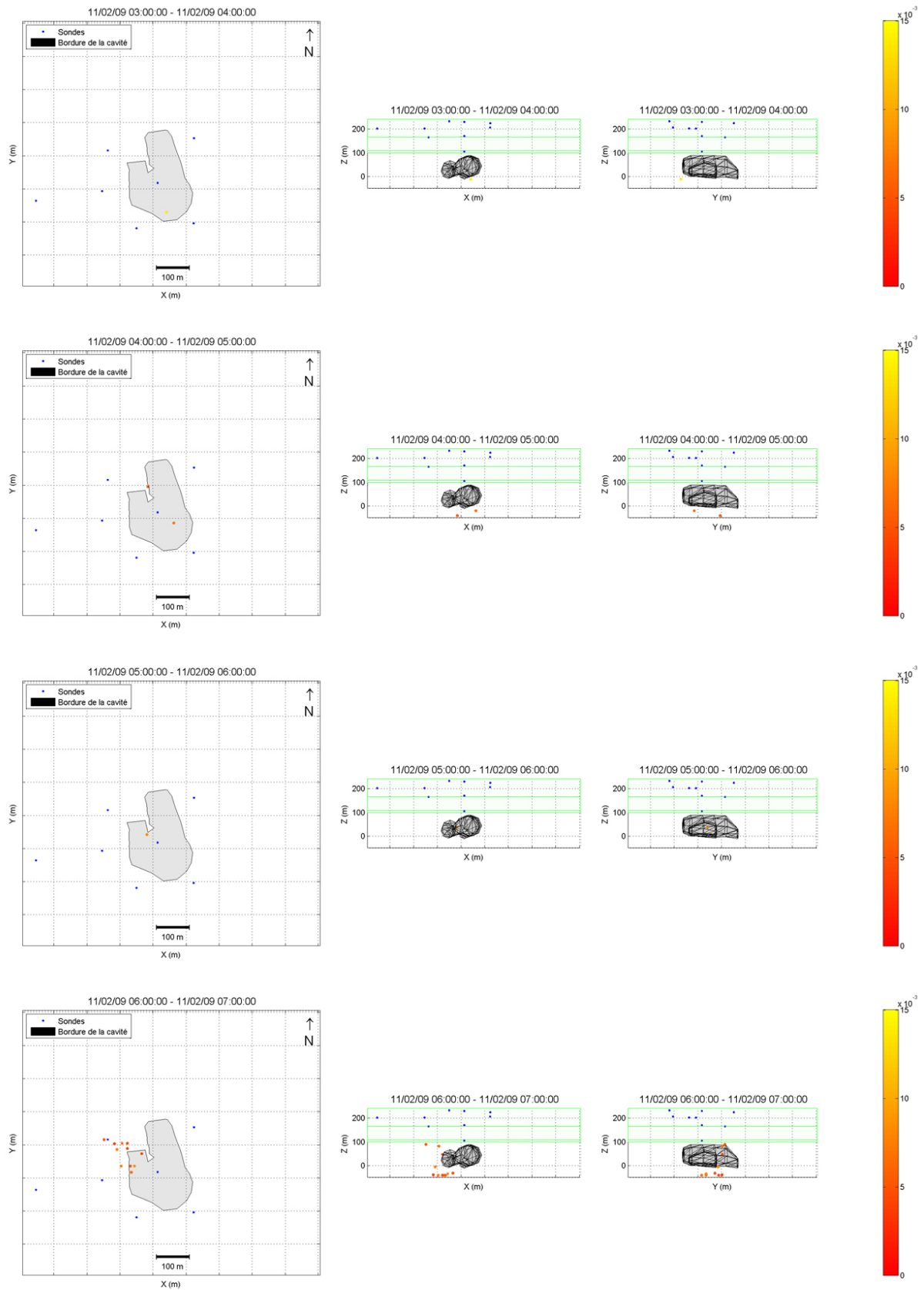
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



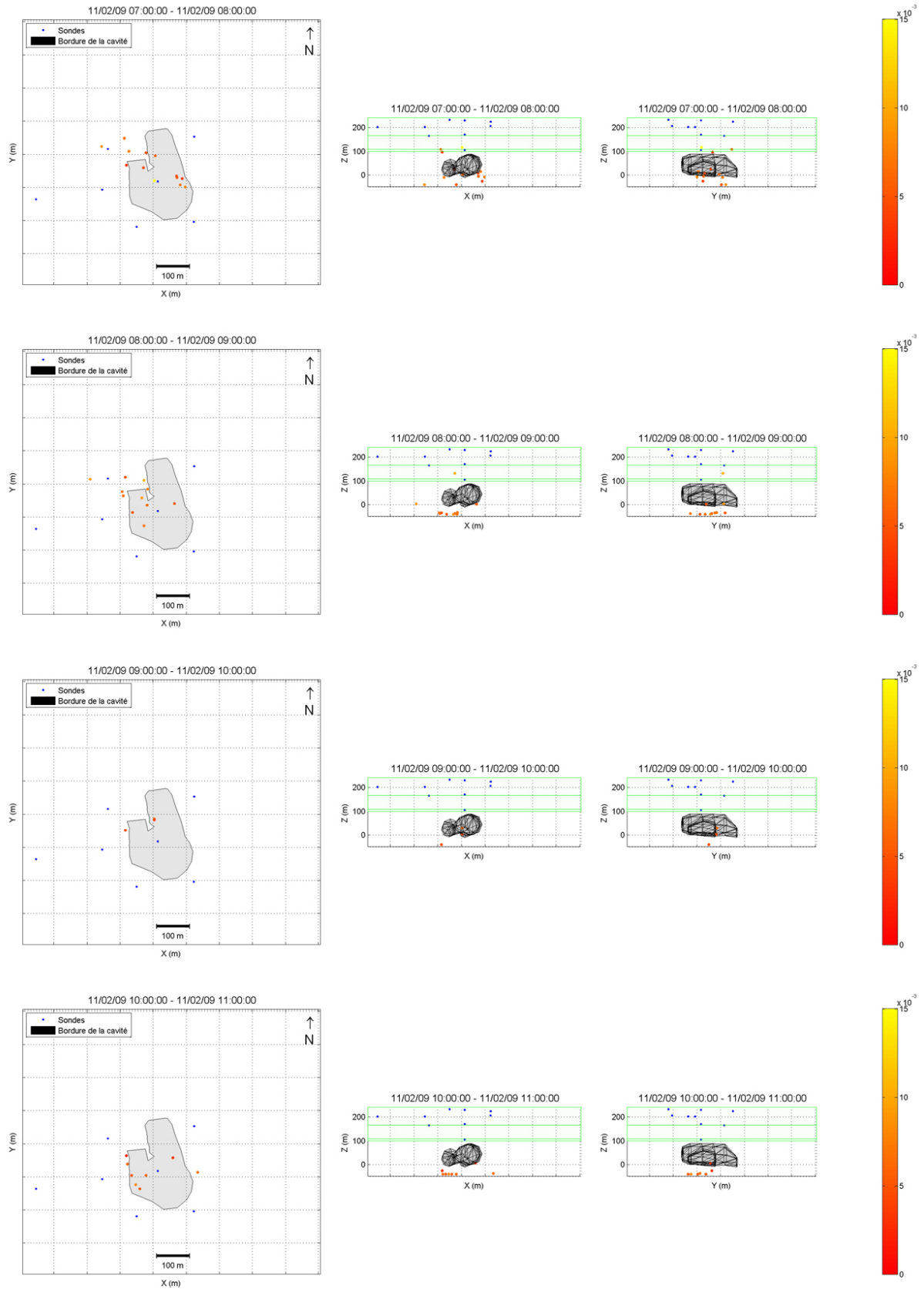
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



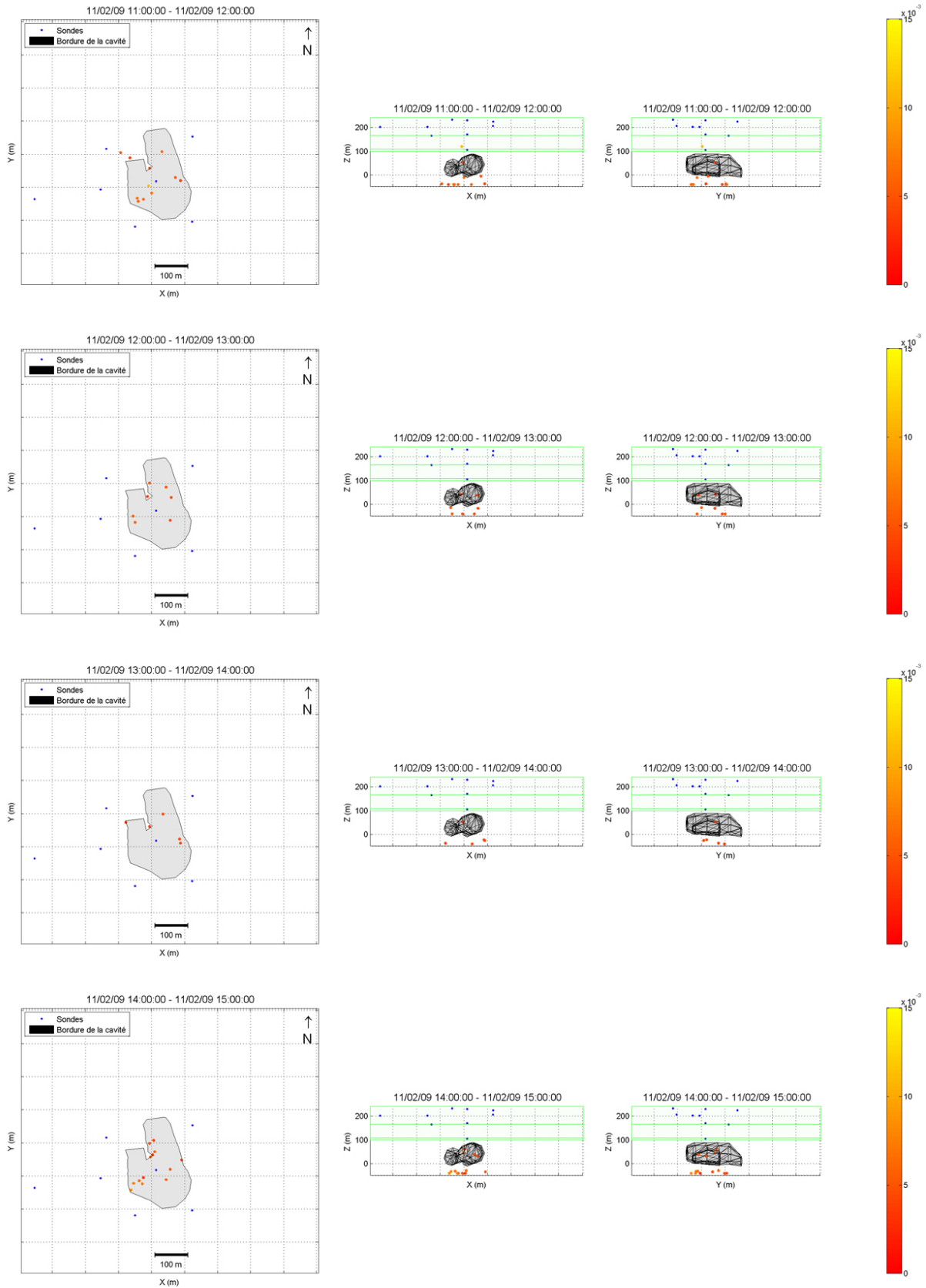
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



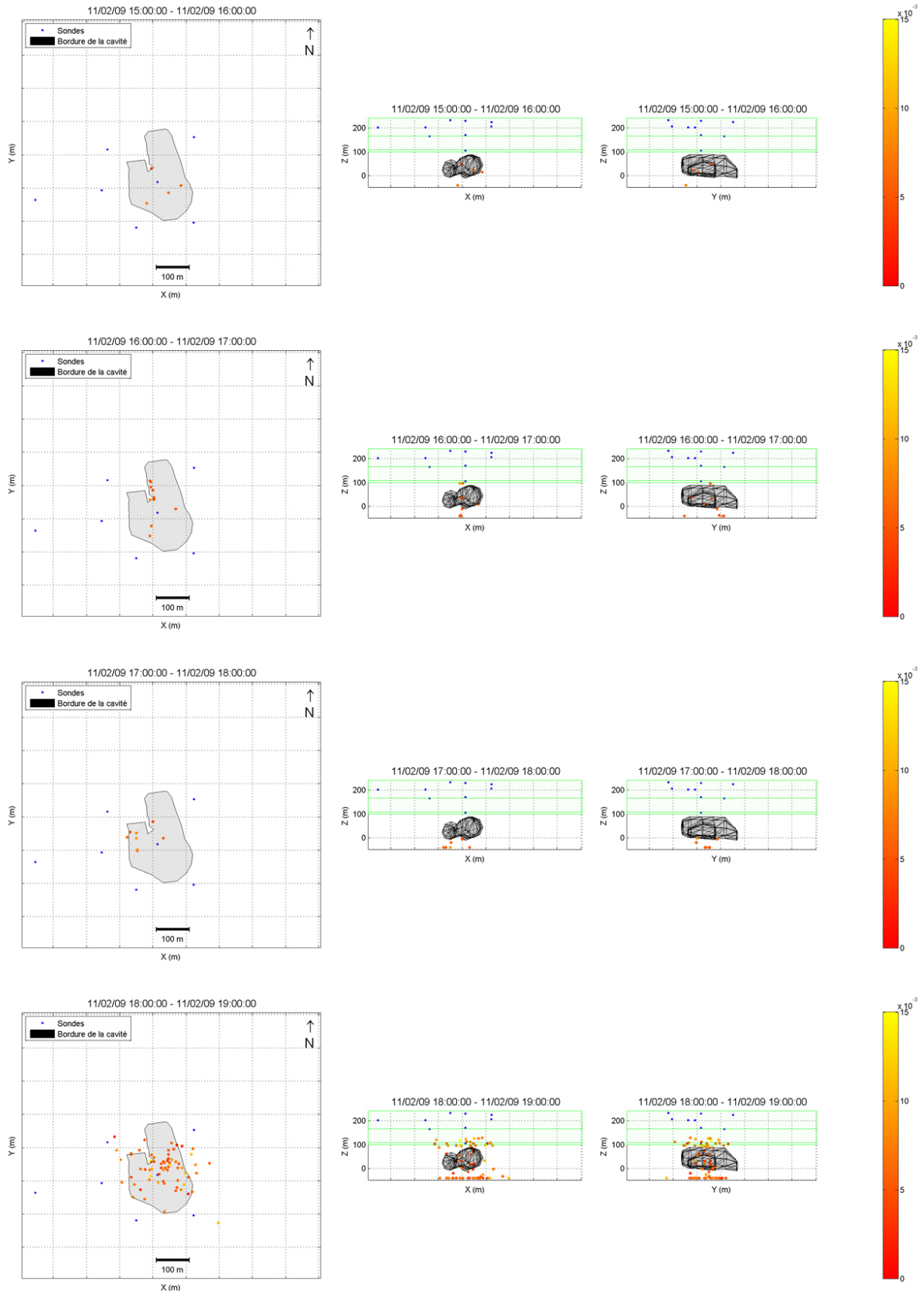
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



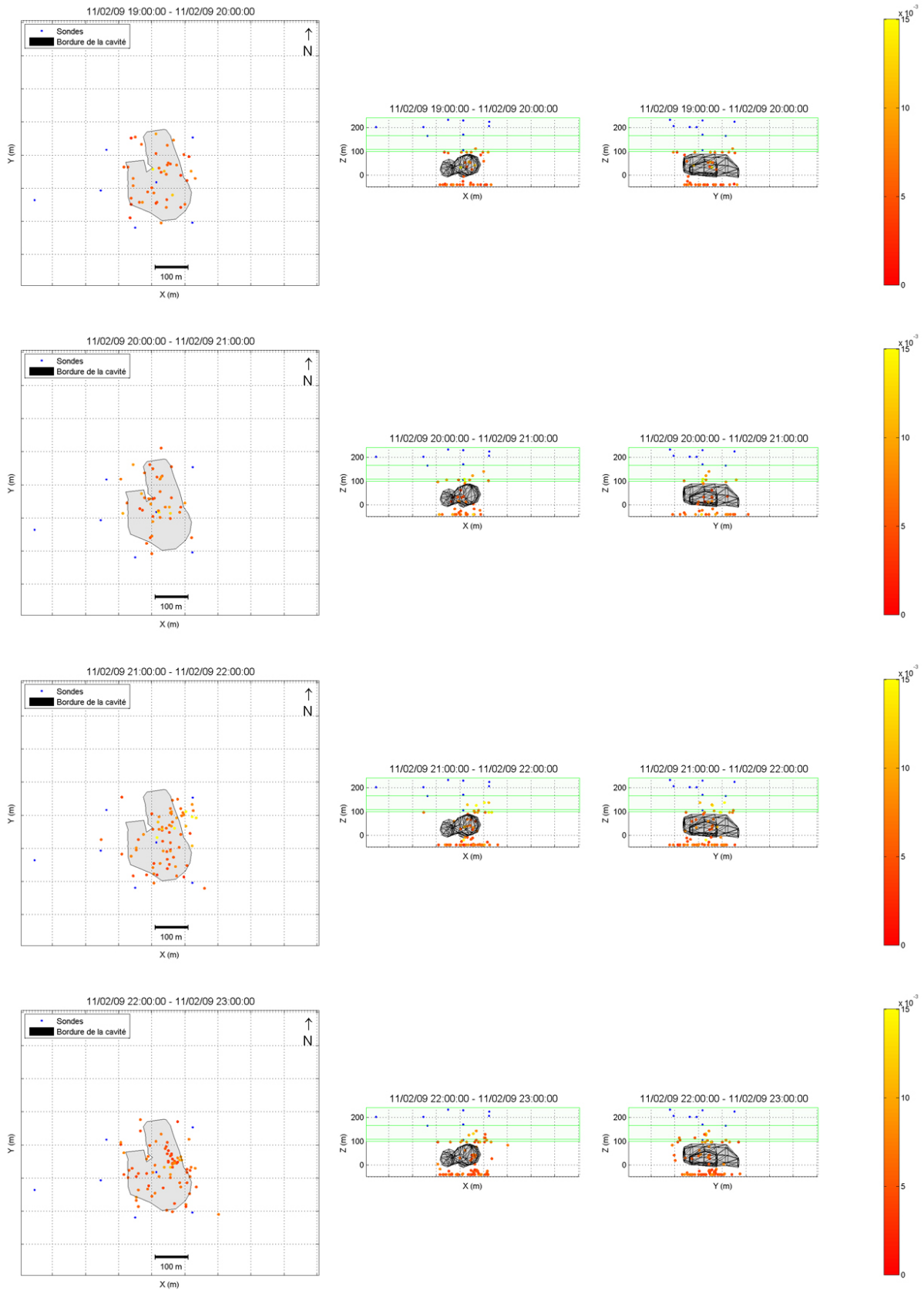
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMQUES



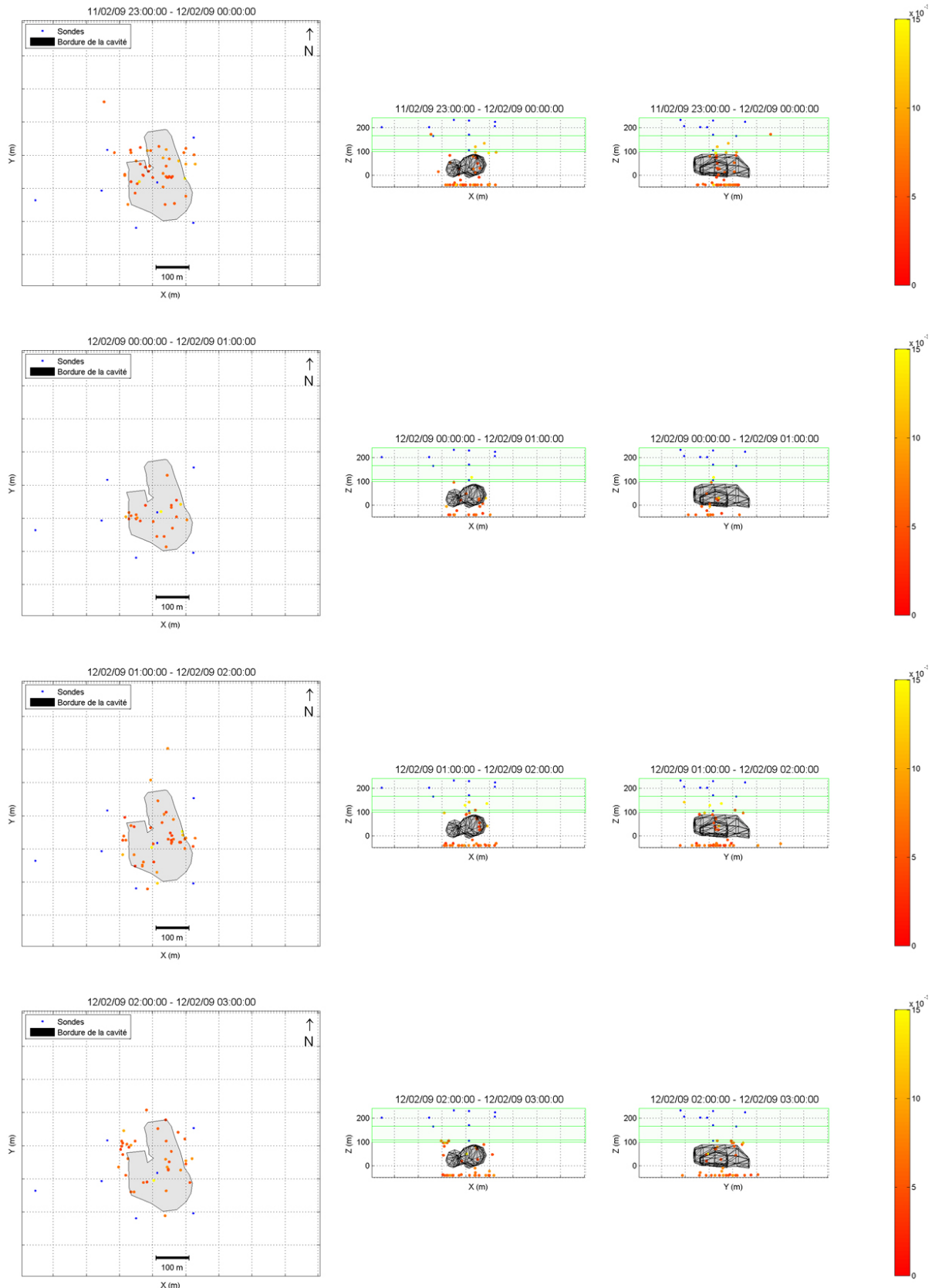
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



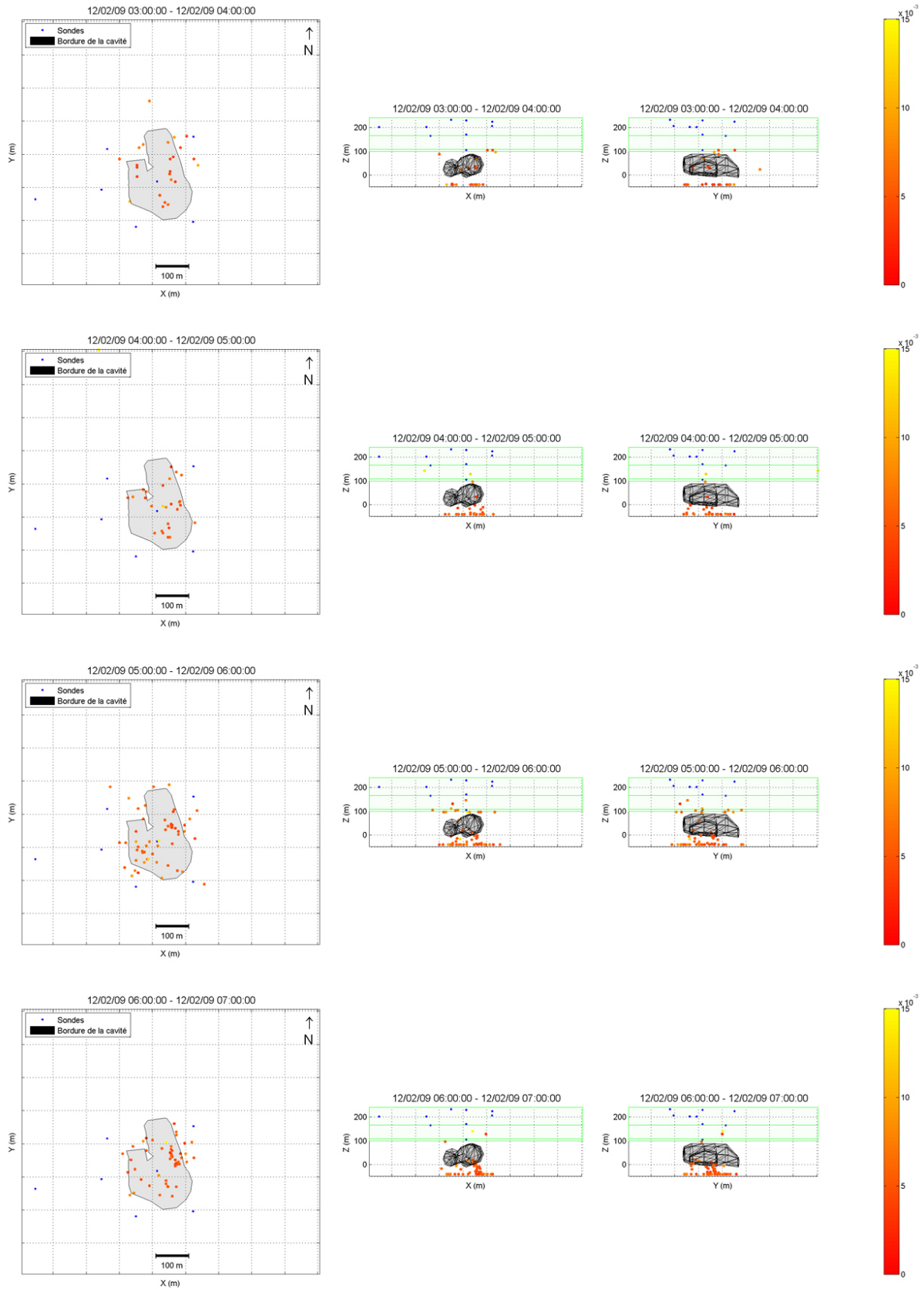
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



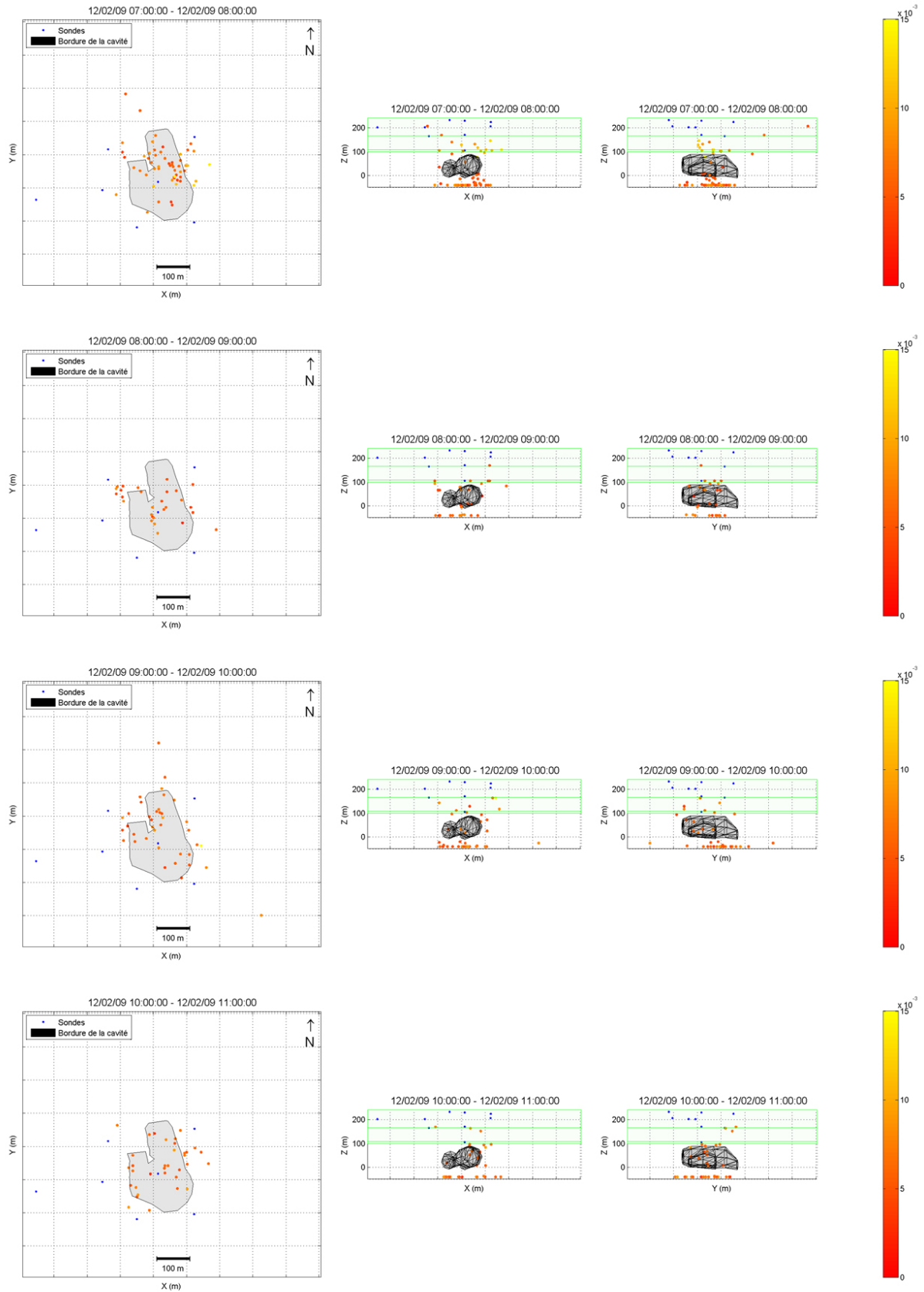
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



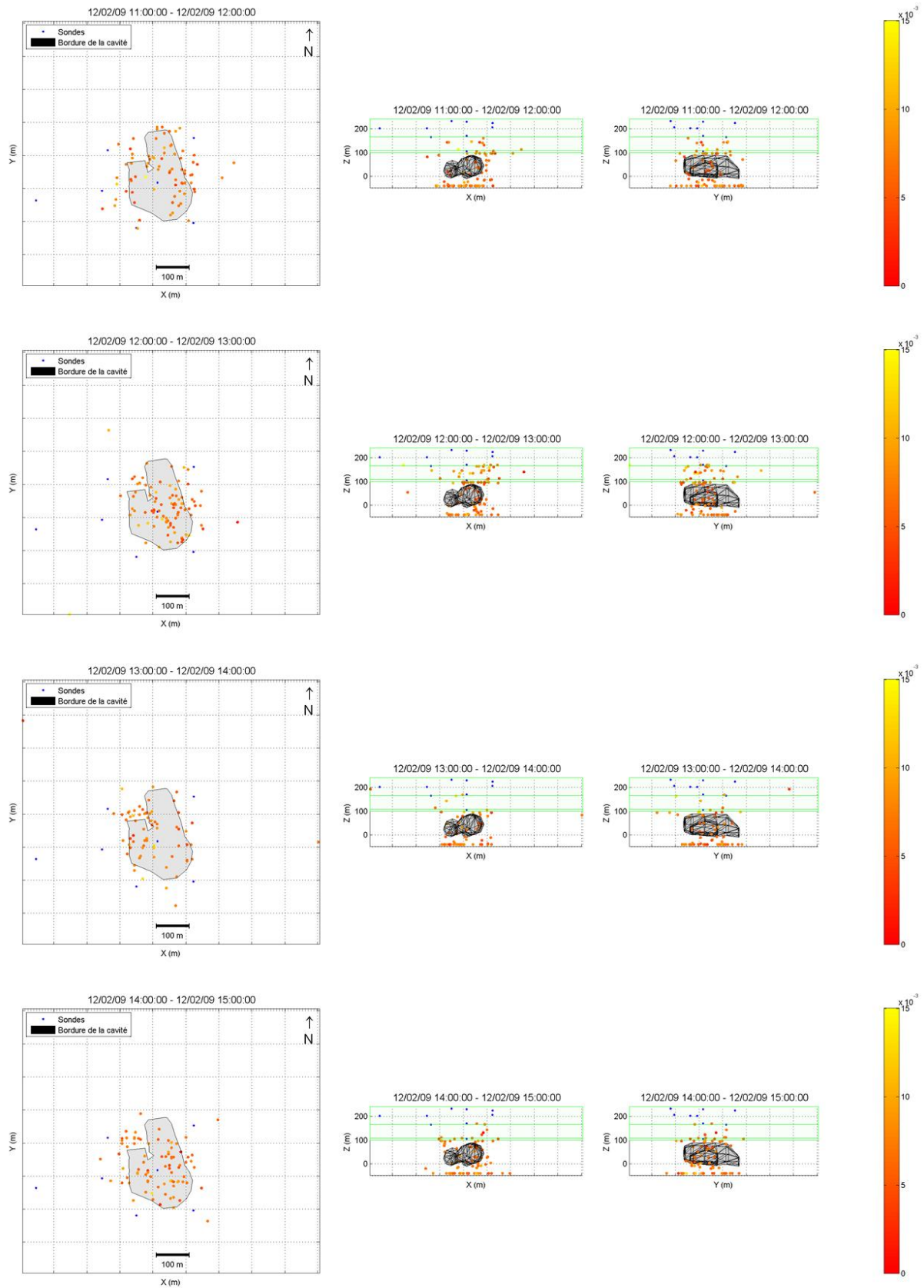
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



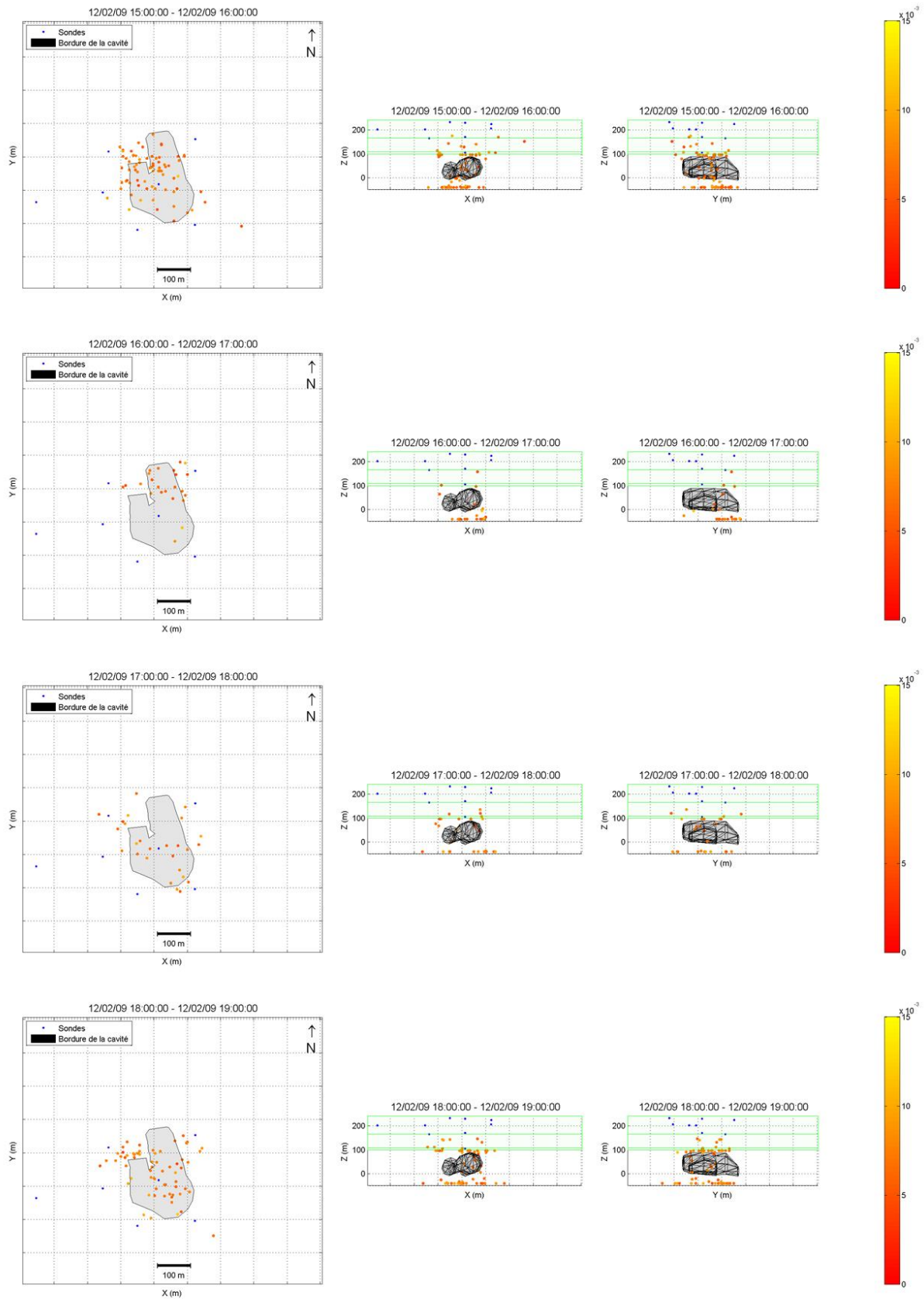
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



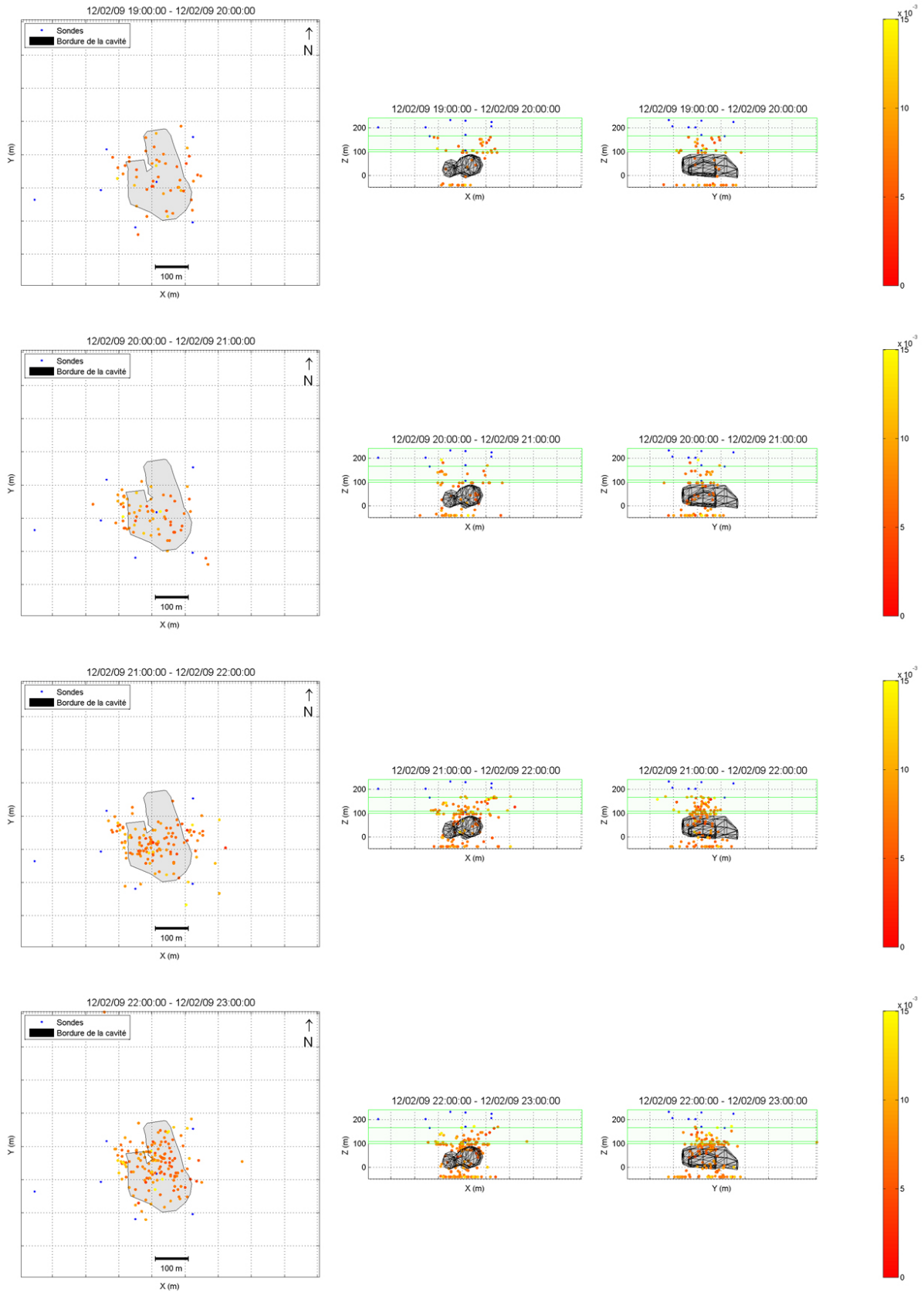
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



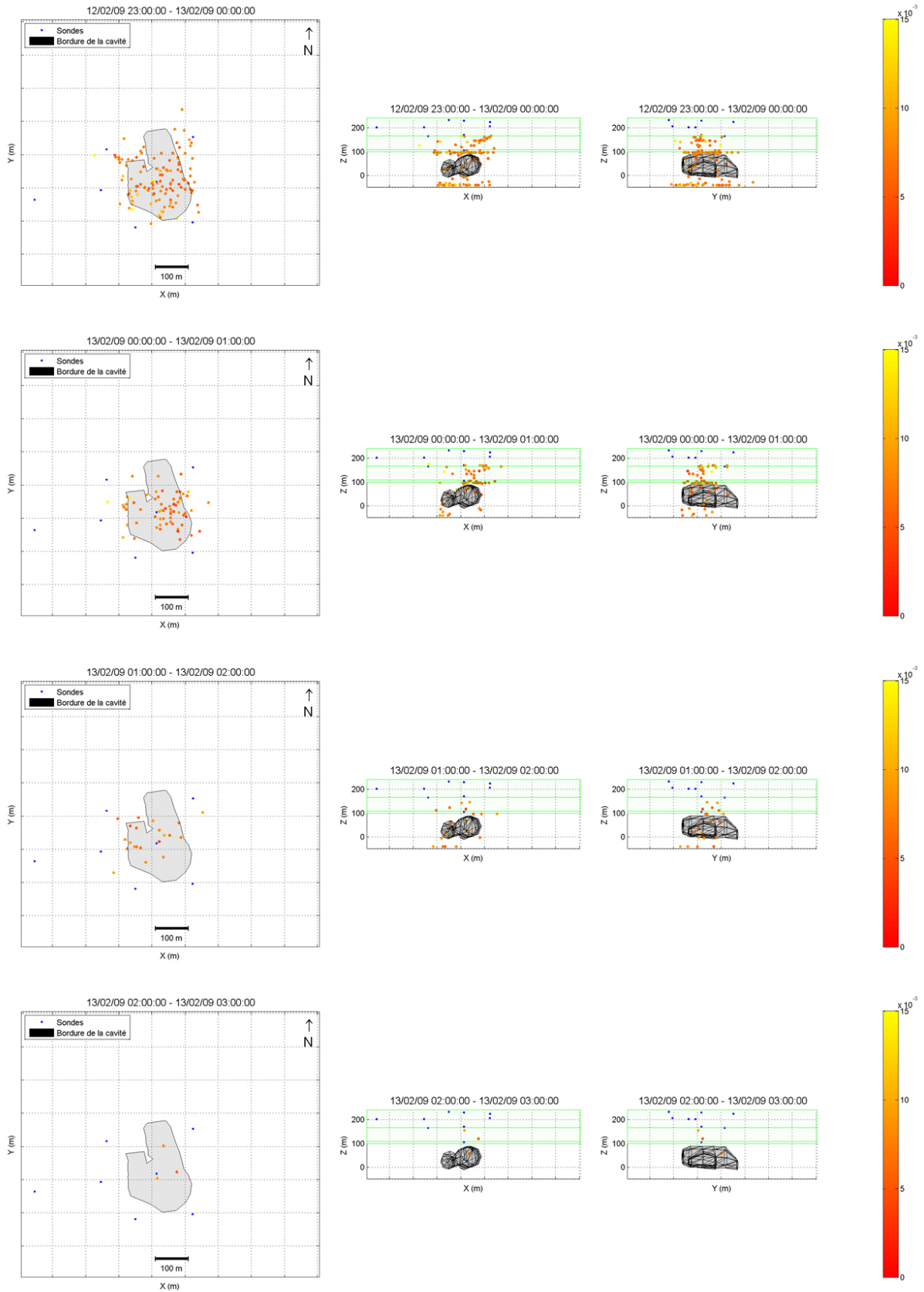
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



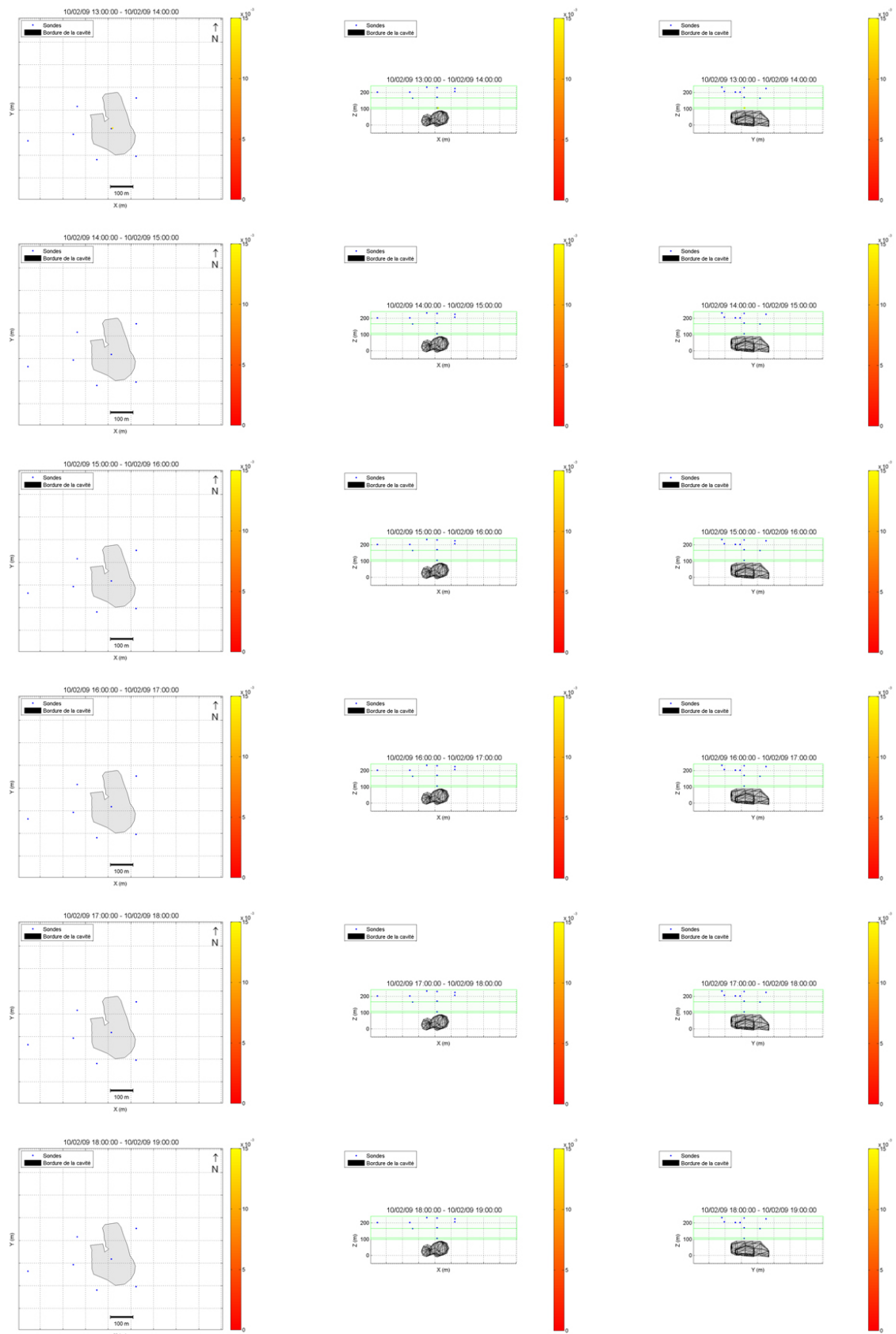
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



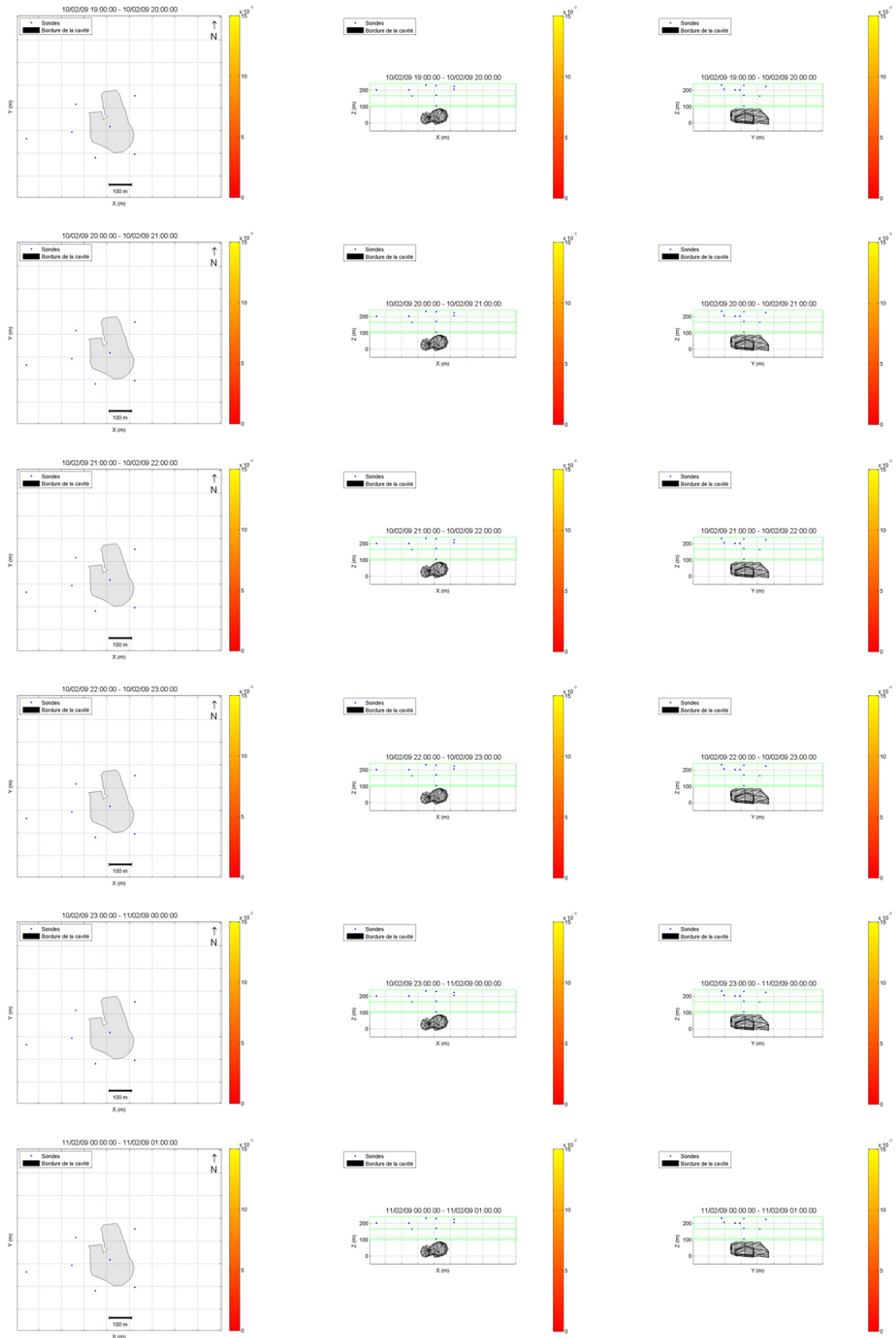
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



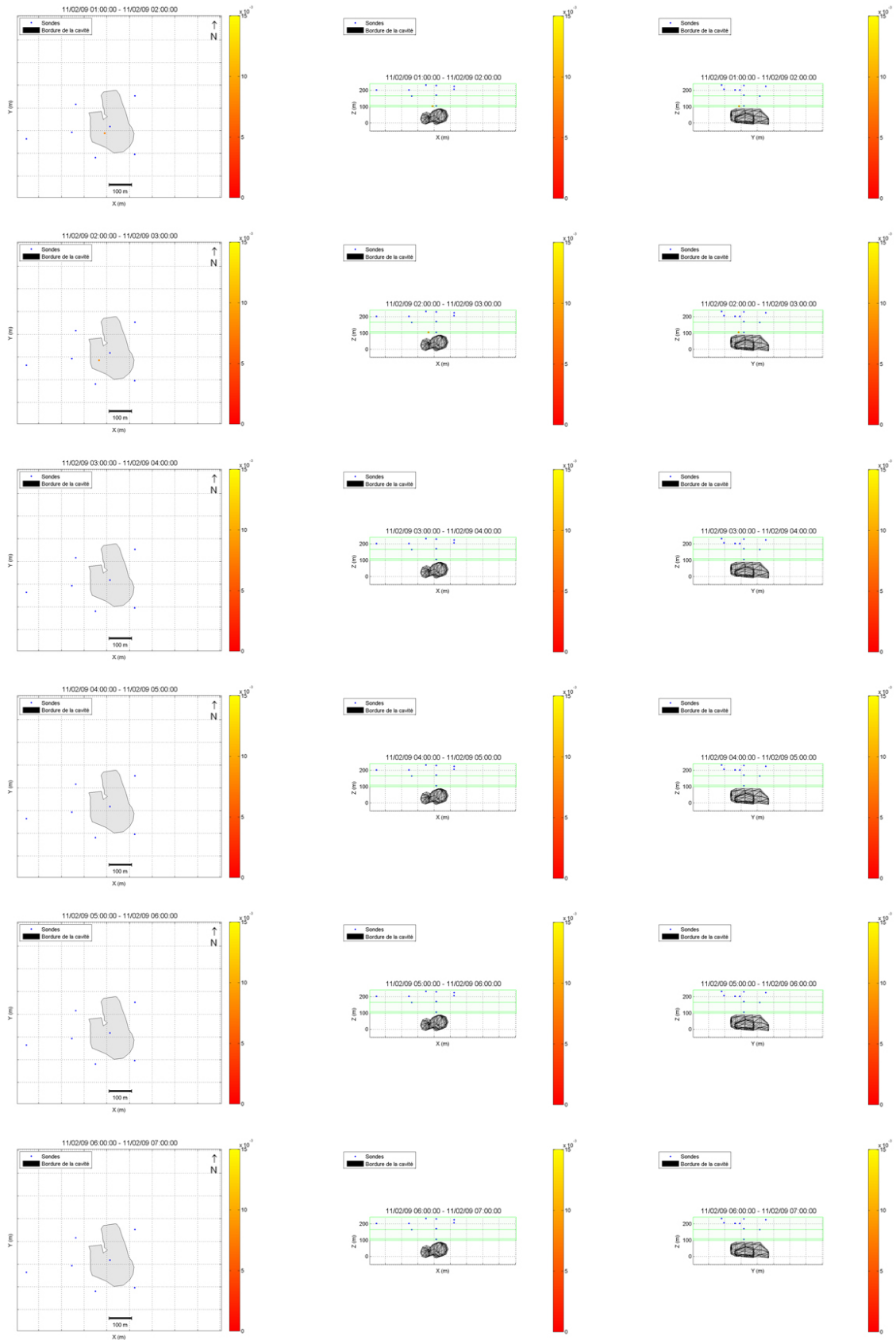
Localisations dans le banc de Dolomie, avec le modèle de vitesse considérant un niveau de saumure à -132 m



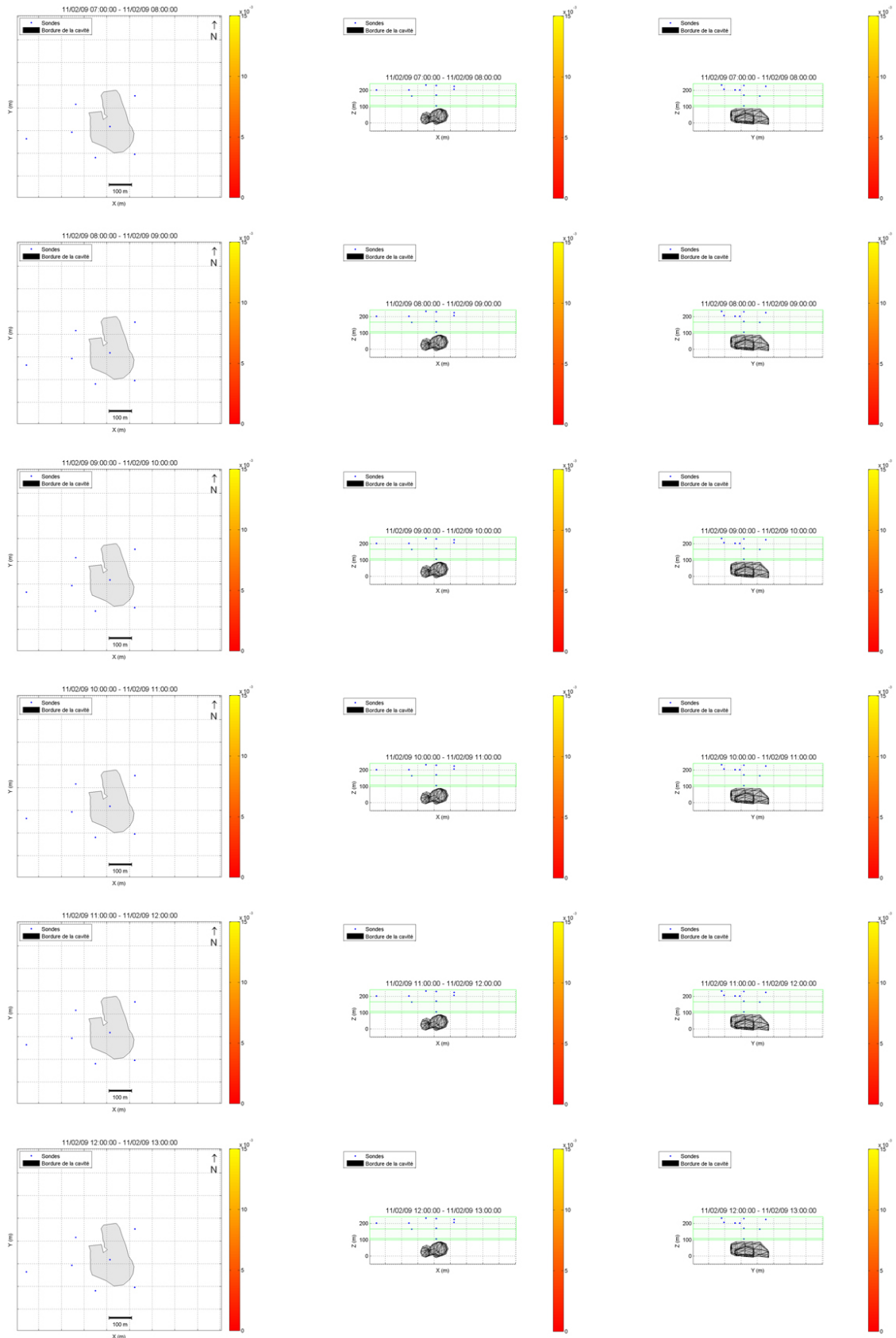
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMIQUES



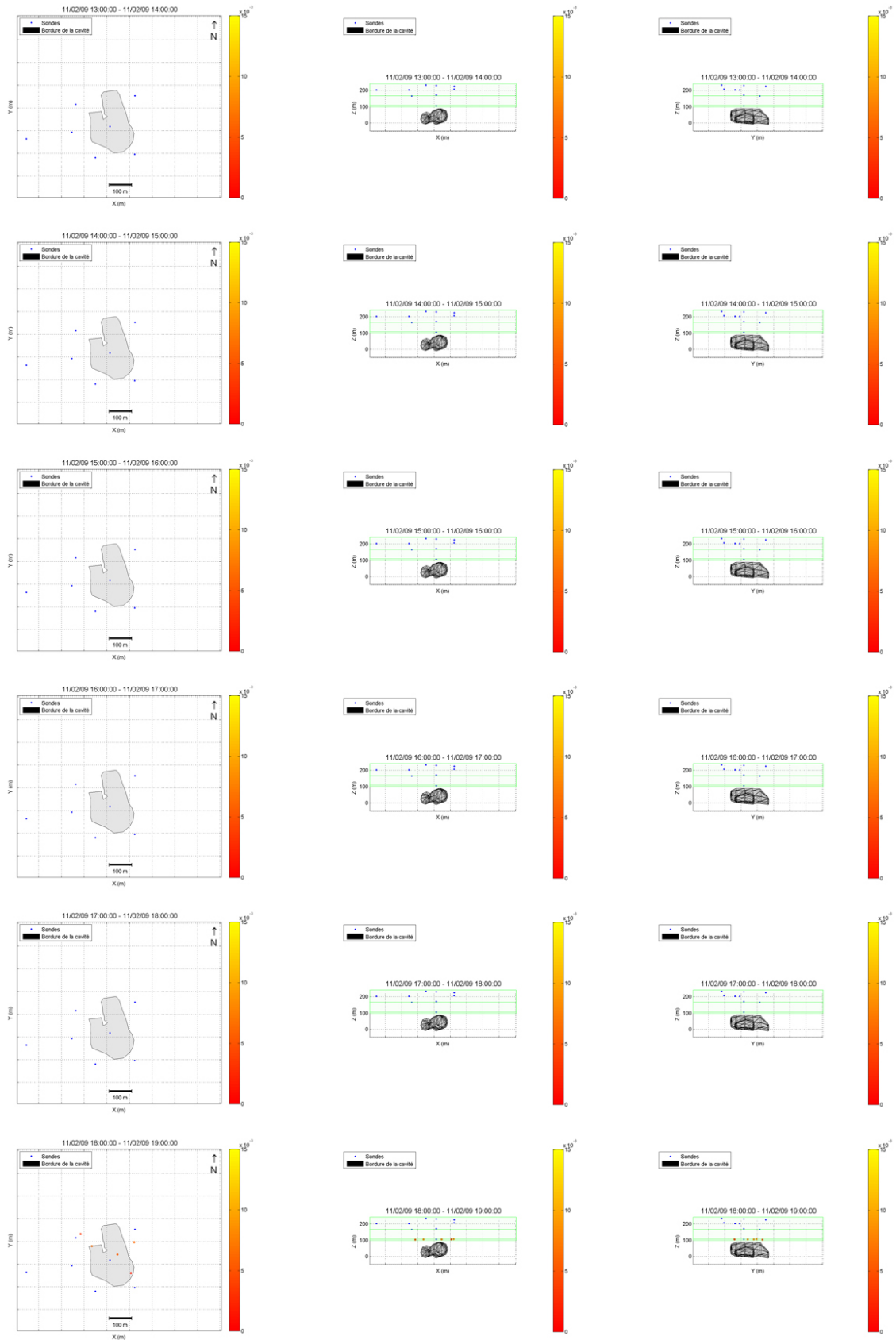
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMICIQUES



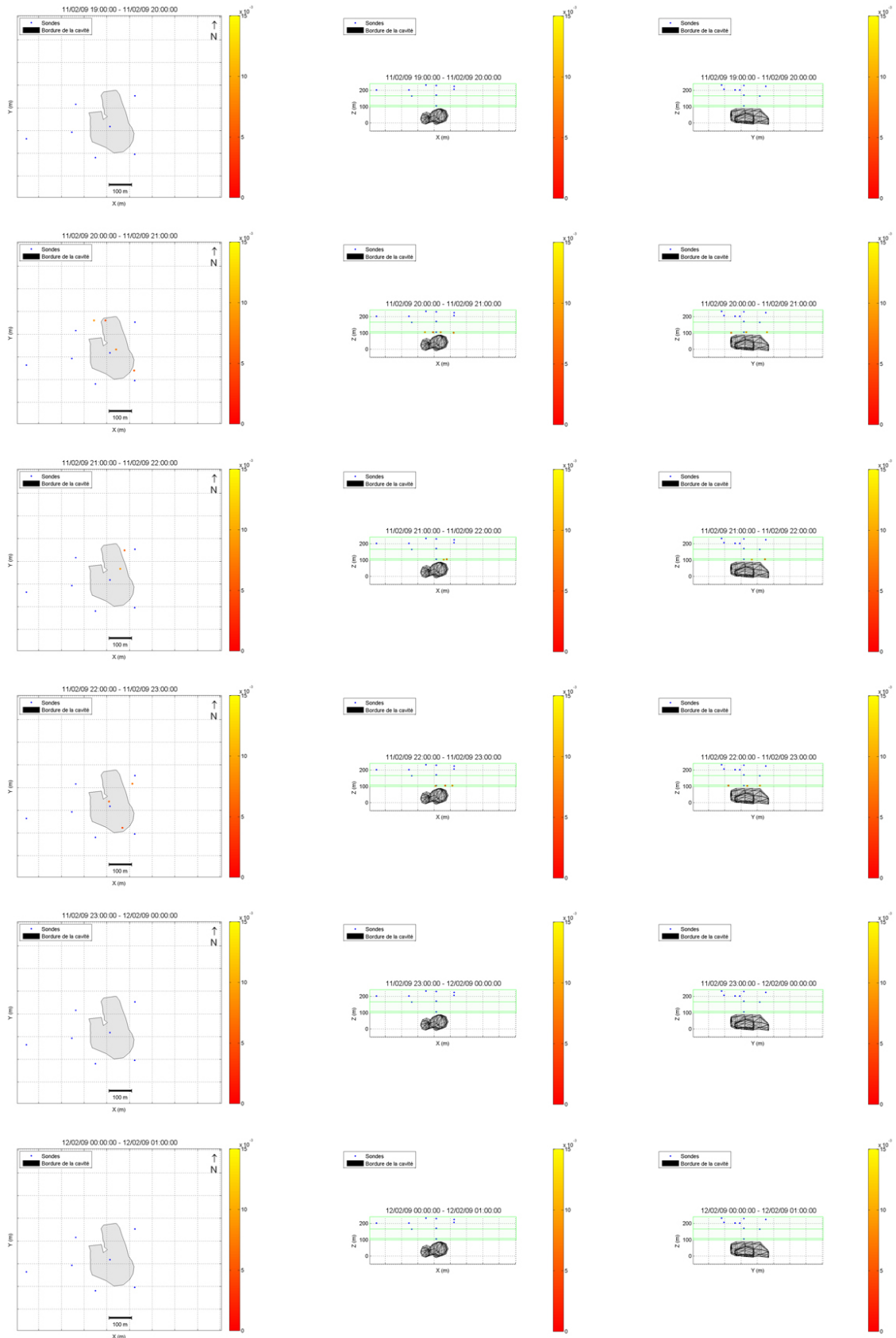
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



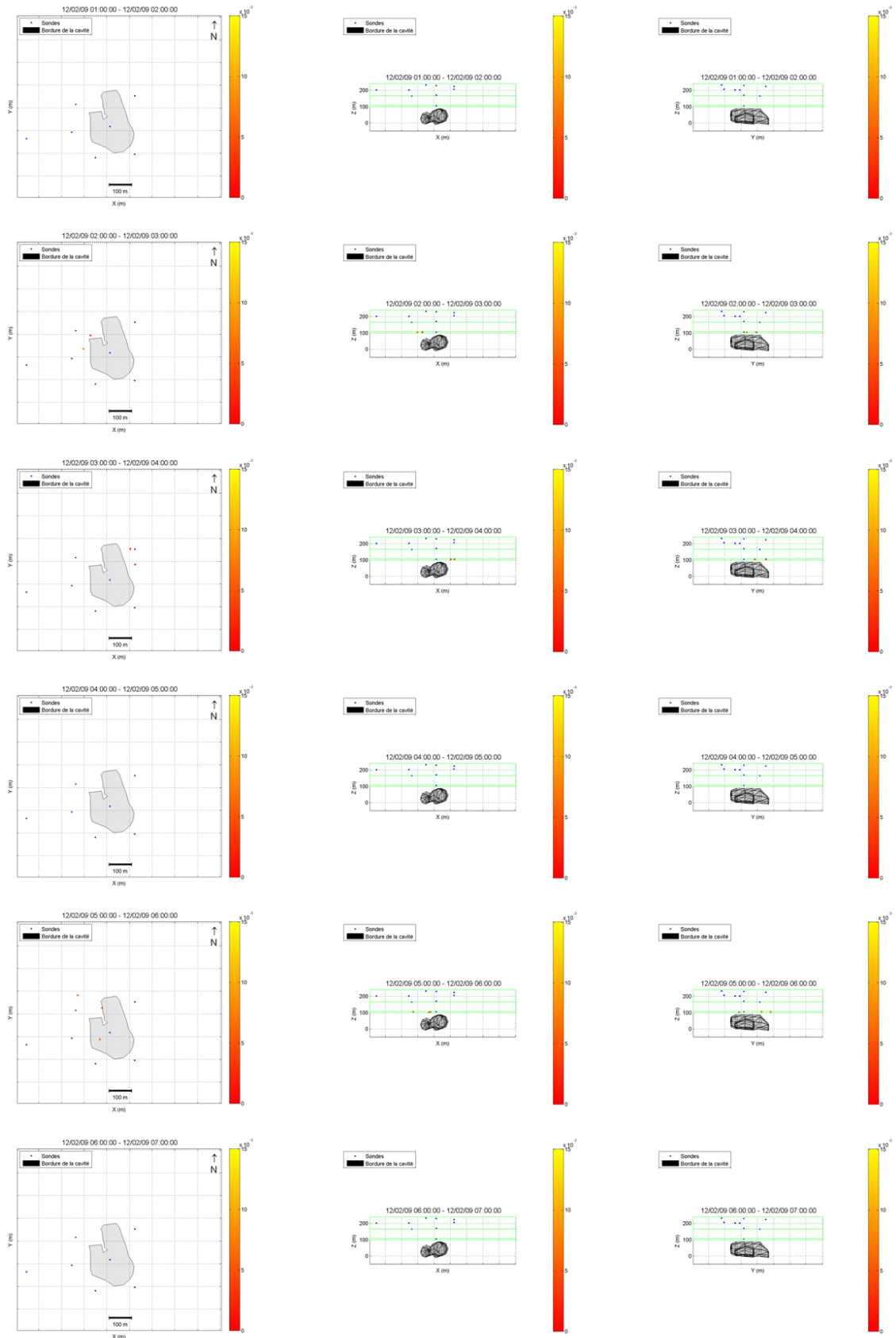
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



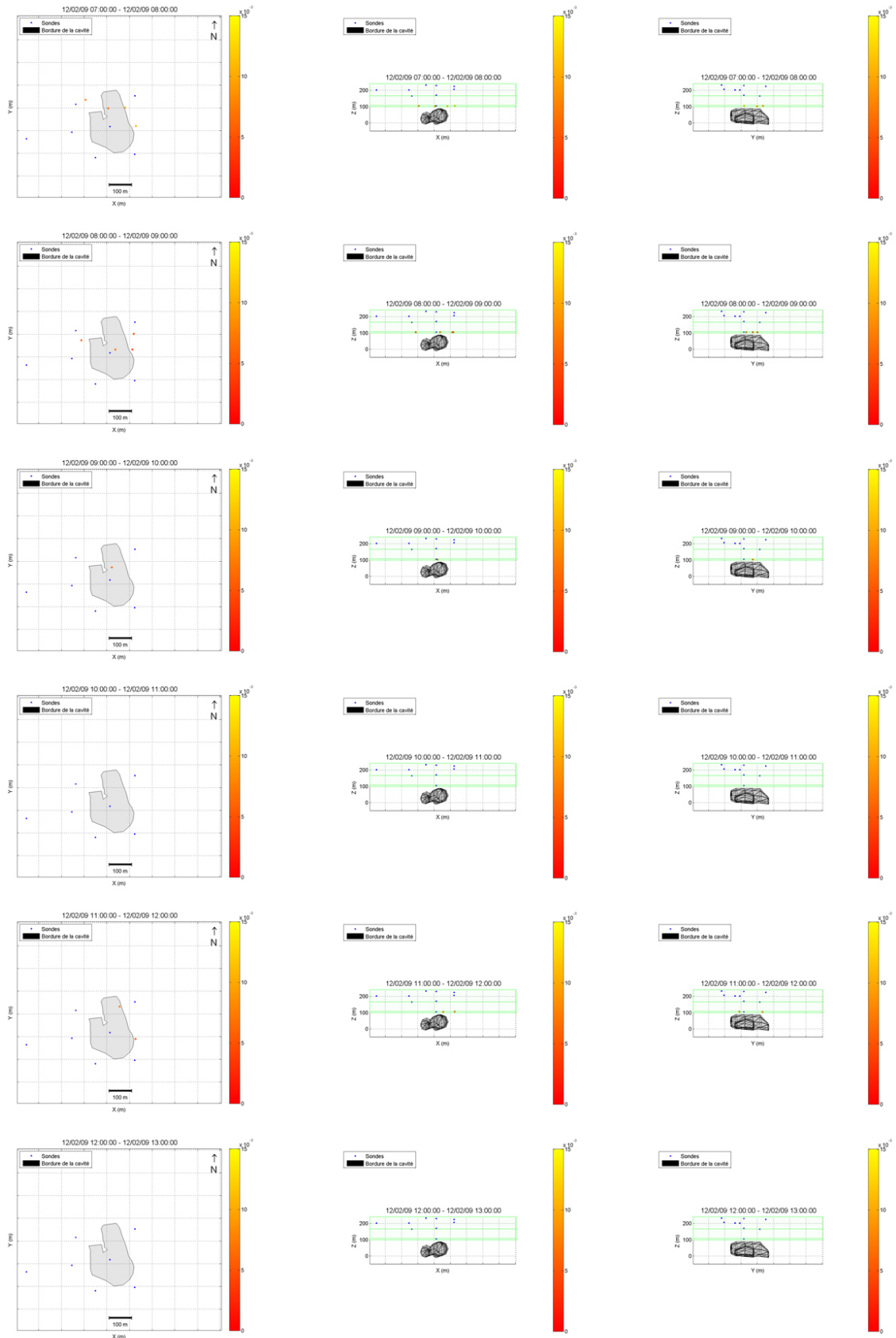
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



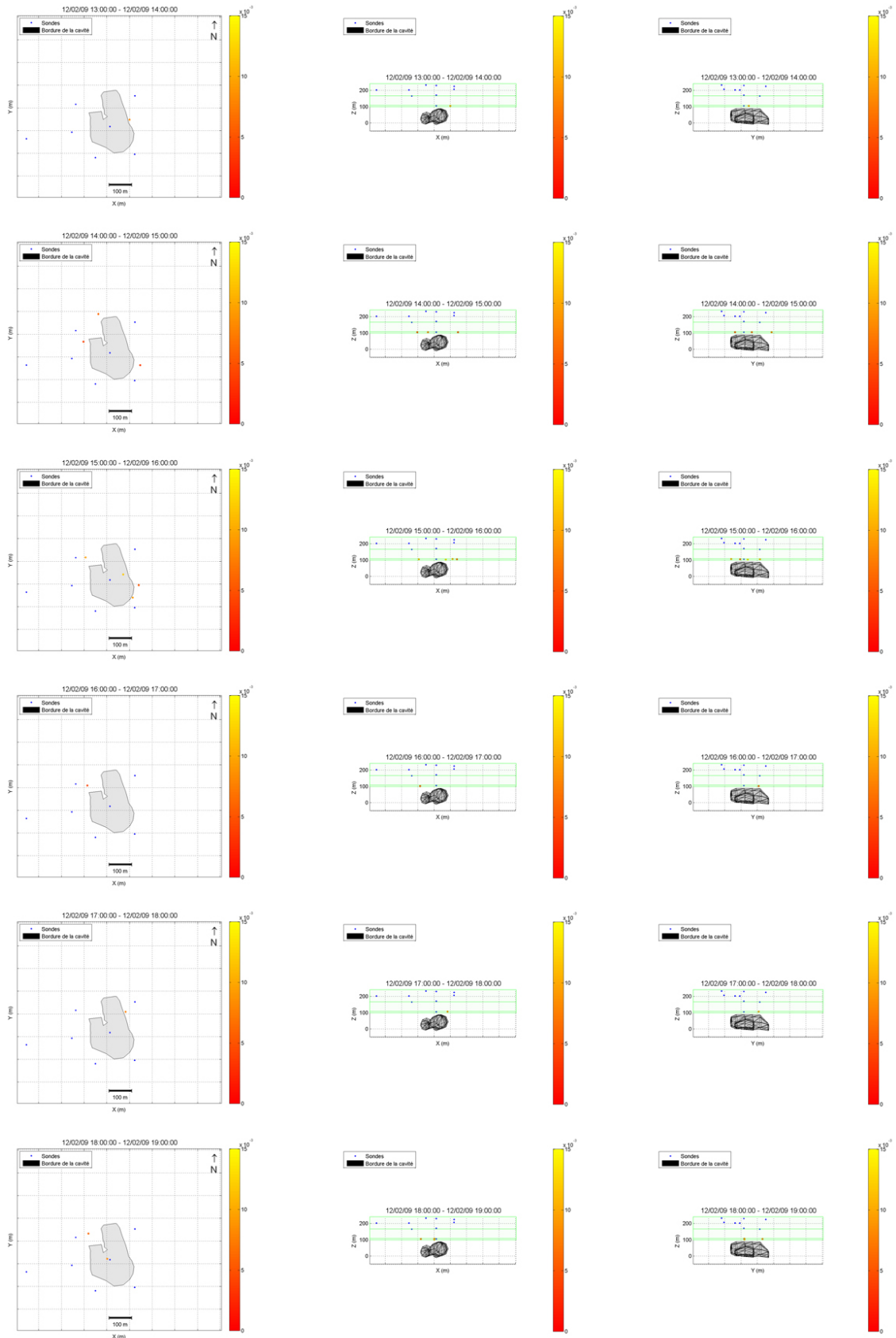
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMICIQUES



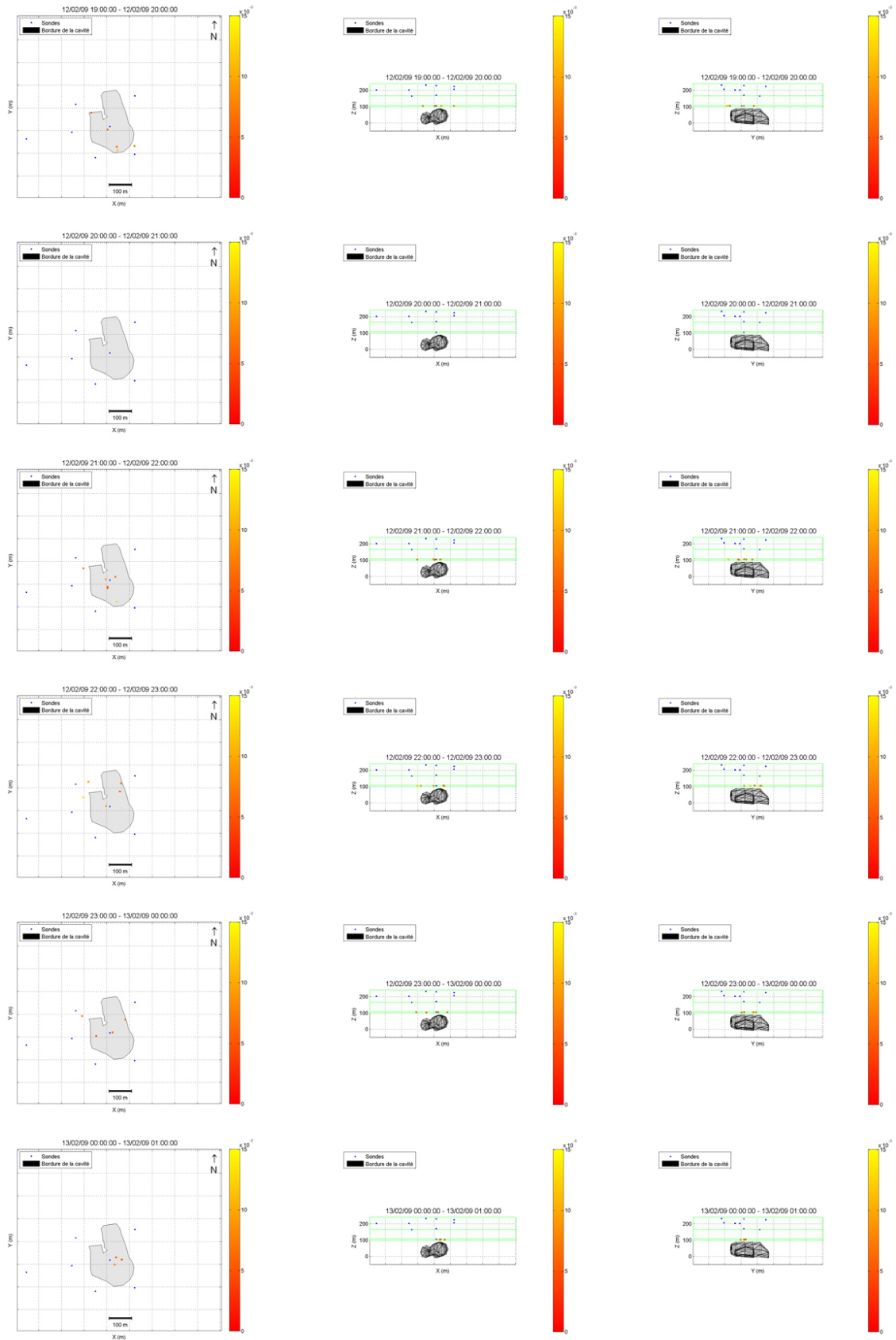
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



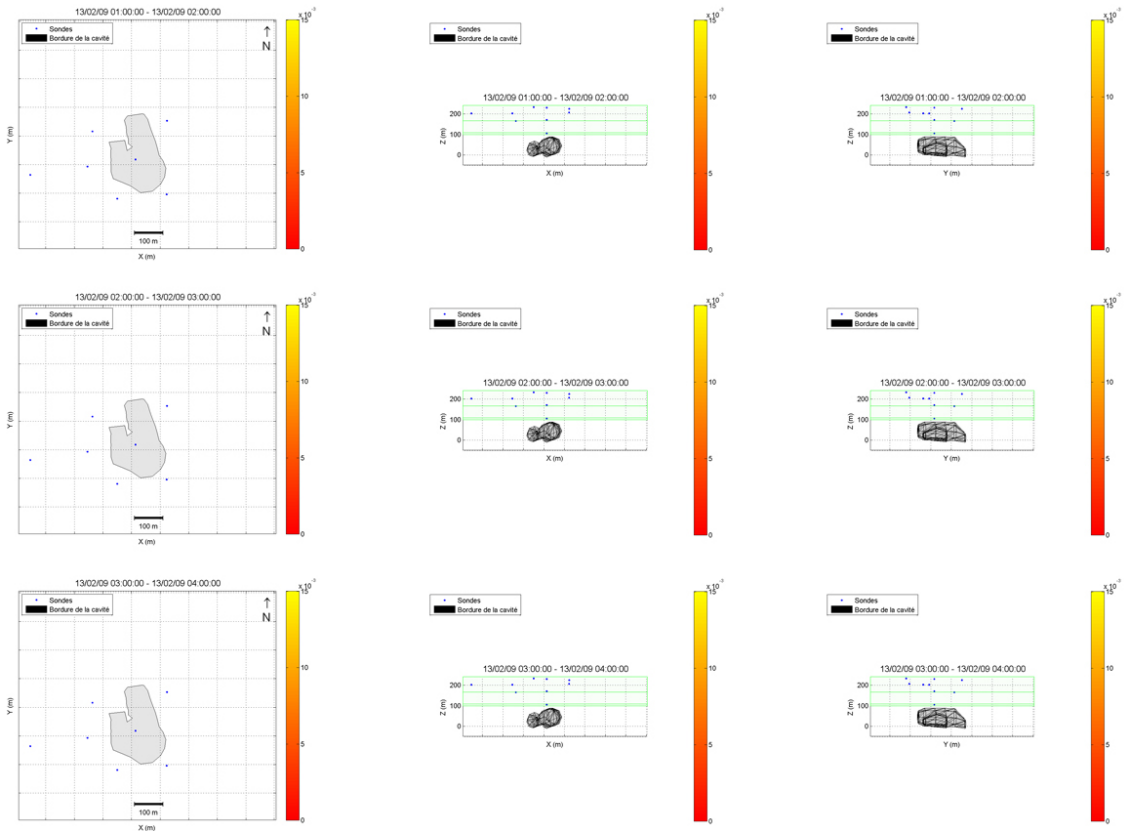
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



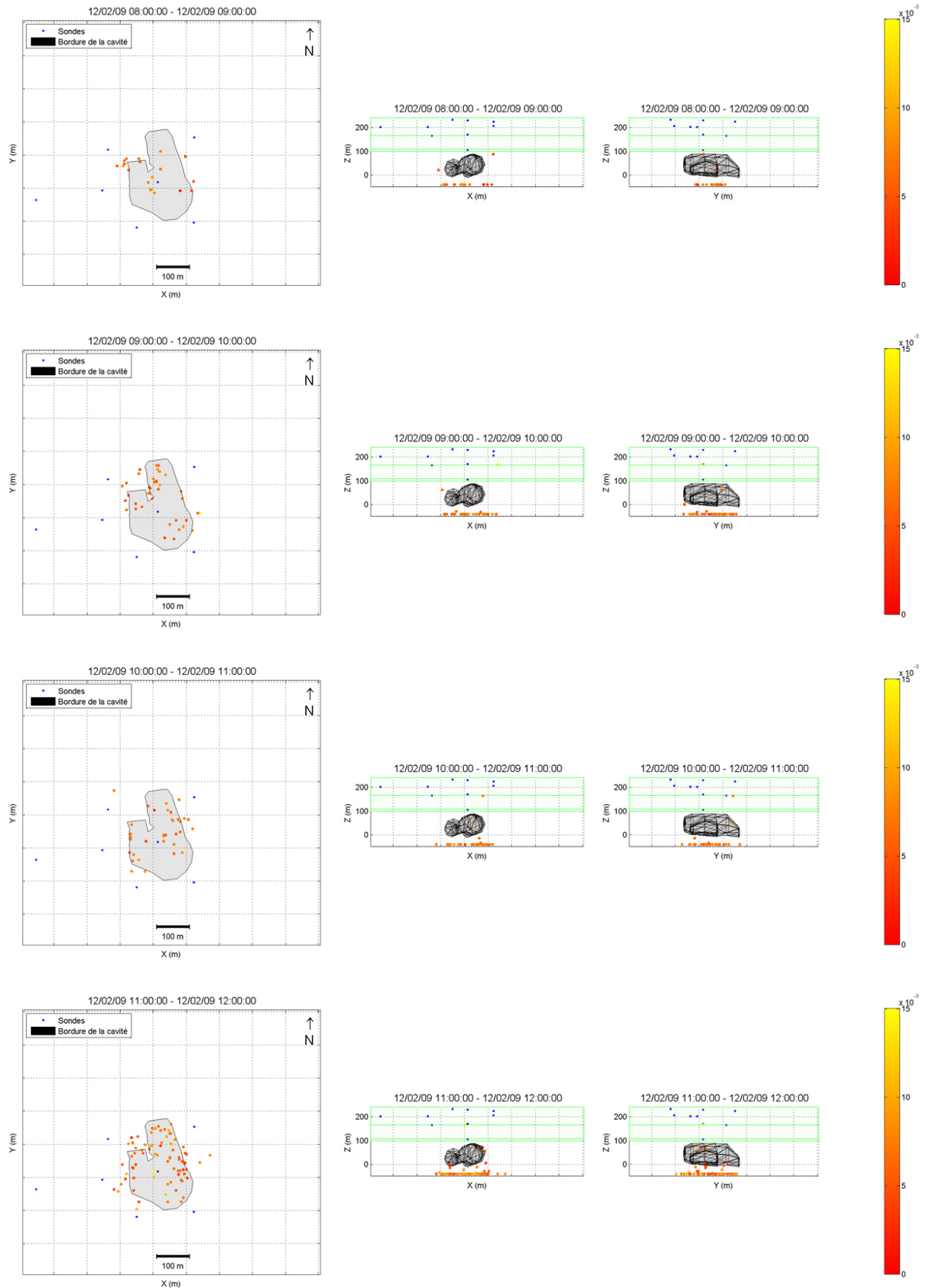
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMICIQUES



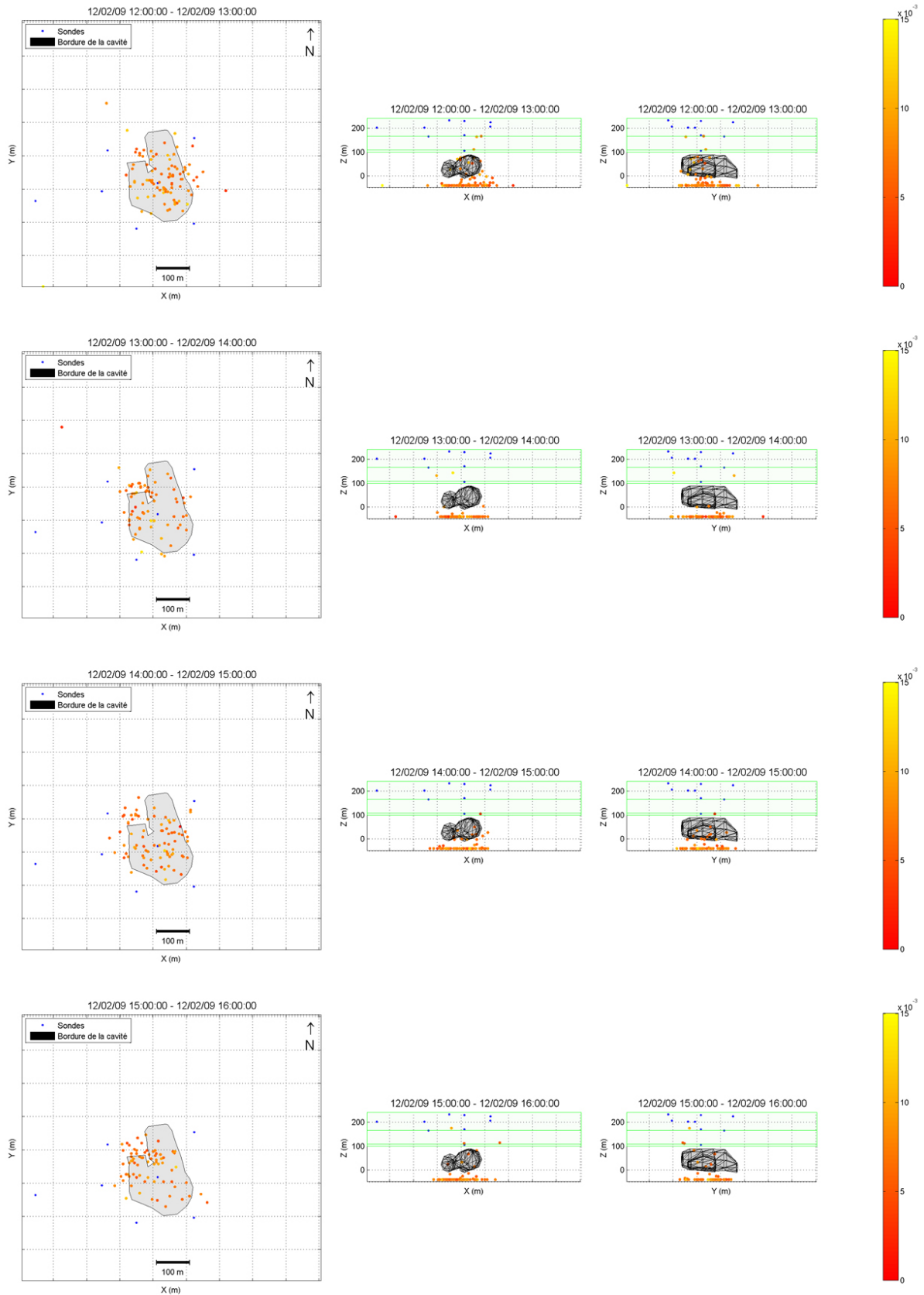
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMQUES



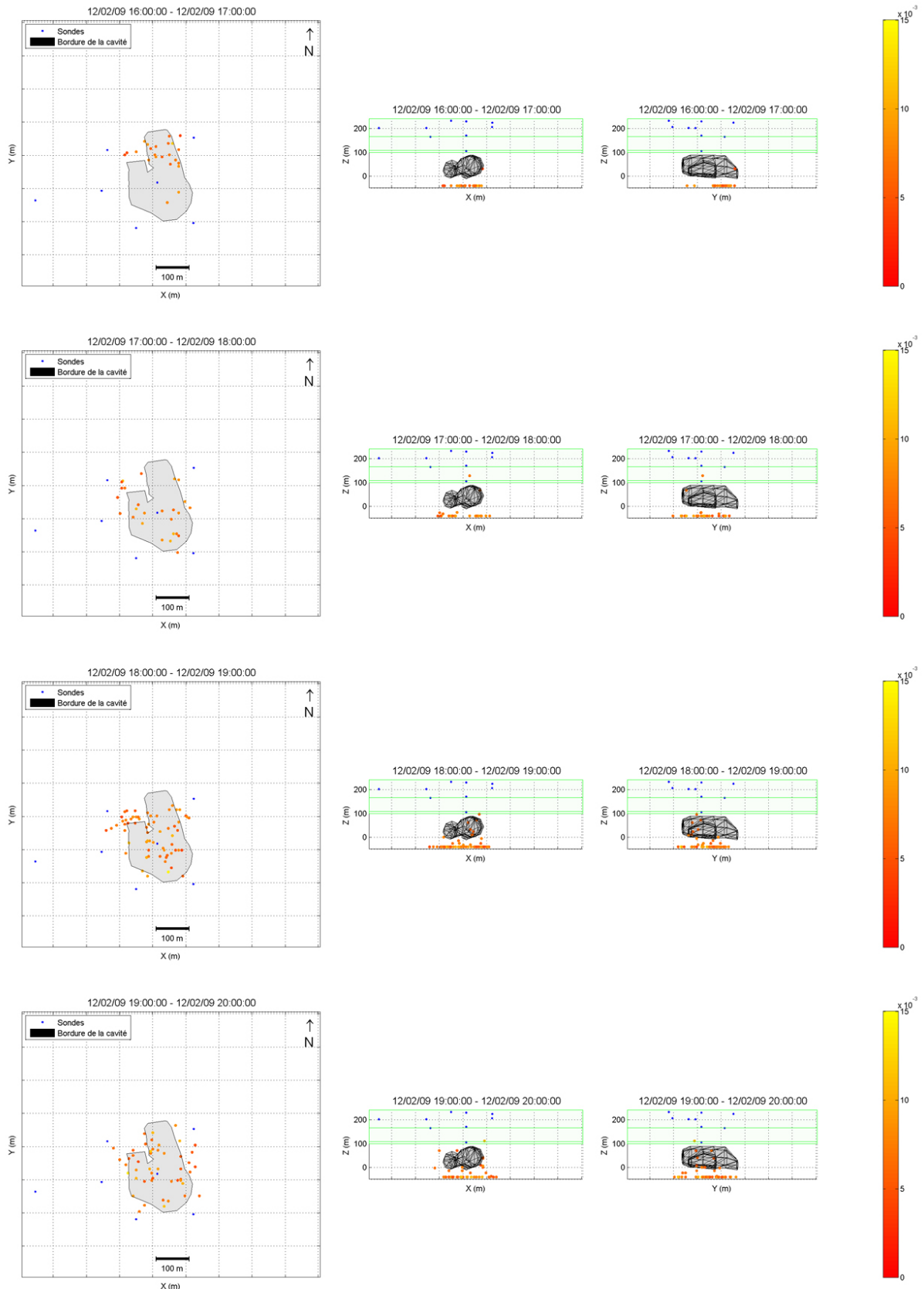
Localisations calculées avec le modèle de vitesse considérant un niveau de saumure à -123 m :



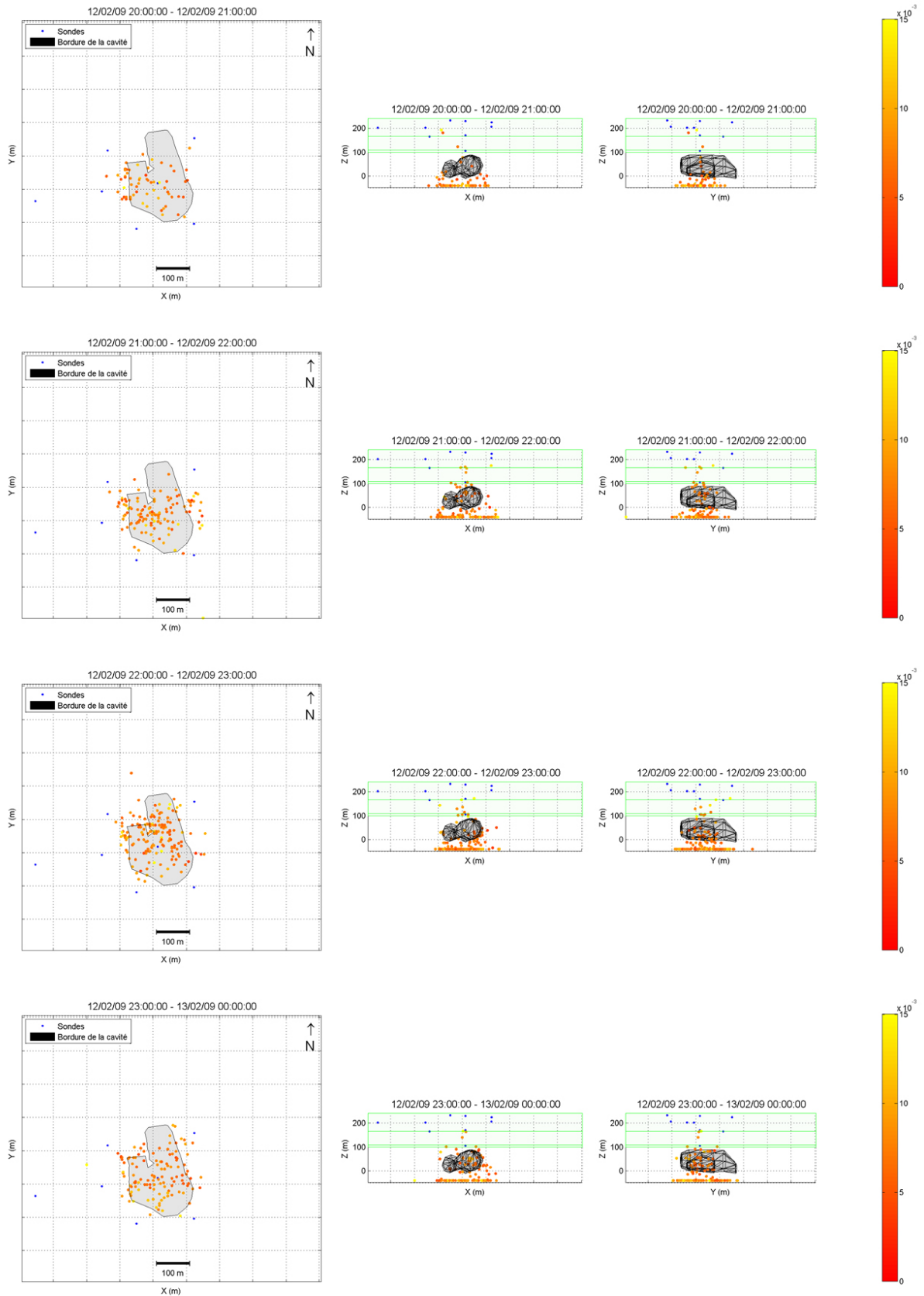
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMICIQUES



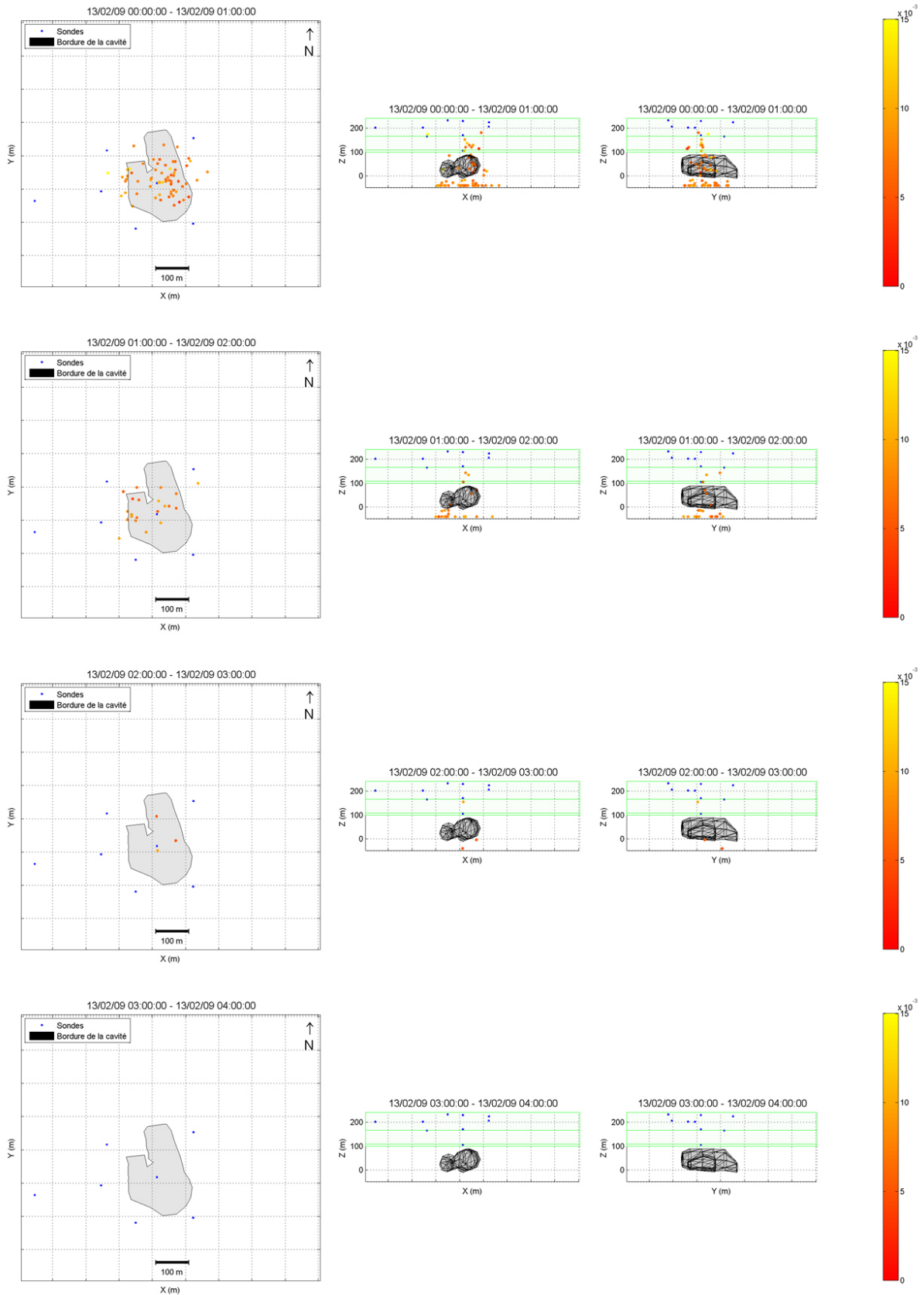
C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



C. LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS MICROSISMiques



AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

Madame Hélène LYON-CAEN, Directrice de Recherche, ENS de Paris

Monsieur Claudio SCAVIA, Professeur, Politecnico di Torino, Italie

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Madame CAO Ngoc-Tuyen

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

**"Apport de la surveillance microsismique en champ proche pour la détection de
mécanismes et de signes précurseurs aux instabilités gravitaires. "**

en vue de l'obtention du titre de :

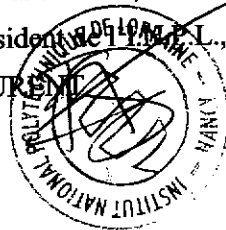
DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : « Génie Civil - Hydrosystèmes - Géotechnique »

Fait à Vandoeuvre, le 5 Décembre 2011

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine,

F. LAURENT



Résumé

L'étude des signes précurseurs d'un effondrement brutal au-dessus de cavités souterraines, dont le recouvrement est caractérisé par la présence d'un banc massif et raide, est un problème majeur pour la sécurité publique. Aussi, pour progresser dans la compréhension et l'évolution des mécanismes mis en jeu, une cavité saline, située dans le NE de la France, a été suivie en temps réel, entre 2004 et 2009, jusqu'à son effondrement. Celle-ci a été exploitée par dissolution, jusqu'à atteindre une dimension critique (de l'ordre de 180 m) sous un recouvrement de 180 m, armé d'un banc raide de Dolomie situé à 120 m de profondeur.

Un système de mesures multi-paramètres haute résolution visait à caractériser les signes précurseurs ainsi qu'à suivre l'effondrement lui-même. Il comprenait des dispositifs à la fois géotechniques et géophysiques, dont des mesures de nivellement de surface et un réseau permanent d'écoute microsismique. Ce dernier, dont les données font l'objet principal de cette thèse, était constitué de neuf sondes équipées de géophones 40 Hz (5 unidirectionnels et 4 tridirectionnels), réparties autour et à l'aplomb de la cavité, dont une dans le banc raide.

L'évolution de la cavité a été marquée par deux épisodes majeurs d'activité microsismique :

- au printemps 2008, la reprise de la dissolution dans la cavité a engendré l'apparition de crises répétées avec plusieurs milliers d'événements en quelques jours, traduisant un changement de régime microsismique, marqueur de l'instabilité de la cavité ;
- en février 2009, suite à ces observations, l'exploitant a décidé de provoquer l'effondrement, par le rabattement intensif de saumure dans la cavité. Pendant les trois jours d'opération, plus de 30000 événements ont été enregistrés (sur 60000 depuis 2004).

L'étude de la signature des événements apporte des renseignements essentiels pour la surveillance opérationnelle et la discrimination de ces deux périodes. En particulier, alors que les valeurs maximales atteintes en amplitude, énergie au capteur et fréquence fondamentale apparente, sont assez stables au cours des crises, les sauts marqués durant l'effondrement, permettent de présumer de son imminence. L'évolution de la distribution des microséismes en termes d'énergie libérée et d'occurrence, calculée de manière similaire à la loi de Gutenberg-Richter, bien que souvent difficile à interpréter, a pu être associée à des hausses du niveau piézométrique, ainsi qu'à de petites accélérations de l'affaissement mesuré en surface. Pendant la période d'effondrement, le nombre d'événements microsismiques augmente en suivant une loi en puissance.

La localisation des microséismes a nécessité la mise en place d'une stratégie adaptée pour garantir la qualité et l'homogénéité des résultats (sélection des enregistrements, calibrage, étude paramétrique). Cependant, l'utilisation d'un modèle de vitesse constant sur toute la période s'est révélé impossible, compte tenu de l'évolution rapide et permanente du milieu. Il a donc été entrepris d'établir des modèles de vitesse différents en fonction des périodes d'évolution de la cavité. Les distributions spatio-temporelles des foyers ainsi localisés montrent l'existence de structures préférentielles de rupture et souligne le rôle majeur du banc raide.

Croisées avec les autres mesures acquises sur le site, ces résultats ont permis d'établir un scénario probable d'évolution de la cavité et de proposer quelques recommandations pour la surveillance opérationnelle.

Ces travaux de recherche ont été réalisés dans le cadre du groupement scientifique GISOS (BRGM, INERIS, INPL, Mines ParisTech), avec l'appui de l'exploitant SOLVAY et en partenariat avec l'IPG de Paris.

Mots clés : microsismicité, système de surveillance, signes précurseurs, effondrement, cavité saline, après-mine.

Abstract

The study of the precursory signs of a brutal collapse above underground caverns, with an overburden characterized by the presence of a massive and stiff bench, is a major problem for public safety. Thus, to progress in the comprehension and the evolution of the concerned mechanisms, a salt cavern, located in the NE France, was monitored in real-time, since 2004 to 2009, until its collapse. This cavern was mined by solution, until reaching its critical dimension (about 180 m) under a covering of 180 m thick, armed with a stiff Dolomite bench located at 120 m of depth.

A multi-parameter high resolution monitoring system aimed at characterizing the precursory signs and following collapse itself. It included both geotechnical and geophysical devices as surface leveling measurements and a permanent microseismic network. This one, which data are the principal subject of this thesis, consisted in nine probes equipped with 40 Hz geophones (5 1D and 4 3D), distributed around and directly below the cavern, including one located in the stiff bench.

The evolution of the cavern was marked by two major episodes of microseismic activity:

- at the beginning of spring 2008, the dissolution restart in the cavern which caused repeated crisis with several thousand events in a few days, this represent a change in the microseismic regime and marked the cavern instability ;
- in February 2009, following these observations, the owner decided to trigger the collapse by intensive brine pumping in the cavern. During the three days of the operation, more than 30,000 events were recorded (against 60,000 since 2004).

The study of the event signature provides essential information for operational monitoring and the discrimination of these two periods. Particularly, while maximal values reached in amplitude, energy and apparent fundamental frequency are quite stable during the 2008 episodes, the rises of this values are important during the collapse period (prior to the peak of activity), allowed us to suppose its imminence. The evolution of the microseism distribution in terms of energy released and occurrence, calculated similarly to the Gutenberg-Richter law, although often difficult to interpret, has been associated with piezometric level rises, and with small accelerations of surface subsidence. During the collapse, the microseismic activity acceleration follows a power law.

Microseisms location required the establishment of an appropriate strategy to ensure the quality and the consistency of the results (record selection, calibration, parametric analysis). However, the use of a constant velocity model over all the period was impossible due to the fast and permanent evolution of the environment. Thus, several models were used, according to the a priori known cavern evolution. The event spatiotemporal distributions, thus located, revealed the existence of preferential failure structures and highlight the role of the stiff bench, located at 120 m depth.

Crossed with other measurements acquired on the site, these results have established a likely scenario of evolution of the cavern.

These research was done within the framework of scientific grouping GISOS (BRGM, INERIS, INPL, Mines ParisTech), with the support of the owner SOLVAY and in collaboration with IPG of Paris.

Keywords: microseismicity, monitoring system, precursors signs, collapse, salt cavern, post-mining.