



Rapport de stage pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'École et
Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg

Présenté par

Adrien BRONNER

Soutenu le 18 décembre 2009

COMBINAISON DE DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES ET GÉOPHYSIQUES
POUR LA CARACTÉRISATION DE MOUVEMENTS DE TERRAIN.
APPLICATION AU GLISSEMENT DU MAS D'AVIGNONET DANS LES
ARGILES DU TRIÈVES

Établissement d'accueil

LABORATOIRE DE GÉOPHYSIQUE INTERNE ET TECTONOPHYSIQUE
DE GRENOBLE

Jury

François CORNET

Président

Frederic MASSON

Superviseur

Andrea WALPERSDORF

Encadrant

Denis JONGMANS

Encadrant

Remerciements

Je tiens à remercier particulièrement Denis Jongmans et Andrea Walpersdorf pour m'avoir accueilli et encadré tout au long de ce stage. Merci pour leurs précieux conseils et leur disponibilité.

Je remercie également Florence Renalier, Grégory Bièvre et Rémi Bethoux pour leur aide amicale lors du traitement des données et pour les moments agréables passés sur le terrain.

Je remercie Frederic Masson, mon superviseur de stage à l'EOST.

Je remercie enfin tous les thésards du LGIT. Ils ont toujours été disponibles pour m'apporter leur aide précieuse tout au long de mon séjour à Grenoble.

Table des matières

Introduction	4
1 Le glissement de terrain du Mas d'Avignonet	5
1.1 Localisation et caractéristiques morphologiques du site	5
1.2 Contexte géologique	7
1.3 Caractéristiques géophysiques du site	8
1.3.1 Les images LIDAR	8
1.3.2 Les mesures de bruit de fond et rapport spectral H/V	8
1.3.3 Les surfaces de glissement et déplacements GPS	10
1.3.4 Évolution de la vitesse des ondes S	12
2 Les données météorologiques et suivi de la hauteur piézométrique des nappes	13
2.1 Météorologie	13
2.1.1 Instrumentation	13
2.1.2 Traitement des données	13
2.1.3 Résultats	14
2.2 Les données piézométriques	15
2.2.1 Instrumentation	15
2.2.2 Traitement des données	15
2.2.3 Résultats	16
2.3 Relations entre pluviométrie et hauteur de nappe	18
3 Le GPS	19
3.1 Instrumentation	19
3.2 Traitement des données	19
3.3 Résultats	19
3.3.1 Déplacement latéral	21
3.3.2 Déplacement dans le plan vertical	22
3.3.3 Déplacement dans le plan horizontal	24
3.4 Topographie et mouvements GPS	25
3.5 Météorologie et mouvements GPS	26
3.6 Conclusion préliminaire	27
4 Sismologie du site	29
4.1 Instrumentation	29
4.2 Traitement des données	29
4.2.1 Calcul de l'énergie sismique	29
4.2.2 Suivi du contenu spectral	29
4.3 Résultats	30
4.3.1 Les courbes d'énergie sismique	30
4.3.2 Évolution du contenu spectral	32
4.4 Analyse des courbes d'énergie sismique	33
4.4.1 Les sauts d'énergie	33
4.4.2 Les augmentations progressives d'énergie	34

4.4.3	Comparaison avec les données météorologiques	37
4.5	Répartition de l'énergie sismique sur les trois composantes	40
4.6	Conclusion préliminaire	41
5	Conclusion	41
	Références	43
6	Annexes	48
6.1	Données GPS	48
6.1.1	Déplacement de la station de référence AVR1	48
6.2	Données sismiques	49
6.2.1	Localisation des stations sismiques lors de la campagne de me- sures de septembre 2007	49
6.2.2	Courbes d'énergie sismique	50
6.2.3	Sismogrammes	52

Introduction

Les glissements de terrain sont des phénomènes géologiques qui impliquent des mouvements dans le matériel sédimentaire ou le socle rocheux sous l'effet de la gravité. Ils sont caractérisés par la formation d'instabilités pouvant résulter de différents facteurs ou combinaisons de facteurs tels que la pente du terrain, la pression des fluides dans le matériel concerné, ou encore un évènement sismique [Guzzetti et al., 2008]. Leur étude est donc très importante car ils peuvent constituer une menace pour les zones urbanisées et les ouvrages géotechniques.

Nous tenterons ici de caractériser le glissement de terrain du Mas d'Avignonet (Alpes) par l'intermédiaire de la combinaison de données géophysiques et météorologiques. Dans cette région des Alpes, en raison des phénomènes d'érosion, il y a présence d'instabilités gravitaires dans les argiles d'origine glacio-lacustre recouvrant le socle rocheux. Les mouvements observés sont relativement lents (de l'ordre de 1 à 10 cm/an) mais peuvent évoluer en coulée boueuse comme lors de l'évènement de l'Harmalière (1981) [Moulin and Robert, 2004] et la catastrophe de la Salle en Beaumont (1994) [Moulin and Chapeau, 2004] durant laquelle quatre personnes périrent et de nombreux dégâts matériels furent à déplorer.

Le but du stage est de caractériser le glissement de terrain d'Avignonet par l'intermédiaire de la combinaison de données météorologiques et géophysiques. Nous disposons de données sismologiques et GPS issues de trois stations permanentes, de données météorologiques, et des hauteurs piézométriques des nappes dans deux forages à respectivement 5 et 47 m de profondeur.

La première partie de notre travail consistera à étudier les déplacements GPS. Nous mettrons ces données en relation avec la météorologie et les hauteurs piézométriques des nappes dans le but de définir quelle est l'influence de la pluviométrie sur le mouvement de terrain.

La deuxième partie de notre travail consistera à étudier les données sismologiques. Nous tenterons de définir si le glissement argileux génère un signal sismique. Si tel est le cas, nous ferons le parallèle avec les données de déplacements GPS et la météorologie.

Nous présenterons d'abord le site d'Avignonet et les différentes études géophysiques qui y ont été menées avant d'aborder le traitement des données et les résultats que nous avons obtenus durant ce stage.

1 Le glissement de terrain du Mas d'Avignonet

1.1 Localisation et caractéristiques morphologiques du site

Le site d'étude se trouve à 40km au Sud de Grenoble à l'extrémité Nord de la région du Trièves qui est délimitée à l'Ouest par le Massif du Vercors et à l'Est par le massif de Belledonne (figure 1) . Dans cette région, le socle forme une large dépression recouverte d'une couche de sédiments argileux d'origine glacio-lacustre. Le tout est drainé par le Drac et la Gresse.

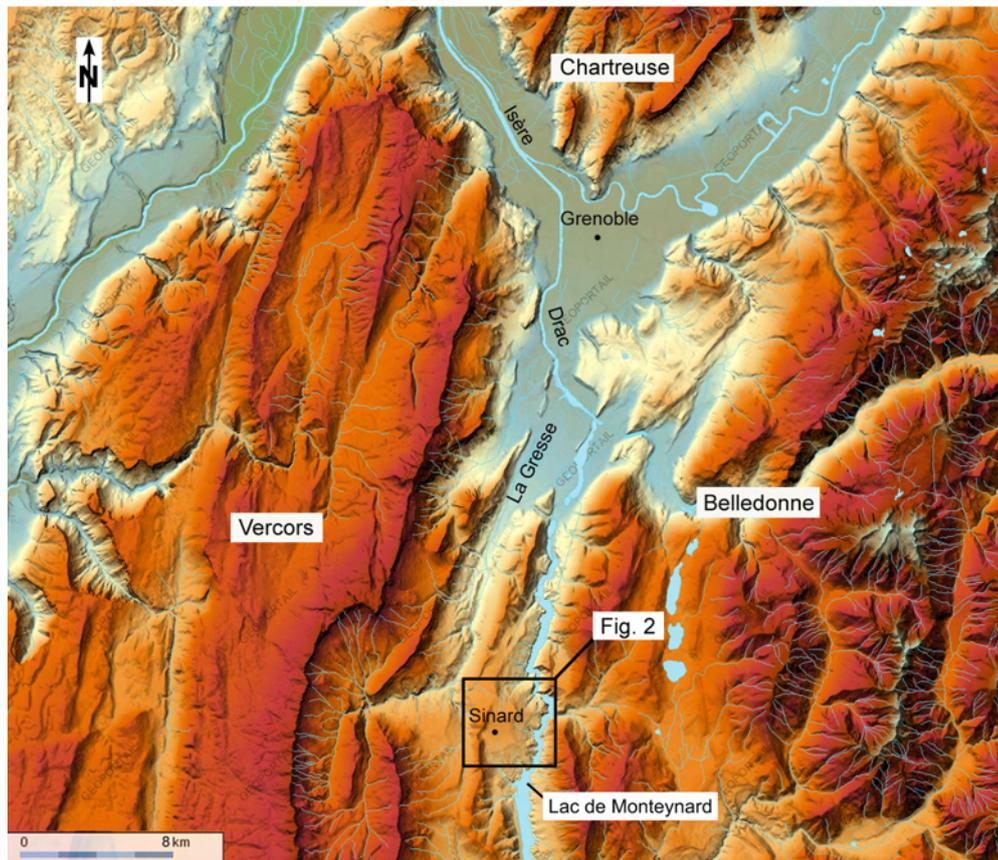


FIG. 1 – Localisation géographique du site d'étude (image Géoportail©)

Le glissement de terrain se situe sur la rive gauche du lac EDF de Monteynard. Il se caractérise par des mouvements dans le matériel argileux recouvrant la combe d'Avignonet et de l'Harmalière (figure 2). Il menace des cultures et une dizaine d'habitations construites dans cette zone.



FIG. 2 – Présentation du site d'étude et localisation des instruments utilisés. Les stations GPS (AVN3, AVP2 et AVR1). Les stations sismologiques 3 composantes (AVR, AVP et AVM) , la station météorologique et les deux forages équipés de capteurs CPI. Les limites des combes d'Avignonet et de l'Harmalière sont représentées en pointillés (image Géoportail©)

Dans cette région, les instabilités de terrain ont été mises à jour après l'événement de l'Harmalière (combe voisine du Mas) qui s'est traduit par le glissement vers le Lac de Monteynard d'une trentaine d'hectares de bois et prairies représentant un volume de 5 millions de m^3 [Moulin and Robert, 2004] . Parallèlement, des dommages étaient constatés sur les constructions récentes du lotissement du Mas. La morphologie du site est caractérisée par une zone de faible pente correspondant au plateau du Sinard suivie d'une zone plus pentue vers l'Est.

1.2 Contexte géologique

Lors du maximum de l'épisode glaciaire du Würm, les glaciers de l'Isère et de la Romanche fortement alimentés par les hauts sommets de Savoie et le massif des Ecrins sont venus obstruer la vallée du Drac pendant plusieurs milliers d'années (figure 3). Il s'en est suivi la formation d'un lac glaciaire d'environ 300 km^2 recouvrant une grande partie du Trièves [Huff, 1974]. Ce lac a été progressivement comblé par des argiles glacio-lacustres provenant de l'érosion des massifs montagneux avoisinants. Ce dépôt a recouvert le socle et les sédiments alluvionnaires anciens (pré-glacières) sur une épaisseur très variable de 0 à 200 m pour atteindre une cote maximale de 800 m. Après la fonte des glaciers, les cours des rivières se sont rétablis et ont incisé le matériel argileux. La topographie ainsi générée a entraîné l'apparition d'instabilités de terrain caractérisées par le glissement du matériel sédimentaire vers les cours d'eau concernés.

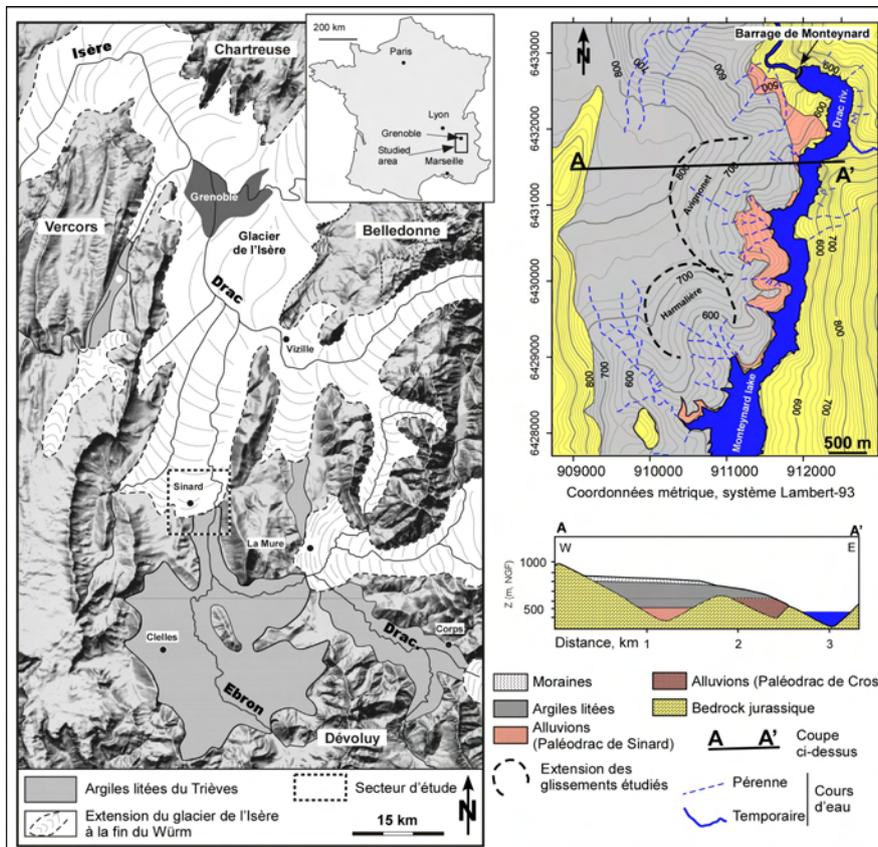


FIG. 3 – Localisation et géologie des glissements de terrain du Mas d'Avignonet et de l'Harmonièrre d'après Bièvre et al. [2008].

Le site d'étude est donc le résultat d'une succession d'érosions et de dépôts. Sa géologie (figure 3) est constituée par le socle Jurassique recouvert par des alluvions de l'ancien lit du Drac sur lequel s'est déposée une grande quantité d'argiles glacio-lacustres. Dans certains cas, ces argiles ont été recouvertes par des sédiments morainiques lorsque les glaciers terminaient leur course non loin du lac du Trièves.

1.3 Caractéristiques géophysiques du site

De récentes études [Bièvre et al., 2008] mettent à jour certains paramètres intéressants pour l'étude de la structure géologique et du comportement dynamique du glissement de terrain du Mas d'Avignonet.

1.3.1 Les images LIDAR

Le LiDAR (Light Detection and Ranging) est une méthode de télédétection au laser. Elle permet d'obtenir un modèle numérique de terrain très précis dans le but de mieux localiser les zones de déformation. Une campagne de mesures a été menée par hélicoptère en novembre 2006 et a permis d'obtenir une carte topographique des glissements d'Avignonet et de l'Harmalière [Kniess et al., 2008]. Les résultats sont présentés sur la figure 4 et seront utilisés par la suite pour lever des profils topographiques et pour mieux comprendre la morphologie du glissement.

1.3.2 Les mesures de bruit de fond et rapport spectral H/V

Une campagne de mesures de bruit de fond sismique à l'aide d'une station 3 composantes a été réalisée afin de déterminer la fréquence de résonance en chaque point par calcul du rapport spectral (H/V) [Lachet and Bard, 1994]. La fréquence de résonance est ainsi estimée en 75 points du site. Par la suite, l'utilisation d'une estimation de la vitesse des ondes S dans les argiles, couplée à la construction d'un modèle géologique 1D composé d'une couche de sédiments recouvrant un substratum rocheux a permis de déduire l'épaisseur des argiles pour chaque point de mesure tel que,

$$F_0 = \frac{V_s}{4H} \quad (1)$$

avec F_0 la fréquence de résonance V_s la vitesse des ondes S et H l'épaisseur des sédiments.

Enfin, par interpolation et en combinant rapport spectral et modèle numérique [Kniess et al., 2009] de terrain (issu de la campagne LiDAR), il est possible de cartographier la base des argiles dans les combes du Mas et de l'Harmalière (figure 4).

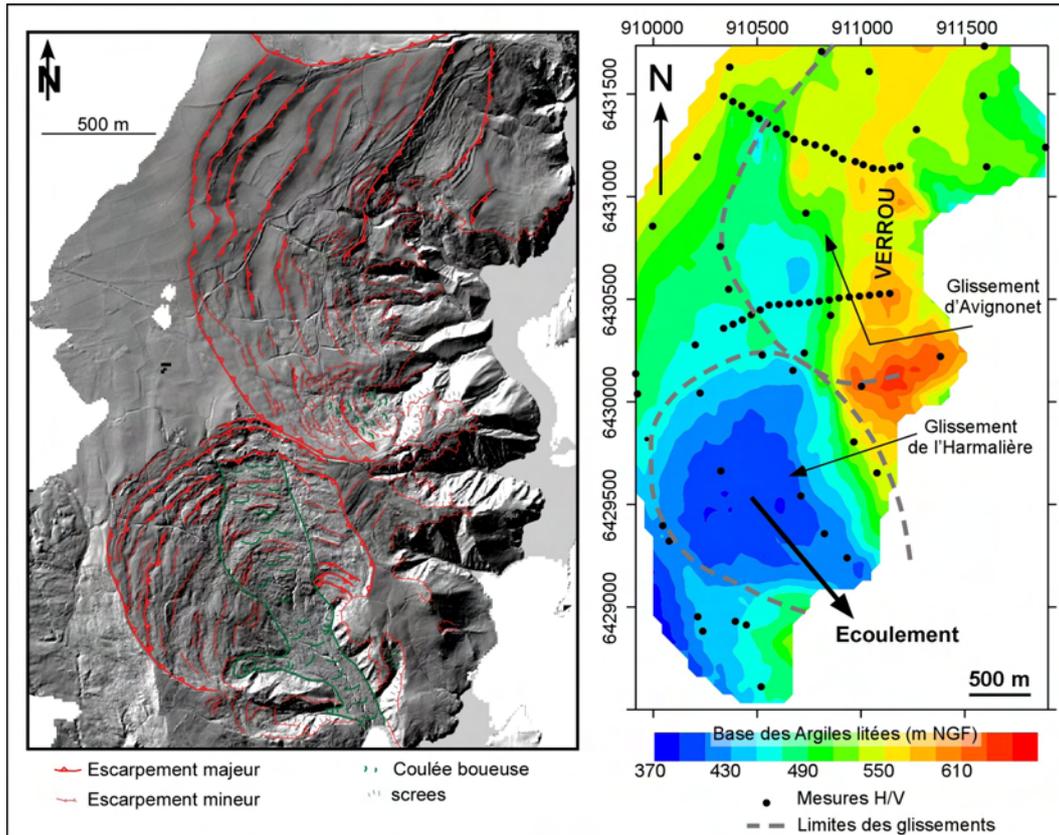


FIG. 4 – Modèle numérique de terrain issu de la campagne LiDAR (2006) et base des argiles [Bièvre et al., 2008]

Les deux cartes présentées figure 4 mettent à jour les différences entre les deux glissements. Nous remarquons que la base des argiles est plus élevée dans la partie basse de la combe du Mas (figure 4) car le substratum marno-calcaire y forme une ride surplombée par des sédiments alluvionnaires. Ces dépôts et déformations tectoniques sont absents dans la combe voisine, ils pourraient donc jouer le rôle de verrou et bloquer la propagation des surfaces de glissement les plus profondes. De ce fait, la combe d'Avignonet n'a pas évoluée en coulée boueuse comme cela a été le cas lors de l'événement de l'Harmalière en 1981.

1.3.3 Les surfaces de glissement et déplacements GPS

Les figures 5 et 6 présentent les études de déplacements menées par GPS sur une vingtaine de repaires géodésiques, les mesures d'inclinométrie ainsi que les profils sismiques et électriques réalisés dans la combe du Mas d'Avignonet.

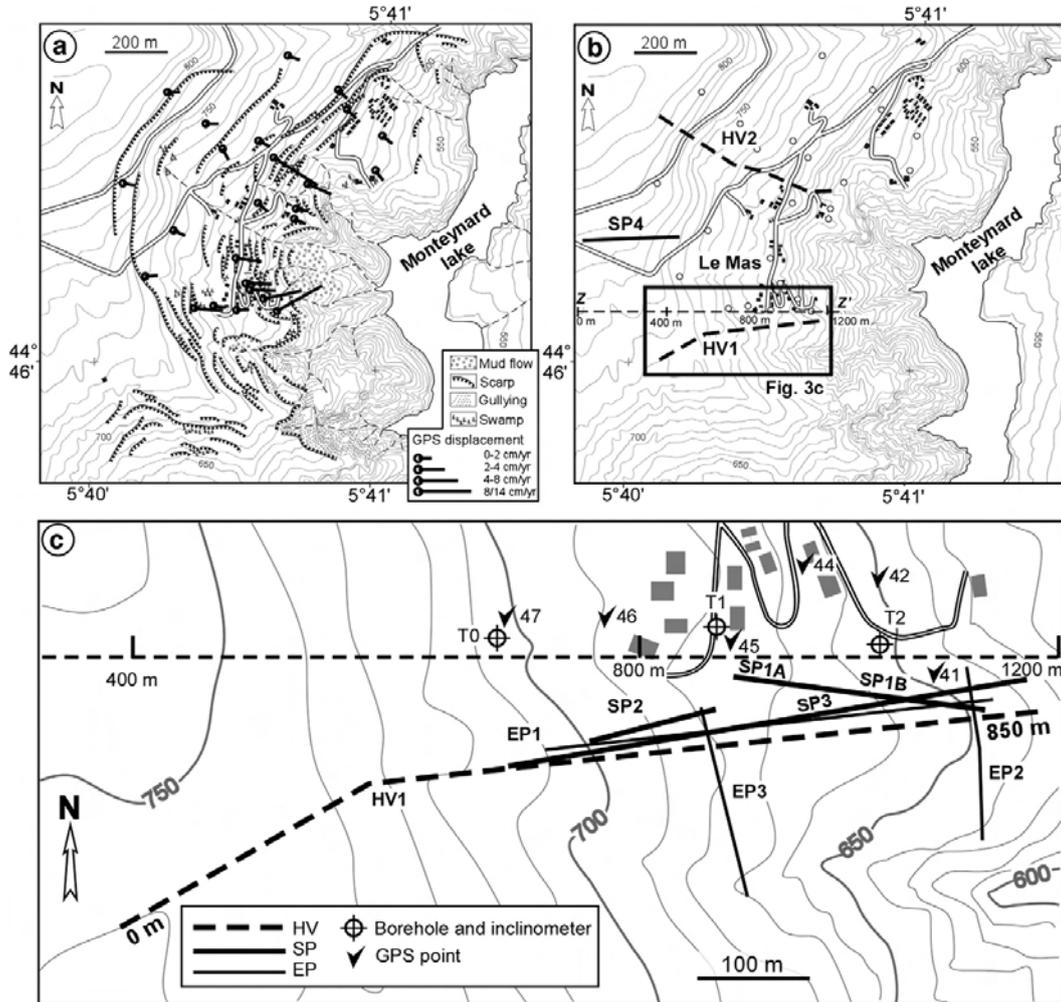


FIG. 5 – Carte du glissement de terrain d'Avignonet et localisation des instruments de mesures et des profils géophysiques réalisés (SP : profils sismiques, EP : profils électriques). a) Repères géodésiques et vitesses de déplacements déduites de campagnes de mesures GPS temporaires. b) Localisation du profil ZZ' présenté figure 6. c) Localisation des tubes d'inclinométrie et des points de mesures GPS [Jongmans et al., 2009].

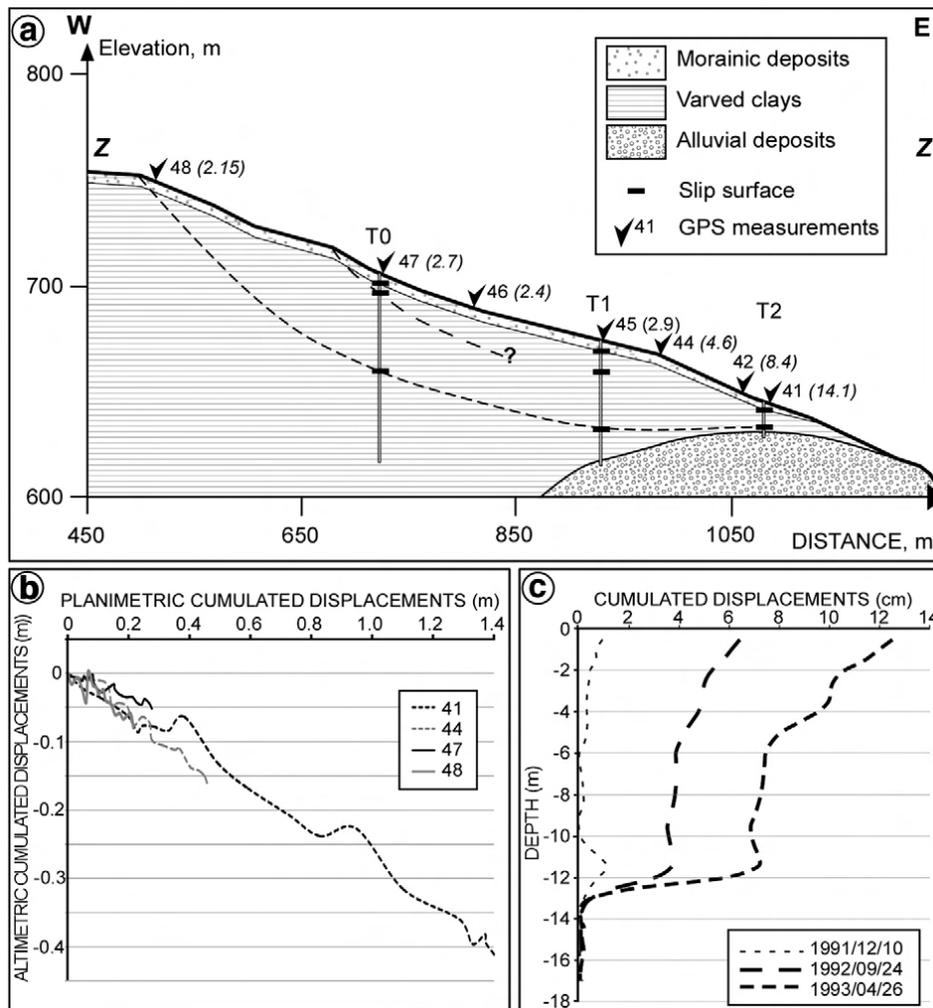


FIG. 6 – Profil ZZ'. a) Vitesses de déplacement mesurées par GPS (cm/an) et surfaces de glissement mises en évidence dans les tubes d'inclinométrie. b) Déplacement cumulé dans le plan vertical des points de mesures GPS 41, 44, 46 et 48 entre le 01/10/1995 et le 26/10/2005. c) Déplacement cumulé mesuré dans le tube d'inclinométrie T2, la courbe de référence a été mesurée le 10/04/1990 [Jongmans et al., 2009].

La pose de 3 tubes inclinométriques (T0-T1-T2) de 1985 à 1995 (figure 5 et 6) sur le glissement d'Avignonet a permis de mettre en évidence plusieurs surfaces de glissement [Requillard, 2004].

- T0 a traversé 83 m d'argiles avant d'atteindre un niveau de limon avec blocs et galets. Deux surfaces de glissement ont été relevées à 5.5 et 10.5 m de profondeur
- T1 a traversé 57 m de niveaux argileux avant de toucher les alluvions et a révélé une surface de glissement à 43 m.
- T2 a traversé 14,5 m d'argiles avant de toucher les alluvions, il a mis en évidence deux zones de cisaillement à 4 et 12 m de profondeur.

Les surfaces de cisaillement relevées dans les forages montrent des mouvements superficiels (environ 5 m) et des mouvements plus profonds à 10 et 43 m. Ce sont les mouvements les plus profonds qui constituent la plus grande menace car ils vont affecter une grande quantité de matériel.

D'autre part, entre 1995 et 2005 des mesures GPS temporaires (bi-annuelles) de repères géodésiques placés sur le site ont permis de calculer les vitesses de déplacement en surface sur une grande partie du glissement de terrain (figures 5 et 6). Le profil Z-Z' (figure 6) montre bien que les vitesses de glissement sont maximales dans la partie basse du glissement avec un déplacement de 14,1 cm/an contre 2,15 cm dans la partie haute. Ceci s'explique aisément par la morphologie de la combe qui constitue un goulot d'étranglement qui se rétrécit jusqu'à la cote 650 où les argiles laissent place aux alluvions.

Ces mesures confirment la cartographie des argiles, levée à l'aide des techniques LiDAR et H/V. En effet, la couche argileuse forme un biseau dont l'épaisseur diminue en partie basse de la combe.

1.3.4 Évolution de la vitesse des ondes S

Le traitement des profils sismiques, localisés figure 5, par des méthodes de tomographie en ondes SH et d'inversion en ondes de surface montre une baisse relative de la vitesse des ondes S à une profondeur de 5 m dans la partie Est du profil ZZ' (figure 7). De plus, lorsque l'on couple ces vitesses avec le taux de déplacements GPS mesuré le long du profil, nous remarquons que plus le déplacement est rapide plus les vitesses des ondes S sont faibles. Ceci s'explique par la déstructuration du matériel argileux sous les contraintes du glissement.

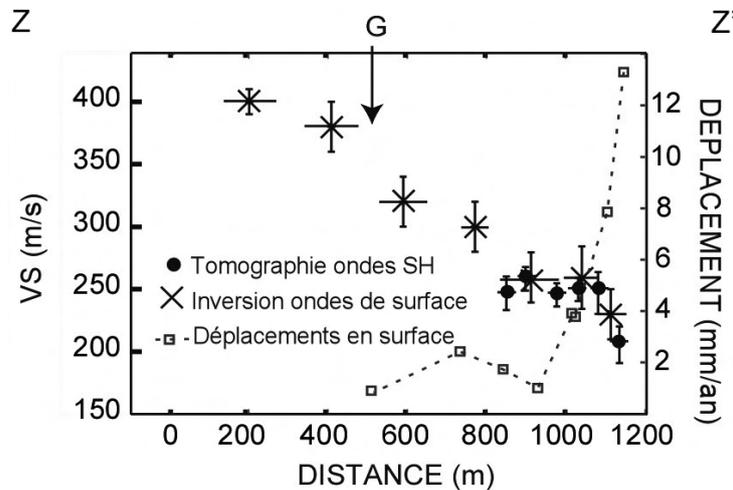


FIG. 7 – Vitesse des ondes S à 5m de profondeur le long du profil ZZ'. Elle est calculée par tomographie en ondes SH et par inversion en ondes de surface des profils sismiques présentés figure 5 [Jongmans et al., 2009]

Les profils en ondes S confirment la présence de mouvements superficiels (5 m de profondeur) déjà relevés par les mesures d'inclinométrie et montrent que la déformation est maximale dans la partie basse du glissement.

2 Les données météorologiques et suivi de la hauteur piézométrique des nappes

2.1 Météorologie

2.1.1 Instrumentation

Une station météorologique a été installée à proximité de la station GPS AVP2 (figure 2). Elle permet d'obtenir toutes les 30 minutes une mesure de toutes les variables météorologiques telles que la pluviométrie, la température, la vitesse et direction du vent etc. Il convient de préciser que le pluviomètre ne permet pas de prendre en compte les chutes et fonte des neiges qui sont des paramètres importants pouvant influencer sur le comportement du mouvement de terrain. Pour s'affranchir de ce problème nous utiliserons les hauteurs piézométriques des nappes.

2.1.2 Traitement des données

Les données de météorologie ne nécessitent pas de traitement particulier. Elle sont téléchargées depuis la station puis nous récupérons les informatisations nécessaires sous forme de fichiers texte de façon à pouvoir les traiter à l'aide du logiciel *Matlab*[®]. Nous nous contenterons de représenter la pluviométrie sous forme de courbes cumulées ou sous forme de graphiques de précipitations journalières. Nous utiliserons également les données de vitesses du vent ainsi que les températures dans le but de les comparer aux données de sismologie.

2.1.3 Résultats

Les mesures débutent au mois de janvier 2008 et se terminent fin octobre 2009.

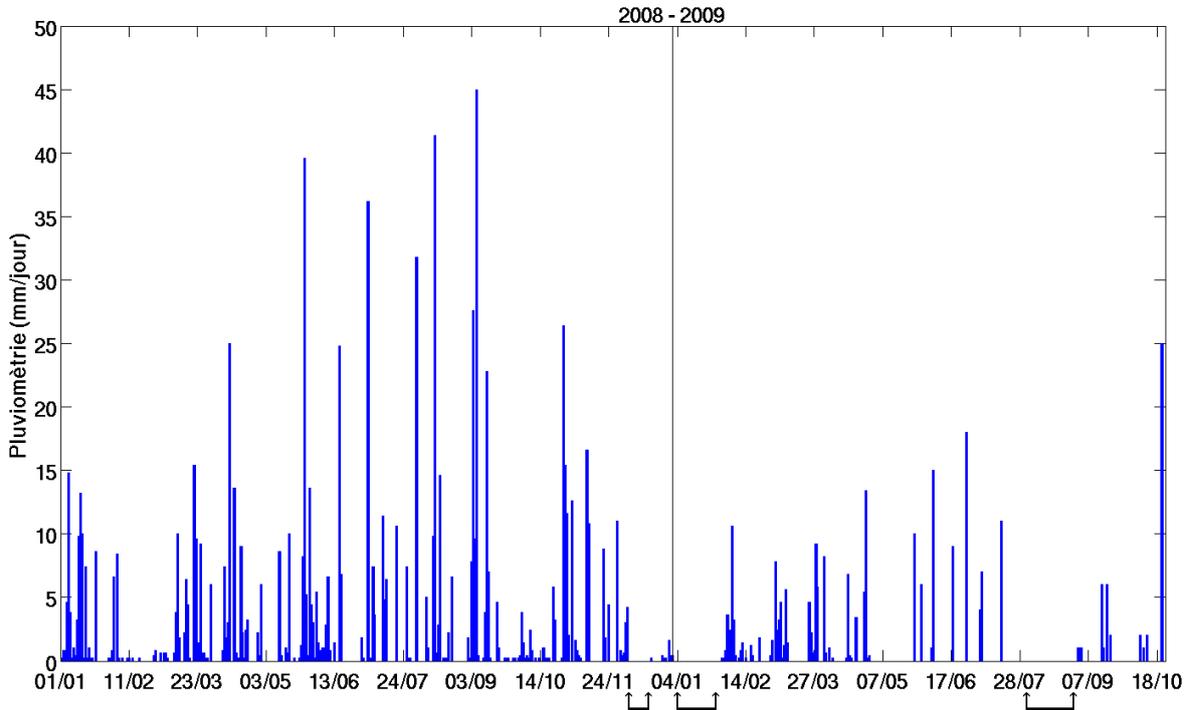


FIG. 8 – Pluviométrie mesurée à la station météorologique d’Avignonet. Les précipitations sont représentées en millimètres par jour, les flèches représentent les pannes de station et la barre verticale démarque le passage de l’année 2008 à 2009

Nous remarquons que les périodes hivernales sont caractérisées par de relativement faibles épisodes pluvieux alors que la période estivale est ponctuée par des événements orageux se traduisant par un apport d’eau important sur de courtes durées (figure 8). Nous remarquerons également que l’année 2009 présente un déficit annuel pluviométrique important par rapport à l’année 2008.

En raison de problèmes d’alimentation en énergie, la station météorologique est tombée en panne trois fois durant la période de mesures (figure 8) :

- du 6/12/2008 au 18/12/2008
- du 4/01/2008 au 27/01/2008
- du 01/08/2009 au 29/08/2009

2.2 Les données piézométriques

Le suivi des hauteurs de nappes est important dans l'étude des glissements de terrain car l'augmentation de la pression interstitielle des matériaux sous l'effet de précipitations ou de la fonte des neiges sont des facteurs pouvant influencer sur le déclenchement des mouvements de terrain [Flageollet et al., 1999].

2.2.1 Instrumentation

Deux forages situés dans la combe du Mas d'Avignonet ont été équipés de sondes CPI (figure 2) permettant le monitoring des nappes. La première sonde se situe à une profondeur de 5 m dans le forage sc_bas et la seconde à une profondeur de 47,5 m dans le forage sc_02 (figure 9). Ces deux forages sont situés à une cinquantaine de mètres des stations GPS AVP2 et météo.

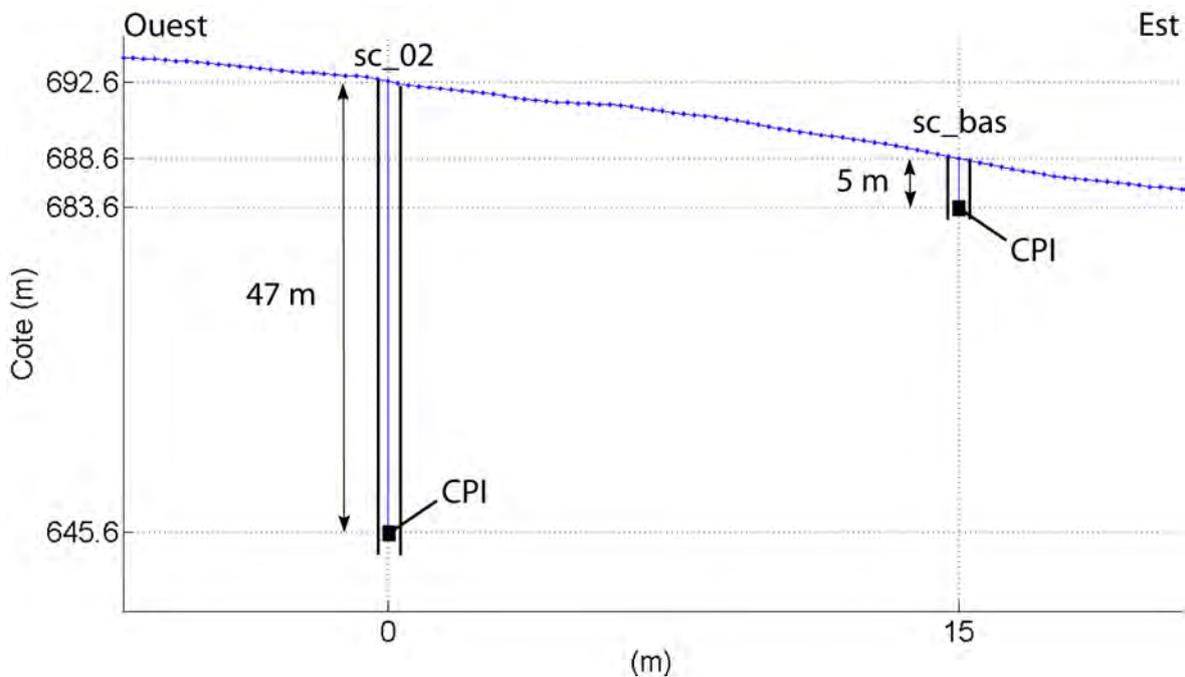


FIG. 9 – Instrumentation des deux forages sc_bas et sc_02. Leur localisation est présentée figure 2

2.2.2 Traitement des données

Nous disposons dans les deux forages, d'un relevé du niveau piézométrique toutes les 30 min pour sc_bas et toutes les 10 min pour sc_02. Les mesures débutent fin juillet 2008 et se terminent fin octobre 2009. Nous ajouterons les valeurs de la hauteur de nappe à la cote de la sonde de façon à obtenir directement la cote du toit de la nappe. Ceci permettra de représenter au mieux les fluctuations de niveaux liées aux phénomènes climatiques.

2.2.3 Résultats

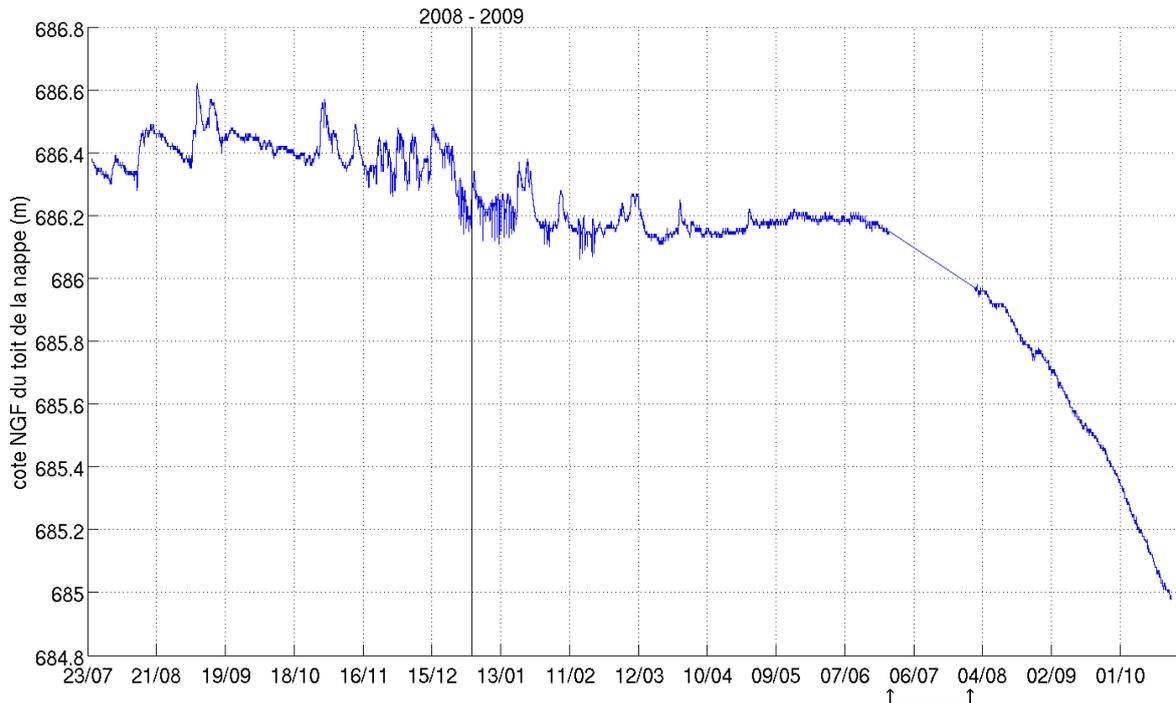


FIG. 10 – Données de piézométrie. Cote du toit de la nappe pour le forage sc_bas, la sonde est placée à 5 m de profondeur. Les flèches représentent les pannes de capteurs (entre le 26/06/09 et le 30/07/09)

Nous distinguons deux phénomènes importants concernant le comportement de la nappe superficielle (figure 10) :

Tout d'abord, nous remarquons une baisse du niveau moyen de la nappe à la fin de l'année 2008. La cote du toit passe d'une moyenne d'environ 686,4 m à une moyenne d'environ 686,2 m. Ensuite, à partir de juin 2009 une baisse de plus de 1,5 m du niveau de la nappe est observée. Dans ce cas, malgré un déficit de pluviométrie important, il convient de rester prudent car à partir de cette date le forage pourrait être drainé par des phénomènes de fissurations liées à l'activité du mouvement de terrain.

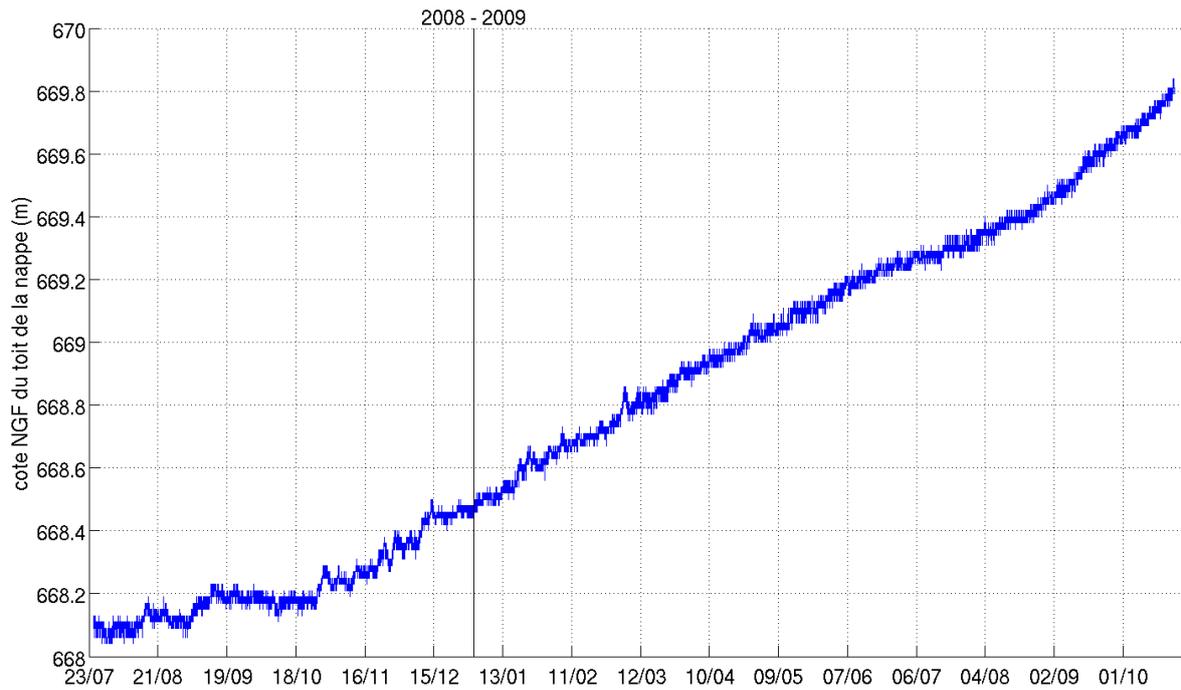


FIG. 11 – Données de piézométrie. Cote du toit de la nappe pour le forage sc_02, la sonde est placée à 47 m de profondeur.

Dans le cas de la nappe profonde (figure 11), nous observons une augmentation constante du niveau piézométrique à partir du 23/10/2008. Au vu des données pluviométriques et des cotes du toit de la nappe superficielle, ceci ne peut pas être représentatif du comportement réel de la nappe profonde mais révèle un problème d'infiltration à travers le tube de forage. En effet, en raison des contraintes qu'il subit, le forage a certainement été endommagé par les surfaces de glissement qu'il traverse. De ce fait, il pourrait y avoir une infiltration de la nappe la plus superficielle vers la nappe la plus profonde par l'intermédiaire du tube de forage.

2.3 Relations entre pluviométrie et hauteur de nappe

Les données de météorologie montrent que l'année 2009 subit un déficit de précipitations important. En effet, si l'on prend la période du 1 février au 1 octobre 2008 nous avons un cumul de précipitations de 670 mm alors qu'en 2009, pour la même période, on obtient 200 mm . Cette remarque est importante car la rhéologie des argiles est fortement influencée par la présence d'eau.

Lorsque l'on met en relation la hauteur de la nappe superficielle (située à environ 5 m de profondeur) et la pluviométrie (figure 12) on voit que chaque événement pluvieux a pour effet d'entraîner un chargement de la nappe. Nous remarquerons également que durant la période estivale, la pluviométrie est caractérisée par des événements orageux de courte durée mais apportant une forte quantité d'eau alors que durant la période hivernale les événements pluvieux sont de plus longue durée avec un apport moindre en eau. Ainsi, durant l'été, lorsque les argiles de surfaces seront faiblement saturées en eau, les précipitations auront tendance à ruisseler et l'infiltration vers la nappe se fera principalement par l'intermédiaire de la fissuration. D'autre part, en hiver, les argiles seront saturées en eau et auront tendance à conduire l'infiltration de façon plus homogène.

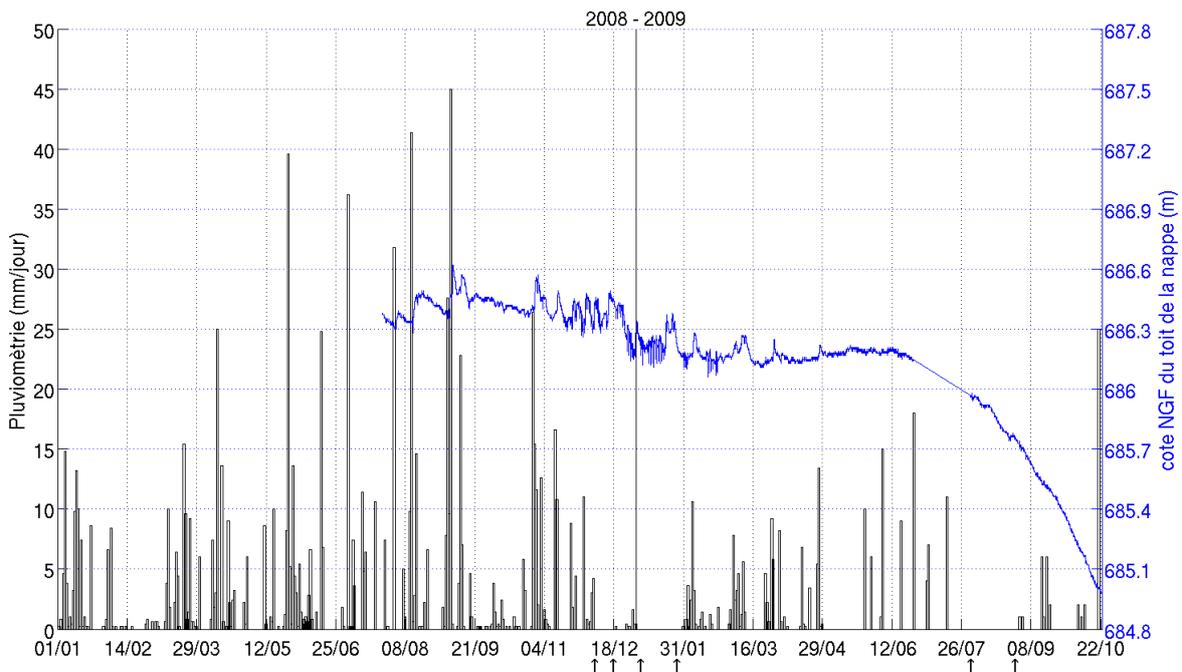


FIG. 12 – Données piézométriques et pluviométriques. Évolution de la cote NGF du toit de la nappe dans le forage sc_bas (la sonde CPI est placée à 5 m de profondeur) en fonction des précipitations journalières.

Le déficit pluviométrique observé en 2009 a donc pour effet d'entraîner une forte baisse de la nappe mais également de favoriser le ruissellement. Ainsi, les événements pluvieux de l'été 2009 n'ont quasiment aucun effet sur le chargement de la nappe car les argiles, très sèches, favorisent le ruissellement des eaux directement vers le lac de Monteynard.

3 Le GPS

3.1 Instrumentation

Trois stations GPS ont été installées dans la zone d'étude : AVN3 et AVP2 sont situées dans les argiles de la combe du Mas alors que AVR1 est située sur le socle rocheux, plus en altitude (figure 2). La station AVR1 a pour but de servir de station de référence. Les trois antennes sont placées sur un trépied reposant sur trois ancrages en béton enfouis à environ 1 m de profondeur. Les mouvements potentiels pouvant être enregistrés concernent donc un volume de matériel d'environ $1 m^3$. Nous avons vu qu'il existe potentiellement plusieurs surfaces de glissement à des profondeurs pouvant aller de 5 à 40 m. De ce fait, les déplacements enregistrés seront la somme cumulée de tous les glissements pouvant intervenir sur les différentes interfaces impliquées. L'alimentation des stations AVP2 et AVN3 se fait à l'aide de batteries et panneaux solaires alors que AVR1 est alimentée par des batteries reliées à un chargeur branché sur le secteur.

3.2 Traitement des données

Les données que nous utiliserons ont été préalablement traitées à l'aide du logiciel GAMIT [Herring et al., 2006]. Les positions des stations sont estimées par rapport à un réseau de 40 stations européennes permanentes selon la méthode des doubles différences. L'analyse se fait sur des sessions de 24 heures, pour lesquelles la position moyenne de la station est estimée. Des paramètres troposphériques sont estimés toutes les 2 heures à l'aide d'une fonction de projection troposphérique issue des modèles météorologiques de l'ECMWF (l'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). En plus, on s'affranchit au premier ordre des surcharges océaniques et atmosphériques à l'aide de modèles fournis par l'NCEP (National Centers for Environmental Prediction).

Nous utiliserons principalement l'évolution des composantes des lignes de bases locales car ceci permet d'éliminer de nombreuses sources d'erreurs telles que les paramètres troposphériques non résolus ou les erreurs liées à la construction du référentiel.

Notre jeu de données débute au mois de janvier 2008 et se termine en septembre 2009. Nous disposons ainsi d'une série temporelle avec une solution de positionnement par jour.

3.3 Résultats

Les séries temporelles montrent que la station AVR1 est relativement stable par rapport aux autres stations alpines (figure 28 en annexe) avec des déplacements de l'ordre du millimètre par an. Elle sera donc utilisée comme station de référence de façon à faire ressortir au mieux le signal lié au mouvement de terrain. Nous examinerons donc principalement l'évolution des composantes des lignes de bases des stations situées dans le glissement (AVN3 et AVP2) par rapport à la station de référence (AVR1) (figure 13).

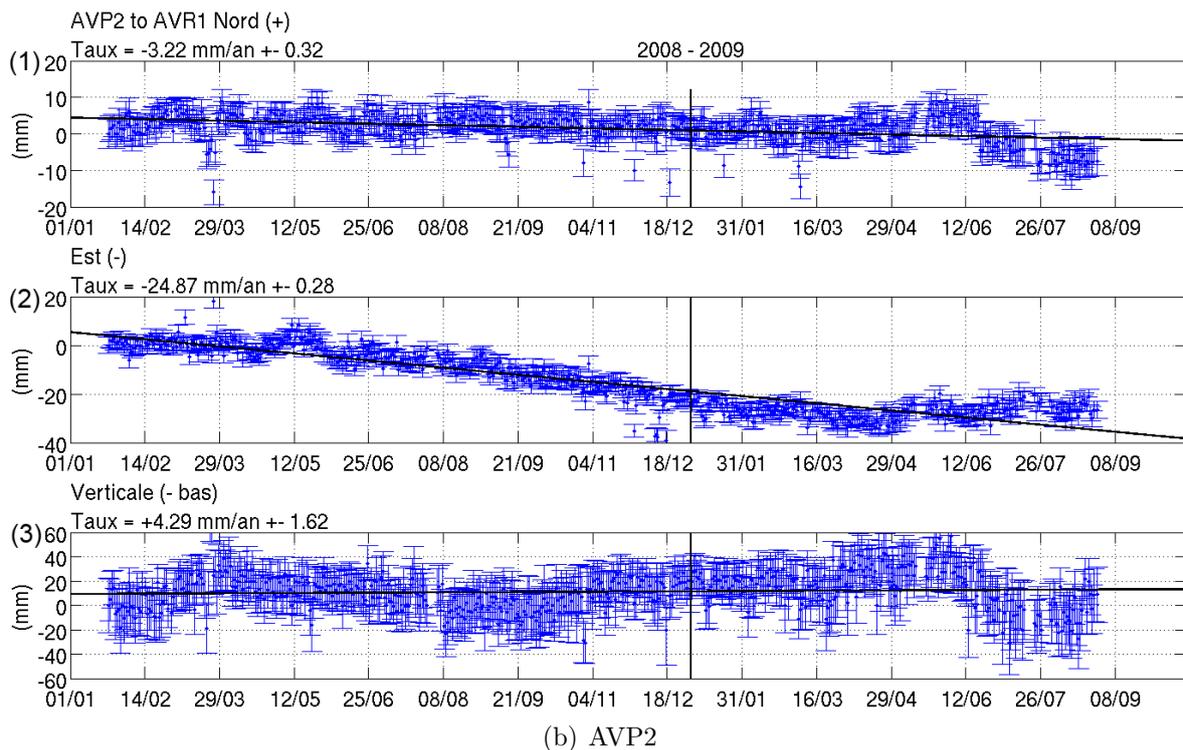
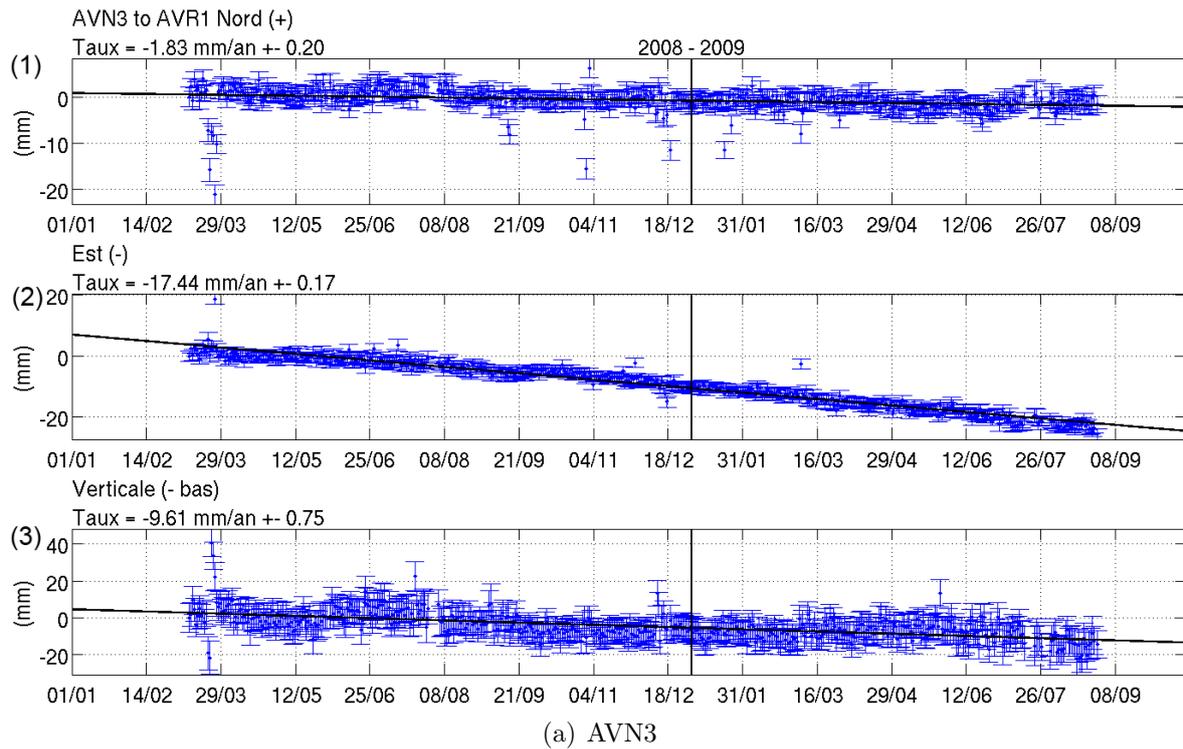


FIG. 13 – Données GPS, évolution des composantes Nord(1), Est(2) et Verticale(3) des stations AVN3(a) et AVP2(b) par rapport à la station de référence. La station AVR1 est supposée fixe et la première position calculée est placée à l'origine. Les vitesses de déplacements sont positives vers le Nord et négatives vers l'Est et le bas

La figure 13 montre le déplacement des stations AVN3 et AVP2 par rapport à la station de référence AVR1. La majeure partie du déplacement se fait vers l'Est (17,44 *mm/an* pour AVN3 et 24,87 *mm/an* pour AVP2) avec une légère composante vers le Sud (1,83 *mm/an* pour AVN3 et 3,22 *mm/an* pour AVP2).

L'évolution de la composante verticale (figure 13 (3)) des deux stations montre que AVN3 a tendance à descendre avec une vitesse de l'ordre de 9.61 *mm/an* alors que AVP2 remonte très légèrement d'environ 4.29 *mm/an*. Pour AVP2, la tendance mesurée sur la verticale n'est probablement pas représentative d'un mouvement réel car la barre d'erreur est importante par rapport à la vitesse de déplacement calculée. Néanmoins, elle permet de montrer que le déplacement se fait principalement horizontalement.

D'autre part, les déplacements verticaux semblent mettre en évidence un signal périodique d'ordre annuel. Celui-ci pourrait être d'origine hydrologique, c'est à dire en relation avec le gonflement et la rétraction des argiles en fonction de leur teneur en eau. Toutefois, la période d'observation n'est pas suffisamment importante pour pouvoir conclure.

Nous remarquons également que durant la période hivernale certains points sont éloignés de plusieurs dizaines de millimètres des droites de régression linéaire. Ceci s'explique par la présence de neige sur les deux antennes, celle-ci va affecter le signal GPS et réduire la précision du positionnement.

Nous remarquerons enfin que les séries temporelles de la station AVN3 semblent présenter un comportement beaucoup plus linéaire que AVP2. De plus, les niveaux de bruit sont plus élevés pour AVP2.

3.3.1 Déplacement latéral

De façon à mieux comparer le comportement des deux stations nous avons représenté l'évolution des composantes Est sur un même graphique.

La figure 14 nous montre que la station AVN3 subit un déplacement vers l'Est moins important que AVP2 mais beaucoup plus linéaire. La barre d'erreur moyenne pour chaque mesure montre que la solution de positionnement de AVN3 (± 1.6 *mm* en moyenne) est plus précise que celle de AVP2 (± 3 *mm* en moyenne). Ceci pourrait être dû à une moins bonne couverture satellitaire liée à la présence d'un masque. Comme indiqué précédemment les vitesses de déplacement calculées sont de l'ordre de 2,5 *cm/an* pour AVP2 et 1,7 *cm/an* pour AVN3.

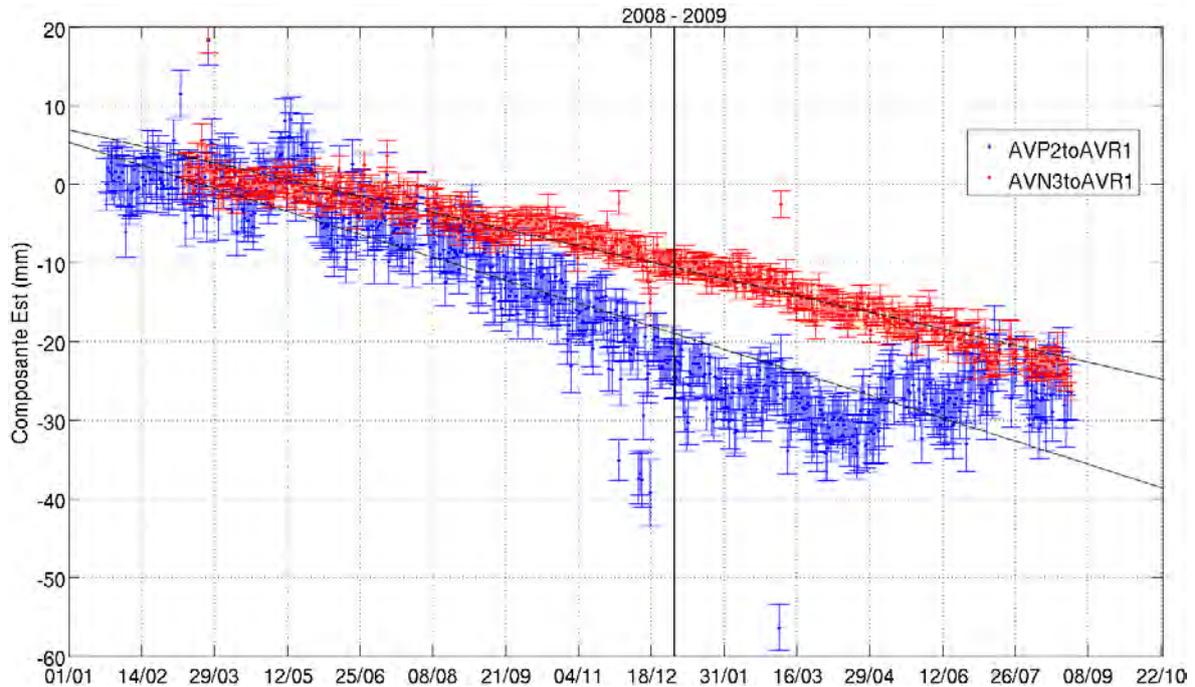


FIG. 14 – Données GPS, évolution de la composante Est des stations AVN3 et AVR1 durant les années 2008 et 2009

3.3.2 Déplacement dans le plan vertical

La figure 15 montre le déplacement des deux stations GPS dans le plan Est-Ouest-vertical. La pente de la droite de régression correspond à la pente moyenne des surfaces pouvant intervenir dans le glissement.

Pour la station AVN3, la relation entre la composante Est et la composante verticale est relativement bien linéaire avec une pente d'environ $0,5$ (soit environ $22,5^\circ$).

Par contre, dans le cas de AVP2 il n'y a plus de relation linéaire entre les deux composantes (figure 15) et la station a tendance à remonter très légèrement (pente d'environ $4,5^\circ$). De ce fait, contrairement à la station AVN3, AVP2 pourrait subir, à partir de début 2009, un mouvement de rotation se caractérisant par une stabilisation du mouvement latéral couplée à une légère remontée puis subsidence (figure 13). Ainsi, compte tenu de ce phénomène et de la barre d'erreur importante observée sur la composante verticale, la tendance linéaire calculée pour cette station n'est probablement pas représentative d'un comportement réel. Toutefois, elle permet de montrer que le mouvement se fait principalement horizontalement.

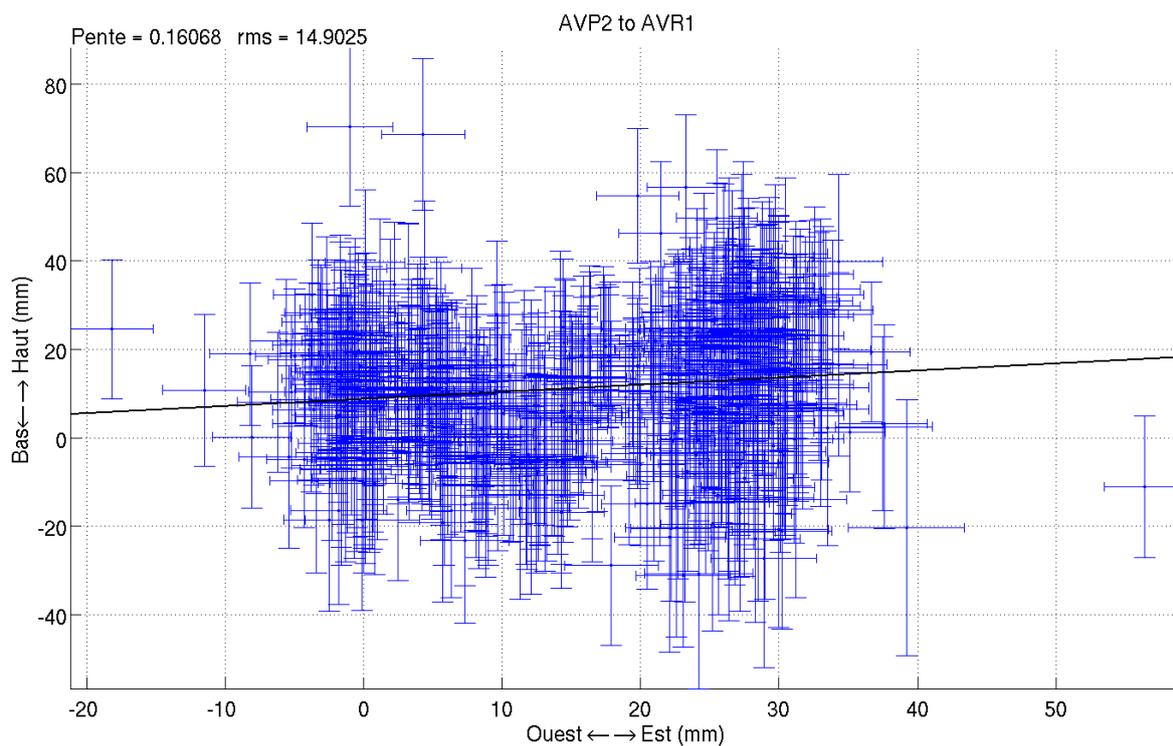
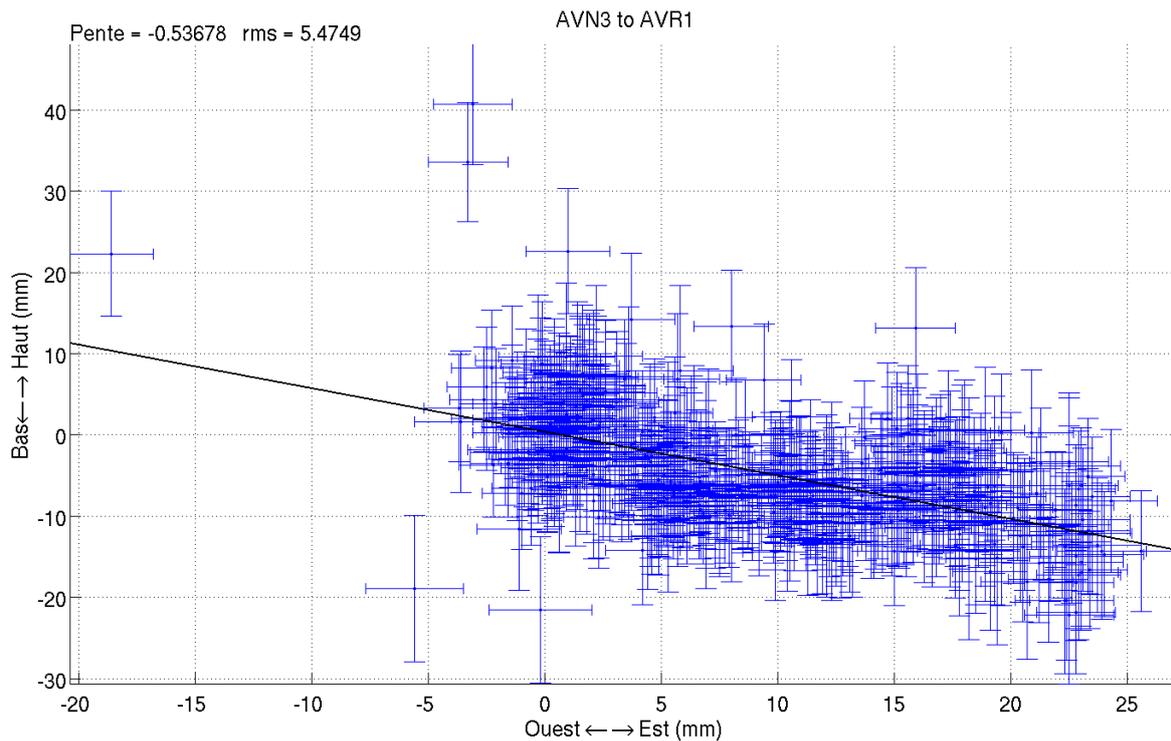
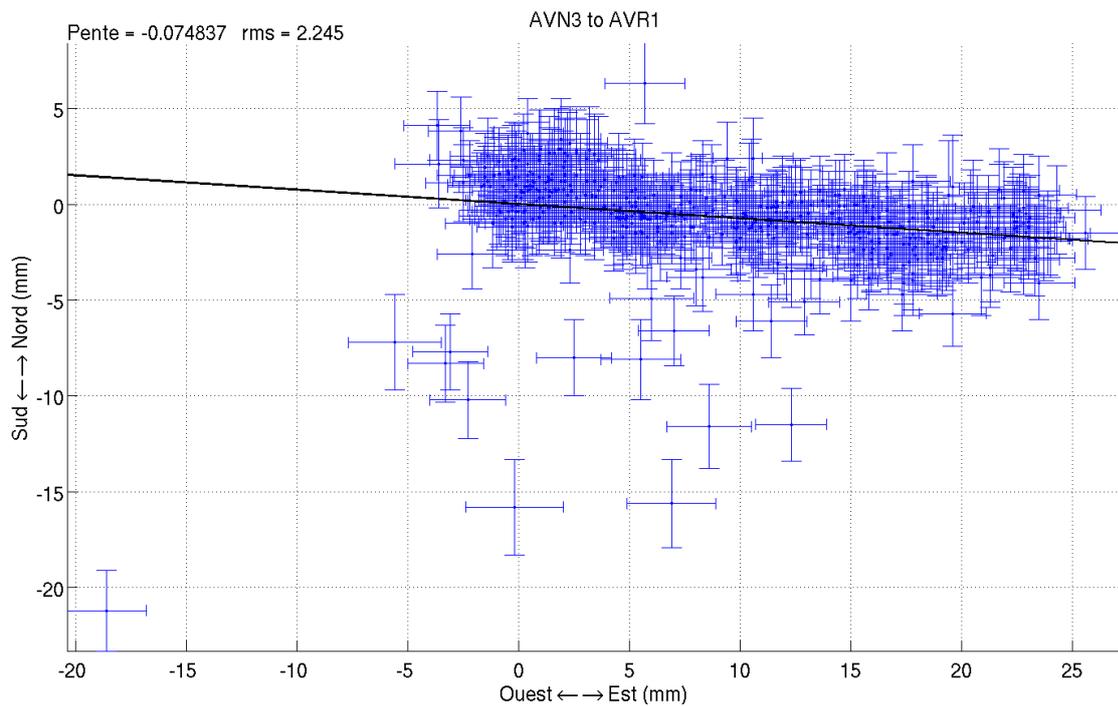
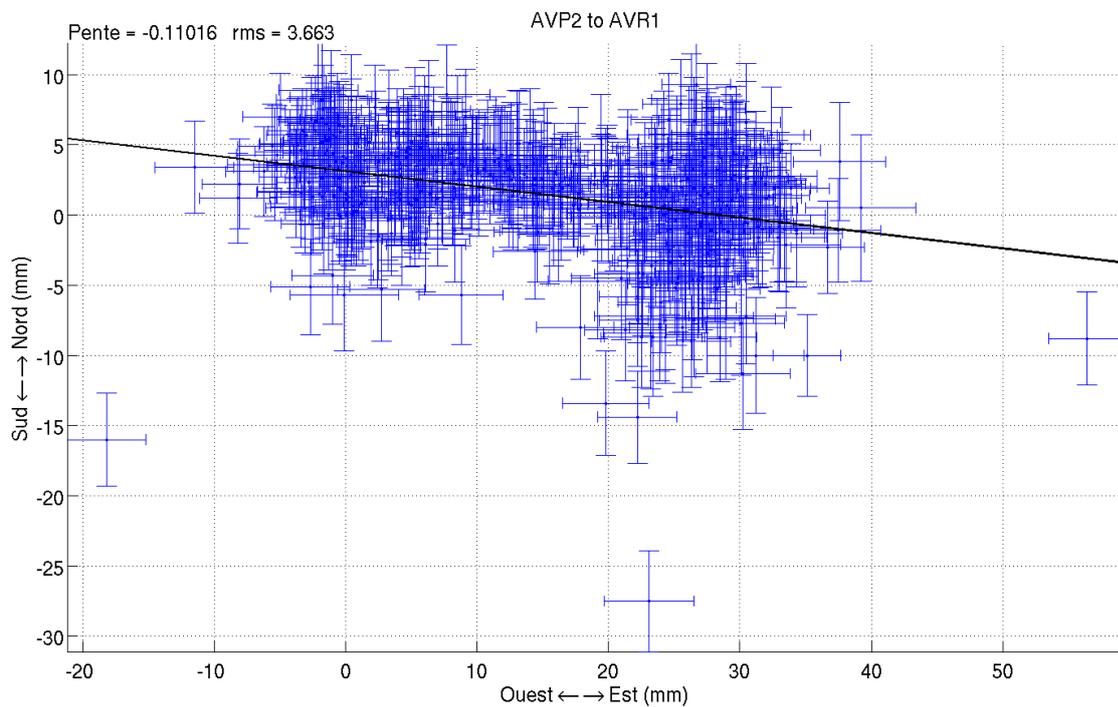


FIG. 15 – Données GPS, déplacement vertical des stations GPS AVP2 et AVN3. Le premier point de mesure est placé à l'origine et les déplacements sont négatifs vers le bas et positifs vers l'Est. La droite correspond à une régression linéaire sur le nuage de points

3.3.3 Déplacement dans le plan horizontal



(a) AVN3



(b) AVP2

FIG. 16 – Données GPS, déplacement horizontal des stations GPS AVP2 et AVN3. Le premier point de mesure est placé à l'origine et les déplacements sont négatifs vers le Sud et positifs vers l'Est. La droite correspond à une régression linéaire sur le nuage de points

De la même façon que pour le déplacement vertical, nous retrouvons un comportement bien linéaire de la station AVN3 dans le plan horizontal. Pour AVP2, il semble que le comportement est tout d'abord relativement linéaire puis affecté par le phénomène de rotation évoqué précédemment. D'autre part, les deux droites de régression linéaire nous donnent un déplacement principal vers l'Est des deux stations avec une très légère composante Sud ($\simeq 3^\circ$ pour AVN3 et $\simeq 5^\circ$ pour AVP).

3.4 Topographie et mouvements GPS

Afin de mieux comprendre les déplacements de AVP2 et AVN3 nous avons tracé deux profils topographiques à partir des données LiDAR. Ces profils sont orientés Ouest-Est et passent par les deux stations GPS (figure 17).

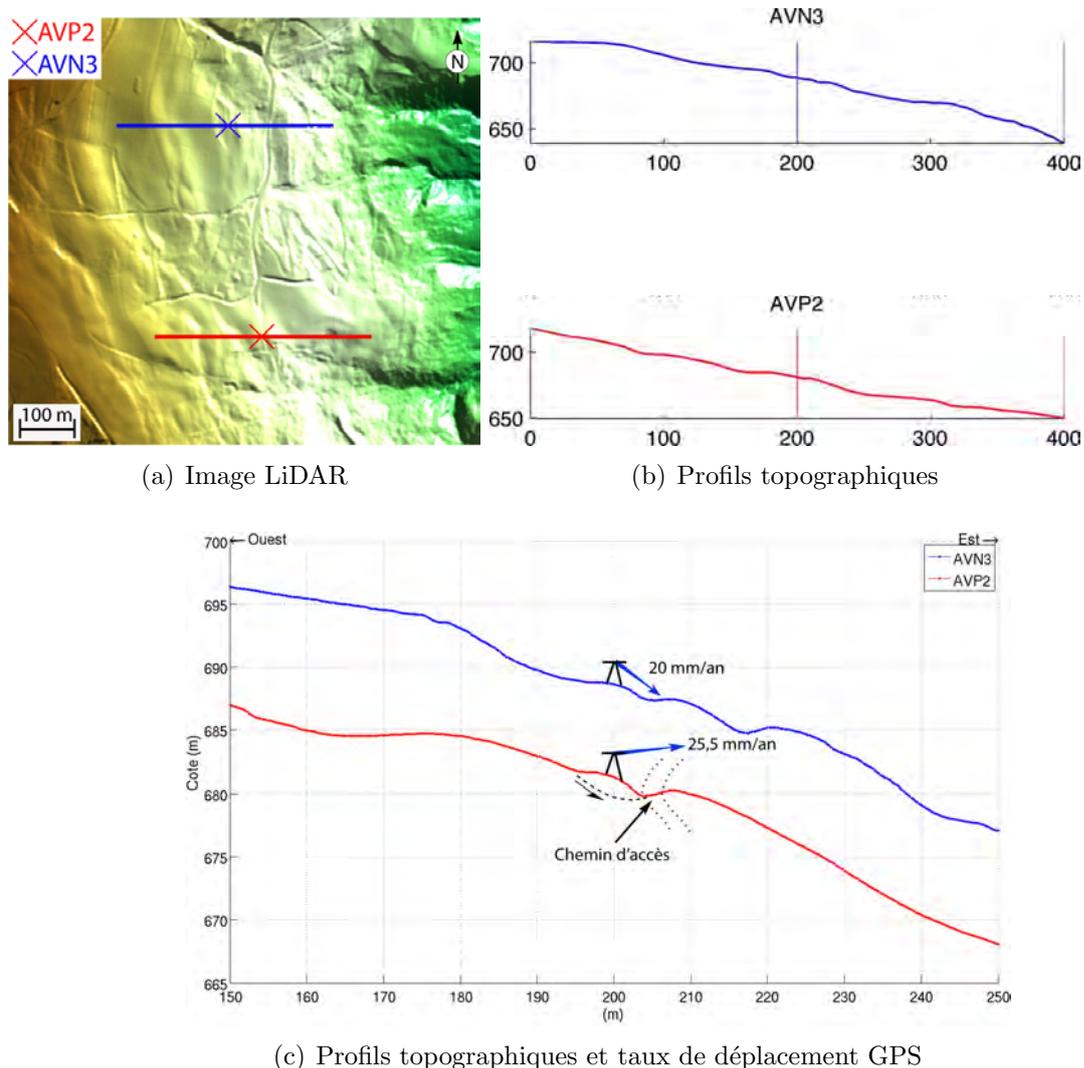


FIG. 17 – Profils topographiques échantillonnés à partir des données LiDAR et taux de déplacement total des stations GPS AVN3 et AVP2 représenté dans le plan Est-Ouest-Vertical. L'inclinaison des vecteurs correspond à l'orientation moyenne du déplacement vertical sur la totalité des données disponibles.

La zone située au Sud du profil AVP2 (figure 17 (a)) semble affectée par des déformations de plus faible longueur d'onde qu'à AVN3. De plus, les profils topographiques montrent que AVP2 est installée sur la rupture de pente du talus qui longe un chemin d'accès aux cultures agricoles. En couplant ces observations avec les mouvements de rotation observés précédemment à la station AVP2, on peut supposer que la station AVP2 est affectée par des instabilités de surface absentes à AVN3 (figure 17 (c)). Comme remarqué précédemment, en raison de la barre d'erreur importante sur la composante verticale de AVP2, il convient de rester prudent quant à l'orientation du vecteur déplacement de la station (figure 17 (c)).

3.5 Météorologie et mouvements GPS

Certaines études [Malet et al., 2002] ont permis de montrer que la combinaison de données GPS avec des données météorologiques pouvaient apporter de précieuses informations pour la compréhension du comportement des mouvements de terrain. Nous allons donc tenter de mettre en relation météorologie et déplacements GPS mesurés. Pour ce faire, nous avons tracé en parallèle les données météorologiques et les déplacements GPS Est-Ouest (figure 18).

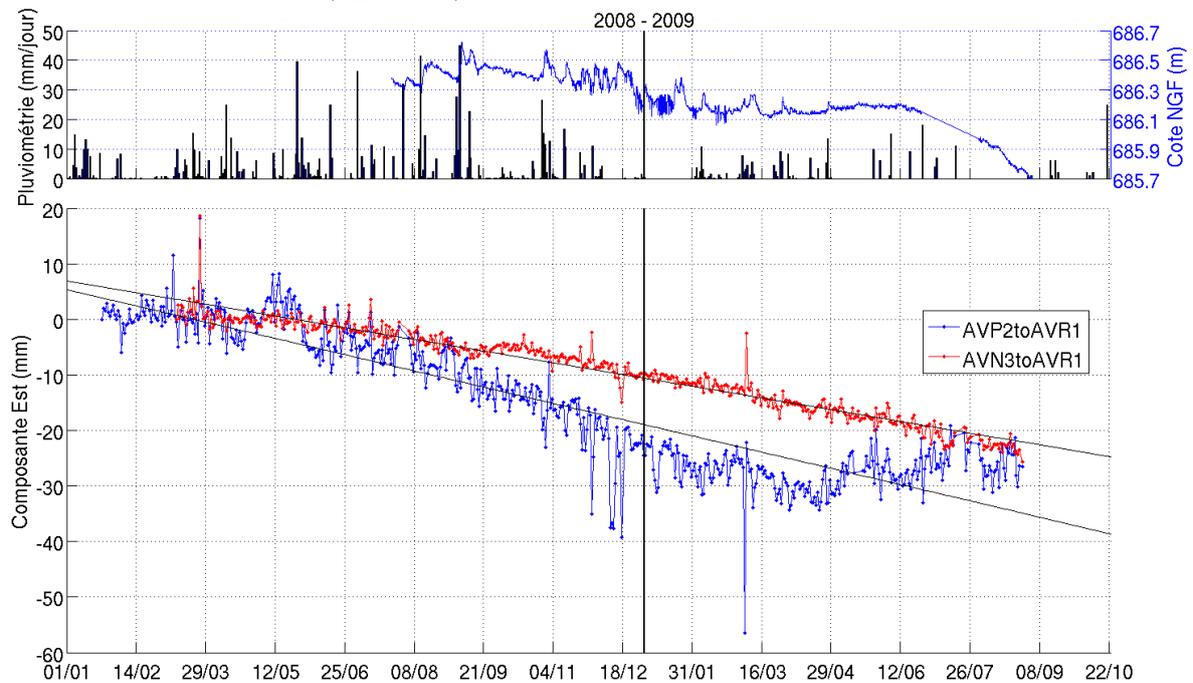


FIG. 18 – Données GPS, pluviométriques et piézométriques. Cote du toit de la nappe dans le forage sc_bas (5m de profondeur) comparée au déplacement latéral (Est-Ouest) des stations AVN3 et AVR1. La barre verticale correspond au passage de l'année 2008 à 2009.

Les très faibles vitesses de glissement ainsi que la précision du positionnement sur des sessions de 24h ne permettent pas de mettre en relation des événements pluviométriques de courte durée (quelques jours ou semaines) avec des variations de comportement dans le déplacement. En effet, pour de faibles durées d'observation les variations de vitesses de déplacements sont noyées dans le bruit de fond.

A plus grande échelle, comme remarqué précédemment, l'année 2009 est caractérisée par un déficit pluviométrique important (figure 12). Ce phénomène se traduit sur les hauteurs de nappe par une baisse critique du niveau piézométrique à la fin de l'année 2008 (fin décembre à début janvier). Après cette date, la nappe ne pourra plus atteindre son niveau moyen antérieur. Si l'on fait le parallèle avec le déplacement mesuré sur la composante Est, nous remarquons que cet événement correspond à une stabilisation du déplacement de la station AVP2 alors qu'il ne semble pas avoir d'influence sur le comportement de AVN3.

On pourrait donc expliquer l'influence sur AVP2 des variations des hauteurs de la nappe située à 5 m de profondeur par la présence de surfaces de glissement plus superficielles qu'à AVN3.

3.6 Conclusion préliminaire

Les vitesses de déplacement totales (Nord-Est-Verticale) sont reprises sur les figures 19 et 17 (c).

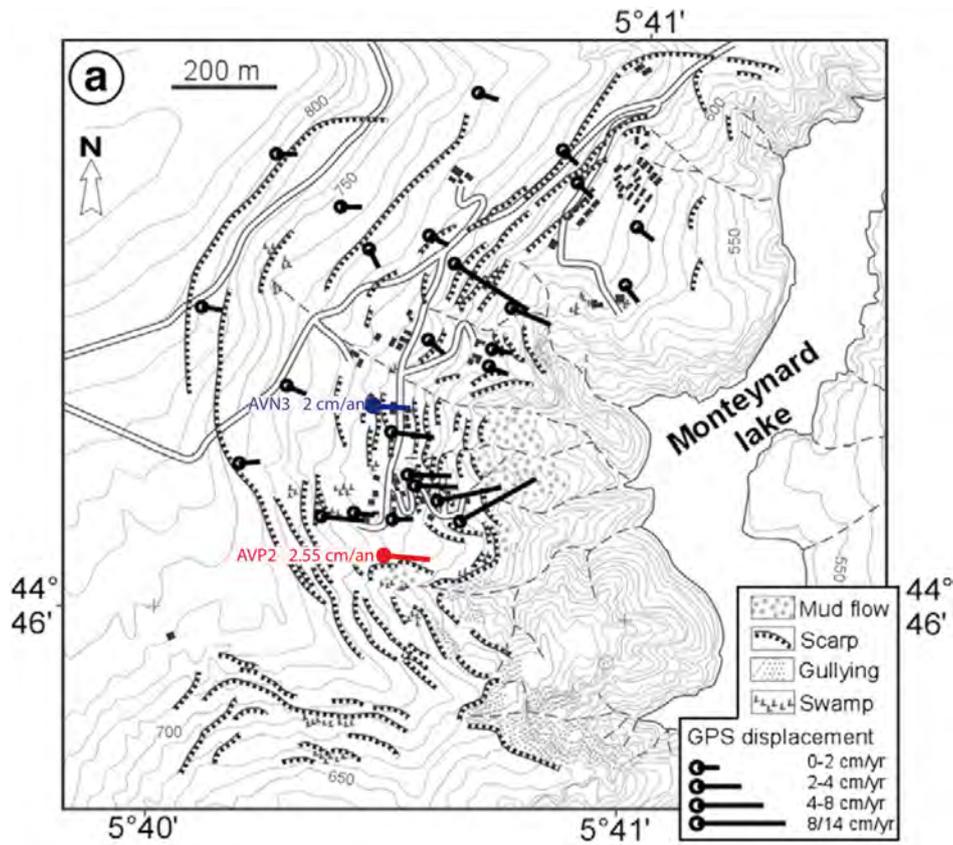


FIG. 19 – Données GPS, déplacement total des stations GPS permanentes AVN3 et AVP2 comparé aux mesures GPS temporaires. L'orientation des vecteurs correspond à l'orientation moyenne du déplacement horizontal sur la totalité des données disponibles d'après Jongmans et al. [2009].

Les vitesses de déplacement que nous avons calculées sont concordantes avec les résultats des campagnes GPS temporaires (bi-annuelles) menées sur les repères géodésiques. En effet, l'amplitude du déplacement ainsi que l'orientation des vecteurs des stations AVP2 et AVN3 sont très similaires avec les résultats obtenus sur les repères avoisinants (figure 19) .

Au vu des résultats obtenus précédemment, nous pouvons affirmer que la station GPS AVP2 subit un mouvement principalement horizontal pouvant être affecté par de légers phénomènes de rotation alors que la station AVN3 présente un déplacement linéaire dans le plan Ouest-Est-Vertical.

D'autre part, nous avons pu mettre en relation les variations de la hauteur de nappe superficielle avec des modifications de la tendance du déplacement mesurée à AVP2. En couplant ces résultats avec la topographie observée aux alentours des deux stations et les surfaces de glissement mises en évidence par inclinométrie, nous pouvons supposer que la station AVP2 subit principalement des déformations superficielles situées à environ 5 m de profondeur alors que AVN3 se déplace en raison de surfaces de glissement plus profondes situées à environ 5 m ou 45 m de profondeur.

Nous remarquerons également que les faibles vitesses de déplacement issues des solutions de positionnement sur 24h ne permettent pas de mettre en relation des événements pluviométriques de courte durée avec des modifications dans le comportement du déplacement.

4 Sismologie du site

4.1 Instrumentation

Trois stations sismologiques trois composantes ont été installées sur le site d'étude (figure 2). La première, AVR, est située au même endroit que la station GPS de référence (AVR1) c'est à dire sur le socle rocheux en dehors de la zone affectée par le mouvement de terrain. Les deux autres stations se situent dans la combe du Mas. AVM est installée dans une maison du lotissement et AVP dans un champ non loin de la station GPS AVP2. La maison qui abrite AVM a été expropriée après l'apparition de larges fissures dans sa structure témoignant de l'activité du mouvement de terrain.

4.2 Traitement des données

Nous disposons de données sismologiques pour les trois stations entre l'année 2008 et 2009. Ces données sont sous forme de fichier SAC d'une durée d'environ 1h. Elles nous serviront principalement pour le calcul de l'énergie sismique et pour pointer d'éventuels événements sismologiques. Le but principal est d'estimer l'influence du glissement de terrain sur la sismicité. Pour chacun des traitements nous filtrerons préalablement les données de façon à conserver uniquement les fréquences comprises entre 0.1 et 45 Hz. Certaines données sont polluées par des problèmes de capteurs (sauts, offset..). Nous avons pallié à ce problème en supprimant le fichier SAC concerné de nos calculs. Le traitement des données sismologiques se fera à l'aide du logiciel *Matlab*®.

4.2.1 Calcul de l'énergie sismique

L'énergie sismique (E_s) correspond à l'intégrale de la vitesse d'oscillation ($V(t)$) au carré. Le calcul se fera sur toute la durée (d) de l'enregistrement (environ 1h par fichier SAC) nous permettant d'obtenir une valeur toutes les heures pour les 2 années concernées.

$$E_s = \int_d V^2(t) dt \quad (2)$$

L'énergie ainsi calculée sera représentée en cumulé sur la période d'observation concernée de façon à pouvoir aisément mettre en valeur d'éventuels sauts et augmentations d'énergie.

4.2.2 Suivi du contenu spectral

Pour suivre l'évolution du contenu spectral pour chaque station, nous avons calculé le spectre de Fourier pour chacun des fichiers SAC puis nous avons représenté, sous forme d'échelle de couleur, le spectre d'amplitude normalisé par la valeur maximale sur la durée d'observation. Les données sont également filtrées entre 0,1 et 45 Hz.

4.3 Résultats

4.3.1 Les courbes d'énergie sismique

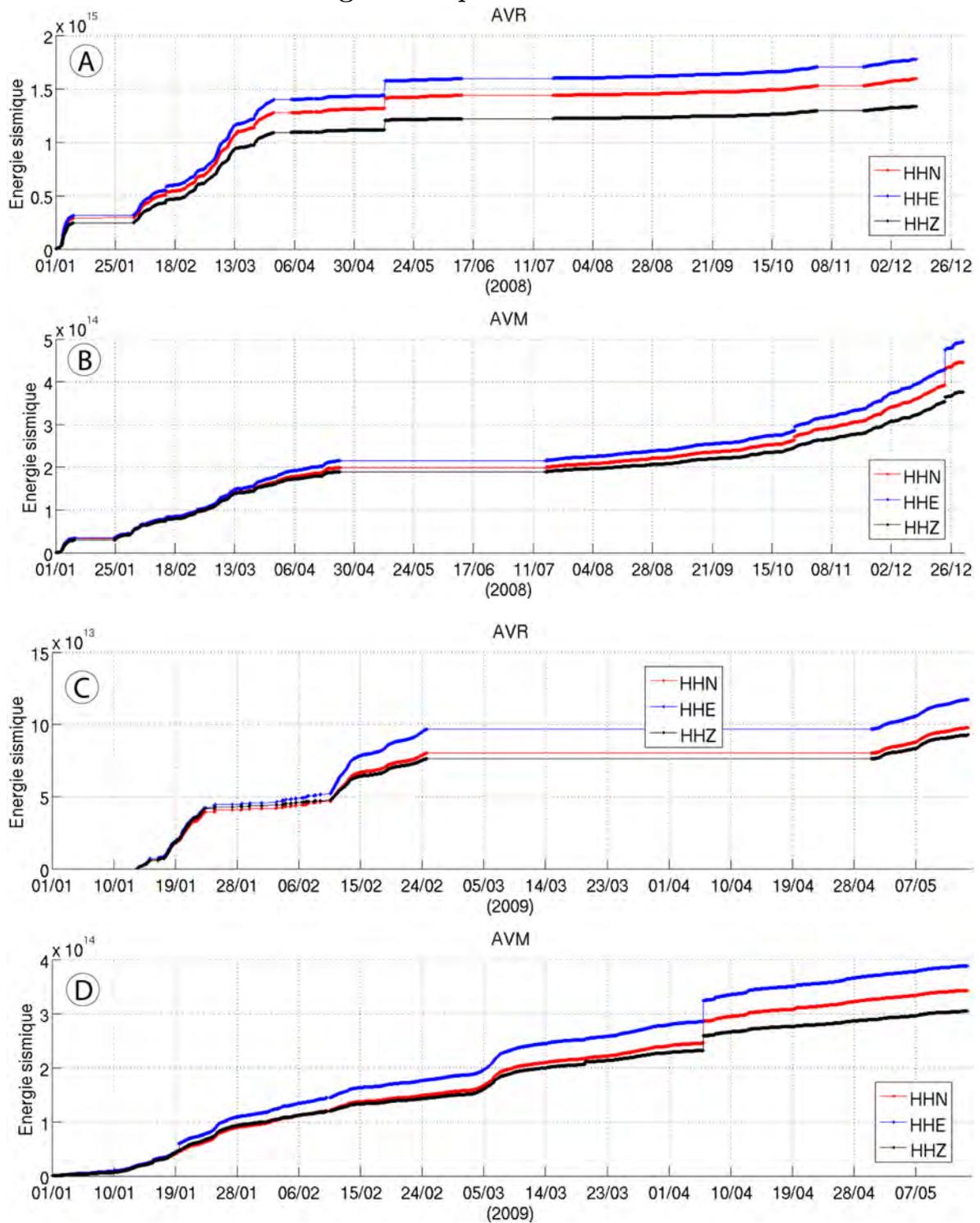


FIG. 20 – Données sismiques, énergie sismique cumulée sur les années 2008 et 2009 aux stations AVR (a) et (c) et AVM (b) et (d). Les composantes Nord, Est et verticale (respectivement HHN, HHE, HHZ) sont représentées.

La figure 20 montre les courbes d'énergie sismique calculées sur les trois composantes des stations AVM et AVR. Il existe un certain nombre de trous dans les données pour des périodes de quelques heures à quelques mois. Ceci s'explique par des travaux de maintenance sur le matériel ou des problèmes d'alimentation liés à la batterie ou au panneau solaire.

L'évolution de l'énergie sismique est ponctuée de sauts d'énergie et de périodes avec un apport en énergie plus ou moins important. Ce sont ces phénomènes que nous allons étudier pour tenter d'identifier un éventuel signal sismique lié au mouvement de terrain.

4.3.2 Évolution du contenu spectral

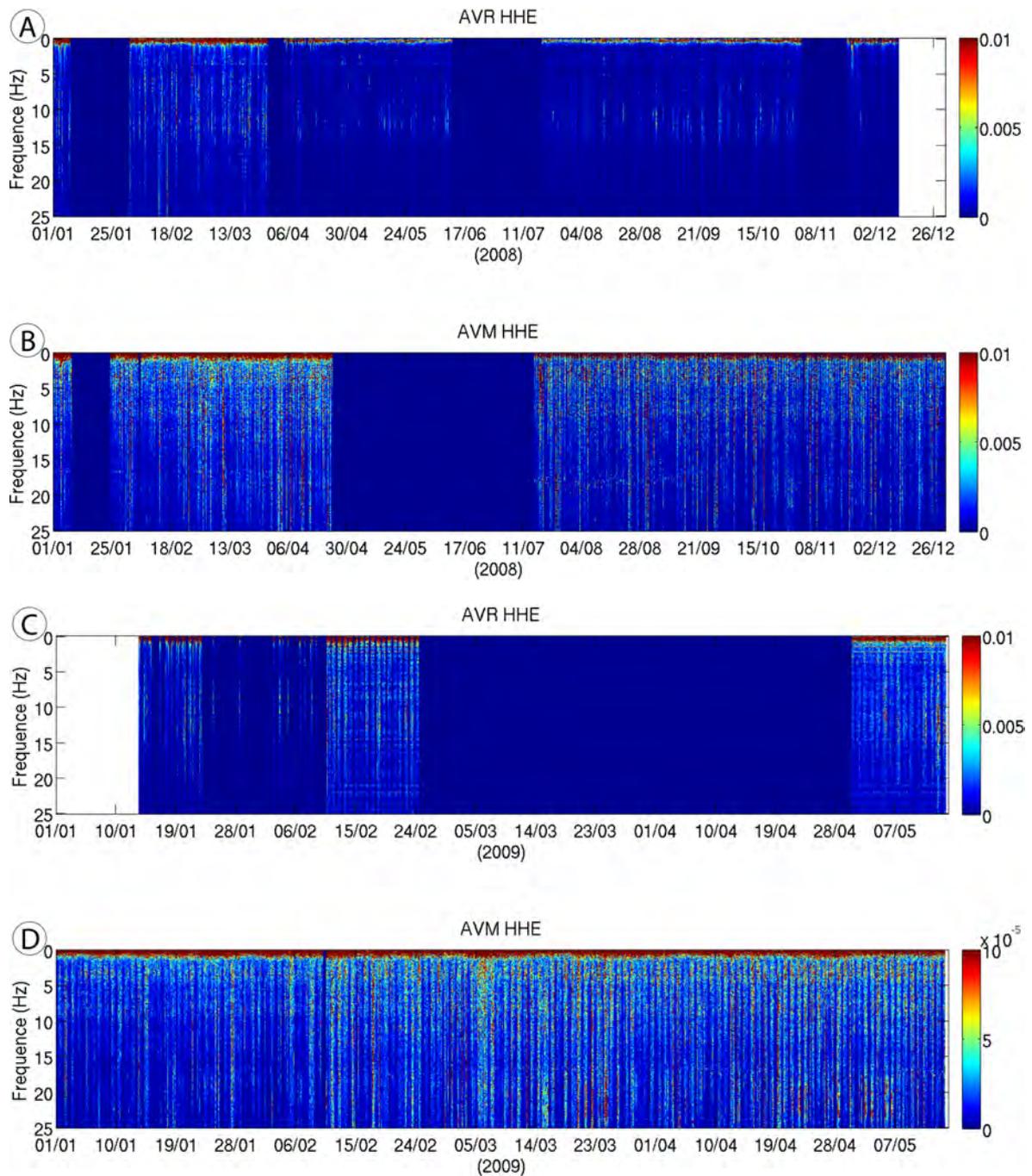


FIG. 21 – Données sismiques, évolution du contenu spectral des signaux enregistrés sur la composante Est des stations AVR (a) et (c) et AVM (b) et (d) pour les années 2008 et 2009.

La figure 21 montre l'évolution des spectres de la composante Est aux stations AVM et AVR pour les années 2008 et 2009. Nous avons sélectionné cette composante car c'est elle qui reçoit le plus d'énergie, elle sera également utilisée par la suite pour comparer les données enregistrées aux deux stations AVR et AVM. Nous jouerons sur l'échelle de couleur pour faire ressortir les contrastes présents dans différentes gammes de fréquences. A première vue, nous remarquons que la majeure partie de l'énergie reçue par les stations est répartie sur les basses fréquences (entre 0 et 1 Hz).

4.4 Analyse des courbes d'énergie sismique

Le but principal de ce travail est d'évaluer si le glissement de terrain génère des signaux sismiques. Nous avons donc comparé l'énergie sismique mesurée par la station sismique AVR (station de référence) avec celle mesurée à AVM (station située dans le glissement). De façon à disposer simultanément de données aux deux stations, nous avons sélectionné la période du 18/07/2008 au 1/11/2008 (figure 20(a)) que nous avons ensuite divisée en périodes plus courtes d'une durée moyenne de 1 mois (figures 30 , 31 et 32 présentées en annexes). Nous avons ensuite procédé à l'analyse des courbes et nous avons distingué deux types de perturbations : des sauts d'énergie et des périodes d'augmentation progressive de l'énergie sismique.

4.4.1 Les sauts d'énergie

La figure 22 présente des exemples de sauts d'énergie pointés sur la période du 20/09/2008 au 10/10/2008. Chaque point de la courbe d'énergie correspond à l'intégrale de la vitesse d'oscillation au carré enregistrée dans un fichier SAC d'une durée maximale de 1 heure. Un saut d'énergie correspondra donc à un apport d'énergie sur une durée maximale de 1 heure et sera représenté sur la courbe par la présence d'un créneau.

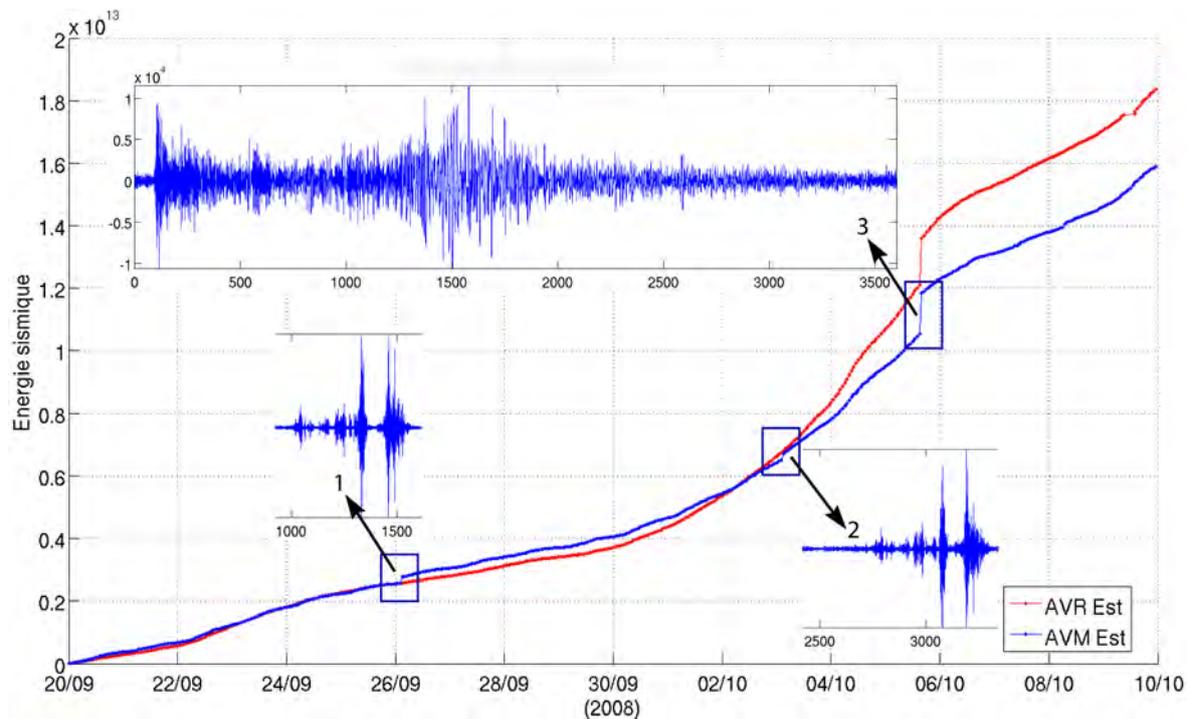


FIG. 22 – Données sismiques, exemple de sauts d'énergie sur la période du 20/09/2008 au 10/10/2009. Les extraits de sismogrammes ont été enregistrés par la composante Est de la station AVM. Les données complètes sont disponibles en annexes. L'événement 3 est un séisme de magnitude $M_s=6.9$ qui s'est produit au Tadjikistan.

De façon à définir l'origine de ces perturbations, nous avons créé un programme *Matlab*[®] permettant de remonter aux sismogrammes en pointant les sauts d'énergie directement sur la courbe. Nous avons mis en évidence 26 événements sismiques sur la période du 18/07/2008 au 1/11/2008 (figures 30 , 31 et 32 en annexes). Nous avons ensuite distingué 19 sauts d'énergie propres à la station AVM (station située dans le glissement) et 7 sauts d'énergie enregistrés simultanément à AVR et AVM.

Les perturbations propres à AVM correspondent aux événements 1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 17, 21, 22, 23, 24 et les perturbations présentes aux deux stations correspondent aux événements 2, 4, 13, 15, 19, 20, 25, 26 présentés figures 33 , 34 ,35 , 36 37 (en annexes).

Nous remarquons que les événements propres à AVM se produisent tous entre 6 et 9 heures du matin (heures GMT), ils sont de formes similaires et se déroulent sur une durée d'environ 500 secondes. La succession de 4 pulses semblables (figure 22 événements 1 et 2) suggère que ces signaux résultent d'une activité anthropique régulière et systématique. Ceci est appuyé par le fait que la station AVM est installée dans une maison du Mas d'Avignonet. Elle est donc probablement plus sensible à l'activité humaine que AVR située plus en hauteur à l'écart du lotissement.

D'autre part, tous les événements enregistrés simultanément aux deux stations correspondent à des séismes répertoriés dans la base de données BDSIS [CNRS].

4.4.2 Les augmentations progressives d'énergie

L'examen des courbes d'énergie sismique a montré une succession de périodes calmes avec un apport relativement faible d'énergie avec des périodes d'augmentation plus prononcée de l'énergie sismique. Nous avons sélectionné deux périodes mettant en valeur ce phénomène : la première se déroule entre le 20/09/2008 et le 10/10/2008 et la deuxième entre le 09/09/2008 et le 19/09/2008 (figure 23 et 24).

De façon à définir l'origine de ces phénomènes, nous avons mis en parallèle les courbes d'énergie avec l'enveloppe de la trace sismique et l'évolution du contenu spectral (figure 23).

La figure 23 (c) montre que le spectre d'amplitude fait apparaître des cycles journaliers. Durant la journée l'énergie est répartie sur la totalité des fréquences alors que la nuit l'énergie reçue est principalement basses fréquences (0 à 1 Hz). Ce phénomène résulte du bruit de fond sismique lié à l'activité humaine.

La figure 23 (b) montre également que l'augmentation progressive de l'énergie se fait en raison d'une augmentation générale du bruit de fond sismique dans des gammes de fréquences de l'ordre de 0 à 1,5 Hz (figure 23 (d)). Ces observations se confirment pour la période du 09/09/2008 au 19/09/2008 (figure 24 (b)).

Des études ont montré que pour des fréquences inférieures à 1 Hz, l'origine du bruit de fond sismique était principalement naturelle (météorologique, océanique etc.) [Bonnefoy-Claudet et al., 2006]. De ce fait, pour expliquer les augmentations d'énergie sismique observées sur nos deux stations, nous avons tenté de mettre en relation les données sismiques avec les données météorologiques.

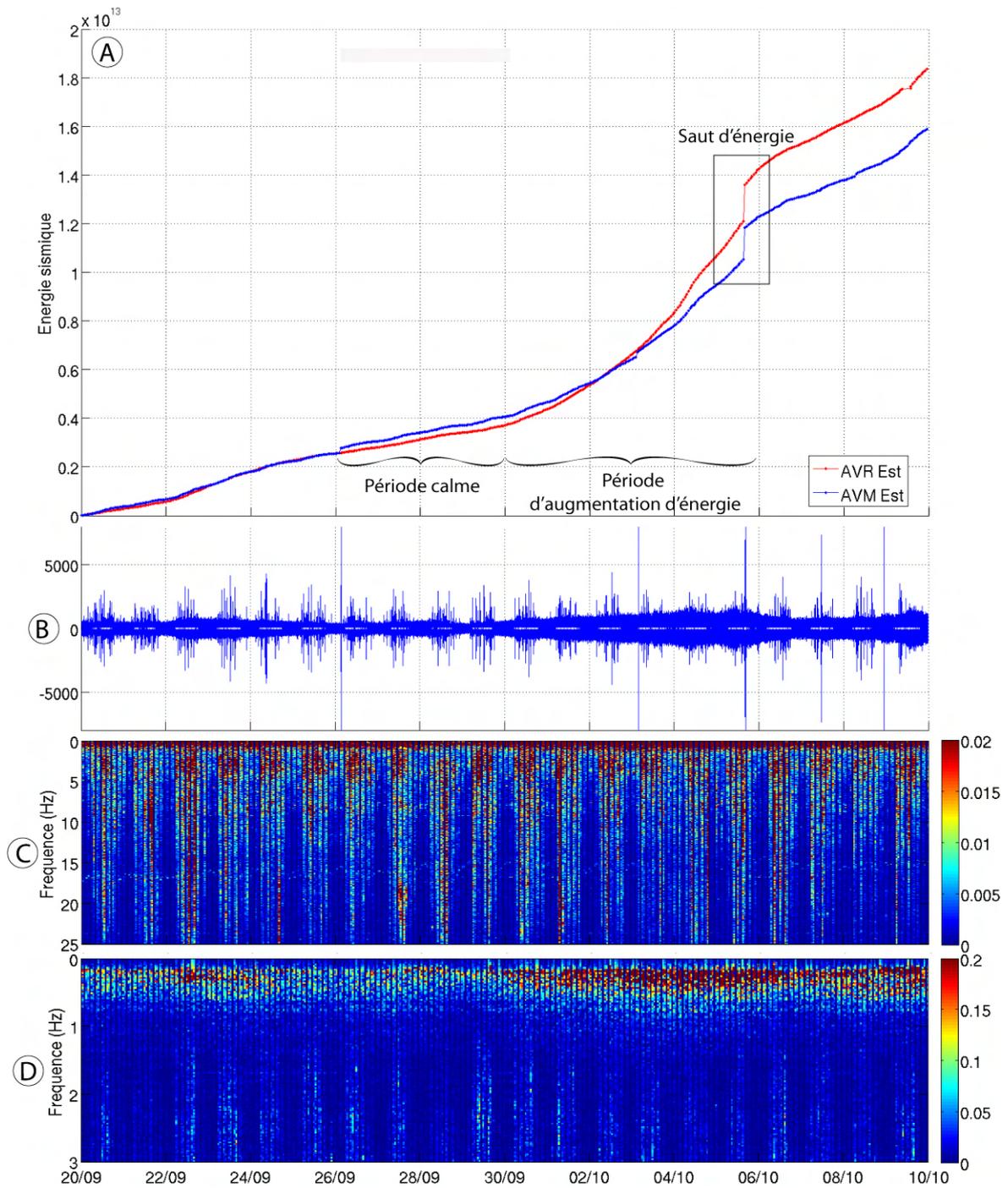


FIG. 23 – Données sismiques sur la périodes du 20/09 au 10/10/2008. A) Courbe d'énergie sismique calculée sur la composante Est des deux stations AVM et AVR. B) Enveloppe de la trace sismique enregistrée sur composante Est de AVM. C) et D) Spectre d'amplitude normalisé (nous avons joué sur les échelles de couleur de façon à faire ressortir les contrastes présents dans les hautes fréquences (C) ou dans les basses fréquences (D)).

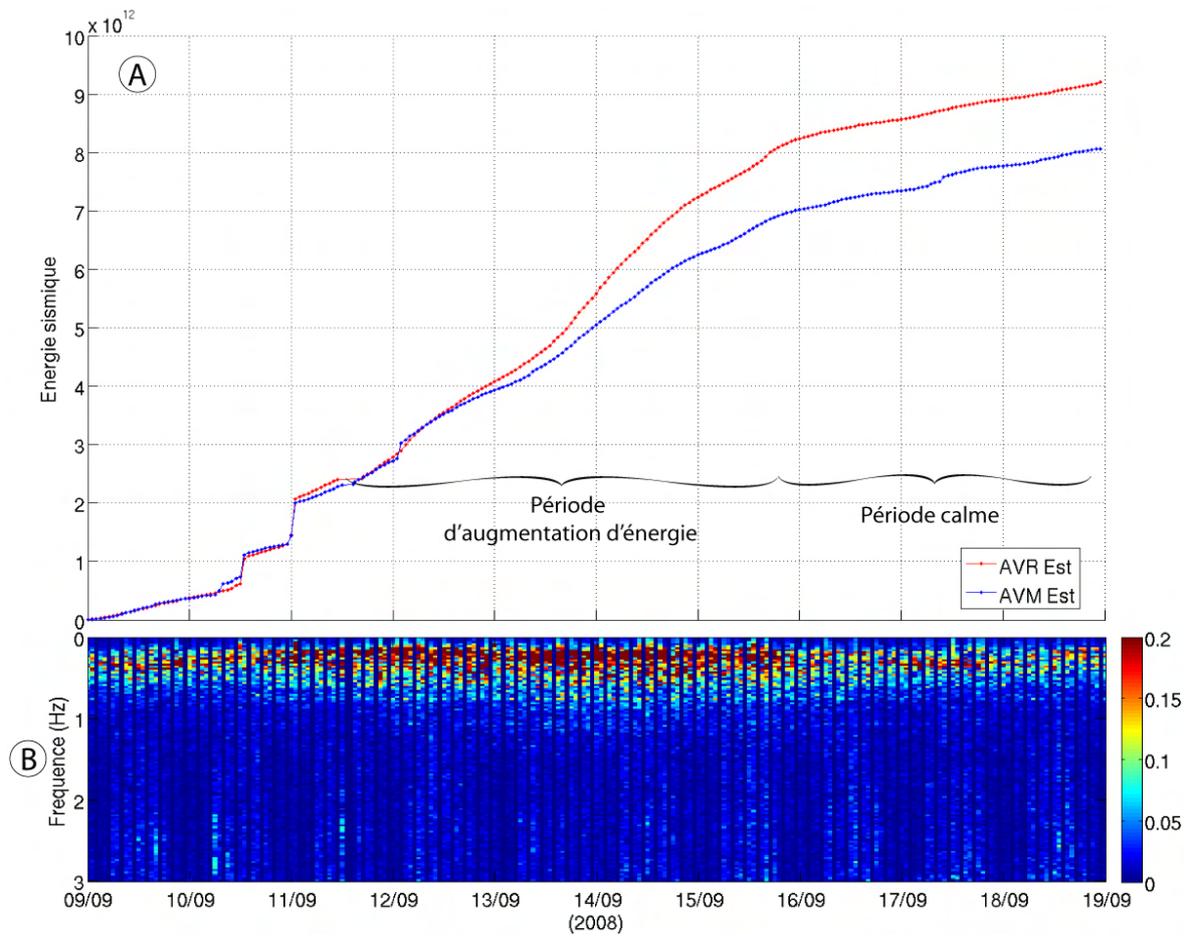


FIG. 24 – Données sismiques sur la période du 09/09 au 19/09/2008. A) Courbe d'énergie sismique calculée sur la composante Est des deux stations AVM et AVR. B) Spectre d'amplitude normalisé.

4.4.3 Comparaison avec les données météorologiques

De façon à comparer les données météorologiques et sismiques nous avons mis en parallèle les données de pluviométrie, de température, de vitesse du vent et d'énergie sismique sur les deux périodes observées précédemment (du 20/09/2008 au 10/10/2008 et du 09/09/2008 au 19/09/2008) présentées sur figures 25 et 26). Nous avons cumulé les vitesses du vent selon toutes les directions, selon les directions Est-Ouest et selon les directions Nord-Sud (respectivement figure 25 (b), (c) et (d)).

Nous remarquons que les longues périodes de vent d'orientation principalement Nord ou Sud semblent en relation avec les augmentations d'énergie sismique observées sur nos deux stations AVM et AVR (figures 25 (d) et 26 (b)). En effet, l'augmentation d'énergie sismique se fait parallèlement à l'épisode venteux.

Pour expliquer ce phénomène, nous pouvons avancer deux hypothèses :

L'oscillation des arbres sous l'effet du vent pourrait constituer une source sismique basses fréquences se caractérisant par une augmentation générale du bruit ambiant observée sur le sismogramme (figure 23 (c)). Ce phénomène est particulièrement sensible aux vents orientés Nord ou Sud car la vallée du Drac est elle-même orientée dans cette direction (figure 1) .

Pour appuyer cette hypothèse, la station AVR qui reçoit le plus d'énergie durant cette période est située sur une colline à proximité d'une forêt. Elle est donc potentiellement plus sensible aux effets du vent que la station AVM située en contrebas dans une maison du Mas.

Il a également été montré, dans le cas du lac Ontario, que l'énergie sismique pouvait être directement corrélée à la vitesse du vent [Kerman and Mereu, 1993]. Les vagues générées à la surface de l'eau entraînent des microséismes et le lac devient source de bruit de fond sismique. Le site d'Avignonet est situé sur le flanc Ouest du lac de Monteynard, il pourrait donc subir un effet similaire.

Pour appuyer cette hypothèse, le lac de Monteynard se situe dans la vallée du Drac qui est orientée Nord-Sud. Ceci expliquerait l'influence principale du vent provenant de la même direction.

Toutefois, cette hypothèse reste discutable du fait que la station AVR devrait subir une atténuation de l'énergie sismique car elle est plus éloignée du lac que AVM. Or AVR ne subit pas cet effet, c'est elle qui reçoit un maximum d'énergie.

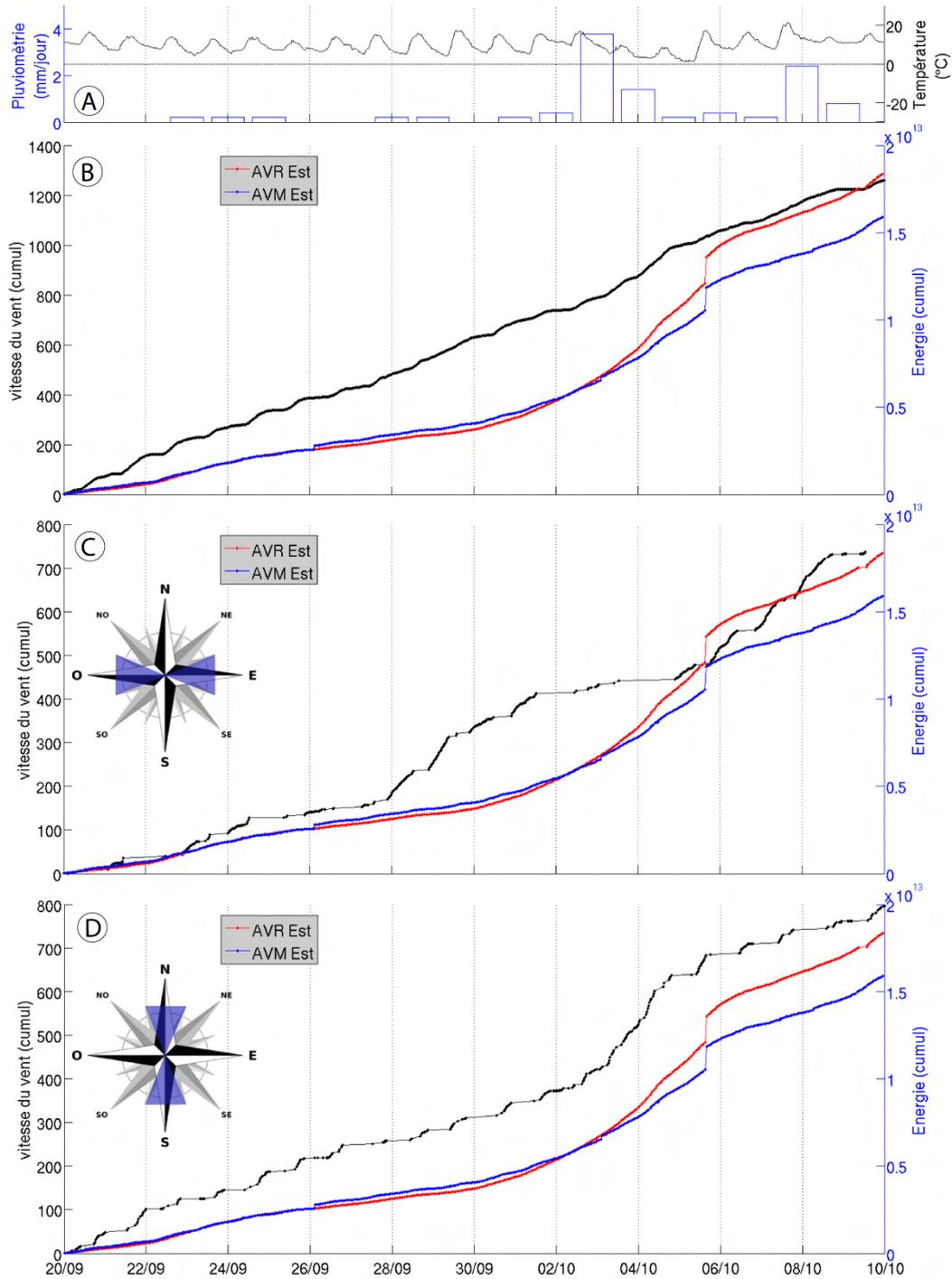


FIG. 25 – Comparaison des données sismiques et météorologiques sur la période du 20/09 au 10/10/2008. a) Températures (noir) et pluviométrie (bleu). b) Énergie sismique reçue par la composante Est de AVR et AVM et vitesses du vent cumulées (courbe noire). c) Vents orientés Est ou Ouest $\pm 22,5^\circ$. d) Vents orientés Nord ou Sud $\pm 22,5^\circ$.

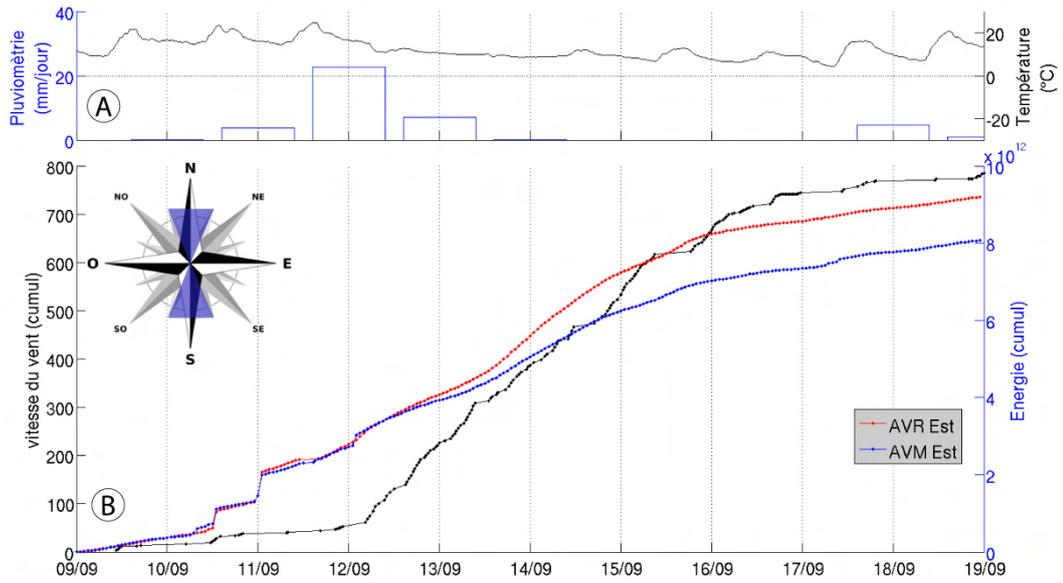


FIG. 26 – Comparaison des données sismiques et météorologiques sur la période du 09/09 au 19/09/2008. a) Températures (noir) et pluviométrie (bleu). b) Énergie sismique reçue par la composante Est des stations AVR et AVM et vitesses du vent cumulées (vents orientés Nord ou Sud $\pm 22,5^\circ$).

4.5 Répartition de l'énergie sismique sur les trois composantes

Nous remarquons que quelles que soient la station et la durée d'observation, la composante Est des stations sismiques reçoit un maximum d'énergie. Cette observation a été confirmée par les données issues d'une campagne de mesures temporaires menée en septembre 2007 (figure 27).

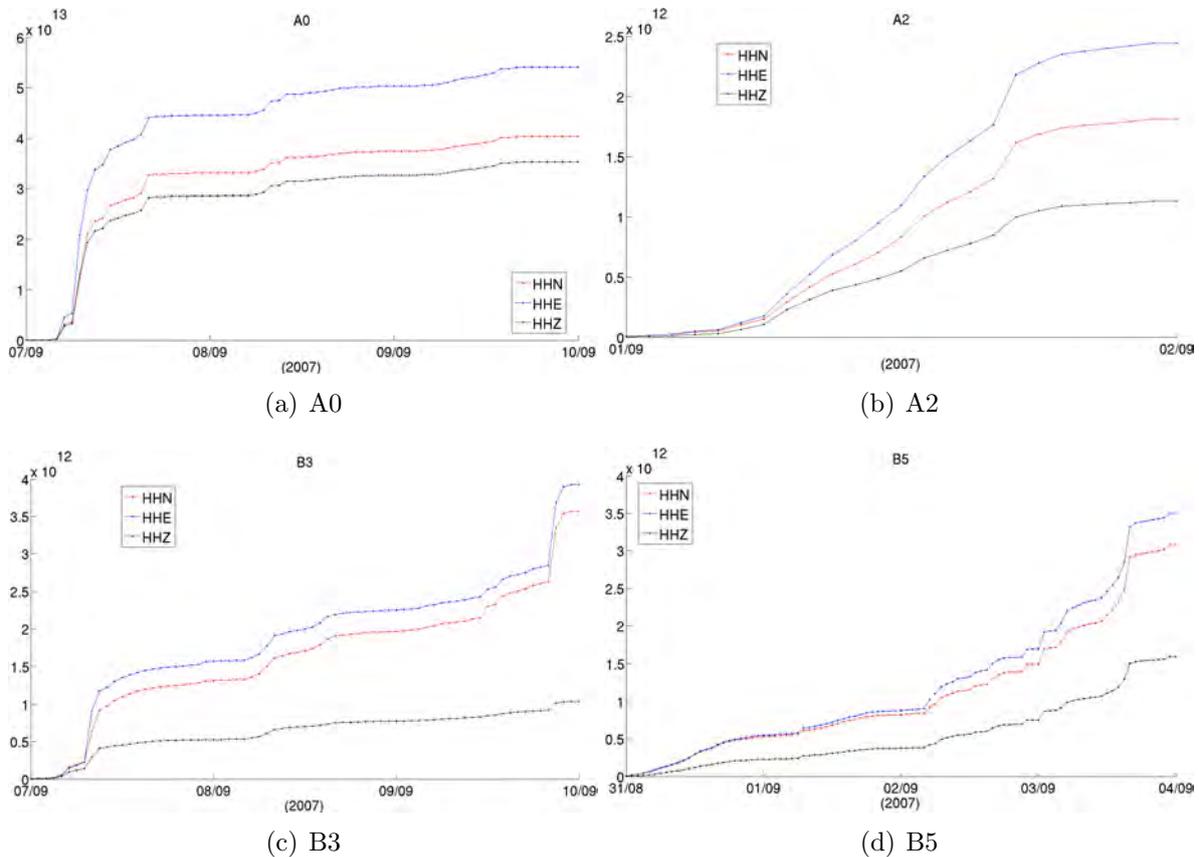


FIG. 27 – Données sismiques, campagne temporaire réalisée en septembre 2007. Répartition de l'énergie sismique sur les composantes des stations A0, A2, B3 et B5. La localisation des stations est représentée en annexes (figure 29).

Il a été montré que la géométrie et la géologie des vallées alluviales pouvaient avoir une influence importante sur l'amplification des ondes sismiques [Khair et al., 1989]. La vallée du Drac est orientée Nord-Sud et les dépôts argileux qui la recouvrent forment des biseaux sédimentaires dans les directions Est-Ouest (figure 6). La réflexion des ondes sismiques à l'interface socle-sédiment pourraient donc favoriser la formation d'ondes de surfaces se propageant dans les directions Est-Ouest.

Ceci pourrait expliquer l'apport maximal d'énergie observé sur les composantes Est des stations sismologiques présentes sur site.

Cette observation est importante car l'amplification des ondes sismiques par effet de site peut-être un facteur important dans le déclenchement des glissements de terrain.

4.6 Conclusion préliminaire

L'analyse des données sismologiques nous a permis de mettre en évidence des événements sismiques propres à AVM. Ceux-ci se présentent sous forme de créneaux et l'analyse des sismogrammes correspondants montre qu'ils sont en relation avec l'activité anthropique.

Nous avons également mis en évidence des événements sismiques enregistrés simultanément sur AVM et AVR. Ils se caractérisent par des sauts d'énergie ou des périodes d'augmentation progressive de l'énergie sismique. Après analyse des sismogrammes et des données météorologiques correspondantes, nous avons pu mettre en relation ces phénomènes avec des séismes ou des événements météorologiques.

Il n'a donc pas été possible d'isoler un signal sismique en relation avec le mouvement de terrain.

5 Conclusion

Le but de ce travail était de caractériser le glissement de terrain du Mas d'Avignonnet en combinant des données géophysiques et météorologiques.

La première partie de notre travail a consisté à étudier les vitesses de déplacement GPS. Nous avons tout d'abord utilisé les données de positionnement GPS de trois stations permanentes installées sur le site. Nous avons examiné principalement l'évolution des composantes des lignes de bases locales des stations situées dans le glissement (AVN3 et AVP2) par rapport à la station de référence (AVR1). Le calcul des positions des stations s'est fait à partir de sessions de 24h.

L'analyse des données GPS montre que les deux stations AVP2 et AVN3 se déplacent à des vitesses de l'ordre de 2 à 3 *cm/an*, en accord avec les campagnes de mesures GPS temporaires (bi-annuelles) menées sur le site.

La comparaison entre les données GPS, les hauteurs piézométriques des nappes, le modèle numérique de terrain et les mesures d'inclinométrie montre que la station AVP2 subit principalement des mouvements de terrain superficiels (probablement au niveau de la surface de rupture mise à jour par inclinométrie à 5 m de profondeur) alors que la station AVN3 subit des mouvements plus profonds (probablement au niveau de la surface de rupture mise à jour par inclinométrie à 15 ou 45 m). Pour des sessions de positionnement de 24h, il n'a pas été possible de mettre en relation un événement pluviométrique de courte durée (jours ou semaines) avec une modification du comportement du déplacement GPS car les déplacements en jeu sont trop petits (millimétriques) par rapport à la barre d'erreur du positionnement.

La deuxième partie de notre travail a consisté en l'analyse des données sismologiques. Nous avons examiné principalement des courbes d'énergie sismique des stations AVM (située dans le glissement) et AVR (station de référence située sur le socle).

L'étude de l'énergie sismique a montré la présence de deux types de perturbations : des sauts d'énergie et des périodes d'augmentation progressive de l'énergie sismique. En remontant aux sismogrammes, nous avons montré que tous les sauts d'énergie étaient soit issus de l'activité anthropique soit d'origine sismique.

D'autre part, la comparaison entre les courbes d'énergie sismique, le spectre d'amplitude et les données météorologiques a montré que les augmentations progressives d'énergie sismique sont d'origine naturelle et peuvent être mises en relation avec l'activité du vent sur le site d'étude.

Nous n'avons donc pas pu identifier un signal sismique en relation avec l'activité du mouvement de terrain. De ce fait, il n'a pas été possible de montrer que la sismicité entraîne une modification des vitesses de glissement.

Dans le but d'approfondir ce travail, il serait nécessaire d'appliquer d'autres méthodes géophysiques telles que le suivi temporel du rapport H/V de l'intercorrélacion entre stations pour mettre en évidence une éventuelle contribution du glissement de terrain sur les données de sismologie. D'autre part, l'augmentation de la durée d'observation GPS pourrait permettre de caractériser le signal annuel que l'on retrouve sur la composante verticale du déplacement GPS. Celui-ci est probablement d'origine hydrologique et son étude serait importante pour la compréhension du comportement rhéologique des argiles impliquées dans ce type de mouvement de terrain.

Références

- G. Bièvre, D. Jongmans, F. Renalier, S. Schwartz, E. Pathier, Y. Orengo, T. Villemin, and C. Delacourt. Caractérisation géophysique des glissements d'Avignonet de l'Harmalière (région du Trièves, Alpes externes). In *Journées aléa gravitaire, 17-18 novembre 2008, Orléans, France*, 2008.
- S. Bonnefoy-Claudet, F. Cotton, and P.Y. Bard. The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies A literature review. *Earth Science Reviews*, 79 (3-4) :205–227, 2006.
- CNRS. Base de données sismologiques. http://bdsis.obs.ujf-grenoble.fr/donnees/index_donnees.html.
- J.C. Flageollet, O. Maquaire, B. Martin, and D. Weber. Landslides and climatic conditions in the Barcelonnette and Vars basins (Southern French Alps, France). *Geomorphology*, 30(1-2) :65–78, 1999.
- F. Guzzetti, S. Peruccacci, M. Rossi, and C.P. Stark. The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows : an update. *Landslides*, 5(1) :3–17, 2008.
- TA Herring, RW King, and SC McClusky. GPS Analysis at MIT (GAMIT) reference manual, release 10.3. *Massachusetts Institute of Technology*, 2006.
- W.D. Huff. Mineralogy and Provenance of Pleistocene Lake Clay in an Alpine Region. *Bulletin of the Geological Society of America*, 85(9) :1455–1460, 1974.
- D. Jongmans, G. Bièvre, F. Renalier, S. Schwartz, N. Beaurez, and Y. Orengo. Geophysical investigation of a large landslide in glaciolacustrine clays in the Trièves area (French Alps). *Engineering Geology*, 109(1-2) :45–56, 2009.
- B.R. Kerman and R.F. Mereu. Wind-Induced Microseisms From Lake Ontario. *Atmosphere Ocean*, 31 :501–501, 1993.
- KR Khair, SK Datta, and AH Shah. Amplification of obliquely incident seismic waves by cylindrical alluvial valleys of arbitrary cross-sectional shape. Part I. Incident P and SV waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 79(3) :610, 1989.
- U. Kniess, C. J. Van Westen, T. Villemin, G. Bievre, E. Pathier, D. Jongmans, and S. Schwartz. Analysis of a high resolution LIDAR DEM over two large landslides within glaciolacustrine clays (Trieves area, French Alps). *Poster at : the European Geosciences Union General Assembly*, 2008.
- U. Kniess, D. Jongmans, E. Pathier, S. Schwartz, Bièvre, and T. Villemin. Influence of bedrock topography on kinematics of two clayey landslides in the trièves area (french alps). In *Proceedings of the International Conference on Landslide Processes : from geomorphologic mapping to dynamic modelling, 06-07 February 2009, Strasbourg, France*. CERG Edition, 2009.

- C. Lachet and P.Y. Bard. Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's. *Journal of Physics of the Earth*, 42 :377–397, 1994.
- J.P. Malet, O. Maquaire, and E. Calais. The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides : application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Geomorphology*, 43(1-2) :33–54, 2002.
- C. Moulin and C. Chapeau. Le glissement de la salle en Beaumont (Isère) : Proceedings of the workshop Ryskhydrogeo. *Program Interreg III*, 2004. La Mure (France).
- C. Moulin and Y. Robert. Le glissement de l'Harmalère sur la commune de Sinard : Proceedings of the workshop Ryskhydrogeo. *Program Interreg III*, 2004. La Mure (France).
- C. Requillard, J.P.and Moulin. Glissement du Mas sur la commune d'Avignonet (FRANCE) état de la gestion du risque en octobre 2004. *Restauration des Terrains de Montagne*, 2004.

Table des figures

1	Localisation géographique du site d'étude (image Géoportail©)	5
2	Présentation du site d'étude et localisation des instruments utilisés. Les stations GPS (AVN3, AVP2 et AVR1). Les stations sismologiques 3 composantes (AVR, AVP et AVM) , la station météorologique et les deux forages équipés de capteurs CPI. Les limites des combes d'Avignonet et de l'Harmalière sont représentées en pointillés (image Géoportail©) . .	6
3	Localisation et géologie des glissements de terrain du Mas d'Avignonet et de l'Harmalière d'après Bièvre et al. [2008].	7
4	Modèle numérique de terrain issu de la campagne LiDAR (2006) et base des argiles [Bièvre et al., 2008]	9
5	Carte du glissement de terrain d'Avignonet et localisation des instruments de mesures et des profils géophysiques réalisés (SP : profils sismiques, EP: profils électriques). a) Repères géodésiques et vitesses de déplacements déduites de campagnes de mesures GPS temporaires. b) Localisation du profil ZZ' présenté figure 6. c) Localisation des tubes d'inclinométrie et des points de mesures GPS [Jongmans et al., 2009].	10
6	Profil ZZ'. a) Vitesses de déplacement mesurées par GPS (cm/an) et surfaces de glissement mises en évidence dans les tubes d'inclinométrie. b) Déplacement cumulé dans le plan vertical des points de mesures GPS 41, 44 , 46 et 48 entre le 01/10/1995 et le 26/10/2005. c) Déplacement cumulé mesuré dans le tube d'inclinométrie T2, la courbe de référence a été mesurée le 10/04/1990 [Jongmans et al., 2009].	11
7	Vitesse des ondes S à 5m de profondeur le long du profil ZZ'. Elle est calculée par tomographie en ondes SH et par inversion en ondes de surface des profils sismiques présentés figure 5 [Jongmans et al., 2009]	12
8	Pluviométrie mesurée à la station météorologique d'Avignonet. Les précipitations sont représentées en millimètres par jour, les flèches représentent les pannes de station et la barre verticale démarque le passage de l'année 2008 à 2009	14
9	Instrumentation des deux forages sc_bas et sc_02. Leur localisation est présentée figure 2	15
10	Données de piézométrie. Cote du toit de la nappe pour le forage sc_bas, la sonde est placée à 5 m de profondeur. Les flèches représentent les pannes de capteurs (entre le 26/06/09 et le 30/07/09)	16
11	Données de piézométrie. Cote du toit de la nappe pour le forage sc_02, la sonde est placée à 47 m de profondeur.	17
12	Données piézométriques et pluviométriques. Évolution de la cote NGF du toit de la nappe dans le forage sc_bas (la sonde CPI est placé à 5 m de profondeur) en fonction des précipitations journalières.	18
13	Données GPS, évolution des composantes Nord(1), Est(2) et Verticale(3) des stations AVN3(a) et AVP2(b) par rapport à la station de référence. La station AVR1 est supposée fixe et la première position calculée est placée à l'origine. Les vitesses de déplacements sont positives vers le Nord et négatives vers l'Est et le bas	20

14	Données GPS, évolution de la composante Est des stations AVN3 et AVR1 durant les années 2008 et 2009	22
15	Données GPS, déplacement vertical des stations GPS AVP2 et AVN3. Le premier point de mesure est placé à l'origine et les déplacements sont négatif vers le bas et positif vers l'Est. La droite correspond à une régression linéaire sur le nuage de points	23
16	Données GPS, déplacement vertical des stations GPS AVP2 et AVN3. Le premier point de mesure est placé à l'origine et les déplacements sont négatifs vers le Sud et positifs vers l'Est. La droite correspond à une régression linéaire sur le nuage de points	24
17	Profils topographiques échantillonnés à partir des données LiDAR et taux de déplacement total des stations GPS AVN3 et AVP2 représenté dans le plan Est-Ouest-Vertical. L'inclinaison des vecteurs correspond à l'orientation moyenne du déplacement vertical sur la totalité des données disponibles.	25
18	Données GPS, pluviométriques et piézométriques. Cote du toit de la nappe dans le forage sc_bas (5m de profondeur) comparée au déplacement latéral (Est-Ouest) des stations AVN3 et AVR1. La barre verticale correspond au passage de l'année 2008 à 2009.	26
19	Données GPS, déplacement total des stations GPS permanentes AVN3 et AVP2 comparé aux mesures GPS temporaires. L'orientation des vecteurs correspond à l'orientation moyenne du déplacement horizontal sur la totalité des données disponibles d'après Jongmans et al. [2009]. . . .	27
20	Données sismiques, énergie sismique cumulée sur les années 2008 et 2009 aux stations AVR (a) et (c) et AVM (b) et (d). Les composantes Nord, Est et verticale (respectivement HHN, HHE, HHZ) sont représentées. . .	30
21	Données sismiques, évolution du contenu spectral des signaux enregistrés sur la composantes Est des stations AVR (a) et (c) et AVM (b) et (d) pour les années 2008 et 2009.	32
22	Données sismiques, exemple de sauts d'énergie sur la période du 20/09/2008 au 10/10/2009. Les extraits de sismogrammes ont été enregistrés par la composante Est de la station AVM. Les données complètes sont disponibles en annexes. L'événement 3 est un séisme de magnitude Ms=6.9 qui s'est produit au Tadjikistan.	33
23	Données sismiques sur la périodes du 20/09 au 10/10/2008. A) Courbe d'énergie sismique calculée sur la composante Est des deux stations AVM et AVR. B) Enveloppe de la trace sismique enregistrée sur composante Est de AVM. C) et D) Spectre d'amplitude normalisé (nous avons joué sur les échelles de couleur de façon à faire ressortir les contrastes présents dans les hautes fréquences (C) ou dans les basses fréquences (D)).	35
24	Données sismiques sur la période du 09/09 au 19/09/2008. A) Courbe d'énergie sismique calculée sur la composante Est des deux stations AVM et AVR. B) Spectre d'amplitude normalisé.	36

25	Comparaison des données sismiques et météorologiques sur la période du 20/09 au 10/10/2008. a) Températures (noir) et pluviométrie (bleu). b) Énergie sismique reçue par la composante Est de AVR et AVM et vitesses du vent cumulées (courbe noire). c) Vents orientés Est ou Ouest $\pm 22,5^\circ$. d) Vents orientés Nord ou Sud $\pm 22,5^\circ$	38
26	Comparaison des données sismiques et météorologiques sur la périodes du 09/09 au 19/09/2008. a) Températures (noir) et pluviométrie (bleu). b) Énergie sismique reçue par la composante Est des stations AVR et AVM et vitesses du vent cumulées (vents orientés Nord ou Sud $\pm 22,5^\circ$).	39
27	Données sismiques, campagne temporaire réalisée en septembre 2007. Répartition de l'énergie sismique sur les composantes des stations A0, A2, B3 et B5. La localisation des stations est représentée en annexes (figure 29).	40
28	Données GPS, évolution des composantes Nord, Est, Verticale et Longueur de la station AVR1 par rapport à la station de Chamrousse (a) et de l'Alpe d'Huez (b)	48
29	Localisation des stations sismologiques lors de la campagne de mesures de septembre 2007. Nous utiliserons uniquement les données issues des stations A0, A2, B3 et B5.	49
30	Données sismiques, courbes d'énergie sismique et événements pointés sur la station AVM pour la période du 18/07/2008 au 07/08/2008 (a) et du 07/08/2008 au 27/08/2008 (b).	50
31	Données sismiques, courbes d'énergie sismique et événements pointés sur la station AVM pour la période du 27/08/2008 au 20/09/2008 (a) et du 20/09/2008 au 10/10/2008 (b).	51
32	Données sismiques, courbes d'énergie sismique et événements pointés sur la station AVM pour la période du 10/10/2008 au 03/11/2008.	52
33	Données sismiques, composante Nord (HHN), Est (HHE) et Verticale (HHZ) des événements 1 et 2 pointés sur les courbes d'énergie sismique (figure 30 (a)).	52
34	Données sismiques, composante Nord (HHN), Est (HHE) et Verticale (HHZ) des événements 3 à 8 pointés sur les courbes d'énergie sismique (figure 30 (a)).	53
35	Données sismiques, composante Nord (HHN), Est (HHE) et Verticale (HHZ) des événements 9 à 14 pointés sur les courbes d'énergie sismique (figure 30 (b)).	54
36	Données sismiques, composante Nord (HHN), Est (HHE) et Verticale (HHZ) des événements 15 à 20 pointés sur les courbes d'énergie sismique (figure 31 (a)).	55
37	Données sismiques, composante Nord (HHN), Est (HHE) et Verticale (HHZ) des événements 21 à 26 pointés sur les courbes d'énergie sismique (figure 31 et 32).	56

6 Annexes

6.1 Données GPS

6.1.1 Déplacement de la station de référence AVR1

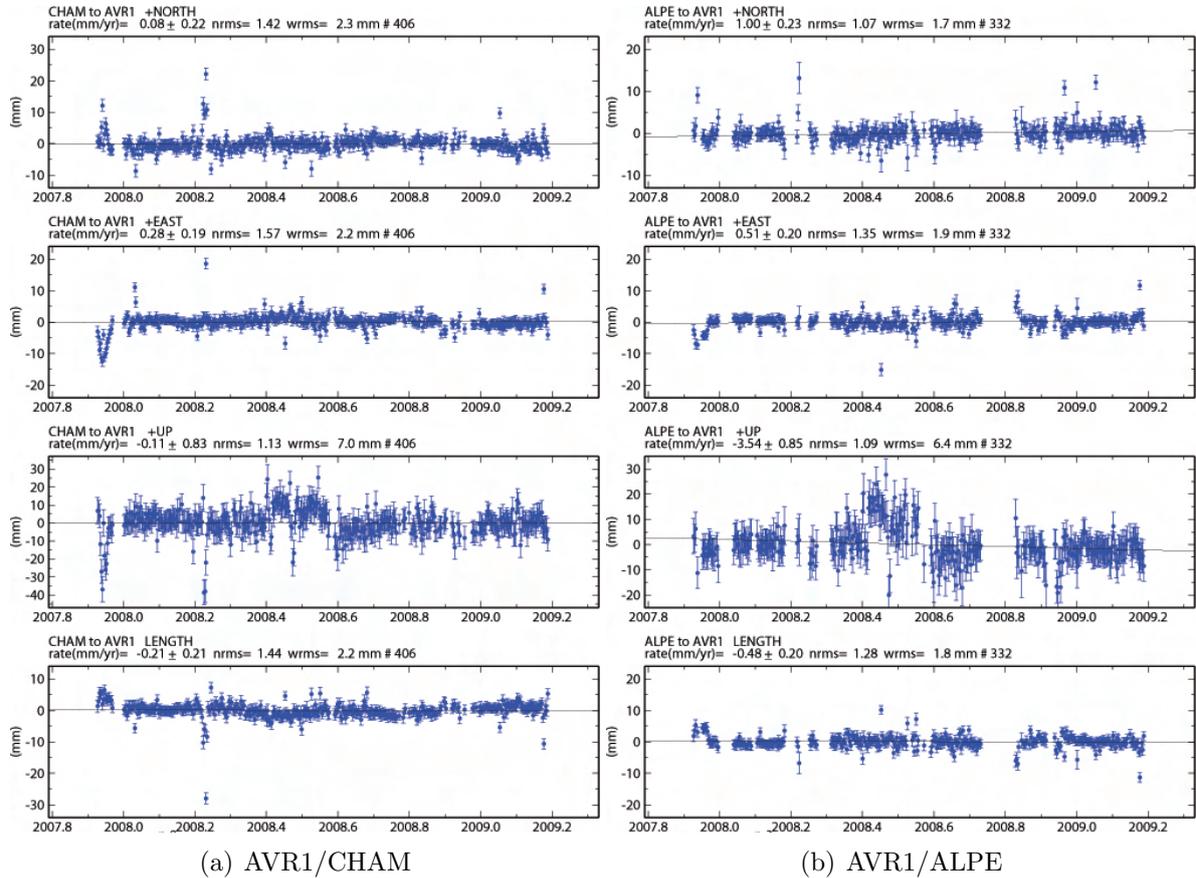


FIG. 28 – Données GPS, évolution des composantes Nord, Est, Verticale et Longueur de la station AVR1 par rapport à la station de Chamrousse (a) et de l'Alpe d'Huez (b)

6.2 Données sismiques

6.2.1 Localisation des stations sismiques lors de la campagne de mesures de septembre 2007

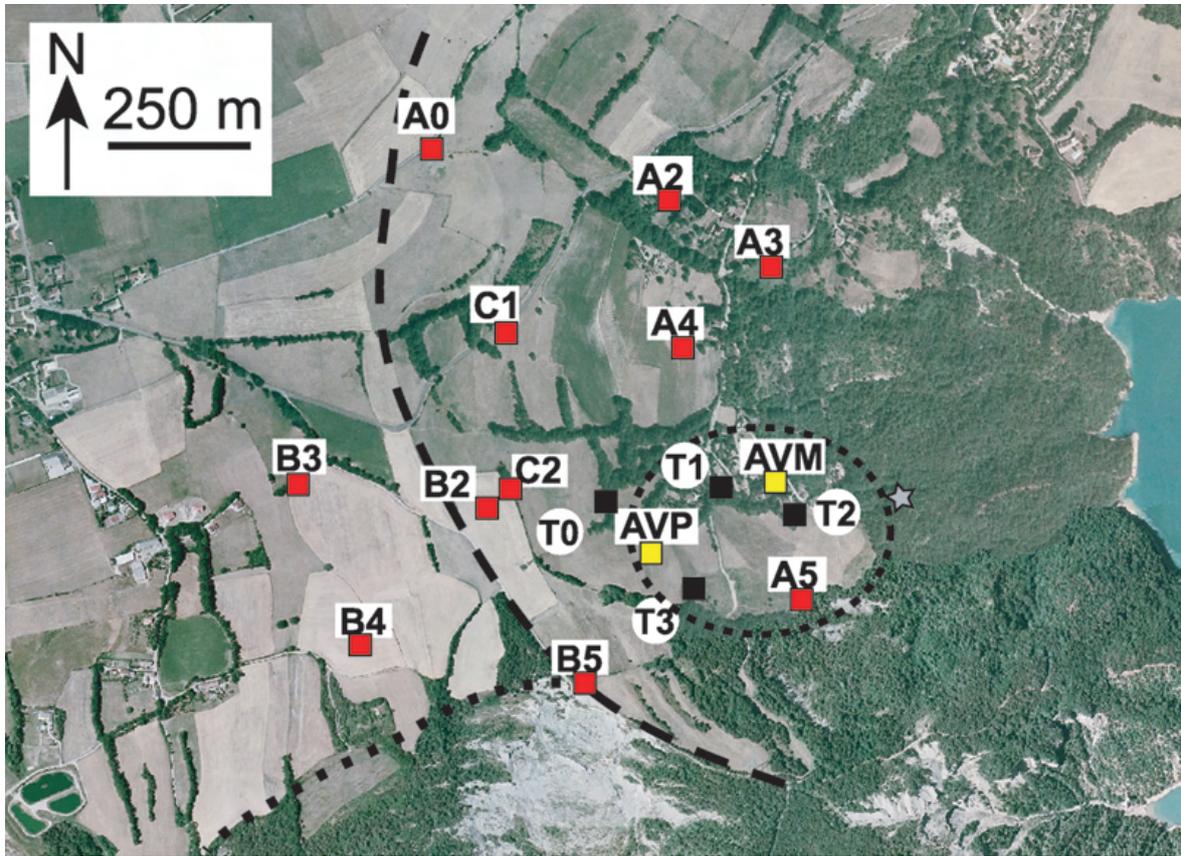


FIG. 29 – Localisation des stations sismologiques lors de la campagne de mesures de septembre 2007. Nous utiliserons uniquement les données issues des stations A0, A2, B3 et B5.

6.2.2 Courbes d'énergie sismique

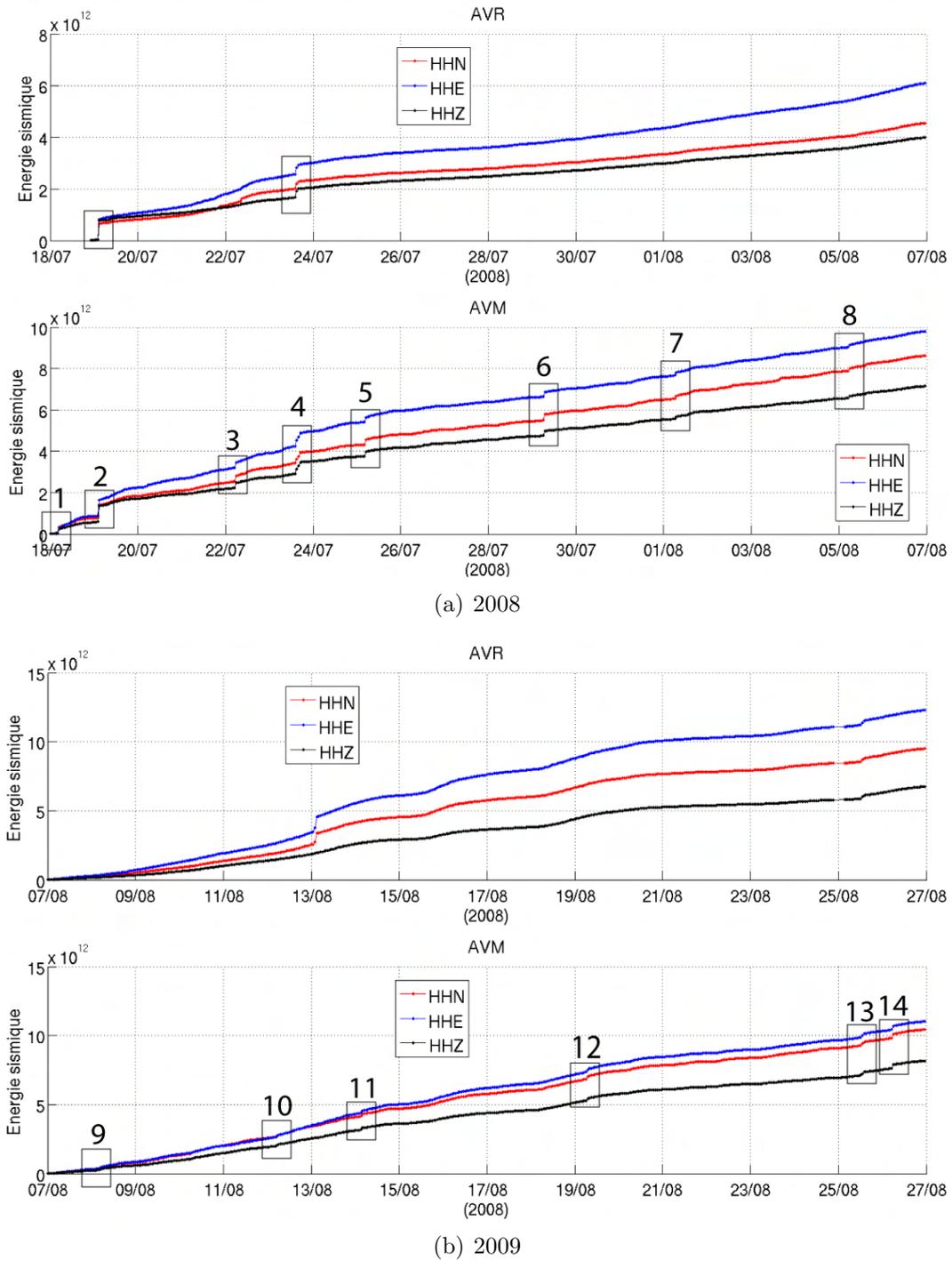
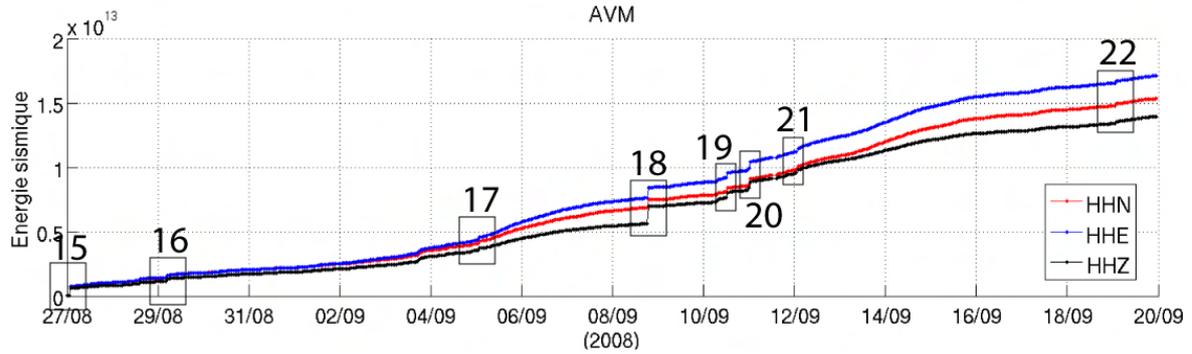
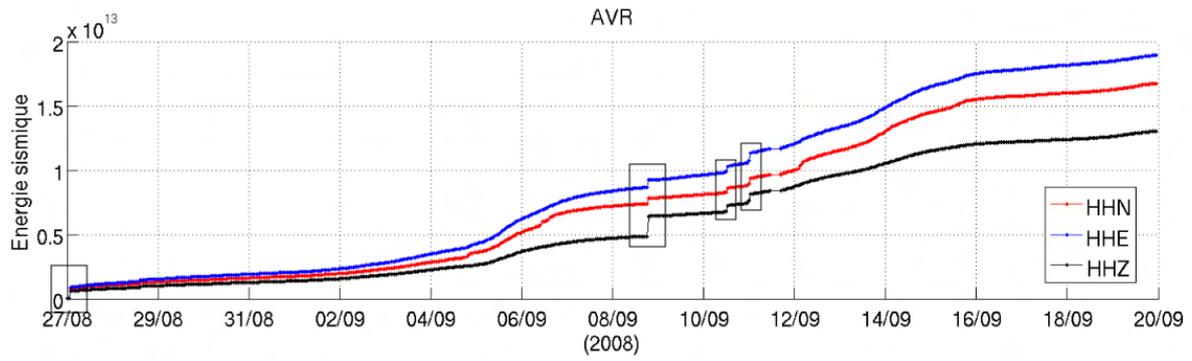
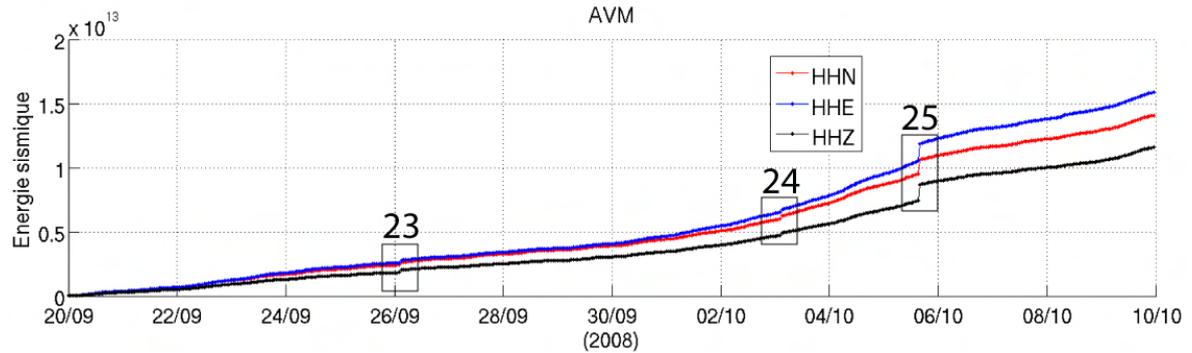
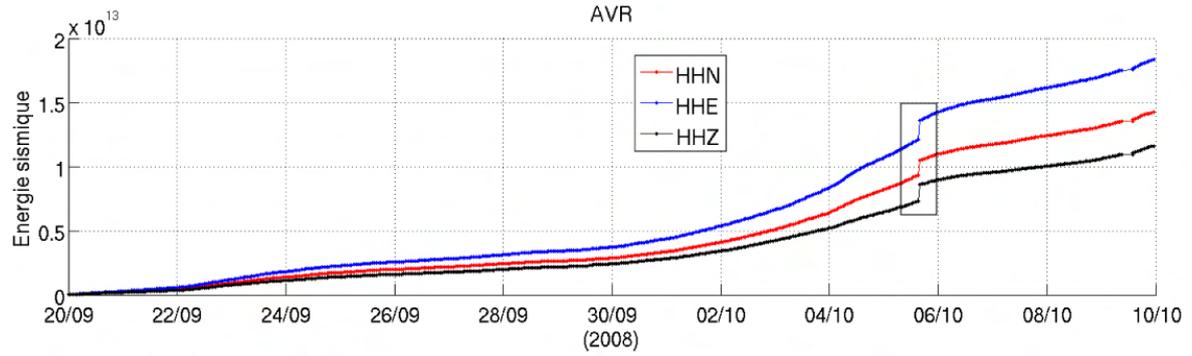


FIG. 30 – Données sismiques, courbes d'énergie sismique et événements pointés sur la station AVM pour la période du 18/07/2008 au 07/08/2008 (a) et du 07/08/2008 au 27/08/2008 (b).



(a) 2009



(b) 2009

FIG. 31 – Données sismiques, courbes d'énergie sismique et événements pointés sur la station AVM pour la période du 27/08/2008 au 20/09/2008 (a) et du 20/09/2008 au 10/10/2008 (b).

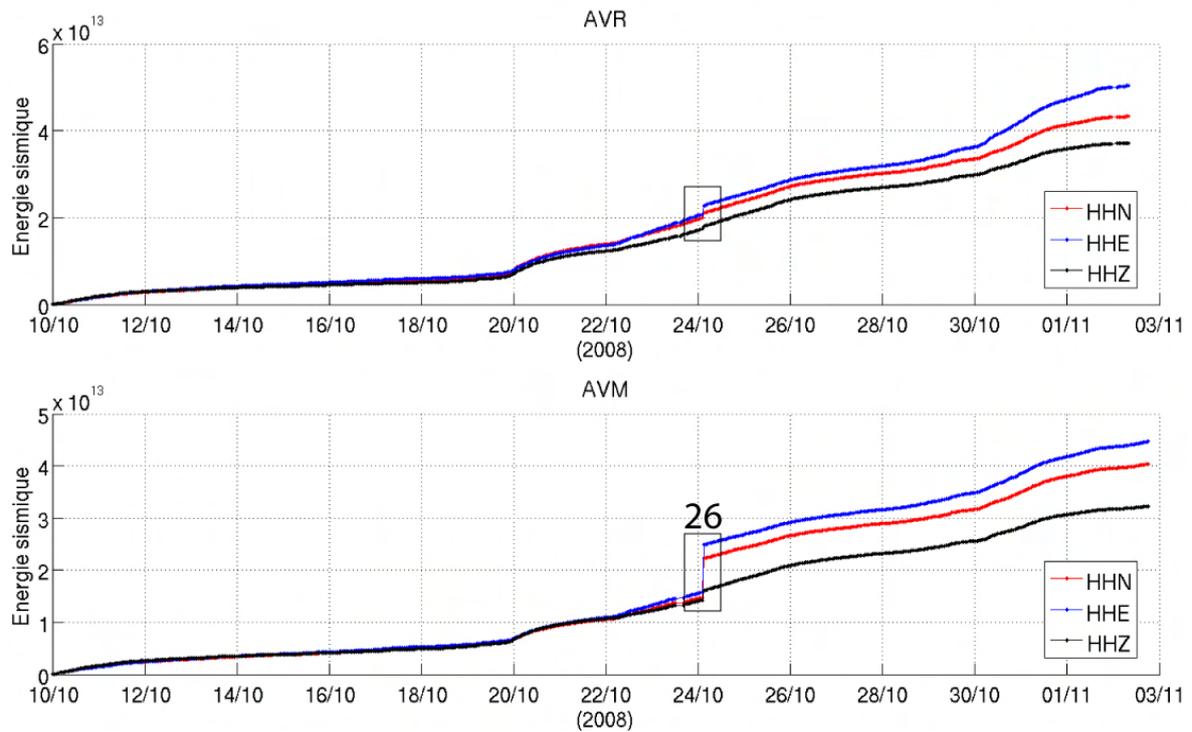


FIG. 32 – Données sismiques, courbes d'énergie sismique et événements pointés sur la station AVM pour la période du 10/10/2008 au 03/11/2008.

6.2.3 Sismogrammes

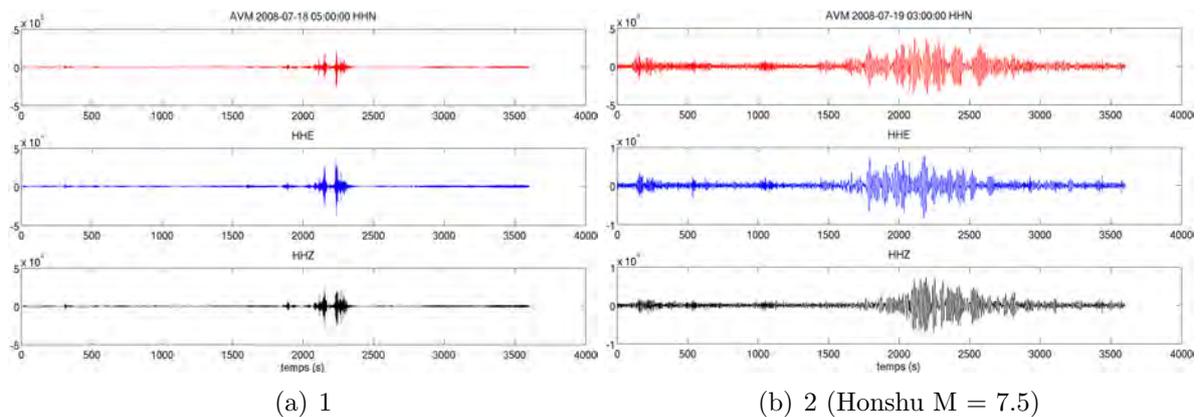
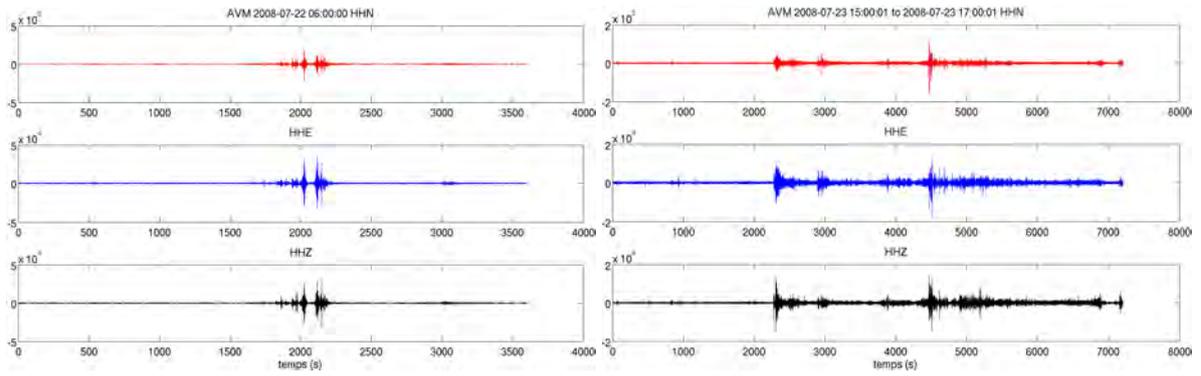
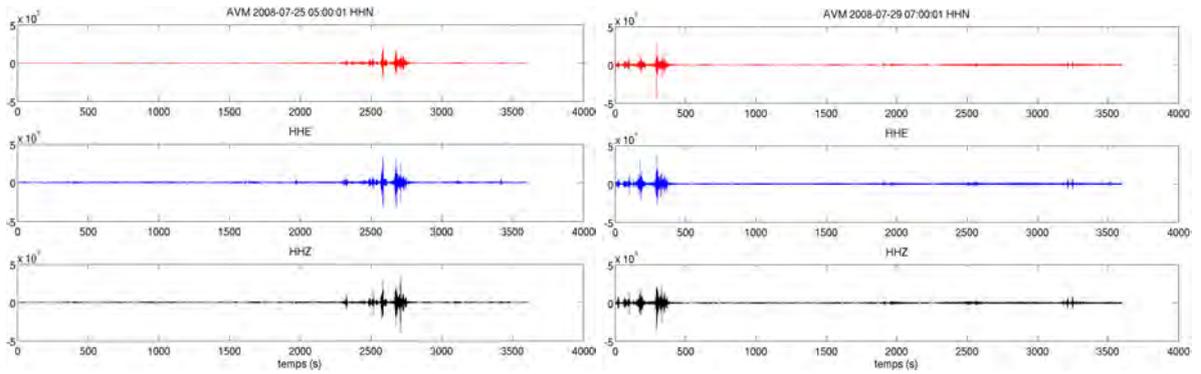


FIG. 33 – Données sismiques, composante Nord (HHN), Est (HHE) et Verticale (HHZ) des événements 1 et 2 pointés sur les courbes d'énergie sismique (figure 30 (a)).



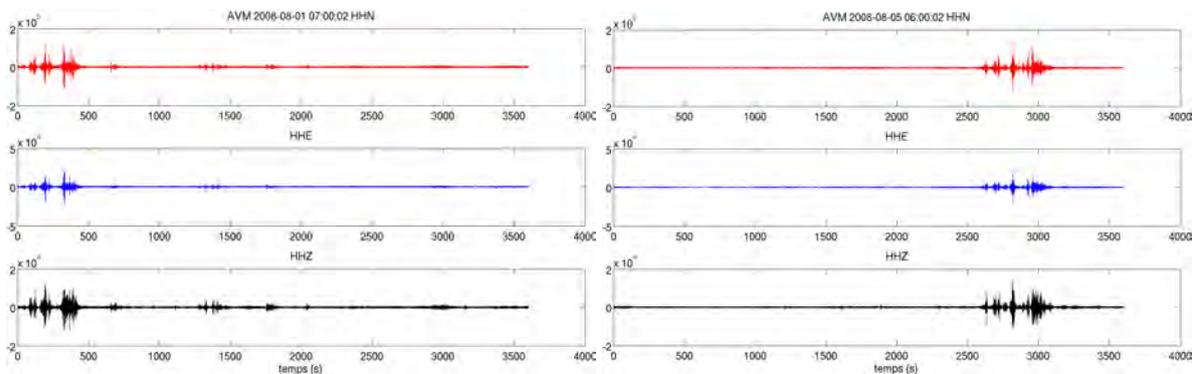
(a) 3

(b) 4 (Pologne M = 4.6)



(c) 5

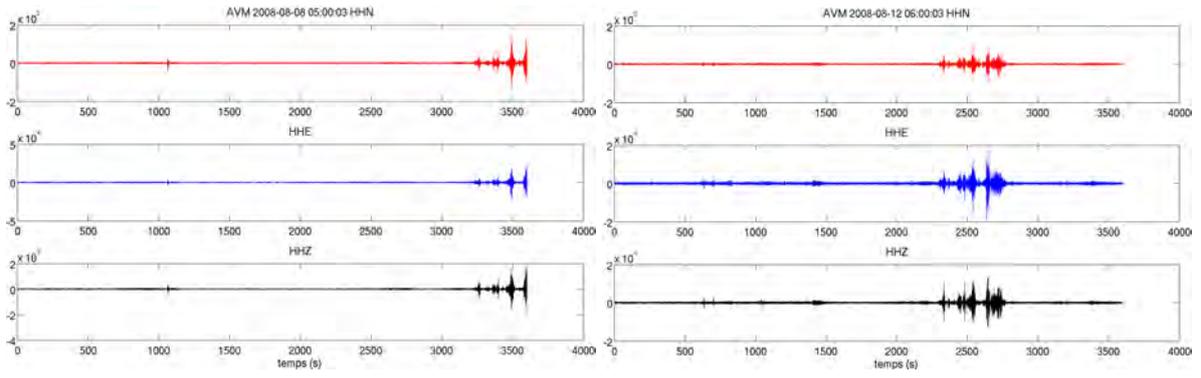
(d) 6



(e) 7

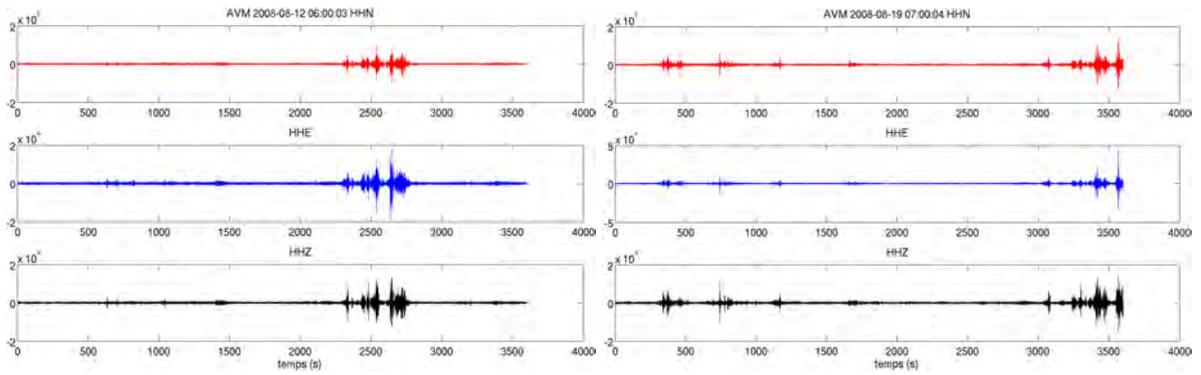
(f) 8

FIG. 34 – Données sismiques, composante Nord (HHN), Est (HHE) et Verticale (HHZ) des événements 3 à 8 pointés sur les courbes d'énergie sismique (figure 30 (a)).



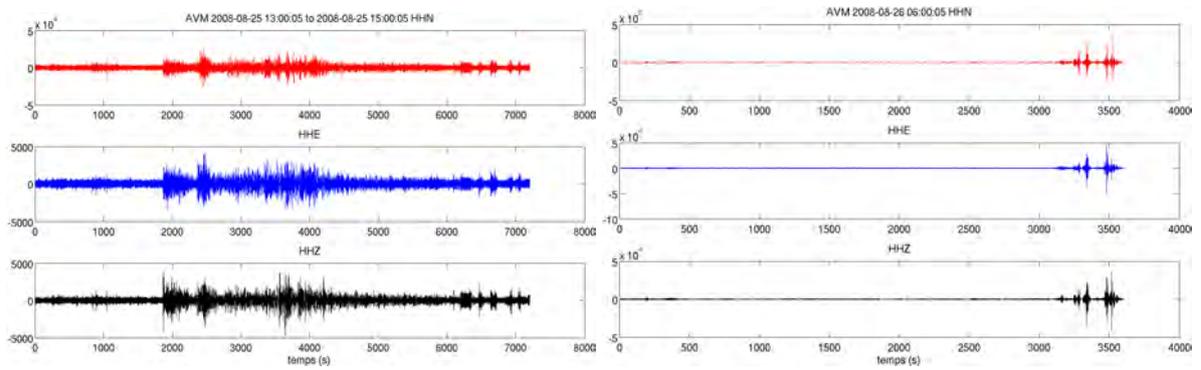
(a) 9

(b) 10



(c) 11

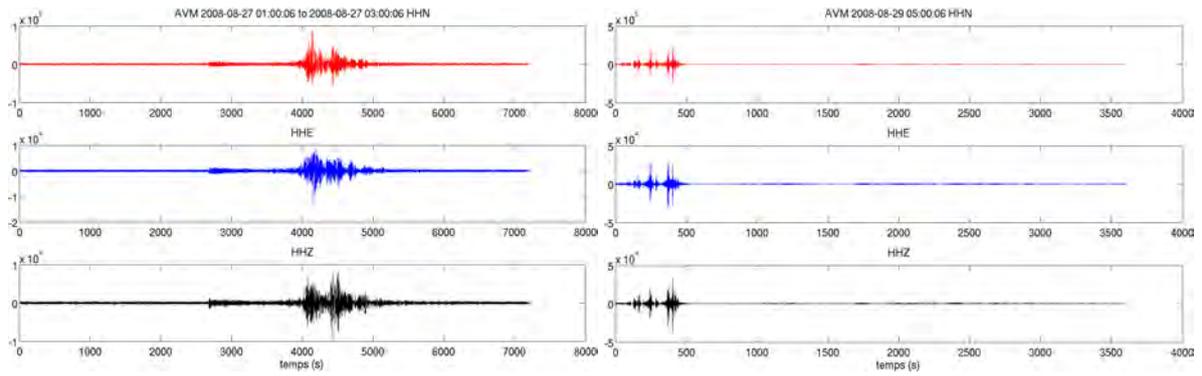
(d) 12



(e) 13 (Xisang M = 6.7)

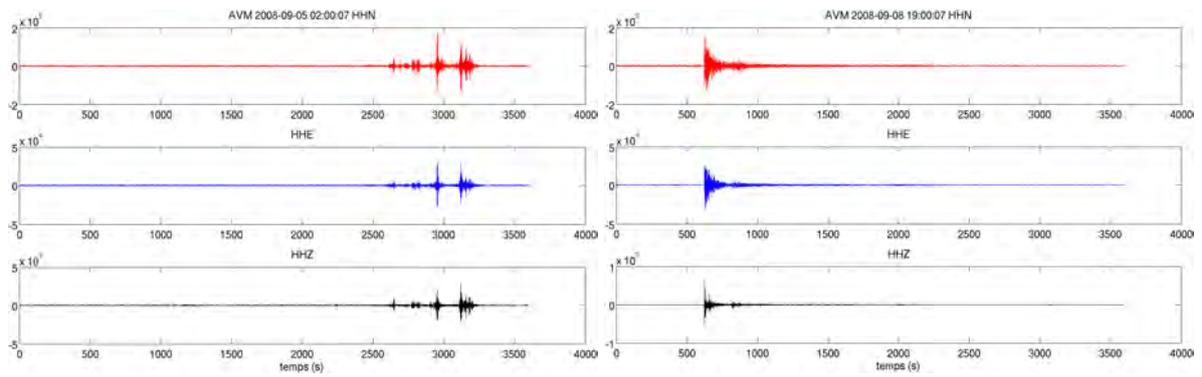
(f) 14

FIG. 35 – Données sismiques, composante Nord (HHN), Est (HHE) et Verticale (HHZ) des événements 9 à 14 pointés sur les courbes d'énergie sismique (figure 30 (b)).



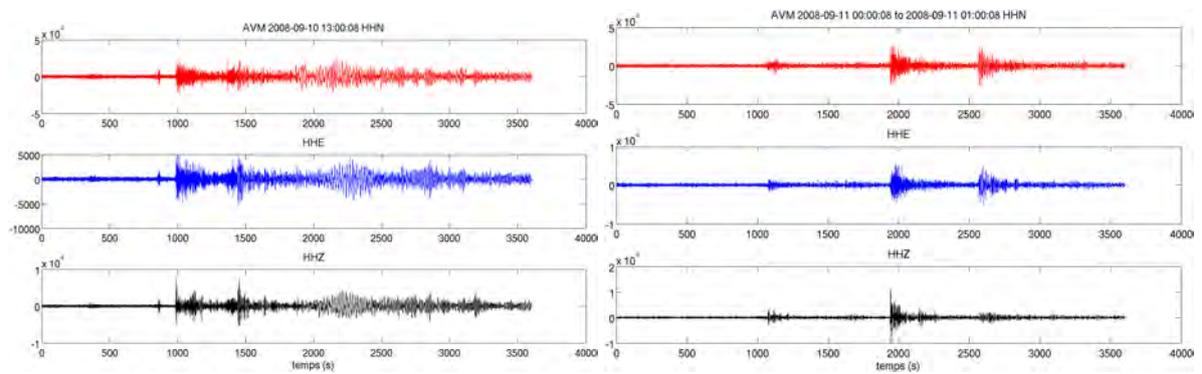
(a) 15 (Leeward Island $M = 2.5$)

(b) 16



(c) 17

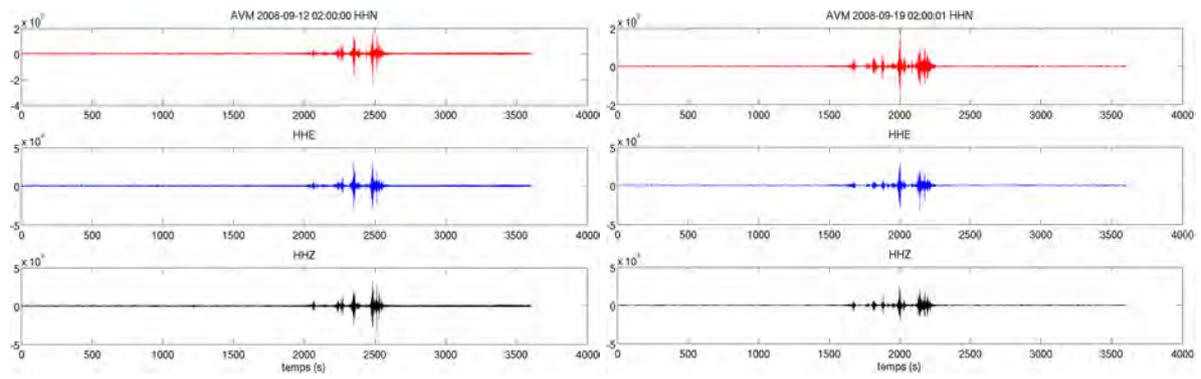
(d) 18



(e) 19 (Mid Oceanic Ridge $M = 6.7$)

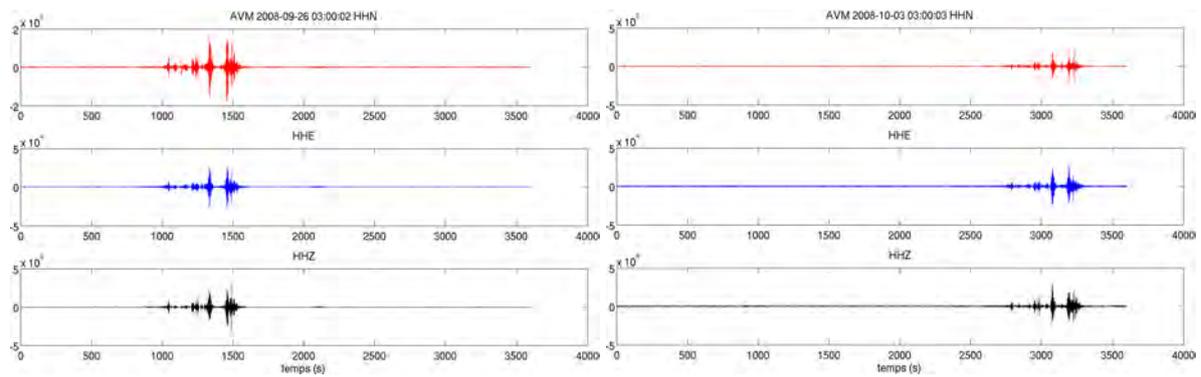
(f) 20 (Hokkaido $M = 7.5$)

FIG. 36 – Données sismiques, composante Nord (HHN), Est (HHE) et Verticale (HHZ) des événements 15 à 20 pointés sur les courbes d'énergie sismique (figure 31 (a)).



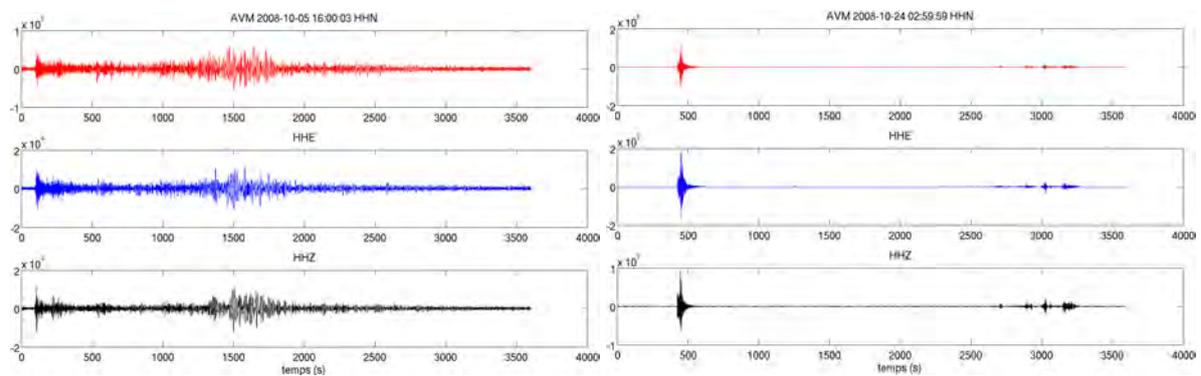
(a) 21

(b) 22



(c) 23

(d) 24



(e) 25(Tadjikistan $M = 6.9$)

(f) 26 (Italie $M = 4.1$)

FIG. 37 – Données sismiques, composante Nord (HHN), Est (HHE) et Verticale (HHZ) des événements 21 à 26 pointés sur les courbes d'énergie sismique (figures 31 et 32).