

RAPPORT D'ÉTUDE

24/09/2018

INERIS DRS-18-171753-08459A

Bilan de mise en œuvre et d'expertise du dispositif de télésurveillance expérimentale du versant des Ruines de Séchilienne (38).

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

Bilan de mise en œuvre et d'expertise du dispositif de télésurveillance expérimentale du versant des *Ruines de Séchilienne* (38).

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'Ineris, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'Ineris ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'Ineris dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'Ineris de par son décret de création, l'Ineris n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'Ineris ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'Ineris dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification / Approbation
NOM	S. COCCIA E. KLEIN	C. FRANCK
Qualité	Ingénieur à Responsable de L'Unité Auscultation et Surveillance Géotechnique et Géophysique	Délégué Appui Technique à la Direction des Risques du sol et du sous-sol
Visa		

RESUME

Entre 2009 et 2016, l'Ineris a contribué aux investigations sur le mouvement de versant de Séchilienne, à l'extrémité sud-ouest du massif de Belledonne (Isère, 38) avec la mise en œuvre d'un dispositif d'observations multi-paramètres en bordure ouest du secteur particulièrement instable.

Ce rapport fait la synthèse des travaux menés durant cette période, et des nombreux enseignements qui ont été tirés. Sur le plan technique d'abord, cette action a permis de valider la technologie SYTGEM-ulp dans le contexte du risque d'éboulement rocheux, et de mettre à profit l'infrastructure de surveillance e.cenaris de l'Ineris pour la gestion et la mise à disposition des données et métadonnées notamment au Cerema Centre-Est, en charge de la surveillance opérationnelle du site.

Sur le plan de l'amélioration des connaissances ensuite, le bilan de cette instrumentation est positif. La mise en place du réseau local de sondes microsismiques profondes a constitué une extension d'un grand intérêt pour le suivi des mécanismes de dégradation du versant et de ruptures en profondeur. La zone frontale a été la source d'une activité microsismique détectable et quantifiable (plus de 7000 événements microsismiques sur toute la période) malgré la très forte désorganisation du versant. La période d'observation a notamment été marquée, en 2012 et 2013, par une accélération, sans précédent dans l'histoire du site, des déplacements en surface dans la zone frontale. Cette modification majeure du régime cinétique de la zone frontale s'est accompagnée d'une importante activité microsismique, directement liée à la pluviosité et aux apports en eau. La désorganisation croissante du massif s'est traduite aussi par une augmentation du nombre et du volume des éboulements dans la zone frontale durant cette période.

Il n'a néanmoins pas été possible d'établir de corrélation forte entre les apports en eau, la microsismicité et les déplacements de surface, en raison de la réactivité croissante du massif aux sollicitations hydroclimatiques. Les changements de comportement se sont avérés trop rapides et complexes pour établir des modèles compatibles avec les observations.

Le dispositif d'observation de l'Ineris a été démantelé fin 2016. A l'exception des sondes microsismiques scellées au terrain lors de l'installation, l'ensemble des équipements de mesure a pu être récupéré et reconditionné en vue d'un prochain déploiement, confirmant la possibilité de réutilisation sur d'autres sites de la plupart des équipements. Les développements technologiques et les améliorations apportés dans le cadre de cette expérimentation seront fort utiles dans le cadre d'autres sollicitations d'observation et/ou de surveillance des versants.

MOTS-CLES

Surveillance multi-paramètre, microsismique profonde, éboulement rocheux, risque, web-monitoring, alarmes précoces, localisation par amplitude

TERRITOIRE

SECHILIENNE, Isère (38), Auvergne-Rhône-Alpes, France, Lat. : 45° 03' 15" nord,
Long. : 5° 50' 02" est

TABLE DES MATIÈRES

RESUME	3
1. INTRODUCTION	7
2. PRESENTATION DU SITE ET DESCRIPTION DU DISPOSITIF MULTI-PARAMETRES INSTALLE PAR L'INERIS	9
2.1 Présentation du site : un peu d'histoire	9
2.2 Contexte géologique et hydrogéologique	10
2.3 Configuration du dispositif d'observation expérimental multi-paramètres....	15
2.4 Information sur l'acquisition, la transmission et la gestion des données	17
3. RETOUR D'EXPERIENCE SUR LE FONCTIONNEMENT ET LE BILAN DE DONNEES DE MESURE	19
3.1 Bilan fonctionnel et technologique.....	19
3.2 Bilan des données de mesure sur la période	21
3.2.1 Activité microsismique sur la période.....	21
3.2.2 Mesure de déplacement en surface par GPS-RTK	24
3.2.3 Mesures inclinométriques	27
3.2.4 Autres mesures.....	29
4. MISE EN PERSPECTIVE DES DONNEES MULTI-PARAMETRES	31
4.1 Influence des apports en eau sur les déplacements en surface.....	31
4.2 Influence des apports en eau – études statistiques	33
4.3 Localisation des ruptures en profondeur	35
4.4 Gestion du risque	36
5. CONCLUSIONS	41
6. REFERENCES	43
7. LISTE DES ANNEXES	45

1. INTRODUCTION

Le présent rapport, réalisé dans le cadre de la mission d'appui au Ministère de la Transition écologique et solidaire¹, propose la synthèse et les apports technologiques et opérationnels de l'observation, par l'Ineris, du mouvement de versant dit « des Ruines de Séchillienne », dans le département de l'Isère.

Ce mouvement de versant, de très grande ampleur, se situe à une vingtaine de kilomètres au sud-est de Grenoble. Il concerne le versant sud du Mont Sec, situé en rive droite de la vallée de la Romanche, à l'extrémité sud-ouest du massif de Belledonne. Le cône d'éboulis des Ruines est bien visible depuis la route départementale 1091, qui dessert Bourg d'Oisans ainsi que les stations de l'Alpe d'Huez et des Deux-Alpes, et permet de rejoindre l'Italie par le col du Lautaret et Briançon.

L'action de l'Ineris, débutée en 2009 et terminée en 2017, visait à contribuer aux nombreuses investigations et études menées sur ce site, dont les mécanismes de rupture sont complexes. Il s'agissait notamment de mettre en œuvre un dispositif expérimental de télésurveillance multi-paramètres en bordure ouest du secteur particulièrement instable, mettant à profit des ouvrages profonds réalisés par ailleurs.

Plus précisément, l'objectif était double pour l'Ineris :

1. valider la technologie SYTGEM-vlp, à base de stations modulaires et multi-paramètres pour systèmes d'alerte précoce, dans le contexte du risque d'éboulement rocheux, ainsi que l'infrastructure de surveillance [e.cenaris](#) pour la gestion et la mise à disposition des données et métadonnées au Cerema en charge de la surveillance opérationnelle du site depuis 1986 ;
2. intégrer et évaluer l'apport de la surveillance microsismique dans le contexte du versant complexe et très actif de *Séchillienne*, sujet à des éboulements importants récurrents et toujours difficiles à anticiper avec précision. La mise en place de sondes microsismiques profondes constituait en ce sens un grand intérêt pour le suivi des mécanismes de dégradation et de ruptures en profondeur d'une zone précise du versant, en filtrant les artefacts inhérents à des mesures de surface et en s'approchant des zones d'intérêt supposées.

Dans ce rapport nous décrivons d'abord le dispositif de télésurveillance, puis nous présentons le retour d'expérience sur le fonctionnement, le bilan de données et une mise en perspective des données multi-paramètres acquises. Une rapide synthèse des développements réalisés dans le cadre de ce projet sera également faite.

Pour rappel, cette action de l'Ineris a été menée en partenariat étroit avec le Cerema Centre-Est. Elle s'est inscrite également dans le cadre du projet ANR SLAMS (« Etudes Multidisciplinaires du Mouvement de Séchillienne : aléa, risques associés et conséquences socio-économiques », terminé en 2013).

¹ pour le compte du Bureau des Risques Naturels Terrestres (DGPR/BRNT) du Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES).

2. PRESENTATION DU SITE ET DESCRIPTION DU DISPOSITIF MULTI-PARAMETRES INSTALLE PAR L'INERIS

2.1 PRESENTATION DU SITE : UN PEU D'HISTOIRE

Le versant instable des Ruines de Séchilienne se situe dans le département de l'Isère (38), au sud-ouest du massif de Belledonne, à 20 km au sud-est de Grenoble. Il s'inscrit dans la vallée glacière de la Romanche, à 2,5 km en aval du village de Séchilienne. Le mouvement de terrain concerne le versant sud du Mont Sec qui surplombe la route RN 91 (ou D1091), reliant Grenoble à Briançon et qui borde la rivière de la Romanche (Figure 1).

Le terrain en mouvement concerne aujourd'hui 70 hectares situés entre les cotes 450 m NGF et 1100 m NGF (Lebrouc et al, 2013). La zone la plus instable, située entre les cotes 450 m NGF et 950 m NGF, représente quant à elle une zone de 4 ha (Lebrouc et al, 2013).

Divers témoignages historiques indiquent l'existence d'éboulements à Séchilienne, dès 1726 et jusqu'en 1906 (Potherat et Effendiantz, 2009). Dans les années 1960, une recrudescence de l'instabilité est observée, supposément en lien avec une reprise de l'activité sismique de la faille de la Romanche. Au cours de l'hiver 1985, une augmentation du nombre de chutes de blocs, de la taille de ces derniers (atteignant la route RN 91), accompagnée d'une accélération du déplacement, alertent les pouvoirs publics.

En 1986, le CETE de Lyon (aujourd'hui Cerema Centre-Est) a été chargé de la surveillance opérationnelle du site et y a installé des extensomètres et des inclinomètres. En 1994, une galerie de reconnaissance de 240 m de longueur a été forée à environ 150 m à l'ouest de la zone la plus active, à 710 m d'altitude, pour la réalisation d'investigations en profondeur dans le massif. Puis en 2009 ce sont trois forages sub-verticaux profonds qui ont été réalisés, également en bordure ouest de la zone la plus active (cf. section 2.3).

Un Collège d'Experts pour les Ruines de Séchilienne, présidé par Marc Panet a été créé en 2000. Composé de spécialistes en sols, roches, mouvements gravitaires et hydraulique, ainsi que de représentants des services de l'Etat, il étudie les scénarios d'évolution et présente régulièrement ses conclusions relativement aux observations réalisées.

Ainsi, en 2000, le rapport Panet I du collège d'experts établissait l'éboulement potentiel de ce secteur (d'un volume estimé à 3 millions de m³) comme la principale menace à court terme. Les enjeux humains et économiques associés étaient importants. L'éboulement en question pourrait engendrer la coupure de la Romanche. Le barrage naturel ainsi constitué, lors de sa rupture, déclencherait l'inondation de la vallée : 18 400 habitants sur 8 communes étaient concernés par ce scénario. D'importantes pertes économiques étaient impliquées notamment en lien avec la coupure de l'axe routier en contrebas, unique itinéraire vers les stations de ski de l'Oisans (les Deux Alpes et l'Alpe d'Huez). De plus, la présence d'usines y ajoutait un risque environnemental.

Depuis 2009 et le rapport Panet III, l'effondrement catastrophique de la partie active est devenu très peu probable. Les études de la dynamique du versant ont montré une évolution en plusieurs phases du mouvement de terrain, et conclu sur

le caractère très peu probable de l'effondrement soudain des 3 millions de m³ redouté auparavant. Concernant les risques à long terme représentés par l'effondrement du reste du versant, depuis le collège d'experts, ce dernier devrait également se dérouler suivant des éboulements successifs sur plusieurs dizaines d'années.

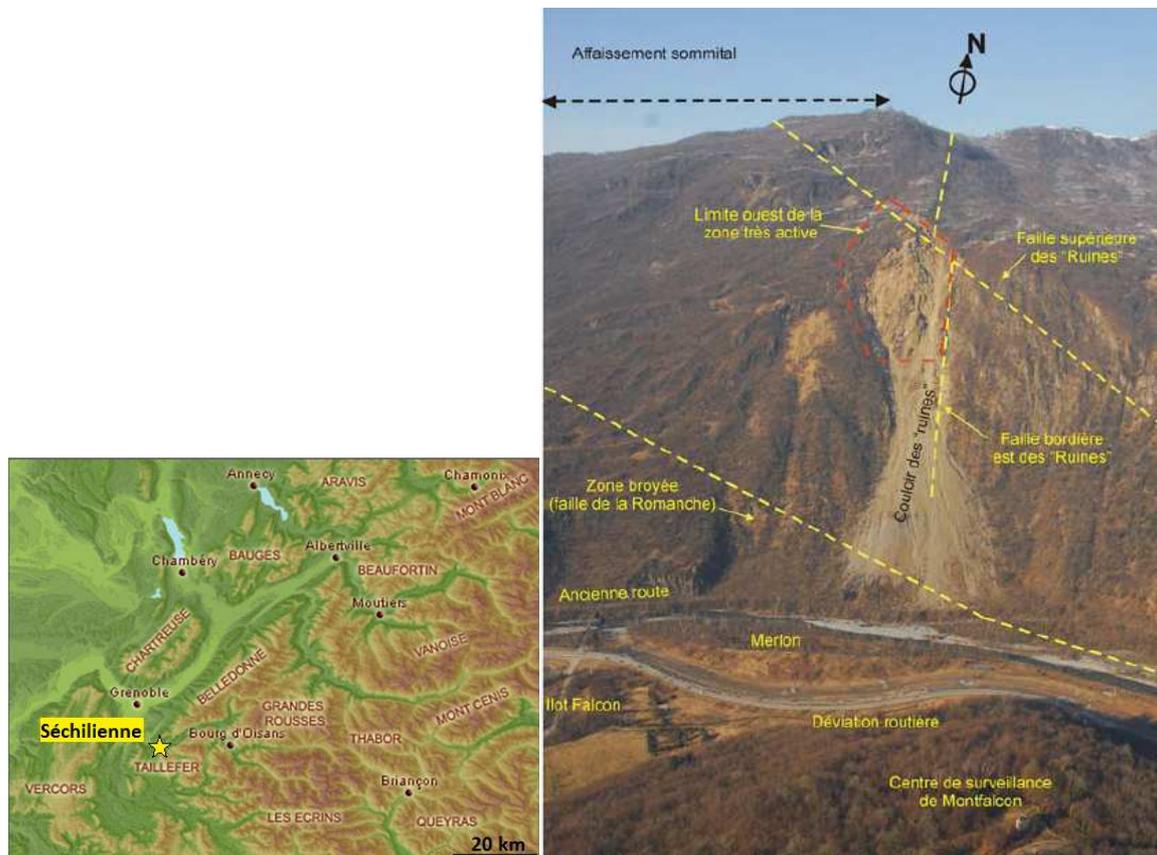


Figure 1 : (à gauche) carte des massifs alpins, l'étoile jaune indique l'emplacement du site (source : www.avalanche-net.com) ; (à droite) vue de face du versant instable des Ruines de Séchillienne et localisation des structures principales (Pothérat et Effendiantz, 2009).

Aujourd'hui, la vulnérabilité du site a été réduite par la déviation de la RN 91 sur l'autre rive de la Romanche, la dérivation de la Romanche grâce à la construction d'un chenal, l'expropriation de 94 habitations du Mont-Falcon (situé juste en face du Mont-Sec) et l'installation d'un merlon de protection de capacité de retenue d'environ un million de m³.

2.2 CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

La zone instable de Séchillienne est délimitée au nord par l'escarpement du Mont-Sec, à l'est par une longue fracture N20°E, tandis que les limites ouest et sud ne sont pas nettement marquées. Le mouvement de terrain peut être divisé en trois zones (Le Roux et al, 2011) : une zone d'affaissement (depletion zone) située entre les cotes 1100 et 950 m NGF, une zone d'accumulation (accumulation zone)

située entre 950 et 450 m NGF et une zone très active, appelée zone frontale (high motion zone), où les vitesses de déplacement ont été supérieures au mètre (Figure 2). Cette dernière zone est située à l'extrémité est de l'instabilité et surplombe le couloir des « Ruines » (Figure 1). Ce dernier est l'endroit privilégié des chutes de blocs. Sa longueur est d'environ 800 m pour une largeur d'une centaine de mètres (Le Roux et al, 2011).

Le massif de Séchilienne est principalement constitué de leptynites et de micaschistes très fracturés, datant du paléozoïque inférieur. Ces roches présentent une schistosité quasi-verticale de direction N20° E.

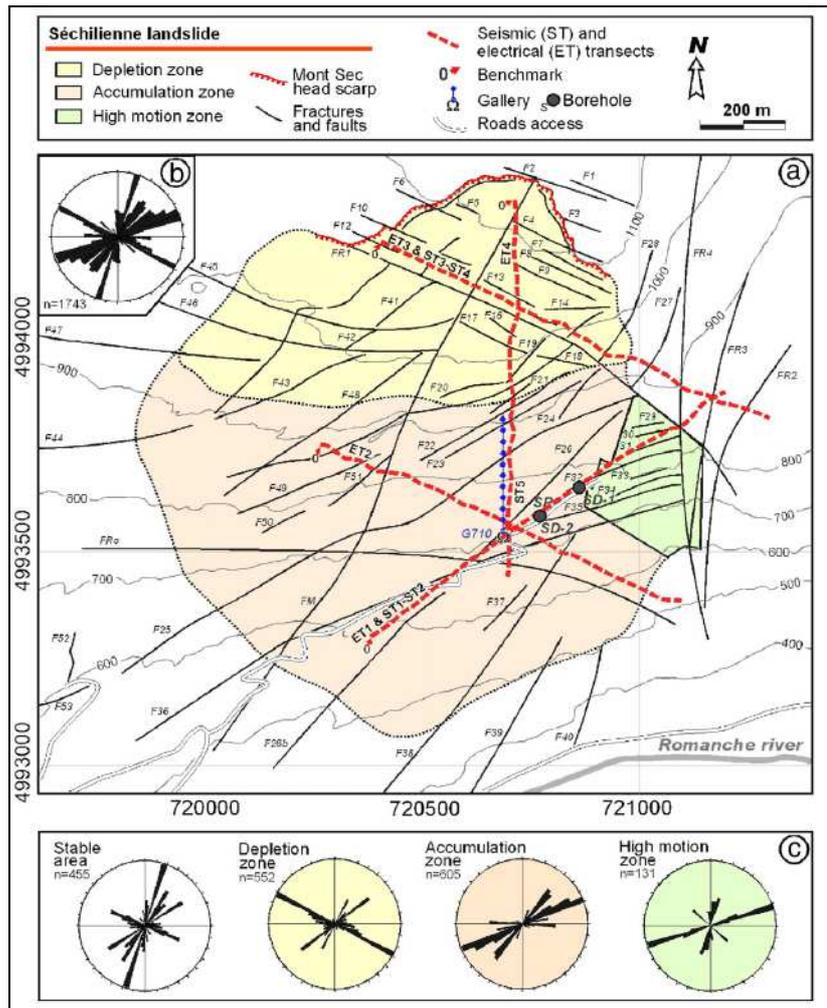


Figure 2 : carte de la zone d'instabilité où figurent les principales familles de failles (N20° E, N70° E et N110° E -N120° E) et les trois zones (zone d'affaissement – depletion - en jaune, zone d'accumulation en orange et zone frontale – high motion zone - en vert) (Le Roux et al, 2011).

Situé en bordure des Alpes, le site s'inscrit dans une histoire tectonique complexe. Trois familles de failles (au pendage quasi-vertical) y ont été recensées en surface (Figure 2) :

- ❖ 1ère famille de failles de direction N20°E : héritée de l'histoire tectonique des Alpes, cette famille de faille présente la même orientation que le chevauchement pennique (ou Belledonne Middle Fault, BMF), grand

chevauchement délimitant la zone externe de la zone interne des Alpes, situé à 2 km à l'est du site. La direction de ces failles correspond également à l'orientation du pli situé à l'ouest du site de Séchilienne et au plan principal de schistosité des micaschistes ;

- ❖ 2ème famille de failles de direction N70°E : elle correspond à des accidents géologiques régionaux, de part et d'autre de la BMF (Leroux et al, 2010). Dans la zone d'accumulation de Séchilienne, ces fractures ouvertes délimitent des blocs quasi-verticaux qui, localement, basculent et qui ont été progressivement remplis d'éboulis grossiers (Lebrouc et al, 2013). Il est possible de voir sur le « profil structural » (Figure 4) que ces failles découpent l'ensemble du terrain déstabilisé. Les observations dans la galerie de reconnaissance confirment la présence d'une succession de blocs indéformés de plusieurs dizaines de mètres séparés par des zones broyées (allant du mètre à la dizaine de mètres) remplies de matériau argileux. La faille décrochante de la Romanche présente également cette orientation ;
- ❖ 3ème famille de failles de direction N110°E-N120°E : cette famille a également été interprétée comme un héritage de l'histoire tectonique de la région. Elle est dominante dans la zone d'affaissement, en haut du versant (Lebrouc et al, 2013).

Une dernière famille de discontinuités est mise en évidence par les mesures faites dans la galerie d'exploration :

- ❖ 4ème famille de discontinuités : cette famille regroupe des fractures courtes (métriques) de pendage quasi-parallèles à la pente topographique (environ 40° vers le sud-sud-est) et de direction N75°E. Elle se combine avec la famille de fractures N70°E pour former une géométrie « en marches d'escalier » (Figure 3) qui favorise probablement le mouvement descendant. De telles fractures, de pendage correspondant à la pente, sont fréquemment observées dans les zones autrefois couvertes par un glacier. Elles sont communément attribuées au relâchement des contraintes dû à la disparition de celui-ci. Mais le permafrost peut également être à l'origine de ce genre de fracturation. Lebrouc et al (2013) ont modélisé le permafrost dans le but d'expliquer le délai de 6200 ans, mis en évidence par les datations, entre la fonte du glacier et le début de la déstabilisation (Leroux, 2009). Il s'avère qu'il y a une concordance entre la profondeur du terrain fragilisé connu actuellement (Figure 4) et la profondeur atteinte par leur modélisation du permafrost.

À la vue de l'ensemble des données récoltées, le retrait du glacier de la Romanche il y a 16600 ans (datation par Le Roux et al, 2009) serait le déclencheur de la déstabilisation du massif. La décompression liée à la décharge serait à l'origine de la création de fractures subparallèles à la vallée (N70°E) et l'affaissement en coin du sommet de Mont-Sec. Ces fractures sont à l'origine du découpage « en lanières » du versant (Figure 4). Le mécanisme d'effondrement serait en lien avec le basculement de ces blocs. Ceci permet d'expliquer l'incapacité jusqu'à aujourd'hui d'identifier une surface de glissement. La persistance d'un permafrost, après le retrait du glacier, peut également expliquer l'apparition des fractures de direction N70°E parallèles à la pente.



Figure 3 : photographies in situ des failles en "marche d'escalier" formée par l'intersection des deux familles de fractures d'orientation N70°E (Lebrouc et al, 2013).

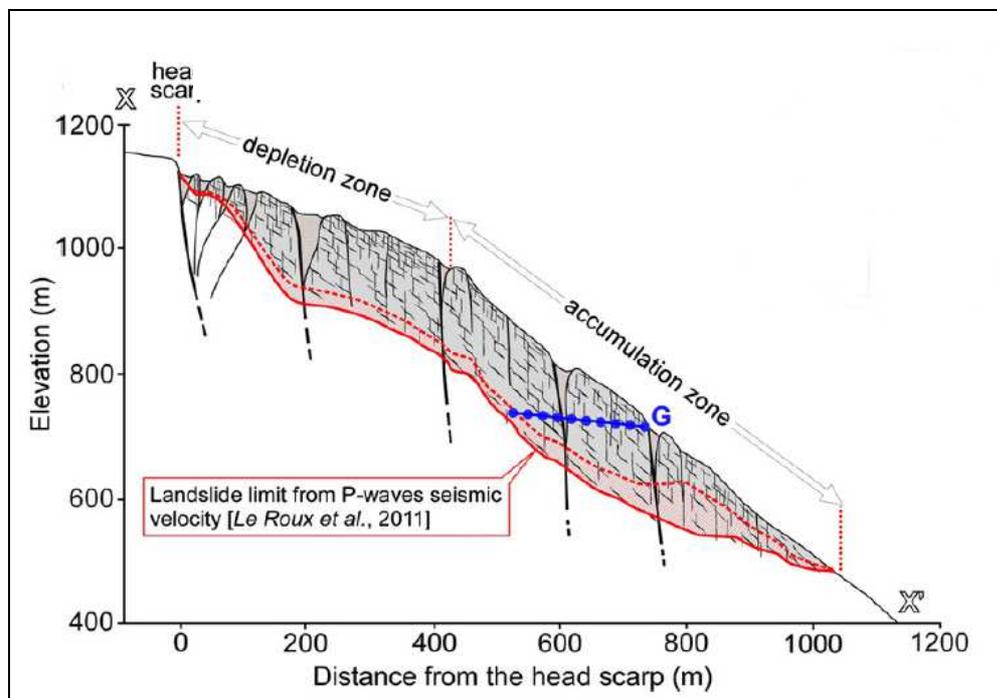


Figure 4 : profil structural du massif : près de l'escarpement la zone d'affaissement, puis la zone d'accumulation (modifié à partir de Lebrouc et al, 2013), voir aussi la figure 2.

Un modèle hydrogéologique du versant (Vallet et al. 2015b) décrit la coexistence de deux aquifères, profond et perché : le drainage des eaux vers l'aquifère

profond s'opère par les failles quasi-verticales d'orientation N70°E. Dans les périodes de grandes venues d'eaux (précipitations plus ou moins intenses sur de longues durées), le niveau de l'aquifère profond pourrait atteindre un niveau suffisant pour connecter les zones saturées de l'aquifère perché. Une circulation de l'eau, parallèle à la pente, se mettrait alors en place par le réseau de fractures parallèles à la pente. Ces deux aquifères ont une surface de recharge qui dépasse la surface du mouvement de versant puisqu'ils sont tous deux rechargés par un aquifère perché situé dans la couverture sédimentaire à 1050 m d'altitude.

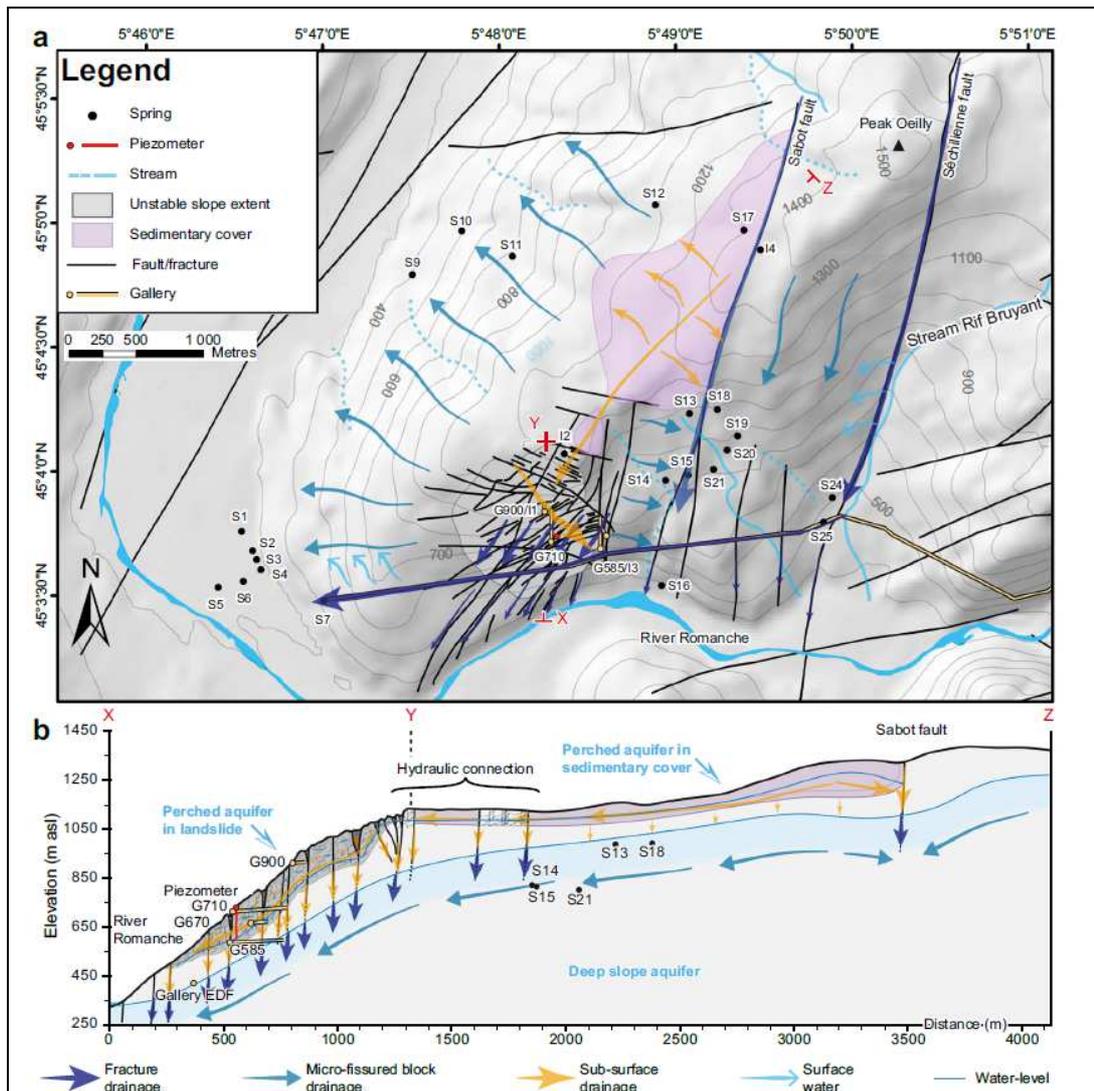


Figure 5 : modèle hydrogéologique proposé par Vallet et al. (2015b).

2.3 CONFIGURATION DU DISPOSITIF D'OBSERVATION EXPERIMENTAL MULTI-PARAMETRES

Les mécanismes de déformation en profondeur des Ruines de Séchilienne, leurs rôles dans les accélérations et leur relation empirique établie avec les données météoriques étaient mal connus en 2009. C'est pourquoi, le Collège d'Experts (cf. section 2.1) avait recommandé la réalisation d'investigations complémentaires par forages profonds sur le site. C'est dans ce contexte que l'Ineris, en collaboration étroite avec le Cerema, est intervenu (cf. Etude de conception, réf. Ineris : DRS-09-103900-07382A).

Entre 2009 et 2010 pour permettre l'instrumentation de l'Ineris, les ouvrages « souterrains » suivants (leur localisation est montrée dans la Figure 6) ont été réalisés :

1. deux forages verticaux, profondeur 1 m, dans la galerie subhorizontale de reconnaissance (dite station Galerie) pour instrumentation en forage de deux sondes 3D multi-paramètres ;
2. un forage destructif, SD (80 m) dédié à l'instrumentation microsismique, (dit station Piste) ;
3. un forage destructif SP (150 m) dédié à l'instrumentation hydrologique.

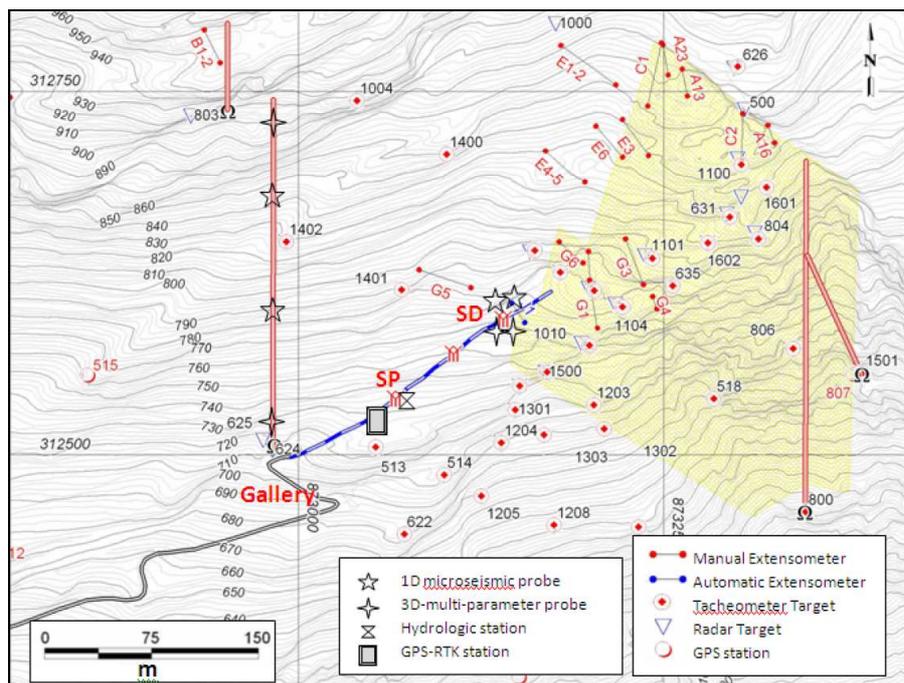


Figure 6 : carte de localisation des forages (SD et SP), de la galerie de reconnaissance (Gallery) et des équipements du système de télésurveillance multi-paramètre de l'Ineris au début de l'expérimentation (source Cerema).

Les travaux d'instrumentation par l'Ineris se sont déroulés entre juin et novembre 2009, une vue d'ensemble du dispositif est donnée dans la Figure 7. Ces travaux ont été suivis d'une période de quelques semaines de « réglages préliminaires, mise en service et validation de bon fonctionnement » avant sa mise en service

opérationnel à l'automne 2009. Excepté pour les données microsismiques, la validation des données durant cette phase a été rapide car leur lecture et analyse sont quasi-immédiates. La cohérence avec les mesures du Cerema a aussi pu être vérifiée. Pour les données microsismiques, la phase de validation s'est en réalité opérée en deux temps. La réponse des sondes microsismiques a été évaluée d'abord par coups de masse à proximité immédiate des sondes, puis à l'occasion d'une campagne de tirs de calage réalisée en 2010 (cf. section 3.2.1 pour plus de détails).

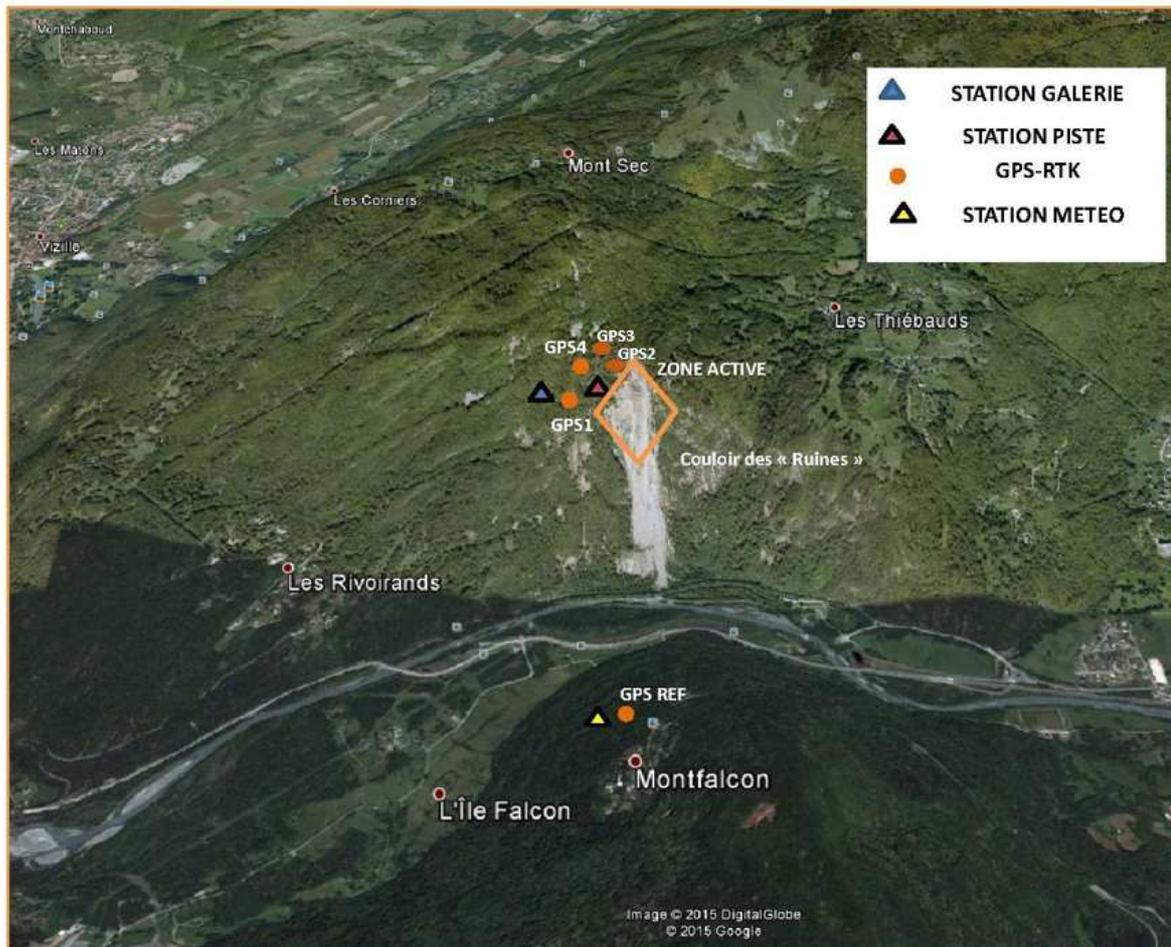


Figure 7 : vue d'ensemble du dispositif de surveillance multi-paramètre de l'Ineris (Google Earth).

L'ensemble des caractéristiques techniques, métrologiques et électriques, ainsi que les références des équipements de mesure et d'acquisition ont été décrites dans le rapport d'installation (réf. Ineris : DRS-10-112150-01857A).

Concrètement, le dispositif mis en œuvre à Séchillienne produisait :

- des enregistrements microsismiques sur la base de critères de dépassement de seuils en amplitude ;
- des mesures de déplacements par GPS différentiel précis (RTK) ;

- des mesures inclinométriques intégrées aux sondes microsismiques trois composantes positionnées en entrée et en fond de galerie ainsi qu'en forage vertical ;
- des mesures météorologiques (précipitations, températures de l'air et du sol, pression atmosphérique) sur le versant opposé (au Mont Falcon) ;
- des mesures de la piézométrie naturelle de la nappe du versant ainsi que des mesures de conductivité-température à l'aide de capteurs positionnés à ~147 m de profondeur.

Précisons néanmoins que l'implantation des sondes microsismiques ayant été contrainte par le positionnement des ouvrages (galerie et sondages profonds), elle n'était pas optimale pour l'analyse en localisation d'événements provenant de la zone active.

2.4 INFORMATION SUR L'ACQUISITION, LA TRANSMISSION ET LA GESTION DES DONNEES

Les données multi-paramètres acquises ont été chaque jour transmises automatiquement (via le réseau mobile haut débit) au CENARIS (Centre de Surveillance National des Risques du Sol et du Sous-sol) de l'Ineris, basé à Nancy. Le traitement et la gestion de la base de données ont été réalisés à l'aide de l'infrastructure de surveillance [e.cenaris \(https://e.cenaris.ineris.fr/SYTGEMweb_3.1/public/\)](https://e.cenaris.ineris.fr/SYTGEMweb_3.1/public/) qui intègre un outil de web-monitoring sécurisé. Celui-ci garantit un accès continu et un partage contrôlé des données et métadonnées ; il s'appuie sur des fonctionnalités d'édition simple et efficace des données et résultats avancés de traitement et analyse. Dès 2010, il a été ouvert au Cerema Centre-Est et au BRNT, puis aux partenaires du projet ANR SLAMS. Entre le début du projet en 2009 et la fin des opérations sur site en 2016, cet outil a été enrichi de nouvelles sorties graphiques et fonctionnalités. Le traitement et l'analyse de données ont été menés en lien étroit avec le Cerema, ainsi qu'avec les équipes de l'Université de Franche-Comté (UFC) pour la corrélation avec les données météorologiques, ainsi qu'avec l'Institut de Sciences de la Terre (ISterre) de Grenoble pour les données microsismiques.

3. RETOUR D'EXPERIENCE SUR LE FONCTIONNEMENT ET LE BILAN DE DONNEES DE MESURE

3.1 BILAN FONCTIONNEL ET TECHNOLOGIQUE

Le dispositif d'observation expérimentale multi-paramètre de Séchilienne a correctement fonctionné. Il a fait l'objet d'évolutions et d'améliorations techniques mineures tout au long du projet.

Le taux de fonctionnement annuel par type d'équipements de mesure sur la période d'observation est illustré en figures 8, 9 et 10.

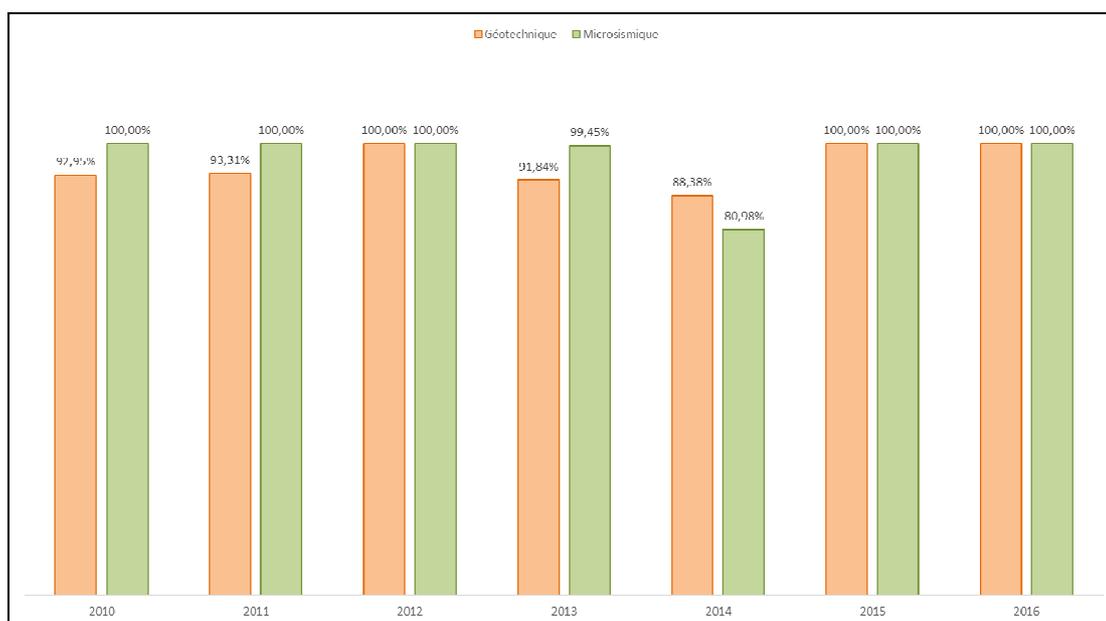


Figure 8 : détails des taux de fonctionnement annuel par type d'équipements (microsismique et géotechnique).

Notons que les équipements ne présentent pas un taux de fonctionnement identique : les sondes microsismiques et inclinométriques ont pleinement fonctionné (Figure 8) alors que des arrêts d'acquisition ont affecté les équipements de mesure géodésique (Figure 8) de façon différente pour chaque balise de mesure. Il a en effet été nécessaire de déplacer l'une des balises (GPS 2) à plusieurs reprises pour ne pas la perdre (parce que le secteur s'était considérablement dégradé). Les équipements géodésiques ont également fait l'objet de mises à jour qui ont nécessité un retour en atelier (cf. section 3.2.2). Pour les équipements météorologiques le taux de fonctionnement s'est dégradé à partir de 2014, en raison de dysfonctionnements techniques (Figure 10). Ils n'ont pas été suivis d'efforts de remise en route particulier car des données météorologiques de grande qualité étaient par ailleurs disponibles via le Cerema.

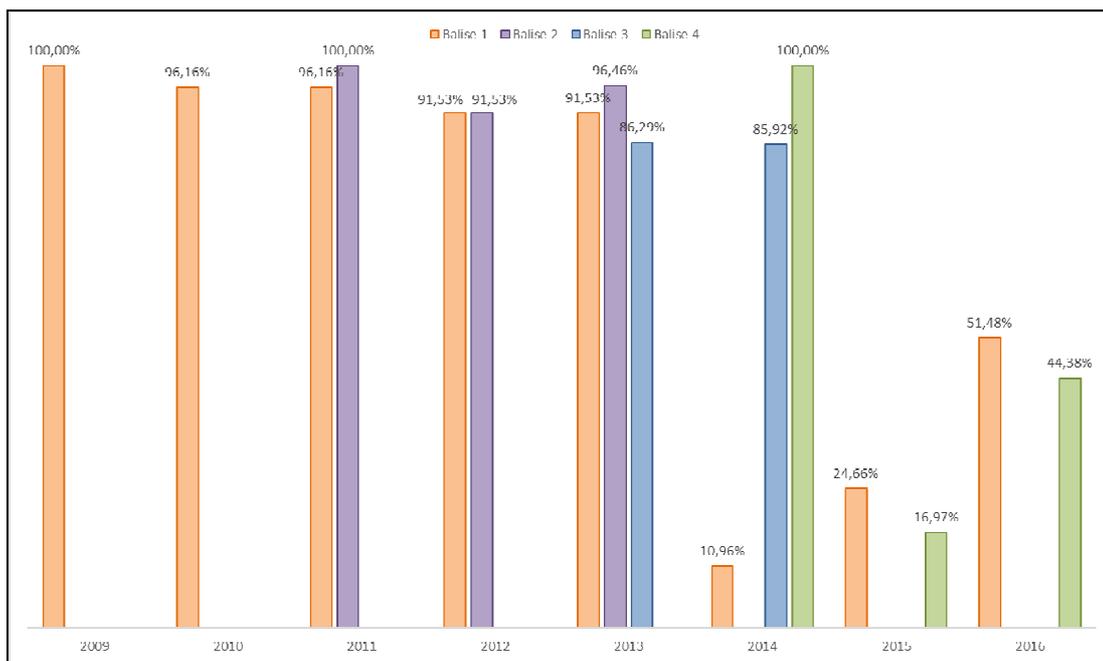


Figure 9 : détails des taux de fonctionnement annuel pour la géodésie (GPS-RTK). Les balises de mesure sont la balise 1, pour laquelle la position n'a jamais changé et la balise de mesure 2 (Figure 7), dont la position a changé plusieurs fois. Cette dernière est devenue ensuite balise 3, puis balise 4 (cf. Figure 7).

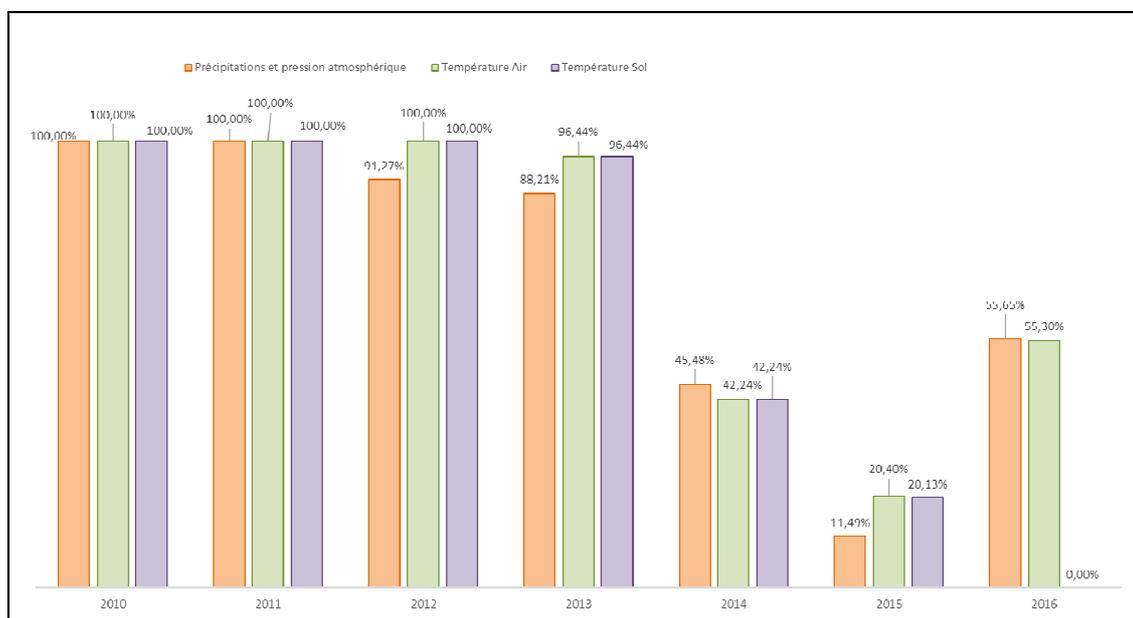


Figure 10 : détails des taux de fonctionnement annuel de la station météo (au Mont Falcon, cf. Figure 7).

3.2 BILAN DES DONNEES DE MESURE SUR LA PERIODE

3.2.1 ACTIVITE MICROSISMIQUE SUR LA PERIODE

Précisons que le bon couplage des sondes microsismiques avec le terrain ainsi que les capacités de détection du réseau d'écoute microsismique ont pu être démontrées en 2010 à la suite du traitement et de l'analyse de données de calibrage par campagne de tirs. L'analyse des sismogrammes de tirs avaient aussi permis de montrer que les signaux étaient globalement bien polarisés et de mettre en évidence des contrastes importants de vitesse de propagation d'ondes entre les couches superficielles et les couches profondes (réf. Rapport Ineris : DRS-10-112150-14033A).

Plus généralement, comme évoqué précédemment, l'activité microsismique a été enregistrée par dépassement de seuils en amplitude. Dès la première année de monitoring, un catalogue des enregistrements microsismiques a été défini et il a été possible de caractériser deux familles principales d'enregistrements (réf. Rapport Ineris : DRS-11-117635-04322A) :

- les séismes locaux ;
- les enregistrements associés à l'évolution du versant (dits événements microsismiques) se répartissant en trois groupes distincts :
 1. des signaux transitoires de très courte durée, détectés exclusivement au fond de la galerie de reconnaissance et vraisemblablement liés à des chutes de blocs et petits éboulis dans la galerie ;
 2. des signaux de type « trémors » (McNutt, 1992) qui présentent une arrivée d'ondes émergentes et peuvent durer plusieurs dizaines de secondes ;
 3. des événements isolés avec une arrivée d'ondes plus impulsive et de durée plus courte .

Le Tableau 1 présente les caractéristiques plus détaillées de ces signatures, illustrées également par les sismogrammes en Annexe A.

Une étude comparative entre le catalogue de l'Ineris et celui de l'ISTERRE a aussi été menée. Le réseau ISTERRE étant bien plus dense (22 capteurs répartis sur 3 antennes de surface), l'analyse comparative s'est portée sur les enregistrements de la station GAL la plus proche des équipements de l'Ineris. (réf. Rapport Ineris : DRS-11-117635-09100A). Elle avait permis de confirmer la bonne sensibilité des sondes installées puisqu'à seuils de déclenchements équivalents les sondes Ineris détectaient près de 300% d'enregistrements de plus que la station GAL à proximité immédiate.

Cette étude comparative avait aussi démontré que l'implantation des sondes en profondeur permettait de s'affranchir des bruits et artefacts de surface et garantissait ainsi la détection quasi-exclusive d'événements associés à l'évolution interne du versant. Certains événements microsismiques n'étaient ainsi détectés et enregistrés que par les stations de mesure du réseau d'écoute microsismique dans les ouvrages souterrains « à bas bruit » (galerie de reconnaissance et forage SD). A l'évidence, ces événements n'étaient pas détectés par le réseau d'auscultation sismique de l'ISTerre à cause de la fréquence de ces événements trop importante.

Tableau 1. Caractéristiques des différents types de signaux transitoires associés à l'évolution du versant des Ruines de Séchillienne - Ineris.

Evénement	Durée	Fréquence	Observations
Chute de blocs GALERIE	< 0,2 s	> 100 Hz	<ul style="list-style-type: none"> • Occurrence aléatoire • Vraisemblablement liée à de petits éboulements ou chutes de petits blocs
Isolé	< 0,2 s	< 100 Hz	<ul style="list-style-type: none"> • Contenu fréquentiel faible • Signaux globalement bien polarisés
Trémor	Durée variable 0,5 < t < 15 s	Basse fréquence < 60 Hz	<ul style="list-style-type: none"> • Arrivée d'ondes très émergentes sur l'ensemble des sondes de mesure

S'agissant de la répartition temporelle des événements microsismiques, elle est illustrée en Figure 11. Le début de la période d'observation avait été caractérisé par une activité peu soutenue. Entre 2011 et 2012 cette activité avait progressé de 220% et mis clairement en évidence une évolution accrue du mouvement de versant, avec une crise microsismique importante à la mi-novembre 2012. A la même période le Cerema avait relevé des ouvertures de fractures et déplacements importants et constaté que les vitesses n'avaient jamais été aussi élevées (réf. Rapport Ineris : DRS-13-135995-08714A).

Cette crise a également marqué une évolution dans la signature des événements microsismiques (Tableau 2) : en 2011, les trémors ne représentaient que 65% des enregistrements alors qu'au 1er semestre 2013 ils représentaient ~90% des enregistrements.

L'année 2013 a été la plus intense avec un pic d'enregistrements (339 signaux microsismiques) dans la journée du 20 octobre. Cette crise démarrée le 19/10/2013 (70 événements ce jour-là) et terminée le 21/10/2013 (27 signaux enregistrés) a été la plus importante de toutes en nombre d'événements sur une période de 24h. Elle a été probablement en lien avec deux éboulements de volumes de l'ordre de 500 m³ (information OMIV). Le deuxième éboulement (du 21 octobre) a correspondu à la remise en mouvement d'un bloc de plusieurs dizaines de m³ dans le couloir est des Ruines (information reçue par le Cerema Centre Est). Un troisième éboulement a eu lieu le 7 décembre 2013 (22 signaux enregistrés), l'estimation du volume éboulé était l'ordre de 2500 à 3000 m³ (information Cerema Centre Est). Encore une fois, pendant ces crises la plupart des signaux enregistrés, ont été de type « trémors ».

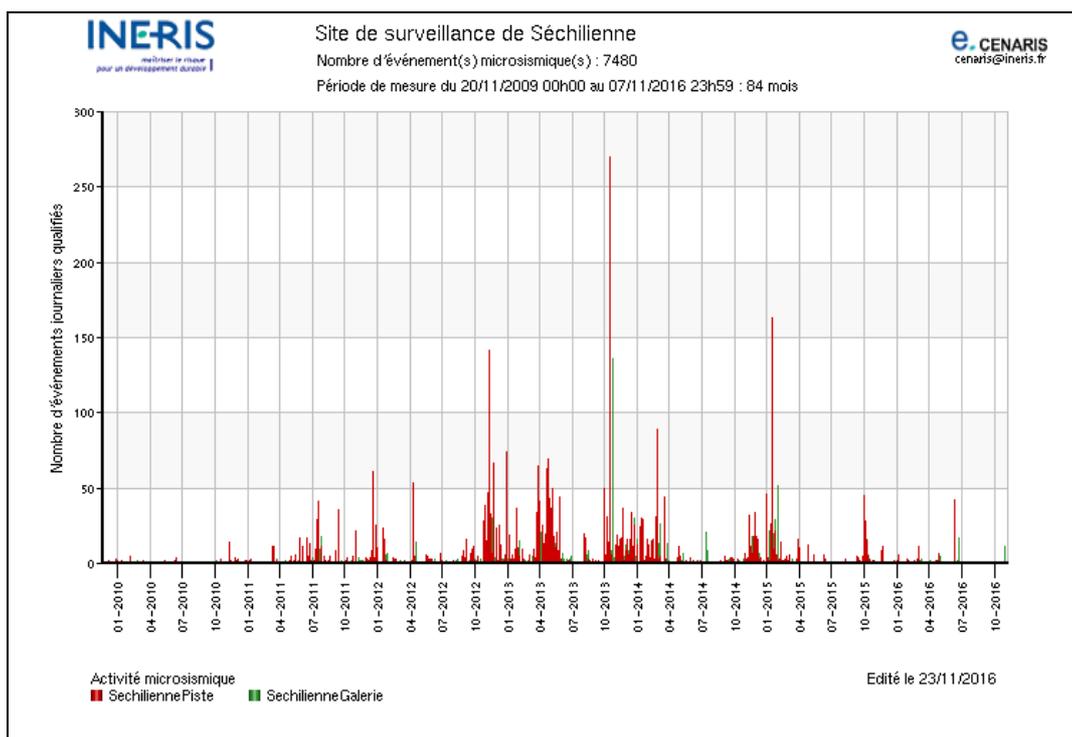


Figure 11 : histogramme de l'activité microsismique de deux stations Piste et Galerie (cf. Figure 7) sur toute la période de vie du dispositif d'observation expérimentale.

A partir de 2014, la baisse d'activité microsismique coïncide avec une baisse des vitesses de déplacement de surface constatée aussi par le Cerema Centre Est. Quelques périodes de crises ont eu lieu en janvier et octobre 2015, sans informations particulières de la part du Cerema. Enfin en 2016, la baisse de l'activité se confirme. Le Tableau 2 montre une répartition de différents types d'événements pour la période d'étude.

Tableau 2 : Synthèse de différents types de signature sismique à Séchillienne.

Année	Evénements microsismiques (Nb Total)	Chutes de Blocs (Nb)	Evénements Isolés (Nb)	Trémors (Nb)	% trémors
2009	11	2	2	7	63%
2010	123	31	16	76	62%
2011	731	61	197	473	65%
2012	1603	69	167	1367	85%
2013	2573	68	149	2356	91%
2014	1114	44	163	907	81%
2015	919	26	164	729	79%
2016 (07/11/16)	173	14	49	110	66%

3.2.2 MESURE DE DEPLACEMENT EN SURFACE PAR GPS-RTK

Comme évoqué précédemment (cf. § 2.3) le suivi des déplacements de surface à Séchilienne a été opéré avec deux stations de mesure GPS-RTK installées sur le glissement (balise 1 et 2) et une station de référence GPS-RTK installée au Mont Falcon, en dehors de la zone instable (cf. Figure 7).

Cet ensemble de balises a connu quelques dysfonctionnements et évolutions techniques qui ont nécessité des retours en atelier, notamment entre l'été 2015 et le printemps 2016.

A noter que les mesures GPS-RTK fournissent l'ensemble des données quantitatives nécessaires à l'analyse du champ de déplacement tridimensionnel, sans aucun traitement *a posteriori* et cela a eu un intérêt non négligeable pour la surveillance en quasi temps réel. Pour rappel, la convention de signe est telle qu'une variation positive en latitude indique un déplacement vers le nord, une variation positive en longitude un sens de mouvement vers l'ouest. La précision du capteur est +/- 30 mm.

La balise GPS-RTK 1 n'a jamais changé de position durant toute la période de mesure. Sa chronique de données, en termes de déplacement relatif (latitude, longitude et altitude), sur toute la période d'observation est assez stable comme montré dans la Figure 12. Le détail de ses mesures sont disponibles dans le Tableau 3.

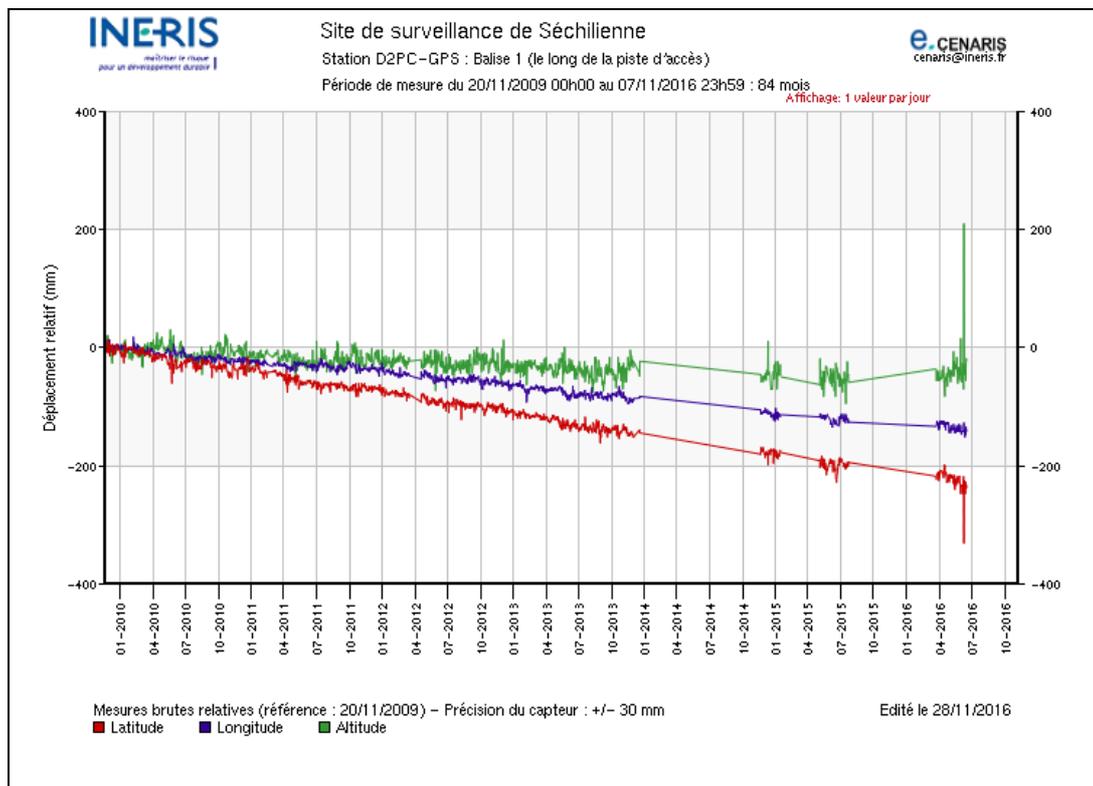


Figure 12 : chroniques temporelles de déplacement en surface en termes de latitude, longitude et altitude pour la balise 1 pour toute la période d'observation (les droites indiquent un manque de données suite à une panne).

Tableau 3: Bilan des déplacements mesurés par la balise GPS-RTK 1.

Déplacement cumulé de la balise GPS1 (mm)	Du 24/07/15 au 17/06/16	Du 20/11/09 au 24/07/15	Du 20/11/09 au 30/11/14	Du 20/11/09 au 30/06/13	Du 01/01/12 au 31/12/12	Du 01/01/11 au 31/12/11	Du 20/11/09 au 31/12/10
En latitude	-238	-194	-173	-134	-35	-46	-30
En longitude	-139	-126	-107	-81	-29	-12	-25
En altitude	-21	-58	-48	-36	-9	4	-19
Déplacement 3D	276	239	209	161	46	47	43

Cette balise GPS n°1 était positionnée dans un secteur dans lequel les déplacements sont de faibles amplitudes et peu affectés par des changements de régime de déformation en surface (Tableau 3).

A l'inverse, la balise GPS-RTK 2, installée en avril 2011, en bordure ouest du couloir des Ruines, a mesuré des déplacements très importants qui ont nécessité son déplacement fin avril 2013 (parce que le secteur s'était considérablement dégradé - elle est alors renommée balise 3). Pour la même raison elle a à nouveau été déplacée en juillet 2014 (elle est alors renommée balise 4 - cf. Figure 7). Le Tableau 4 montre le déplacement mesuré par cette balise au fil du temps et de ses positionnements successifs.

Tableau 4: Bilan des déplacements mesurés par la balise GPS-RTK n°2 (nommées GPS 2, GPS 3 et GPS-4).

Déplacement cumulé mesuré par les balises GPS2, 3 et 4	Du 04/07/14 au 27/06/2015 <u>GPS4</u> (mm)	Du 26/04/13 au 25/05/14 <u>GPS3</u> (m)	Du 29/04/11 au 23/04/13 <u>GPS2</u> (m)	Du 30/04/12 au 23/04/13 <u>GPS2</u> (m)	Du 29/04/11 au 29/04/12 <u>GPS2</u> (m)
En latitude	-2,92	-3,42	-5,66	-3,73	-1,93
En longitude	-38,39	-0,56	-1,78	-1,15	-0,63
En altitude	-86,35	-2,29	-3,06	-2,07	-0,99
Déplacement 3D	94,55	4,03	6,67	4,41	2,26

La direction de déplacement donnée par cette balise est sud-sud-est, cohérente avec la direction N150°E- N150°E estimée par le Cerema. En outre, le déplacement 3D de cette balise, présenté en figures 13 et 14, peut être décomposé en cinq périodes principales qui mettent en évidence l'évolution du versant de Séchilienne et qui sont en accord avec les mesures de déplacement du Cerema et les observations sur le terrain :

- la période « P1 », entre mai 2011 et janvier 2012, caractérisée par une vitesse

de déplacement de la balise l'ordre de 2 m/an (Figure 13);

- la période « P2 », comprise entre janvier 2012 et novembre 2012, caractérisée par une cinétique de déplacement plus importante, de l'ordre de 2,2 à 2.4 m/an ;
- la période « P3 », entre novembre 2012 et le mois de juin 2013 (déplacement de la balise 2 vers le site n°3), avec une forte accélération du déplacement de la balise 2, de l'ordre de 5 m à ponctuellement 9 m/an ;
- la période « P4 » (Figure 14), comprise entre juin 2013 et mars 2014 (balise 3), qui indique une atténuation de la cinétique de glissement de la zone frontale, avec une vitesse de déplacement moyenne de l'ordre de 3,5 à 4 m/an ;
- la période « P5 », la plus récente, comprise entre mars et juin 2014, qui semble indiquer sur seulement 4 mois, une décélération de la cinétique de glissement, avec une vitesse moyenne de déplacement 3D de l'ordre de 2,5 m/an. Pour rappel, la balise du site 3 a été endommagée par un éboulement partiel de la zone frontale en juin 2014.

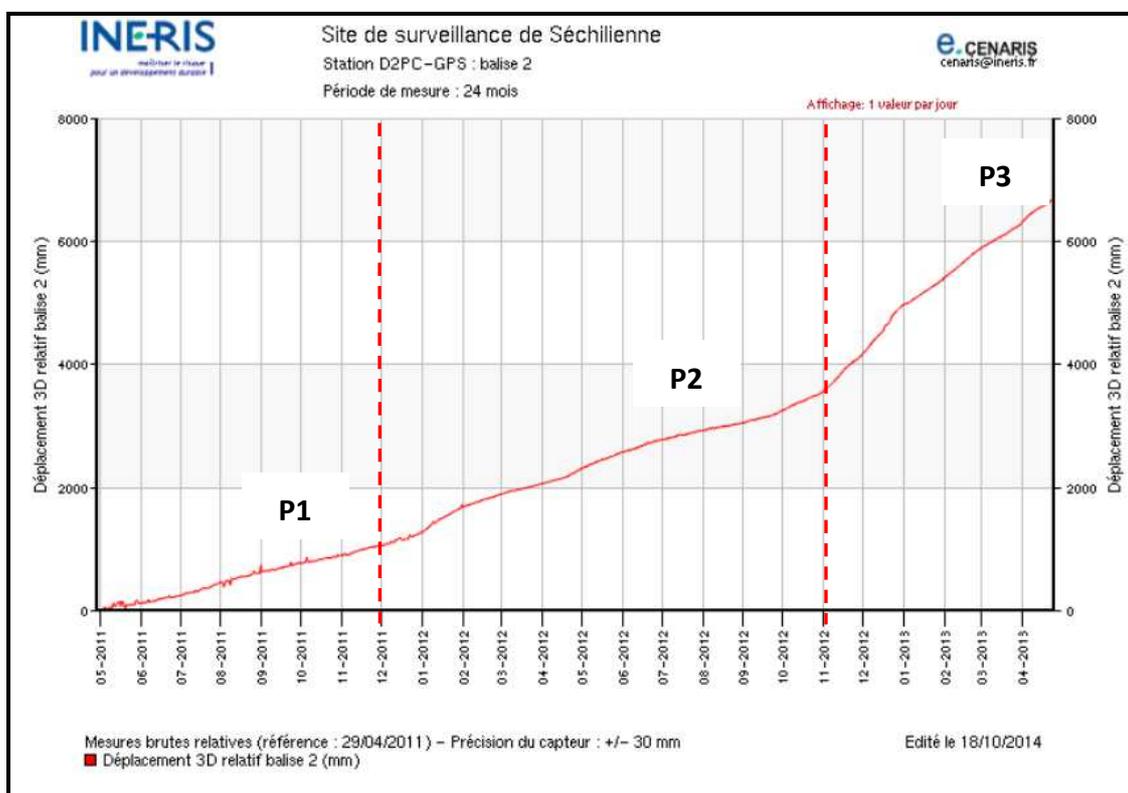


Figure 13 : évolution cinétique de la zone frontale de Séchillienne entre mai 2011 et avril 2013 – Déplacement 3D de la balise 2.

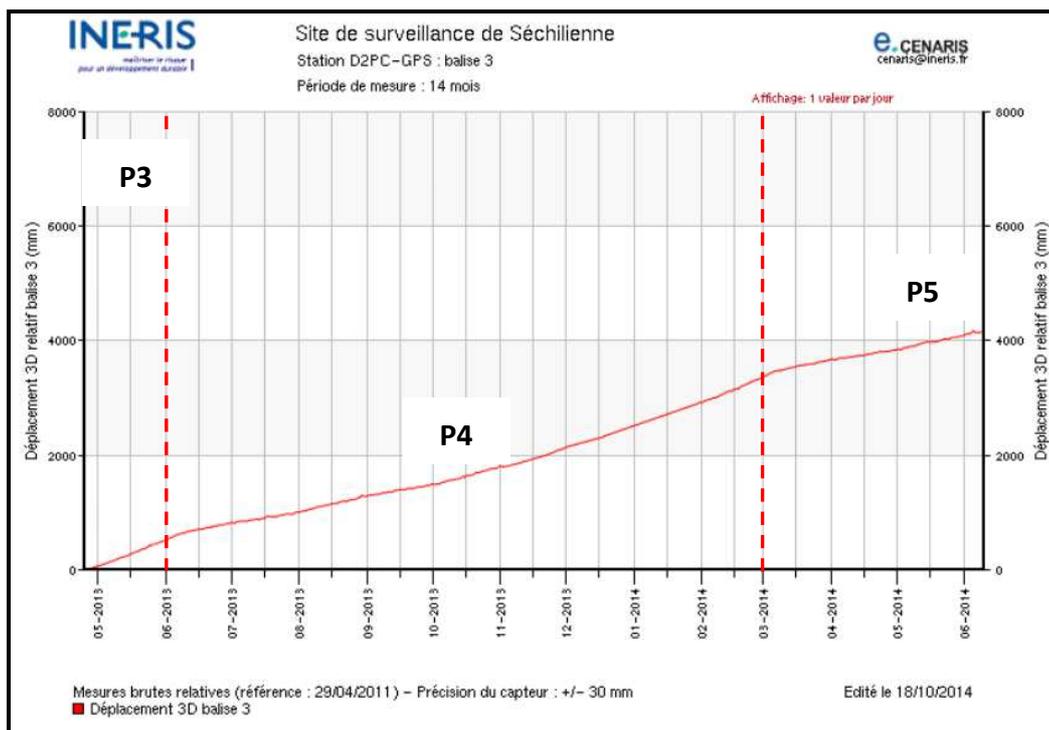


Figure 14 : évolution cinétique de la zone frontale de Séchillienne entre mai 2013 et juin 2014 – Déplacement 3D de la balise 3.

Globalement, ces mesures géodésiques ont bien traduit la dynamique du versant des Ruines de Séchillienne et plus en général un déplacement vers la vallée, accompagné d'un déplacement vers l'est. Elles ont été cohérentes avec les mesures du système de surveillance opérationnelle du Cerema Centre-Est.

3.2.3 MESURES INCLINOMETRIQUES

La Figure 15 présente les mesures d'inclinométrie dans la galerie de reconnaissance G710. Pendant toute la période d'étude ces mesures ont montré, à l'entrée de galerie (sonde KB12) un mouvement saisonnier de basculement vers le sud-ouest et en fond de galerie (sonde GS20) un mouvement lent de basculement vers le nord. Si le mouvement saisonnier en entrée de galerie est bien connu, le mouvement observé en fond de galerie a fait l'objet de nombreuses discussions avec le Cerema Centre-Est, car il n'est en effet pas corroboré par les autres observations faites à proximité. L'hypothèse la plus probable, est que les différences observées sont imputables à un effet local en fond de galerie.

En profondeur (cf. Figure 16) dans le forage SD, après correction des orientations des sondes (réf Rapport Ineris : DRS-13-135995-08714A), la direction du mouvement est orientée quasiment plein sud à 40 m de profondeur et orienté N140°E (sud-est) à 80 m de profondeur. Cette dernière direction correspond à l'estimation de la direction du mouvement du versant autour de N150°E- N160°E, perpendiculaire à celle des grandes lames verticales affectant le massif rocheux (Chanut et al., 2014 et cf. figure 2).

L'amplitude du mouvement a toujours été plus importante entre 40 m et 80 m de profondeur (cf. Annexe F). Cela est encore une fois conforme avec les mesures relevées par le Cerema et avec le comportement connu.

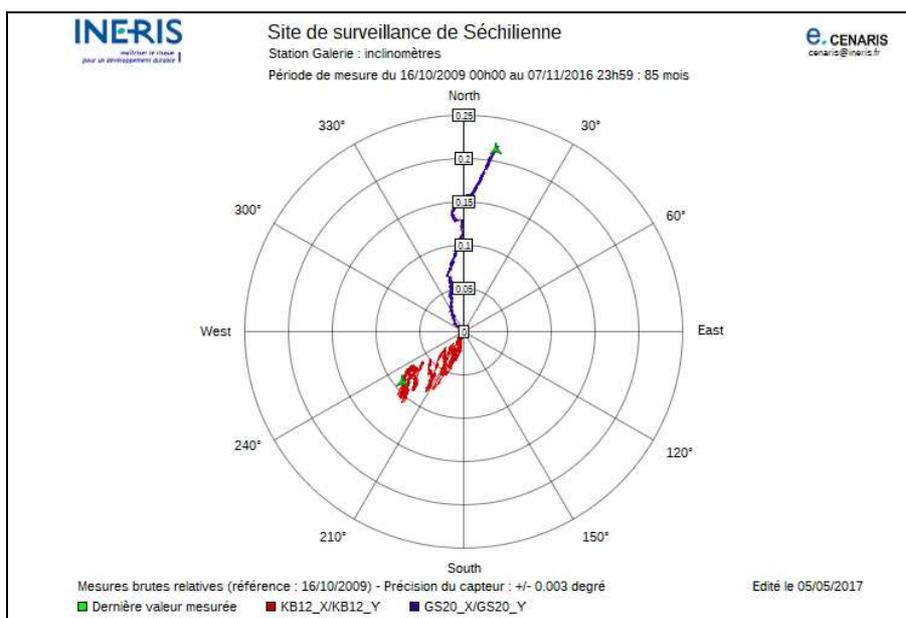


Figure 15 : mesures inclinométriques relatives (réf. 16/10/2009) à la station Galerie en projection hémisphérique supérieure (le curseur vert indique la dernière mesure sur la période). La sonde KB12 (en rouge) est positionnée en entrée de galerie, la sonde GS20 (en violet) en fond de galerie.

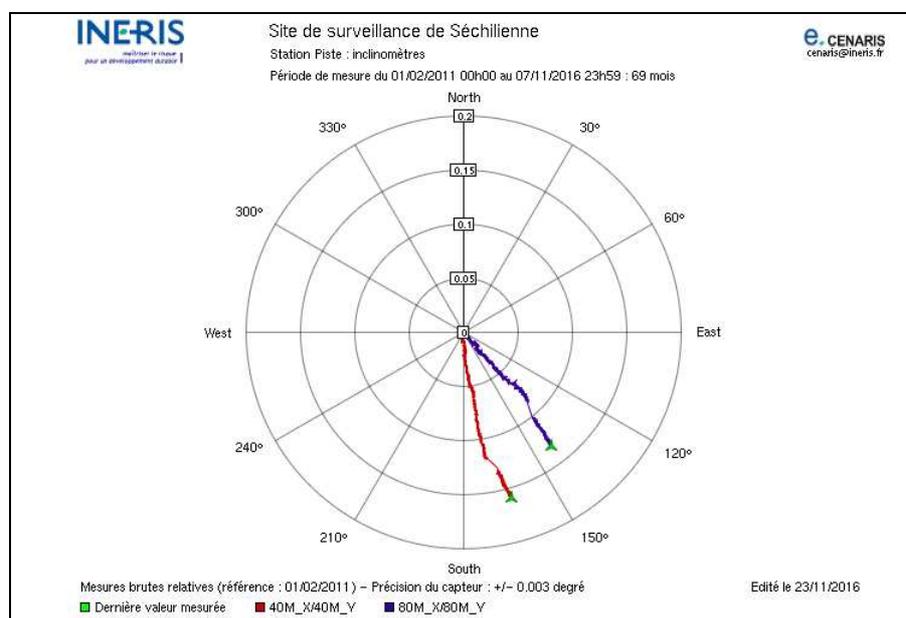


Figure 16 : mesures inclinométriques relatives (réf. 20/11/2009) à la station Piste en projection hémisphérique supérieure (le curseur vert indique la dernière mesure sur la période). Les sondes 40M et 80M sont positionnées respectivement à 40 m (en rouge) et 80 m (en violet) de profondeur dans le forage SD.

3.2.4 AUTRES MESURES

Des mesures météorologiques ont également été acquises : température de l'air et du sol, pluviométrie et pression atmosphérique. Pour rappel la station météo de l'Ineris a été installée au Mont Falcon (ref. Rapport Ineris : DRS-10-112150-01857A).

S'agissant du suivi hydrologique (Figure 17), seuls les six premiers mois de mesure sont exploitables en raison du colmatage du sondage hydrologique (SP) à la suite de travaux de forage réalisés en avril 2010 à moins de cinq mètres de ce sondage. Durant les six premiers mois de mesure, l'évolution piézométrique a montré que la réponse du versant aux sollicitations climatiques était typique d'un aquifère fracturé à double porosité avec des recharges rapides de la nappe par les fractures majeures de surface et des décrues plus lentes en raison des discontinuités moins perméables en profondeur. Le manque de recul empêche cependant d'aller au-delà de ces constats.

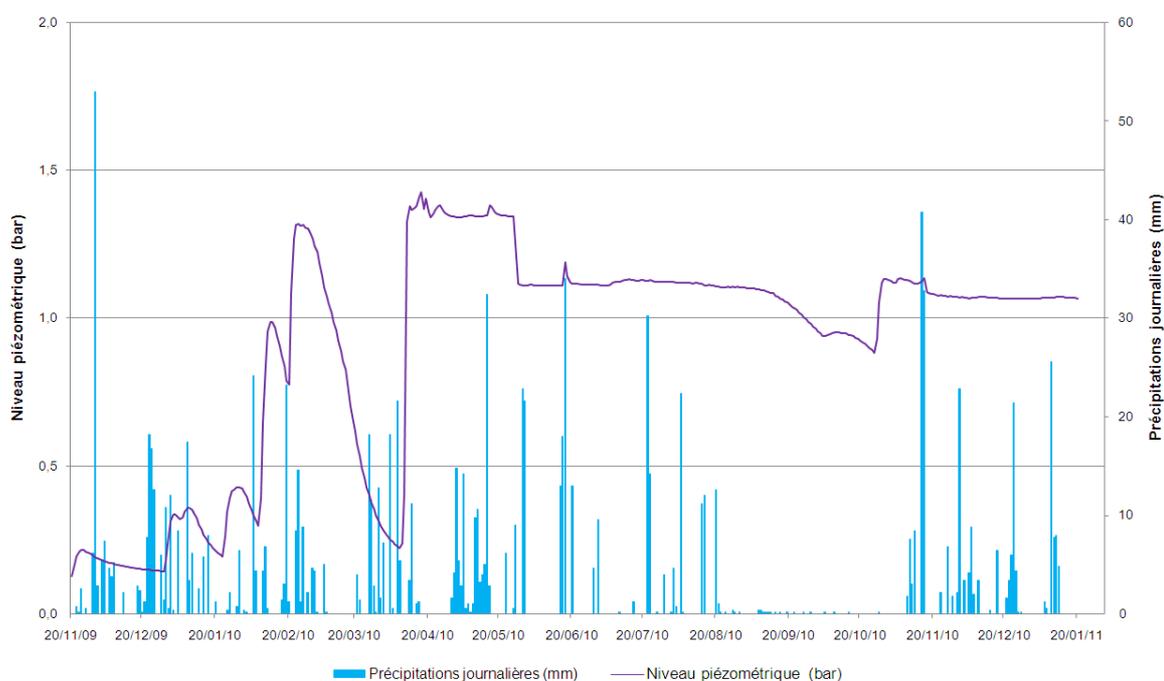


Figure 17 : suivi piézométrique et pluviométrique du versant instable des Ruines de Séchilienne. Dès mi-avril 2010, les mesures piézométriques indiquent que le sondage s'est colmaté. Le saut de mesure enregistré fin mai 2010 est dû à une intervention technique : la sonde de pression a été remontée de 2 m. Enfin, le pluviomètre a fourni des mesures incohérentes du 6 septembre au 9 novembre 2010 car le collecteur était obstrué.

4. MISE EN PERSPECTIVE DES DONNEES MULTI-PARAMETRES

4.1 INFLUENCE DES APPORTS EN EAU SUR LES DEPLACEMENTS EN SURFACE

Pour les données acquises tout au long de la période, des corrélations visuelles ont été réalisées, notamment entre les précipitations journalières « brutes » cumulées et vitesses de déplacement en surface des balises GPS sur la zone frontale active de Séchilienne. La Figure 18, issue des données collectées par l'Ineris, montre les points suivants :

- la forte accélération du déplacement de la balise 2 à partir de novembre 2012 (période « P3 »), coïncide avec d'importantes précipitations cumulées sur environ deux mois, pour un total de 543 mm de pluies. La cinétique de déplacement de la zone frontale s'accélère dès novembre 2012, en passant d'une vitesse moyenne de 2,6 m/an à environ 9,5 m/an jusqu'en janvier 2013, puis diminue à 5,2 m/an de janvier à juillet 2013. Pour rappel, le mois de novembre est en général un des mois le plus pluvieux de l'année ;
- Les 3 éboulements recensés visuellement sur la zone frontale entre juin et décembre 2013 surviennent presque 10 mois après cette période de forte accélération, sur une période moins rapide, de juillet 2013 à mars 2014, où les vitesses moyennes enregistrées seraient de l'ordre de 3,5 à 4 m/an ;
- Le début d'année 2014 semble indiquer une période d'amortissement des déplacements au niveau de la zone frontale, avec des vitesses moyennes de l'ordre de 2,4 m/an. L'absence d'acquisition géodésique depuis juillet 2014 ne nous permet pas de connaître l'impact du dernier épisode pluvieux important, en juillet 2014, sur la cinétique récente du versant instable.

Toutefois, cette corrélation visuelle doit être considérée avec précaution. En effet un évènement orageux, comme l'épisode torrentiel très bref et intense (93 mm/j) d'août 2013, ne semble pas avoir d'impact direct sur les déplacements et n'a pas été accompagné d'éboulement notable. De même certains épisodes pluvieux importants en durée et en intensité, comme l'épisode de juillet 2014 (cumul de 303.9 mm), ou celui de novembre 2013 (cumul de 288,6 mm) ne semblent pas avoir d'influence importante et directe sur les déplacements du versant

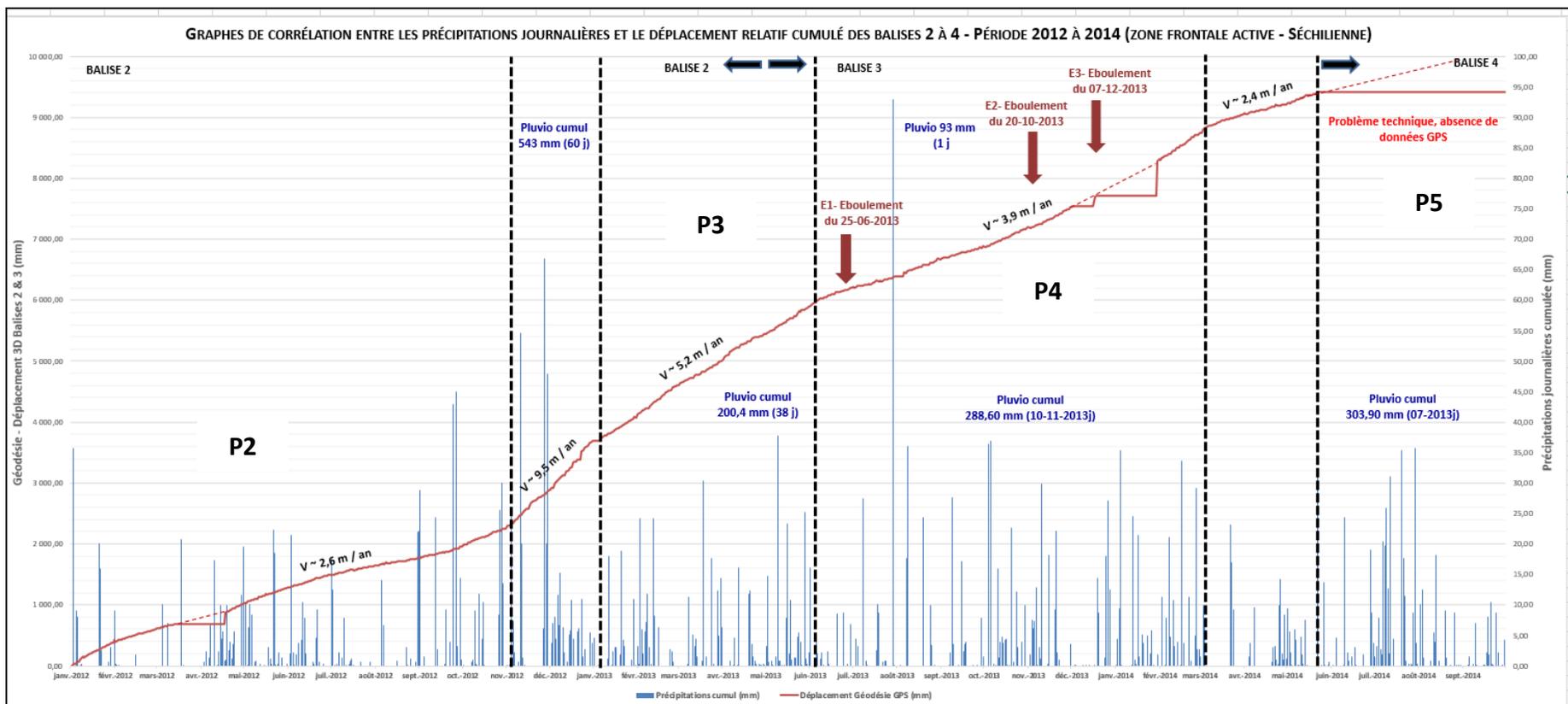


Figure 18 : graphe de corrélation visuelle entre les précipitations journalières cumulées et les vitesses de déplacement de la zone frontale active en mm – Focus d’analyse sur la période de 2012 à 2014 – les périodes P2 à P5 sont identiques à celles des figures 13 et 14.

4.2 INFLUENCE DES APPORTS EN EAU – ETUDES STATISTIQUES

Des études statistiques ont été menées pour asseoir l'existence de corrélations entre microsismicité, déplacements de surface et précipitations.

Une première approche a été menée avec la méthode développée par Hipel et McLeod (1995) pour des données environnementales complexes, qui présente l'avantage d'être basée uniquement sur les données (pas de modèle physique nécessaire). Sa mise en œuvre a nécessité un important travail de préparation et conditionnement des données. Appliquée à la période du 16/10/2009 au 30/06/2013, cette méthode n'avait pas permis de mettre en évidence une corrélation forte entre les précipitations, la microsismicité et les déplacements (voir note technique réf. Ineris : DRS-13-135995-08714A pour les détails).

Le coefficient de corrélation entre la microsismicité et les précipitations était faible (0,18 pour un seuil de significativité à 5% de 0,05) ; la corrélation sans retard, traduisant un effet immédiat significatif des apports en eau sur l'activité microsismique. Le groupe d'événements qui était le mieux corrélé (coefficient de corrélation de 0,34) aux précipitations était le sous-groupe des événements isolés qui correspondent à des ruptures en profondeur dans les terrains. Les chutes de blocs en galerie en revanche ne présentaient aucun lien avec les précipitations. De même, le groupe des tremors, le plus représentatif des enregistrements sur le site de Séchilienne n'était que faiblement corrélé aux précipitations.

Une corrélation avec un retard de deux jours a été trouvée entre le déplacement cumulé en longitude et les précipitations : l'effet de l'apport en eau apparaît avec un retard de 2 jours. Le déplacement cumulé en latitude, qui domine pourtant le mouvement, n'est pour sa part pas corrélé aux précipitations. En revanche, le déplacement journalier en latitude est corrélé avec les précipitations avec un retard de deux jours.

Contre toute attente, la prise en compte de la pluie efficace pour affiner l'apport en eau dans les terrains, calculée par Vallet et al. (2013) pour le site de Séchilienne sur la période d'étude, n'a pas permis d'améliorer ces coefficients de corrélation.

Des travaux complémentaires, menés en collaboration avec l'Université de Franche-Comté et le Cerema ont été réalisés sur la période du 01/01/2010 au 31/12/2014. Le but a été d'implémenter la méthode statistique SVM classifieur (cf. détails dans Vallet et al., 2016) dont le point de départ est la détermination d'un seuil d'activation météorologique, basé sur les historiques d'événements dits « instables » et « stables » et des chroniques journalières de pluviométrie.

Pour Séchilienne il a été choisi de prendre en compte les chroniques journalières de pluie brute et la recharge, et comme historique d'événements l'activité microsismique enregistrée du 01/01/2010 au 31/12/2014. A partir de cette activité deux familles d'événements stables et instables ont été identifiées (réf. Ineris : DRS-15-149677-12508A).

Les conditions pluviométriques de chaque événement ont été déterminées sur la base de données journalières de pluie, en calculant une somme pondérée par facteur décroissant (qui avait comme valeur de 0,9 à 1 avec un pas de 0,1) de précipitations sur une période antécédente et précédente (Figure 19).

Pour assurer l'indépendance des valeurs de précipitations (indépendance requise par la méthode), les périodes précédentes et antécédentes ne se chevauchent pas (Figure 19).

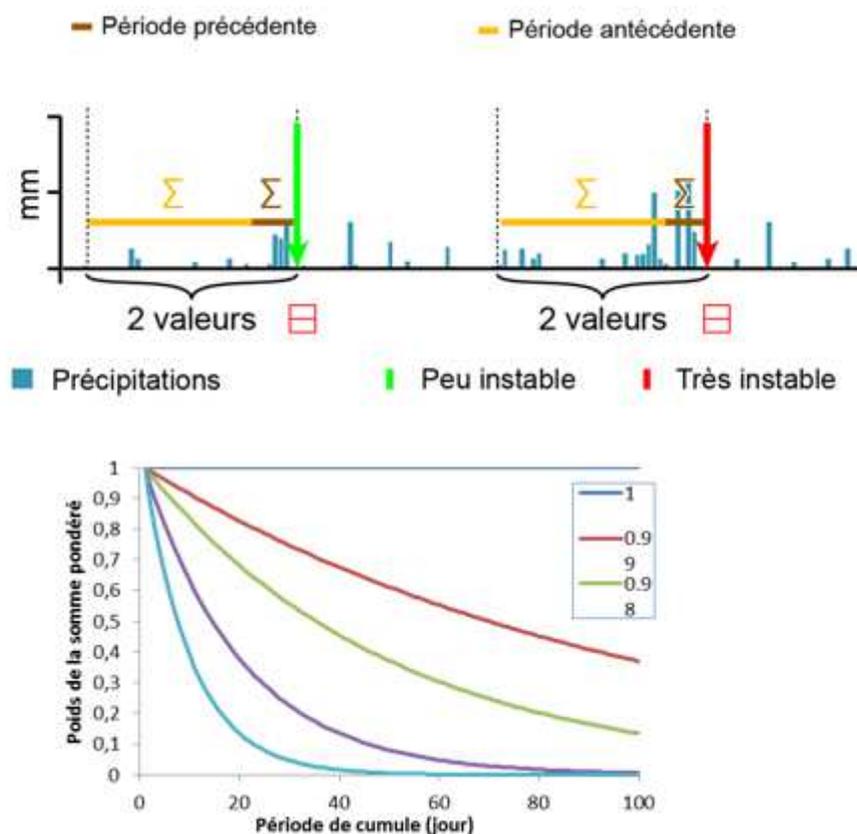


Figure 19 : Définition des périodes précédentes et antécédentes en haut et en bas des poids de la somme pondérée (modifié à partir de Vallet et al., 2016).

Une fois l'identification faite des familles d'événement stables et instables et les périodes de pluie antécédentes et précédentes obtenues, 30 000 permutations ont été calculées et les meilleurs résultats sont présentés dans la Figure 20.

Aucun résultat satisfaisant n'a été trouvé avec la recharge (absence d'une droite de tendance dans la Figure 21 b), la meilleure performance de calcul a été celle avec la pluie brute (présence d'une droite dans la Figure 21a), qui n'est censée prendre en compte que les conditions hydrogéologiques à court terme, c'est-à-dire sans infiltration. Donc, l'activité microsismique du versant des Ruines de Séchilienne (comme les chutes de blocs et petits éboulements), enregistrée par le réseau local microsismique de l'Ineris, serait déclenchée plutôt par des conditions météorologiques en surface ou dans l'aquifère perché que par la dynamique complexe de l'aquifère profond (infiltration et décharge). Cela confirme les résultats précédents obtenus avec d'autres méthodes statistiques.

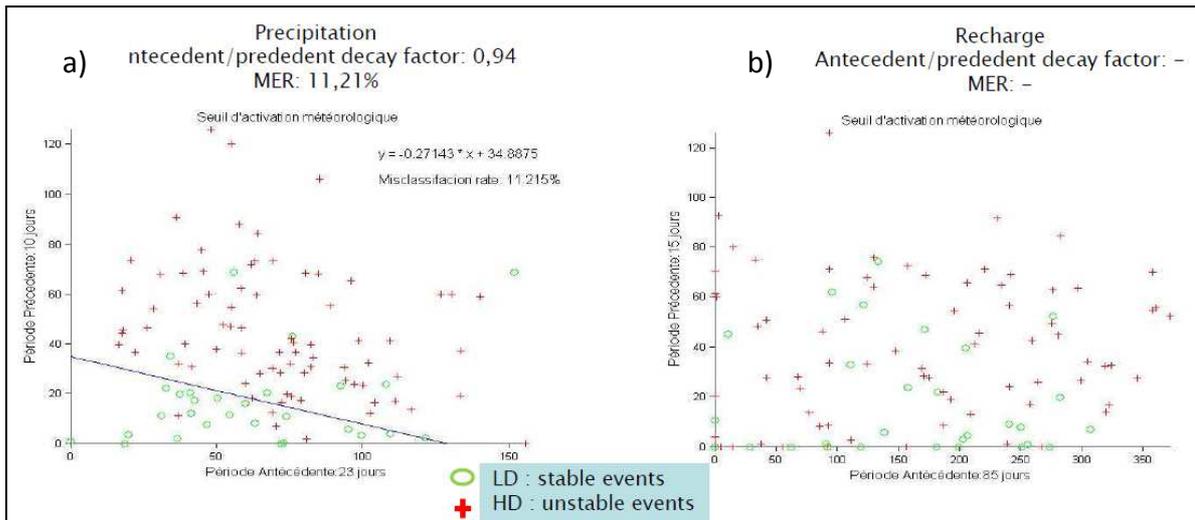


Figure 20 : a) les résultats avec la pluie brute et b) les résultats avec la recharge, le MER (Miscassification Error Rate) indique le niveau de performance du calcul.

4.3 LOCALISATION DES RUPTURES EN PROFONDEUR

La prévalence d'événements microsismiques de type trémors (cf. section 3.2.1) caractérisés par un début de signal peu marqué rend leur localisation par méthode classique (pointés de la première arrivée des ondes sismiques) impossible.

Il a de ce fait été nécessaire d'investiguer une nouvelle méthode de localisation. Le choix s'est porté sur une approche utilisant l'amplitude crête à crête déjà testée avec succès dans le contexte volcanique (e.g. Taisne et al., 2011), le suivi des glaciers (e.g. Jones et al., 2013), ou plus récemment pour la surveillance d'une cavité instable (Kinscher et al, 2015).

Cette méthode, jamais testée en contexte rocheux, repose sur la loi d'atténuation du milieu, qui permet de déterminer la décroissance de l'amplitude avec la distance (cf. détails dans Kinscher et al, 2015) et la localisation des sources est donnée sous la forme de solutions probabilistes.

Elle a été testée d'abord avec les tirs de calage de 2010 en donnant des résultats satisfaisants. Elle a ensuite été mise en œuvre sur les trémors de la crise d'octobre 2013, dont les résultats ont été comparés avec les résultats de localisation obtenus par la méthode de Beam-forming (Almendros, 1999), utilisée par Lacroix et Helmstetter (2011).

Dans ce test, 250 événements du 20/10/2013 (de type trémors) ont été localisés en tenant en compte des données enregistrées par les stations sismiques installées par l'OMIV. Cela permet d'avoir des données d'entrée additionnelles (davantage de traces sismiques exploitables mesurées par un réseau élargi de capteurs). Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 21 et ils sont comparés avec ceux obtenus grâce à la méthode de Beam-forming (Lacroix et Helmstetter, 2011).

Les résultats de localisation sont très similaires, les événements microsismiques du 20/10/2013 sont localisés à la limite ouest de la zone très active (cf. Figure 1 et

7) et leur localisation coïncide avec les observations d'instabilités locales sur le terrain (chutes de blocs et petits éboulements).

De plus, l'avantage de la méthode par amplitude par rapport à la méthode de Beam-forming est qu'elle permet d'implémenter le calcul de façon automatique, et donc de faire une localisation des sources sismiques en quasi temps réel, ce qui n'est pas possible avec la méthode de Beam-forming.

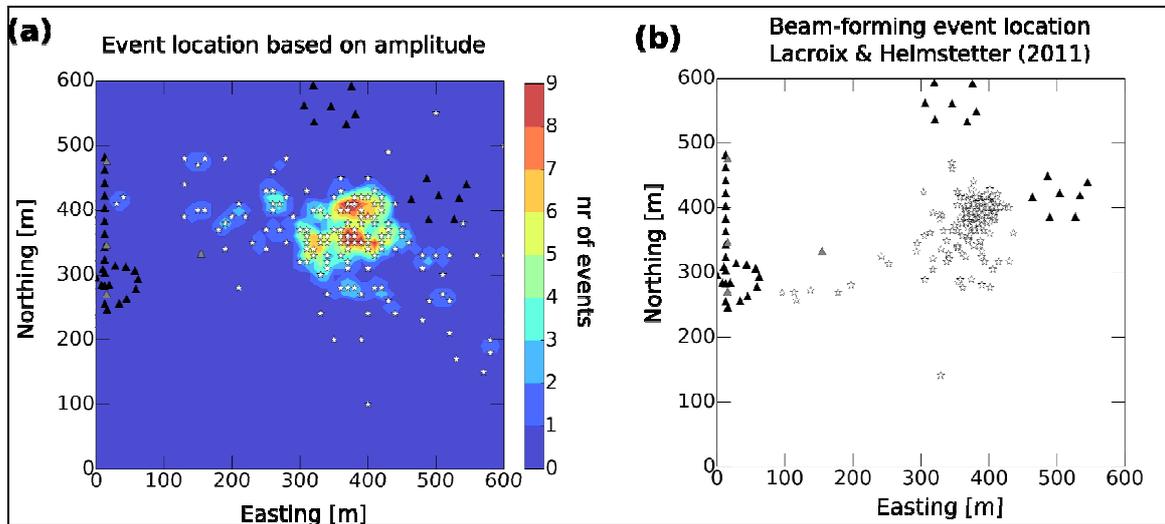


Figure 21 : a) les résultats de localisation de l'Ineris par amplitude et b) les résultats de localisation des mêmes événements du 20/10/2013 avec la méthode de Beam-forming (Lacroix&Helmstetter, 2011). Les triangles noirs sont les stations sismiques utilisées et les étoiles blanches les sources localisées.

Ces résultats nécessitent toutefois d'être approfondis. Deux pistes ont été identifiées :

- étendre l'utilisation de la méthode de localisation par amplitude à toute la période de l'expérimentation pour analyser l'évolution de la répartition spatio-temporelle des événements microsismiques ;
- améliorer davantage la localisation en profondeur des foyers, ce qui nécessite l'ajout de sondes profondes dans le massif.

4.4 GESTION DU RISQUE

L'Ineris, dans le cadre du projet européen CascEff « Modelling of dependencies and cascading effects for emergency management in crises situations » - a intégré à l'infrastructure e.cenaris (cf. section 2.4) un module de gestion d'alarmes automatiques complexes, personnalisables pour chaque site de surveillance (cf. Figure 22).

La version bêta de ce module a été testée sur le site de Séchilienne en 2015.

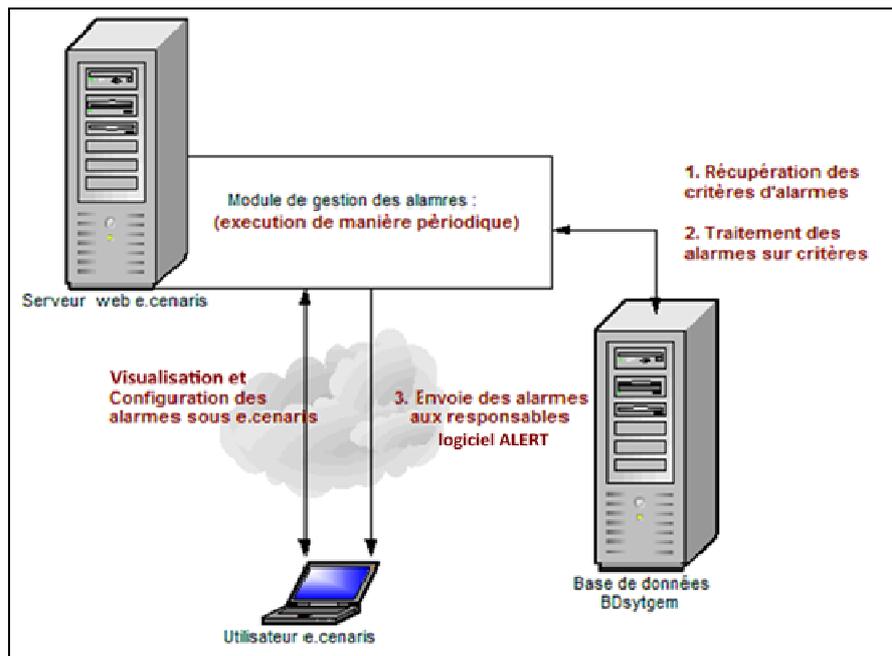


Figure 22 : Flux de travail pour la gestion des alarmes sous e.cenaris.

Le développement de ce nouveau module a été défini selon trois axes (cf. Figure 22) :

- fusion de données : afin d'avoir une vue complète sur l'évolution d'un site, il est nécessaire de récupérer le plus d'informations possibles le concernant (mesure de déplacement, de niveau d'eau, d'inclinaison...), idéalement issues de capteurs différents et localisés en différents lieux. Cela permet de mieux caractériser l'évolution dans le temps et dans l'espace des effets cascade et d'isoler toute valeur artefact (parasite électrique, capteur hors-service...)
- création d'alarmes sur critères variables : on distingue (1) des alarmes simples dont le déclenchement est défini directement sur la base de données de mesure brutes, (2) des alarmes simples sur variables complexes dont le déclenchement est défini à partir d'un calcul ou de la combinaison de mesures (valeur moyenne, magnitude...), et (3) des alarmes complexes qui lient plusieurs alarmes entre elles avec des opérateurs logiques (« et » / « ou »). Plusieurs alarmes peuvent être actives en même temps, il faut alors les hiérarchiser ;
- implémentation et personnalisation du module : un script a été codé sous e.cenaris afin de définir les seuils d'activation et des désactivation des alarmes, d'en lister l'historique et de personnaliser les éventuels messages d'alarmes à transmettre (par courriel) aux experts et décideurs.

Les figures 23 et 24 présentent les fenêtres de paramétrage de ce module pour la création et la gestion des alarmes complexes.

Les données acquises sur le site de Séchilienne ont permis de déboguer ce module ; son utilisation dans ce contexte s'est limité à des fins de validation.

Alarm creation : NbMicroseis/d

Alarm criterion : NbrEvt tous / j => G790(y1)-Séchilienne

Activation value : low : - high : 5

Deactivation value : low : - high : 4

Triggering criterion : last value or 86400 min(s) or cycle(s)

e-mail : contact@ceraris.fr

List of attached files : viewAsPDF.pdf

Action when alarm on :

Create Cancel

Figure 23 : interface web pour la création et la modification des alarmes. Des modules d'aide en ligne sont disponibles (icônes point d'interrogation).

List of the monitoring alarms

N°	Name	Criterion	Low values		High values		Time delay	Action	Options
			acti.	deac.	deac.	acti.			
55	Isterrenofa/giorno	NbrEvt tous / j => G1202(y1)-Mersite	[-	[-	-]	1]	60min	action: email (contact@ceraris.fr)	Activation, modification d'alarmes
57	Temperature+10/day	On corrected date => G1212(y1)-Temp	[-	[-	5]	10]	Last value	Courriel	

List of monitoring alarms links

N°	Name	Criterion	Options
15	EQ+Temp	(555 : Isterrenofa/giorno & 557 : Temperature+10/day)	
16	AIM-20160391529	(555 : Isterrenofa/giorno OU 557 : Temperature+10/day)	

Figure 24 : interface web qui liste les alarmes simples et complexes et leur hiérarchisation.

En outre, le 25 novembre 2011, l'Ineris a mené en collaboration avec Géoressources et le Cerema, une simulation virtuelle de crise avec le dispositif iCrisis™, dans le contexte des Ruines de Séchilienne, avec l'objectif d'analyser les résultats d'un point de vue SHS (Sciences Humaines et Sociales) et émettre des recommandations quant à l'évolution des outils opérationnels de gestion du risque.

La simulation de crise a été réalisée dans les locaux de l'ENTPE de Lyon. Le dispositif a été expérimenté par 38 personnes :

- 17 étudiants de l'ENTPE ont été mobilisés dans les 3 postes de commandement « Préfecture », « Mairie de Séchilienne » et « Entreprise Arkema » ;
- les acteurs impliqués dans le projet ANR SLAMS et certains acteurs institutionnels concernés par la problématique de l'instabilité du versant de *Séchilienne* ont été mobilisés dans les cellules « Animation », « Observateurs » et « Journalistes ».

Afin de sortir du cadre strict des scénarii habituellement envisagés dans le contexte de *Séchilienne*, le scénario mis en œuvre dans cette simulation combinait aléa naturel et aléa technologique. En outre, durant la simulation, différents événements ont été imaginés pour répondre aux multiples actions entreprises par les groupes ou rendre la situation plus complexe à gérer.

La restitution « à chaud » par les observateurs des différents groupes et des stratégies mises en œuvre, a montré que les participants ont perçu une toute autre histoire. Ainsi, l'exercice a mis en évidence le poids des représentations et des erreurs qui peuvent en découler, notamment dans l'interprétation du 1^{er} message envoyé par la cellule d'animation à l'entreprise. En effet, l'entreprise a cru dès le début qu'il y avait une fuite de chlore sur la route, alors que le chlore faisait référence au nom de la route. Malgré les remarques d'un des membres du groupe se demandant si la phrase n'avait pas un autre sens, c'est ce sens-là qu'a finalement retenu le groupe, vraisemblablement pressé de faire coller sa représentation de la crise (objet de la simulation) à un événement typique tel qu'on peut les rencontrer dans une entreprise de ce type.

De fait, il apparaît que les décisions sont systématiquement prises non pas à partir d'une situation objective mais à partir d'une représentation que le décideur se fait de la situation. Il est donc toujours pertinent de s'interroger sur cette représentation, de la confronter à d'autres représentations ou faits objectifs afin de s'assurer de sa validité.

5. CONCLUSIONS

Ce rapport vient clôturer une action débutée en 2009 et menée jusqu'en 2017 en collaboration avec le Cerema Centre Est pour contribuer aux investigations par forages profonds sur le mouvement de versant des Ruines de Séchilienne.

Sur le plan technique d'abord, cette action a permis de valider la transposabilité de la technologie des stations modulaires SYTGEM-ulp - à la base des stations modulaires et multi-paramètres pour systèmes d'alerte précoce – « en grand », développée pour le milieu souterrain, au contexte de risque d'éboulement rocheux. En particulier l'installation du dispositif s'est déroulée relativement facilement, malgré les difficiles conditions de terrain, ce grâce à la bonne portabilité et modularité des différents équipements. D'un point de vue fonctionnel et métrologique, les performances du système d'observation multi-paramètre ont été satisfaisantes et quelques mises à jour mineures ont été réalisées. A l'exception des sondes microsismiques scellées au terrain lors de l'installation en 2009, l'intégralité des équipements a pu être récupérée en 2016 et reconditionnée en 2017 en vue d'une prochaine instrumentation sur site.

L'intégration de la technologie SYTGEM-ulp à l'infrastructure de surveillance e.cenaris a permis de valider les fonctionnalités de transfert, traitement, partage et gestion sécurisée des données de mesure. Les données et métadonnées ont été rendues accessibles en quasi temps réel aux partenaires de l'Ineris via l'interface de web-monitoring de l'infrastructure e.cenaris. Des évolutions technologiques relatives à la gestion d'alarmes et d'alertes ont également été réalisées et testées dans le contexte de Séchilienne.

Sur le plan technique également, le colmatage début 2010 du forage hydrologique a mis un terme à des données qui s'avéraient prometteuses pour la compréhension des circulations d'eau et les cycles de charge / décharge en profondeur.

Sur le plan de l'amélioration des connaissances, les données et résultats ont été riches. La période d'observation a notamment été marquée en 2012 et 2013 par une accélération sans précédent dans l'histoire du site, des déplacements en surface dans la zone frontale. Cette modification majeure du régime cinétique de la zone frontale s'est accompagnée d'une importante activité microsismique, directement liée à la pluviosité et aux apports en eau. La désorganisation croissante du massif s'est traduite aussi par une augmentation du nombre et du volume des éboulements dans la zone frontale durant cette période.

Il n'a néanmoins pas été possible d'établir des corrélations fortes entre les apports en eau, la microsismicité et les déplacements de surface, sans doute en raison de la réactivité croissante du massif aux sollicitations hydroclimatiques. Les changements de comportement étaient alors trop rapides et complexes pour établir des modèles compatibles avec les observations.

La mise en place du réseau local de sondes microsismiques profondes a constitué une extension d'un grand intérêt pour le suivi des mécanismes de dégradation du versant et les ruptures en profondeur : la zone frontale est source d'une activité microsismique détectable et quantifiable (7247 événements microsismiques sur toute la période) malgré la très forte désorganisation du versant. La signature particulière des événements microsismiques (notamment des tremors) n'étant pas propice aux pointés précis d'arrivées d'ondes sismiques, une méthode de

localisation par amplitude, jamais testée dans le contexte de mouvements de versant, a été implémentée. Les résultats obtenus confirment que cette méthode répond bien aux exigences non conventionnelles de mécanismes d'instabilité de Séchilienne, en permettant une localisation fiable des sources microsismiques. Son intégration dans un système d'alerte constitue donc une piste prometteuse pour améliorer la gestion du risque en contexte d'éboulement rocheux. L'analyse des ruptures en profondeur nécessite néanmoins l'installation de plusieurs sondes en profondeur.

D'un point de vue général, ce retour d'expérience technique et scientifique s'est nourri de nombreux échanges avec le Cerema Centre-Est et les partenaires du projet ANR SLAMS notamment l'ISTERRE et l'Université de Franche Comté. Il a donné lieu à plusieurs actions de valorisation en colloques et congrès (cf. Annexe C). Rappelons enfin qu'en 2011, l'Ineris avait organisé en collaboration avec l'Université de Lorraine et le Cerema Centre-Est, une simulation virtuelle de crise dans le contexte des Ruines de Séchilienne. Réalisée avec le dispositif iCrisis, à l'ENTPE, cette simulation avait permis de nourrir la réflexion sur les modalités et outils opérationnels de gestion du risque.

6. REFERENCES

- Almendros J., Ibáñez J. M., Alguacil G., and Del Pezzo E. (1999), Array analysis using circular-wave-front geometry: An application to locate the nearby seismo-volcanic source, *Geophys. J. Int.*, 136, 159–170.
- Chanut M-A., Dubois, L., Duranthon J.P., (2014). Analyse de l'évolution du mouvement de terrain de Séchilienne à partir de données LiDAR. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014 – Bauvais.
- Helmstetter A. and Garambois S., (2010). Seismic monitoring of Séchilienne rockslide (French Alps) : Analysis of seismic signals and their correlation with rainfalls, *J. Geophys. Res.*, 115, F03016, doi :10.1029/2009JF001532, 2010.
- Hipel K.W., McLeod A.I., (1995). *Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Jones G.A., Kulesa B., Doyle S.H., Dow C.F. & Hubbard, A., (2013). An automated approach to the location of icequakes using seismic waveform amplitudes, *Ann. Glaciol.*, 54, 1–9.
- Kinscher J., Bernard P., Contrucci I., Mangeney A., Piguet J.P., Bigarre P., (2015)., Location of seismic swarms induced by salt solution mining, *Geophys. J. Int.* 200, 337–362.
- Lacroix P., Helmstetter A., (2011). Location of seismic signals associated with microearthquakes and rockfalls on the Séchilienne landslide, French Alps, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 101, No. 1, pp. 341–353, February 2011, doi: 10.1785/0120100110.
- Lebrouc V., Schwartz S., Baillet L., Jongmans D., Gamond J.F., (2013). Modeling permafrost extension in a rock slope since the Last Glacial Maximum: Application to the large Séchilienne landslide (French Alps). *Geomorphology* 198, 189–200, doi:10.1016/j.geomorph.2013.06.001.
- Le Roux O., Jongmans D., Kasperski J., Schwartz S., Potherat P., Lebrouc V., Lagabrielle R., and Meric O., (2011). Deep geophysical investigation of the large Séchilienne landslide (Western Alps, France) and calibration with geological data, *Eng. Geol.*, 120, 18–31, doi:10.1016/j.enggeo.2011.03.004, 2011.
- Le Roux O., Schwartz S., Gamond J.F., Jongmans D., Bourlès D., Braucher R., Mahaney W., Carcaillet J., Leanni L. (2009). CRE dating on the head scarp of a major landslide (Séchilienne, French Alps), age constraints on Holocene kinematics. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 280 (1–4), 236–245. doi:10.1016/j.epsl.2009.01.034.
- McNutt, S.R., 1992. Volcanic tremor, *Encycloped. Earth Syst. Sci.*, 4, 417–425.
- Panet, M., (2000). Expertise relative aux risques d'éboulement du versant des Ruines de Séchilienne, 24 pp., Préfecture de l'Isère, Grenoble, France.
- Panet, M., (2009). Scénario d'évolution du versant des Ruines de Séchilienne, 17 pp., Préfecture de l'Isère, Grenoble, France.
- Potherat P., Effendiantz L., (2009). Néotectonique et grands mouvements de versant. Le cas de Séchilienne (Isère, France), *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 2009, pp 567-577.

Taisne B., Brenguier F., Shapiro N.M. & Ferrazzini V., (2011). Imaging the dynamics of magma propagation using radiated seismic intensity, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L04304, doi:10.1029/2010GL046068.

Vallet A., Bertrand C., Mudry, J., (2013). Effective rainfall: a significant parameter to improve understanding of deep-seated rainfall triggering landslide – a simple computation temperature based method applied to Séchilienne unstable slope (French Alps), *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 10, 8945-8991, doi:10.5194/hessd-10-8945.

Vallet A., Charlier, J. B., Fabbri O., Bertrand C., Carry N., Mudry J., (2015b). Functioning and precipitation-displacement modelling of rainfall-induced deep-seated landslides subject to creep deformation *Landslides* DOI 10.1007/s10346-015-0592-3.

Vallet A., Varron D., Bertrand C., Fabbri O., Mudry J., (2016). A multi-dimensional statistical rainfall threshold for deep landslides based on groundwater recharge and support vector machines. *Nat Hazards* DOI 10.1007/s11069-016-2453-3

7. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe A	Rappel des principales signatures associées à l'évolution du versant des Ruines de Séchilienne	4 A4
Annexe B	Liste des notes et rapports Ineris	3 A4
Annexe C	Liste de publications Ineris	2 A4

ANNEXE A

RAPPEL DES PRINCIPALES SIGNATURES ASSOCIEES A L'EVOLUTION DU VERSANT DES RUINES DE SECHILLENNE

Les enregistrements associés à l'évolution du versant présentent une variabilité de signatures qui s'explique par la multiplicité des mécanismes en jeu. Le versant est à la fois l'objet de chutes et impacts de blocs en surface, d'ouvertures de fractures en sub-surface mais aussi de ruptures internes au massif, etc. Cela se traduit par des différences importantes en termes notamment de formes d'ondes, de contenu fréquentiel, d'amplitude et de durée. On observe par ailleurs que ces signaux ne présentent pas d'ondes S.

Ainsi, l'approche mise en œuvre en 2010 a consisté à élaborer, sur la base de critères simples, un catalogue des principales signatures rencontrées. Ainsi, quatre groupes se distinguent :

1. des signaux transitoires de très courte durée détectés exclusivement au fond de la galerie de reconnaissance (Figure A1a) :

ces signaux haute-fréquence (supérieure à 100 Hz) et de courte durée (inférieure à 0,2 s) sont enregistrés principalement par la sonde 3D au fond de la galerie. Leur occurrence apparaît aléatoire ; elle est vraisemblablement liée à de petits éboulis et/ou chutes de petits blocs.

2. des signaux de type « tremors » enregistrés majoritairement à la station PISTE (Figure A1b) :

ces signaux sont détectés par l'une ou l'autre des stations, voire les deux simultanément. Dans la pratique, la station PISTE en a détecté plus de 90%. Ils présentent des durées qui peuvent être très variables (entre 0,5 et 15 s), une arrivée d'onde émergeante, ainsi qu'un spectre a priori plutôt mono-fréquentiel et basse fréquence (inférieur à 60 Hz).

3. des événements isolés de durées plus courtes avec une arrivée d'ondes plutôt impulsive (Figures A1c et A1d)

la plupart sont enregistrés par la station PISTE mais quelques uns sont communs aux deux stations. On observe par ailleurs que ces événements se répartissent en deux sous-groupes selon la forme d'ondes à la station PISTE :

a) certains (Figure A1c) présentent une amplitude très importante sur les sondes 1D ancrées en surface (SPp1 et SPp2) comparées aux amplitudes sur les sondes 3D en forage (S80 et S40) ; les arrivées d'ondes sont impulsives et les temps d'arrivée associés sont tels que $T_{1D} < T_{3D}$ indiquant a priori une origine superficielle. Leur durée est relativement courte (inférieure à 0,2 s) et leur fréquence est comprise entre 50 et 100 Hz. Enfin, l'analyse des angles d'incidence des rais sismiques aux sondes 3D met en évidence un pendage quasi vertical ;

b) les autres (Figure A1d) présentent un contenu fréquentiel plus faible et des temps d'arrivée d'ondes qui indiquent une origine plutôt profonde ($T_{S80} < T_{S40} < T_{1D}$). Les mesures d'azimut montrent que ces événements sont générés à l'Est du dispositif d'écoute : cette direction coïncide avec la zone active du versant.

Compte tenu de leurs caractéristiques, les événements isolés du Groupe 3a, sont vraisemblablement liés à des chutes de blocs en surface. Pour certains de ces événements, les sismogrammes mettent en évidence des événements isolés successifs d'amplitude différente pouvant s'apparenter à des phénomènes de rebond des blocs.

Pour les événements du Groupe 3b, il est difficile d'affirmer à ce stade de l'étude qu'ils trouvent leur origine au cœur du massif. En effet, compte tenu de la forte hétérogénéité de la géologie rencontrée et donc aussi du champ de vitesse des ondes sismiques, il n'est pas exclu qu'une partie de ces événements soit d'origine superficielle lointaine. Dans ce cas, les arrivées d'ondes les plus rapides transitent par les couches profondes plus rapides, ce qui se traduit par des temps d'arrivées et des amplitudes compatibles avec des événements provenant du cœur du massif.

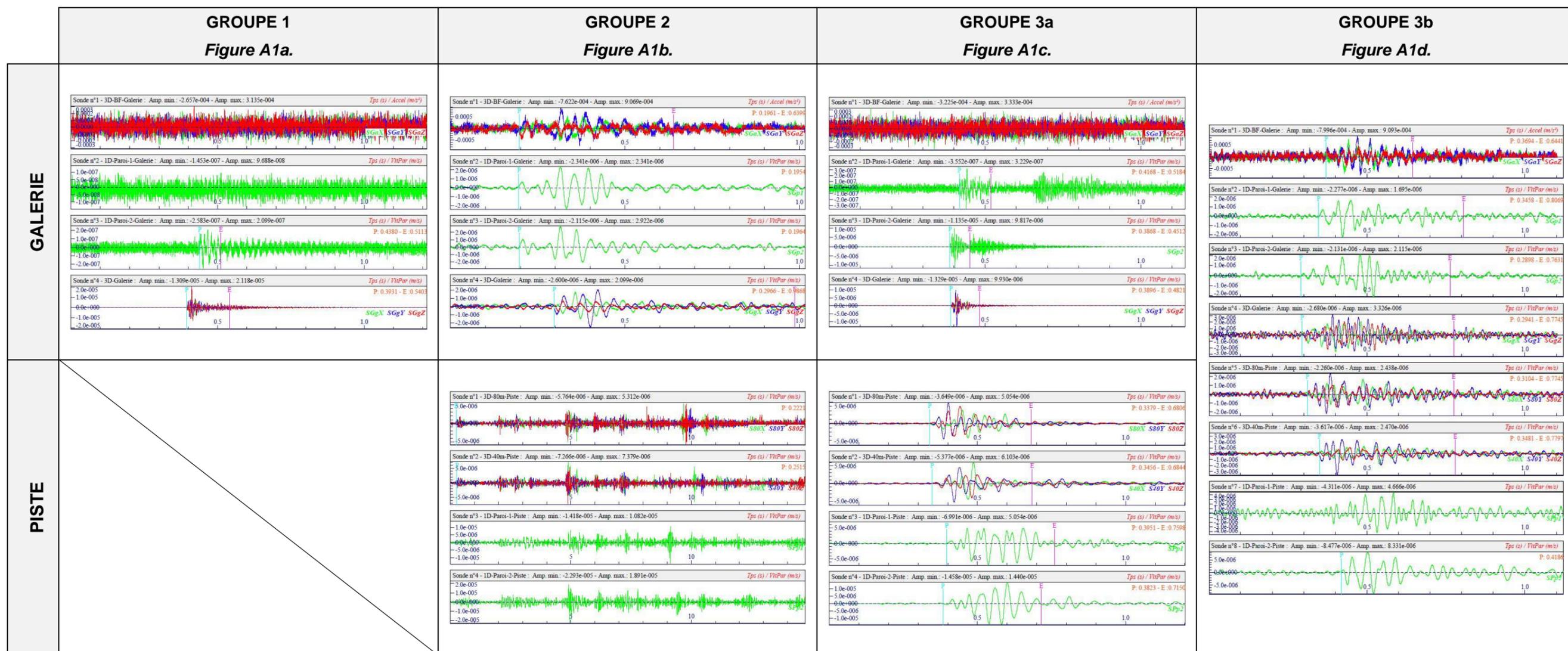


Figure A1. a) Exemple d'enregistrement du Groupe 1 lié à une chute de blocs au fond de la galerie de reconnaissance. Sismogramme enregistré le 15/08/2010. b) Exemple d'enregistrements du Groupe 2, plus communément désignés sous le terme « tremors ». Sismogrammes enregistrés le 29/11/2010. c) Exemple d'enregistrements d'événements isolés (Groupe 3a) à la station GALERIE (haut) le 23/08/2010 et à la station PISTE (bas) le 08/04/2010. d) Exemple d'enregistrement d'événements non isolés (Groupe 3b) aux stations GALERIE et PISTE. Sismogramme enregistré le 11/07/2010.

ANNEXE B

RAPPORTS ET NOTES TECHNIQUES DE L'INERIS SUR LE SUIVI DU MOUVEMENT DE VERSANT A SECHILLENNE

Intitulé	Auteurs	Date	Description	Référence
RAPPORT D'ETUDE INERIS	C. DÜNNER, E. KLEIN, C. FRANCK, P. BIGARRE	2009	Revue de conception détaillée relative à la surveillance expérimentale du versant des Ruines de Séchilienne. Programme EAT-DRS-06 « Centre National de Surveillance des Risques du Sol et du Sous-sol »	DRS-09-103900-07382A
RAPPORT D'ETUDE INERIS	C. DÜNNER, B. BEAUFILS, E. KLEIN, C. FRANCK, P. BIGARRE	2010	Rapport d'installation, de mise en route et validation du réseau	DRS-10-112150-01857A.
NOTE TECHNIQUE INERIS	C. DÜNNER, E. KLEIN, P. BIGARRE	2010	Suivi d'expertise du réseau de surveillance expérimentale du versant des Ruines de Séchilienne (Isère, 38) : Données géodésiques, inclinométriques et météorologiques - Période du 20 novembre 2009 au 31 juillet 2010	DRS-10-112150-07623A
NOTE TECHNIQUE INERIS	M. LENOIR, C. DÜNNER, E. KLEIN, P. BIGARRE	2010	Présentation générale du versant instable des Ruines de Séchilienne (38). Synthèse des connaissances géologiques et structurales, présentation des instrumentations existantes et bilan des données de mesures	DRS-10-112150-07624A
NOTE TECHNIQUE INERIS	M. LENOIR, C. DÜNNER, E. KLEIN, P. BIGARRE	2010	Étude de simulation numérique sur la résolution de l'algorithme de localisation absolue de foyers microsismiques dans le contexte du versant des Ruines de Séchilienne (Isère, 38)	DRS-10-112150-08981A
RAPPORT D'ETUDE INERIS	C. DÜNNER, E. KLEIN, P. BIGARRE	2010	Rapport de suivi d'expertise du 20/11/2009 au 30/11/2010	DRS-10-112150-14033A
NOTE TECHNIQUE INERIS	E. KLEIN, C. DÜNNER, P. BIGARRE	2010	Traitement et analyse de données de calibrage du réseau d'écoute microsismique du versant des Ruines de Séchilienne (Isère, 38) – Phase 1 : définition d'un modèle de vitesse simplifié et calibrage de l'outil de localisation	DRS-10-112150-13848A
RAPPORT D'ETUDE INERIS	C. DÜNNER, E. KLEIN, C. FRANCK, P. BIGARRE, M. GHOREYCHI	2011	Rapport de suivi d'expertise du 16/10/2009 au 31/12/2010	DRS-11-117635-04322A

Intitulé	Auteurs	Date	Description	Référence
NOTE TECHNIQUE INERIS	A. DELONCA, E. KLEIN, C. DÜNNER, P. BIGARRE	2011	Étude comparative des données microsismiques détectées par les antennes sismologiques de surface de l'ISTerre et par le dispositif de surveillance expérimentale de l'ineris, sur le mouvement de versant des Ruines de Séchilienne (Isère, 38)	DRS-11-117635-09100A
RAPPORT D'ETUDE INERIS	C. DÜNNER, E. KLEIN, C. FRANCK, P. BIGARRE	2012	Rapport de suivi d'expertise du 01/01/2011 au 31/12/2011	DRS-12-126025-03423A
NOTE TECHNIQUE INERIS	E. KLEIN, S. COCCIA, P. BIGARRE	2013	Bilan fonctionnel et bilan de suivi d'expertise du dispositif de d'observations multi-paramètres du mouvement de versant de Séchilienne (38) sur la période du 01/01/2012 au 30/06/2013	DRS-13-135995-08714A
NOTE TECHNIQUE INERIS	E. KLEIN	2014	Contribution de l'INERIS à la tâche 1 du projet ANR SLAMS	DRS-14-105756-01728A
NOTE TECHNIQUE INERIS	S. COCCIA, I. CONTRUCCI, P. BIGARRE	2014	Bilan fonctionnel et de suivi d'expertise du dispositif d'observations multi-paramètres du mouvement de versant de Séchilienne (38) sur la période du 01/07/2013 au 30/11/2014	DRS-14-142126-12522A
NOTE TECHNIQUE INERIS	S. COCCIA, P. BIGARRE, C. FRANCK	2015	Bilan fonctionnel et de suivi d'expertise du dispositif d'observations multi-paramètres du mouvement de versant de Séchilienne (38) sur la période du 30/11/2014 au 30/11/2015	DRS-15-149677-12508A
NOTE TECHNIQUE INERIS	S. COCCIA, P. BIGARRE, C. FRANCK	2016	Bilan fonctionnel et de suivi d'expertise du dispositif d'observations multi-paramètres du mouvement de versant de Séchilienne (38) sur la période du 30/11/2014 au 30/11/2015	DRS-15-149677-12508A

ANNEXE C

LISTE DES COMMUNICATIONS POUR LA VALORISATION DU SUIVI INERIS DE SECHILLENNE

DÜNNER C., KLEIN E., CHARMOILLE A., BIGARRÉ P., Multi-parameter monitoring strategy applied to unstable rock slopes: the example of the Ruines de Séchillienne. *Rock Slope Stability Symposium*, 24-25 Novembre 2010, Paris, France.

DÜNNER C., KLEIN E., BIGARRE P., Monitoring multi-paramètres du mouvement de versant des Ruines de Séchillienne (Isère, 38). *Journées 'Aléa Gravitaire' 2011*, Strasbourg (France), 07 et 08 septembre 2011.

KLEIN E., DURENNE A., GUENIFFEY Y., L'analyse statistique de données appliquée à la surveillance multi-paramètres de versants instables. *Journées 'Aléa Gravitaire' 2013*, 17-18 septembre 2013, Grenoble.

KLEIN E., GUENIFFEY Y., COCCIA C., BIGARRE P., Dynamique de mouvements de versant : mécanismes de déformation complexes et analyse de données multi-paramètres. *Rock Slope Stability Symposium*, 2014.

KLEIN E., OCCHIENA C., DURENNE A., GUENIFFEY Y., PIRULLI M., Early warning systems and time series modelling: a new challenge for landslide risks prevention, *3rd World Landslide Forum*, China, 2014.

COCCIA S., TONNELIER A., BIGARRÉ P., KLEIN E., A multi-parameter monitoring system of a large French landslide: data, results and future perspectives. IUGG, Prague 22 Juin - 2 Juillet 2015.

COCCIA S., KINSCHER J., VALLET A., Microseismic and meteorological monitoring of Séchillienne (French Alps) rock slope destabilization. *Rock Slope Stability 2016*, Lyon, 15-17 November 2016.