



HAL
open science

Méthodes et outils pour l'auscultation et la surveillance des instabilités gravitaires

Philippe Mourot

► **To cite this version:**

Philippe Mourot. Méthodes et outils pour l'auscultation et la surveillance des instabilités gravitaires. Géologie appliquée. Université de Savoie, 2008. Français. NNT : . tel-00771338

HAL Id: tel-00771338

<https://theses.hal.science/tel-00771338>

Submitted on 8 Jan 2013

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

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

UNIVERSITÉ DE SAVOIE
École doctorale Terre, Univers, Environnement
Laboratoire de Géophysique Interne et de Tectonophysique

THÈSE

Présentée pour l'obtention du titre de
Docteur de l'Université de Savoie

Spécialité : Terre Solide

par

Philippe MOUROT

Méthodes et Outils pour l'Auscultation et la Surveillance des Instabilités Gravitaires



Soutenue le 9 décembre 2008 devant le jury composé de :

Jean-Luc Got
Gloria Senfaute
Nikolaï Shapiro
Laurent Baillet
Jean-Robert Grasso
Yves Guglielmi
Fabrice Guyoton
Pierre Pothérat

Directeur de thèse
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Invité
Invité

... à Frédérique pour son éternel Amour
... à nos enfants Solal et Anaé, le fruit de cet Amour

Remerciements

Cette thèse s'est déroulée dans un contexte un peu spécial : suite à mon embauche dans la toute jeune société Myotis, elle s'est initiée par une forte volonté personnelle d'approfondir mes connaissances sur les phénomènes d'éboulements rocheux. En premier lieu, je tiens donc à exprimer ma gratitude envers Jean-Luc GOT et Fabrice GUYOTON, qui ont sans hésiter accepté de me soutenir dans ce projet. Un an après le démarrage de cette thèse, l'évolution de la société Myotis m'a amené à en prendre la direction, avec les tâches à haute responsabilité en découlant. Face à ces changements, mon travail de recherche et développement s'est alors grandement ralenti au point de le voir presque abandonné au vu des résultats de terrain limités obtenus. Puis il y a eu la découverte de l'écaïlle rocheuse de Chamousset, instabilité en pleine évolution vers la rupture, qui m'a permis de mettre à profit les développements instrumentaux réalisés jusqu'alors. Mais finalement si aujourd'hui cette thèse a enfin pu aboutir, ce n'est pas seulement grâce à l'écaïlle de Chamousset mais à l'appui et encouragement constant de ma femme, Frédérique, à qui j'exprime mon plus profond amour.

L'instrumentation et l'expérimentation de terrain restent le principal et unique moyen pour observer et analyser ces phénomènes naturels. Malheureusement, il s'agit du travail le plus ingrat car sujet à de multiples et nombreuses sources d'incertitudes et de « plantages », risquant par conséquent l'anéantissement de nombreuses heures de développement, de préparation et d'énergie. C'est pourquoi, ce lourd travail d'expérimentation n'aurait pu se concrétiser sans l'aide précieuse de mes amis et co-équipiers Yannick IDELON et Julien JAY, dont la bonne humeur et l'enthousiasme constants nous ont permis d'appréhender les moments de « galères » avec humour et franche rigolade. Je me souviendrais toujours de nos nuits blanches passées à préparer l'instrumentation du Refuge du Goûter, qui allait nous permettre de tester notre station SAFIR dans des conditions environnementales sévères (3800m d'altitude avec des températures descendant jusqu'à -35°C) ... et de nos visages béats de bonheur (et de fatigue !) quand l'hélico nous déposait sur la crête du Goûter dans le Massif du Mont Blanc alors que le soleil perçait à peine. Quel bonheur de travailler avec vous, merci à vous deux !

Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance envers Jean-Luc GOT pour ses qualités scientifiques, qui m'ont permis d'élargir mon travail d'analyse des données ainsi que pour son insatiable curiosité, source d'interminables et passionnantes discussions.

Mes plus sincères remerciements s'adressent à Fabrice GUYOTON, Laurent CHATEL, Lucas MEIGNAN et Jean-Marc VERDIER pour leur sympathie et pour avoir accepté de parrainer ma thèse.

J'exprime également ma reconnaissance à Jacques GRANGEON pour la conception de la carte analogique sismique mais aussi surtout pour son extrême gentillesse, sa disponibilité et son aide très précieuse en électronique. Merci Jacques de m'avoir fait partager ta grande expérience du terrain et pour tes explications techniques si enrichissantes.

Je remercie profondément Laurent BAILLET pour sa sympathie et sa forte motivation pour l'étude des instabilités gravitaires qu'il communique sans limites, de même que pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Mes remerciements s'adressent à Gloria SENFAUTE et Nikolai SHAPIRO pour avoir, et cela activement, rapporté cette thèse. Je remercie également Pierre POTHERAT et Fabrice GUYOTON pour le point de vue industriel et opérationnel qu'ils ont apporté à ce jury de thèse ainsi qu'à Jean-Robert GRASSO et Yves GUGLIELMI d'avoir accepté d'examiner et juger ce travail, les discussions que nous avons eues m'ont beaucoup apporté.

Je remercie également Jean-Paul DURANTHON, pour sa confiance et le professionnalisme qu'il m'a enseigné lors de nos fructueuses collaborations.

Merci également à Lionel DORIS pour sa sympathie et ses passionnantes discussions sur les systèmes embarqués, ainsi que Jacques SARRAULT et Jean-Marc NEUVILLE pour m'avoir fait partager leur expérience en instrumentation.

Je tiens aussi à remercier Emmanuel FAURE pour son travail sur le stockage sur disque dur, Clément ADELIN pour sa bonne humeur et pour son imposant travail sur le traitement des données GPS, ainsi que tous les différents stagiaires pour leur participation aux expérimentations de terrain (et surtout au portage du matériel !).

Merci à Pierre-François ROUX, Arnaud DAUDIGNON, Jacques DEPARIS, David AMITRANO, Clara LEVY ainsi qu'aux membres des équipes du LGIT Grenoble (équipe Mouvements de Terrain) et du LGIT de Savoie Technolac pour leurs conseils et enrichissantes discussions.

Le plus important à mes yeux, restera le soutien constant de ma famille et amis. J'ai une pensée particulière pour mes parents qui m'ont toujours soutenu dans mes projets, pour ma sœur Anne, qui avec Gwen m'a initié à la géologie par un fabuleux voyage en Islande, et pour ma « belle » famille, Marino, Georges, Lulu, Marion, JB et Mamie Nicole qui ont toujours cru en moi et encouragé tout au long de ma thèse.

Et enfin, à toi, Frédérique, dont je ne saurais jamais assez exprimer ma plus profonde reconnaissance. Tes encouragements, ta patience démesurée, ta compréhension et tes nombreuses concessions personnelles ont favorisé ce lourd travail de développement et de traitement des données cumulé à mes imposantes responsabilités de gestion et animation de la société Myotis. Mais cela ne s'arrête pas là ... Tu as su, en plus, me combler du plus beau des cadeaux qu'un homme puisse rêver, à savoir Solal et Anaé.

Les instabilités rocheuses constituent l'un des risques naturels le plus souvent rencontré dans les grands reliefs alpins et restent malgré tout un domaine encore mal connu des Sciences de la Terre. Compte tenu de leurs caractéristiques, l'amélioration de nos connaissances dans le domaine de la stabilité des massifs rocheux passe par l'instrumentation et la surveillance de ces instabilités.

L'objet de cette thèse a ainsi tout d'abord consisté à mettre au point un dispositif instrumental multi-capteurs, constituant une base solide pour l'acquisition en continu de paramètres pertinents pour le suivi temporel de la stabilité des massifs rocheux. Ce dispositif permet en effet de mesurer et stocker en continu et de façon autonome pendant de longues durées (*plusieurs mois*) des données hautes fréquences (jusqu'à 1 kHz) et lentes issues de différents types de capteurs. Par ailleurs, il peut être télémétré de façon à suivre à distance l'évolution du site surveillé ainsi que le fonctionnement de l'instrumentation. La station de mesure mise au point permet également de faire un pré-traitement des données et a été agrémentée d'algorithmes de surveillance permettant de combiner différents critères pour une première gestion d'alerte. Le travail réalisé a en outre permis de mettre au point un système de transmission par réseau maillé et un système de supervision distant orienté client-serveur. En juin 2008, ce système de surveillance permet de suivre une quinzaine de sites instables en France.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'évolution des déformations subies par une écaille rocheuse instable, sur le site de Chamousset (Sud-Est Vercors), jusqu'à environ une semaine avant son éboulement. L'observation de différents paramètres (déformation, météorologie, écoute sismique) et leur suivi temporel pendant environ 3 mois ont ainsi permis de mettre en évidence :

- ⇒ une accélération nette mais modérée du déplacement horizontal du sommet de l'écaille, fortement liée aux épisodes de gel-dégel;
- ⇒ de très nombreux nano-séismes, dus à la rupture progressive de l'écaille et dont certains présentent une fréquence dominante très basse (5 à 10 Hz), probablement dominée par la résonance de l'écaille;
- ⇒ des modes spectraux s'individualisant à des fréquences supérieures à 10-15 Hz sur l'écaille et ayant tendance à augmenter en moyenne avec le temps ;
- ⇒ l'occurrence de crises sismiques qui ne dégénèrent pas vers l'instabilité.

Compte tenu de sa dynamique, l'expérimentation réalisée sur ce site a permis de progresser dans la connaissance des processus mis en jeu et notamment de mettre en évidence de nouveaux paramètres dignes d'intérêt pour l'étude de ce type d'instabilités et donc de préciser les spécifications des caractéristiques instrumentales à atteindre.

Rock instabilities are one of the most common natural risks encountered in high alpine relief and, despite this fact, they still remain largely uncharted in Earth Sciences. Given their characteristics, these instabilities need to be investigated and closely monitored in order to improve our knowledge of the stability of rock masses.

The main purpose of this thesis was therefore to develop a multi-sensor instrumental device to form a sound basis for the continuous acquisition of the relevant parameters for monitoring the stability of rock masses. This self-contained device is capable of continuously measuring and storing high frequency (up to one kHz) and low frequency data generated by different types of sensor over long periods (several months). Moreover, it can be linked up to a remote-monitoring system for supervising the site and checking the operation of the instrumentation. The measurement station developed can also carry out pre-processing of the data collected and includes monitoring algorithms combining different criteria for an initial warning management procedure. A meshed-network transmission system and client-server oriented remote supervision system have also been developed within the context of this project. In March 2008, this surveillance system was used to monitor fifteen instability sites in France.

Within the context of this thesis, particular attention was focused on the variation in deformations affecting an unstable vertical rock slice on the Chamousset site (south-east Vercors, France), up to about one week prior to its collapse and fall. Observations of various parameters (deformation, weather conditions, monitoring of seismic activity) taken over a period of about three months, revealed the following:

- ⇒ a clear but moderate acceleration in horizontal displacement of the top of the rock slice, closely related to alternating freezing-thawing episodes;
- ⇒ numerous seismic events, due to the progressive failure of the rock slice, some of which had a very low prevailing frequency (5 to 10 Hz), probably dominated by slice resonance;
- ⇒ individualised spectral modes at frequencies greater than 10-15 Hz on the rock slice and which, as a general rule, tended to increase with time;
- ⇒ occurrence of seismic crises which did not degenerate towards the instability.

In view of its dynamics, the experimental work carried out on site has enhanced our knowledge of the processes involved and, in particular, revealed new parameters that would be worthwhile including in the study of this type of instability. Based on these findings, it was possible to specify the instrumental characteristics to be achieved.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	13
CHAPITRE 1 : INSTABILITES ET SURVEILLANCE.....	17
1. <i>Les phénomènes d'instabilités rocheuses</i>	17
1.1. Caractérisation du phénomène	17
1.2. Évolution d'une instabilité vers la rupture	20
2. <i>Surveillance des instabilités rocheuses</i>	22
2.1. La mise sous surveillance	22
2.2. Techniques instrumentales utilisées en surveillance	23
2.3. Système de surveillance : définition et méthodes opérationnelles	24
2.3.1. Définition d'un système de surveillance	24
2.3.2. Systèmes de télésurveillance opérationnels	25
2.3.3. Méthodes de surveillance : seuils et critères d'alerte	26
2.3.4. Remarques générales sur les méthodes de surveillance	28
2.3.5. Présentation de sites sous surveillance	29
2.4. Auscultation des instabilités par écoute microsismique	30
3. <i>Conclusion</i>	31
CHAPITRE 2 : CONCEPTION D'UNE INSTRUMENTATION MULTI-PARAMETRES	33
1. <i>Développement d'une station de mesure multi-paramètres</i>	34
1.1. Présentation de la nouvelle station : SAFIR	34
1.2. Architecture de la station de mesure	34
1.2.1. Module analogique	35
1.2.2. Module numérique	38
1.3. Fonctionnement et caractérisation de la station de mesure	38
1.3.1. Algorithmes d'acquisition	38
1.3.2. Précision de l'horloge interne (RTC)	43
1.3.3. Précision de la fréquence d'échantillonnage (PIT)	44
1.3.4. Consommation	45
1.3.5. Fonction de transfert de la chaîne de mesure sismique	46
1.3.6. Enregistrement des données et gestion des unités de stockage	46
1.3.7. Perturbations et mesures de bruit	49
2. <i>Développement d'une instrumentation GNSS de précision</i>	55
2.1. Le positionnement par satellite	55
2.2. Conception d'une instrumentation GPS	57
2.2.1. Architecture instrumentale	57
2.2.2. Fonctionnement de l'instrumentation	57
2.3. Expérimentation pour de courtes lignes de base	58
2.3.1. Protocole de mesure	58
2.3.2. Traitements et résultats	59
2.4. Perspectives	62
3. <i>Conclusion</i>	63
CHAPITRE 3 : CONCEPTION D'UN SYSTEME DE SURVEILLANCE DES RISQUES	65
1. <i>Un nouveau concept : la surveillance embarquée</i>	66
2. <i>Développement d'une station de surveillance embarquée temps réel</i>	68
2.1. Détection sur seuil	68
2.2. Détection sismique	69
2.2.1. Détection d'un signal sismique	69
2.2.2. Réglage des paramètres de détection sismique	72
2.2.3. Caractérisation des signaux sismiques	77
2.3. Télémétrie	79
2.4. Gestion des alertes	81
2.4.1. Informations fonctionnelle et opérationnelle	81
2.4.2. Elaboration d'un diagnostic au moyen de la logique floue	82
2.4.3. Construction des règles de connaissances	83
2.4.4. Implémentation de la base de connaissances dans la station SAFIR	86

3.	<i>Développement d'un serveur de supervision et d'analyse distant</i>	91
3.1.	Nécessité d'un outil de supervision distant.....	91
3.2.	Choix d'une architecture client / serveur.....	91
3.3.	Typologie et structuration des données.....	92
3.4.	Interface de supervision.....	95
4.	<i>Eléments de réflexion pour la mise en place d'un système de surveillance</i>	96
5.	<i>Conclusion</i>	97
CHAPITRE 4 : APPLICATION A LA SURVEILLANCE DES INSTABILITES ROCHEUSES		99
1.	<i>Systèmes de surveillance mis en œuvre pendant cette thèse</i>	101
2.	<i>Auscultation de l'écaïlle rocheuse de Chamousset (Vercors)</i>	103
2.1.	Contexte géographique et géologique.....	103
2.2.	Instrumentation.....	106
2.2.1.	Description de l'instrumentation.....	106
2.2.2.	Synthèse de fonctionnement.....	108
2.3.	Auscultation du mouvement de l'écaïlle.....	109
2.3.1.	Influence météorologique.....	109
2.3.2.	Variations à moyen et long terme des données extensométriques.....	109
2.3.3.	Variations à court terme des données extensométriques.....	115
2.4.	Analyse du mouvement de l'écaïlle.....	117
2.4.1.	Analyse des variations des oscillations de l'écaïlle à court terme.....	117
2.4.2.	Analyse des variations des oscillations instrumentales à court terme.....	120
2.4.3.	Analyse des variations à long terme.....	121
2.5.	Étude de la sismicité discrète.....	122
2.5.1.	Caractérisation de la sismicité.....	122
2.5.2.	Typologie schématique des signaux rencontrés.....	125
2.5.3.	Source des événements discrets.....	129
2.5.4.	Etude des variations temporelles de la sismicité.....	130
2.6.	Etude des enregistrements continus.....	133
2.6.1.	Variations temporelles de l'amplitude du signal sismique continu.....	133
2.6.2.	Etude des variations fréquentielles du bruit en fonction du temps.....	135
2.7.	Conclusion : Expérience de Chamousset.....	141
3.	<i>Surveillance d'un compartiment rocheux pendant le creusement du Tunnel des Grands Goulets (Drôme)</i>	143
3.1.	Contexte.....	143
3.1.1.	Géologie et instabilités.....	144
3.1.2.	Étude de l'aléa.....	144
3.1.3.	Qualification de l'instabilité C2.....	145
3.2.	Instrumentation et système de surveillance.....	146
3.2.1.	Description de l'instrumentation.....	146
3.2.2.	Historique du suivi instrumental.....	148
3.2.3.	Fonctionnement du système de surveillance.....	149
3.3.	Auscultation des déplacements et des facteurs météorologiques.....	151
3.4.	Etude de la sismicité discrète.....	155
3.4.1.	Caractérisation de la sismicité.....	155
3.4.2.	Typologie des signaux sismiques détectés.....	158
3.5.	Conclusion : Surveillance des Grands Goulets.....	159
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		161
REFERENCES		163
TABLE DES FIGURES		173
LISTE DES TABLEAUX		177
GLOSSAIRE		179
ANNEXES		183

Introduction générale

Les instabilités rocheuses constituent l'un des risques naturels le plus souvent rencontré dans les grands reliefs de la planète, leur impact allant croissant avec le degré d'anthropisation (urbanisation, développement de voies de communication, etc.) de la surface du globe. Ces instabilités restent pourtant un domaine mal connu des Sciences de la Terre. Elles présentent néanmoins l'avantage indéniable d'être superficielles et donc aisément localisables et identifiables et par conséquent susceptibles d'être surveillées plus facilement qu'une faille sismique ou même qu'un volcan. En contre partie, ces instabilités rocheuses sont nombreuses et souvent de dimensions limitées et donc éventuellement plus difficilement repérables. Par ailleurs, de par la variabilité de leur dynamique, pouvant s'étendre sur plusieurs ordres de grandeurs sur l'échelle des temps, l'appréhension de ces phénomènes rend incontournable le recours aux mesures, ce qui a incontestablement retardé les connaissances dans ce domaine. Ainsi l'appréciation des risques liés à ces instabilités nécessite de mettre en place des systèmes d'instrumentation de ces aléas.

Par ailleurs, l'évolution du contexte réglementaire actuel en terme de responsabilité, avec notamment le Code Général des Collectivités Territoriales [article L.2212-2], a renforcé les obligations relatives à la sécurisation des aléas, l'une des solutions de sécurisation consistant à instrumenter ces aléas et à mettre en place un système de gestion d'alerte.

Face à cette nécessité grandissante en terme d'instrumentation des instabilités rocheuses, cette thèse a pour objet de contribuer à l'amélioration des systèmes de mesure et de surveillance de ces phénomènes naturels.

L'axe de recherche porte ainsi sur l'expérimentation de nouvelles méthodes multi-paramètres appliquées à la mise en évidence des indicateurs de la rupture dans un objectif de sécurisation des enjeux. Les phénomènes visés sont les instabilités rocheuses, dont la phase paroxysmale, marquée par l'accélération soudaine des processus géomécaniques, est très courte et très difficile à observer.

Dans une première partie, nous préciserons le type d'instabilités gravitaires qui seront étudiées. Après un rapide tour d'horizon des différentes techniques instrumentales et systèmes de surveillance mis en œuvre et publiés, nous présenterons quelques études de cas d'auscultation d'instabilités gravitaires par écoute microsismique.

Sur cette base, la deuxième partie de ce mémoire s'attachera à décrire les caractéristiques et performances à atteindre par notre station de mesure multi-paramètres et détaillera son développement. Ce dernier comprenant à la fois une partie « matériel » et une partie « logiciel ». La partie « matériel » comprend l'intégration des modules électroniques et numériques et la conception d'interfaces de liaison. Le développement logiciel constitue le point le plus important du travail. Il comprend l'implémentation de tous les algorithmes permettant l'acquisition, le traitement, le stockage et la transmission des données. Le code informatique intègre des routines de bas niveau permettant de piloter le matériel (driver), ainsi que toutes les fonctions de gestion d'alerte et de télé-communication. Nous présenterons ensuite un chapitre spécialement dédié au positionnement GNSS de précision. Nous montrerons qu'à partir de composants « bon marché » et une analyse post-traitement, l'instrumentation réalisée permet la mesure des déplacements (relatifs) avec une précision millimétrique.

Puis, nous définirons dans la troisième partie, les caractéristiques globales à atteindre par notre système de surveillance. Nous détaillerons le travail qui a permis de transformer notre station de mesure en station de surveillance. En effet, dans un contexte de surveillance, la gestion de la sécurité est un élément majeur dans la conception d'un dispositif. Nous montrerons que la transition entre mesure et surveillance n'est possible que par la mise en place de procédures rigoureuses concernant la fiabilité et pérennité du système. Nous présenterons ensuite les outils développés pour la gestion à distance des sites sous surveillance. Une identification des paramètres dont la mesure est pertinente dans le cadre de notre travail sera réalisée. Ainsi, sur la base d'une structure client-serveur et à partir de logiciels libres, le système de télésurveillance a été conçu afin de permettre une gestion centralisée de l'information issue de données multi-sources et à accessibilité restreinte. A l'image de la surveillance volcanique [Murray, 1996], en cas de crise, les gestionnaires ont besoin d'analyser et d'interpréter rapidement les données. De par la nature spécialisée de cette tâche, les outils ont été conçus afin de fournir une information facilement interprétable aux autorités qui doivent gérer cette situation de crise. C'est pourquoi, au delà de la gestion d'alerte in situ, nous montrerons la nécessité de mettre en œuvre un système de supervision, de gestion et d'archivage distant.

Enfin, nous terminerons ce mémoire par la présentation de deux applications de surveillance des éboulements rocheux mises en œuvre au cours de cette thèse. La première application concerne une écaille instable sur le site de Chamousset au Sud-Est du Massif du Vercors. Elle représente un cas type de dynamique d'instabilité rocheuse : cette écaille s'étant progressivement séparée de son massif d'origine par rupture progressive des ponts de matières l'y rattachant. L'individualisation graduelle de l'écaille et la phase précédant sa rupture ont été suivies pendant plus d'un mois, par le biais de mesures extensométriques et sismo-acoustiques. Lors de cette expérience, nous nous sommes plus particulièrement efforcés de mettre en évidence une modification des caractéristiques spectrales du signal total (bruit sismique + signal sismique discret enregistrés en continu), en recherchant les modes propres de cette écaille et leur variable temporelle. Nous avons également corrélé déformations, activité sismo-acoustique discrète et variation temporelle du contenu spectral. Les résultats ainsi obtenus montrent une réelle cohérence avec l'évolution vers la rupture de l'écaille.

La deuxième application concerne la surveillance d'un massif rocheux surplombant la route départementale RD 518, située dans les Gorges des Grands Goulets à l'Ouest du Massif du Vercors. L'évolution de ce bloc a été suivie pendant toute la phase de travaux de creusement du tunnel (automne 2005-printemps 2008) au moyen de capteurs extensométriques et d'un dispositif d'écoute microsismique. L'objet du suivi de cette instabilité a été largement motivé par le fait de la réalisation de tirs à l'explosif pour le creusement du tunnel pouvant permettre d'accélérer le processus de déstabilisation de la masse rocheuse. Au vu des mesures réalisées, que ce soit du point de vue des mesures extensométriques ou de l'écoute microsismique, l'instabilité n'a pas montré de signes d'évolution vers la rupture. Néanmoins, cette longue période de surveillance nous a permis de mettre en évidence d'importants effets thermiques aléatoires à l'échelle hebdomadaire et cyclique à l'échelle annuelle. Nous nous sommes donc efforcés de chercher à corriger ces effets sur la mesure extensométrique. Nous présenterons pour finir une typologie des événements sismiques discrets enregistrés pendant la période de travaux du tunnel.

Dans le cadre de ce travail, cette thèse s'efforcera à synthétiser les points forts acquis au cours des expérimentations réalisées et concernera plus particulièrement :

- les paramètres d'observation pertinents ;
- les méthodes de traitement appropriées ;
- les caractéristiques que doit posséder un système d'acquisition et de surveillance afin d'assurer un suivi temporel fin et efficace des modifications des propriétés physiques des instabilités rocheuses ;
- la définition des variations temporelles mises en évidence dans le cadre des expérimentations menées pendant cette thèse.

CHAPITRE 1 :

Instabilités et surveillance

Ce chapitre présente l'aléa « mouvement de terrain » et plus particulièrement l'instabilité rocheuse, qui constitue l'objectif de surveillance de ces travaux de thèse. Ces phénomènes sont très difficiles à prévoir car il est extrêmement complexe de caractériser de manière exhaustive la qualité des ponts rocheux (altération et endommagement des discontinuités). Dès lors que des biens sont menacés, la mise sous surveillance d'un site constitue une protection efficace. Nous présenterons un tour d'horizon des techniques instrumentales utilisées dans le cadre de l'élaboration d'un système de gestion d'alerte. Pour terminer, nous détaillerons quelques études de cas d'écoute microsismique d'instabilités rocheuses, domaine encore peu développé et faisant l'objet de cette thèse.

1. Les phénomènes d'instabilités rocheuses

1.1. Caractérisation du phénomène

Les instabilités rocheuses font partie de l'aléa « mouvement de terrain ». Ces phénomènes se caractérisent par la déstabilisation d'une masse rocheuse dont la force de gravité est l'élément moteur de la rupture [Flageollet, 1989]. Les instabilités rocheuses se manifestent par des phénomènes de chutes de pierres ou éboulements et peuvent représenter une menace pour les biens et les personnes. Ces phénomènes sont plus particulièrement fréquents et destructeurs en montagne du fait des versants souvent abrupts et des volumes importants de matériaux mobilisables (forte énergie potentielle).

Les instabilités sont caractérisées par des descripteurs physiques et par une probabilité de rupture (fréquence d'occurrence). Le volume constitue le critère le plus déterminant pour l'évaluation de l'aléa. C'est pourquoi, on retrouve principalement dans la littérature une classification des instabilités en fonction de l'intensité du

phénomène (volume éboulé). Ainsi, on distingue la chute de pierre (volume < 0,1 m³), la chute de blocs (volume < 10 m³), l'éboulement (volume < 10 000 m³) et l'effondrement ou éboulement en masse (volume > 10 000 m³) [PPR, 1999, LCPC, 2004].

D'autres classifications se basent sur les mécanismes de rupture, le type de matériaux ou encore le mode de déplacement [Cruden et Varnes, 1996, CFGI, 2000]. Du point de vue de la sécurité, la vitesse de l'instabilité (rupture et propagation) est un élément essentiel à prendre en compte pour la définition des protections. On peut ainsi différencier le glissement, mouvement lent et progressif présentant des signes prémonitoires, le basculement, mouvement plus ou moins rapide, progressif avec indices d'évolution observables, et la rupture, mouvement rapide sans signes prémonitoires (cf. **Annexe A-2**). Il n'est pas rare d'observer des phénomènes combinant plusieurs de ces mécanismes soit simultanément, soit de manière échelonnée dans le temps (un mécanisme en entraînant un autre).

L'identification des instabilités rocheuses s'effectue essentiellement par observation. Un massif rocheux est concerné par l'aléa instabilité, dès lors qu'il présente un état de fracturation avancé ou des traces d'un éboulement antérieur. L'identification des facteurs intrinsèques et déclenchants va permettre de caractériser l'instabilité [Finlayson & Statham, 1980].

Les facteurs intrinsèques correspondent à la description géomécanique du massif rocheux. Ils comprennent (cf. **Figure 1**):

- la définition des discontinuités (localisation, type), qui constituent les points de faiblesse du massif, à l'intérieur desquelles se développent des processus d'altération physico-chimiques qui participent à la stabilité du massif;
- les caractéristiques structurales des différentes discontinuités et des relations entre elles (orientation, pendage, persistance, espacement, etc.);
- les caractéristiques géomorphologiques et géomécaniques (lithologie, ouverture des épontes, remplissage, rugosité, volume des différents éléments instables, etc.) ;
- la définition des mécanismes de rupture probable (glissement, rupture de surplomb ou de pied de colonne, basculement, etc.) (cf. **Annexe A-2**).

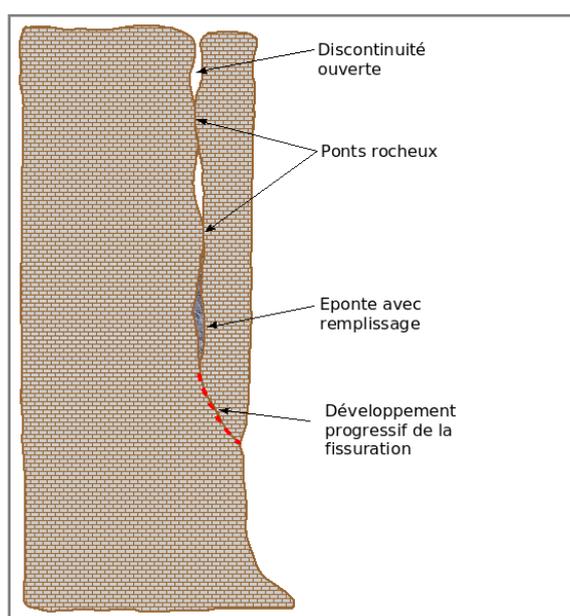


Figure 1 : Facteurs intrinsèques d'une écaïlle rocheuse participant à l'évolution de sa stabilité

Les facteurs intrinsèques vont se dégrader sous l'action de sollicitations extérieures. Il s'agit de tous les processus capables d'intervenir sur la stabilité du massif rocheux.

Ces facteurs, dits « d'évolution » et « déclenchants », peuvent être d'origine naturelle ou anthropique.

Les facteurs d'évolution, nommés aussi facteurs dégradants, sont définis par les actions qui agissent régulièrement sur la stabilité (altération, gel/dégel). **Les facteurs déclenchants** concernent les actions discontinues qui interviennent brutalement (séisme, pression hydraulique suite à de fortes pluies). De manière globale, on les identifie par :

- les données hydrologiques et hydrogéologiques (présence d'eau, pluies, écoulement) ;
- la sismicité ;
- les données climatiques (cycle gel/dégel, vent, sécheresse) (cf. **Figure 2**) ;
- les données relatives au couvert végétal ;
- les données historiques ;
- l'activité anthropique à proximité (travaux, tir de mines, barrage hydraulique, trafic routier, etc.).

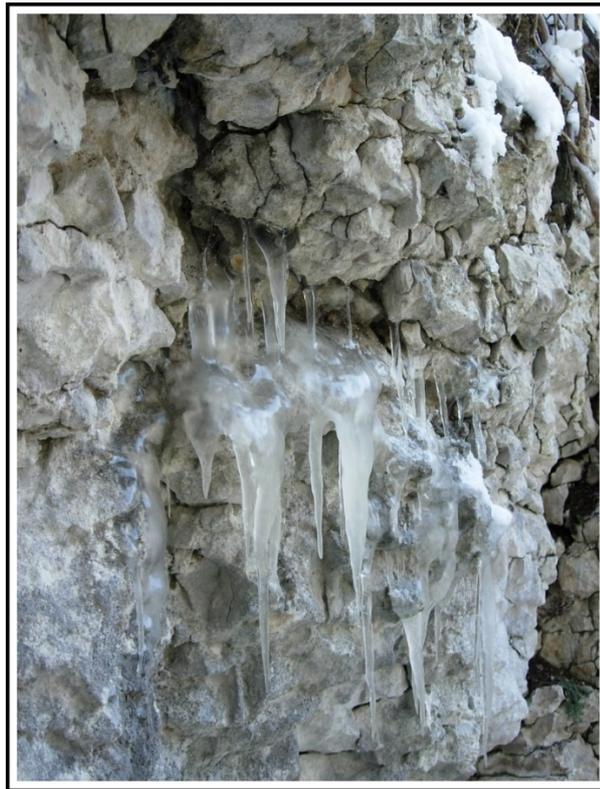


Figure 2 : Action du gel sur la fracturation de la roche (Grands Goulets, *photo P.Mourot*)

Une instabilité est associée à une probabilité de rupture que l'on définit comme la probabilité, pour une période donnée, qu'une masse rocheuse se mette en mouvement. Ce critère est néanmoins difficilement quantifiable car il dépend des facteurs intrinsèques (les forces résistantes) et des facteurs déclenchants (les forces motrices) dont l'action combinée va modifier l'état de stabilité du massif rocheux. On associe aussi à l'instabilité une probabilité d'atteinte qui correspond à la probabilité qu'un bloc rocheux atteigne une zone. Dans ce cas, il est possible d'estimer la

trajectoire ainsi que l'énergie développée par la chute au moyen de modèles numériques du terrain. L'étude de la propagation est conditionnée par la géomorphologie du versant (pente, forme, obstacles, formes et caractéristiques des blocs, etc.). De nombreux codes de calcul des trajectoires existent et permettent d'évaluer des conditions probables de propagation des blocs dans un versant (Modèle LCPC, Modèle ADRGT, PIR3D de l'ENTPE, Modèle BRGM, Modèle EPFL). Les résultats obtenus à partir de ces modèles sont utilisés essentiellement pour la définition des ouvrages de protection (limite de propagation, énergie et distribution des impacts, volumes fragmentés après propagation, etc.). Les résultats de simulations peuvent différer d'un code à l'autre du fait que les modèles ne prennent pas en compte les mêmes interactions rhéologiques. Par ailleurs, la pertinence des résultats dépend de celle des paramètres d'entrée. Pour cette raison, les valeurs de ces paramètres doivent être calibrées par des informations de propagation de masses de blocs observées sur le terrain.

1.2. Évolution d'une instabilité vers la rupture

La stabilité d'une masse rocheuse évolue progressivement dans le temps. Sa résistance diminue naturellement au cours du temps par sollicitation des facteurs d'évolution [Finlayson & Statham, 1980, Hantz, 2003]. Les déformations qui s'opèrent dans le massif sont très faibles, quasiment invisibles en surface. Lorsque les forces motrices deviennent prépondérantes, la stabilité évolue alors dans une phase d'accélération marquée par des modifications géomorphologiques visibles. Cette phase peut se dérouler sur une échelle de temps très variable en fonction du type d'instabilité (de quelques minutes à plusieurs mois). La phase paroxysmale est atteinte par l'éboulement de la masse instable.

Dans le cas des mouvements de terrain lents, type glissement de terrain, la phase d'accélération est bien marquée, avec des indices de déplacement en surface visibles [Azimi et al., 1988, Duranthon et al., 2003]. Ce n'est pas le cas des instabilités rocheuses, où la prévision est rendue difficile par une phase d'accélération du phénomène très courte et très difficile à observer. Dans le cadre de cette thèse, on s'est ainsi attaché à élaborer des dispositifs permettant cette observation.

Il existe différentes méthodes d'évaluation des instabilités rocheuses dont l'objectif va de la caractérisation de l'aléa à la probabilité d'atteinte de l'instabilité. Parmi les différentes approches, on peut citer :

- la méthode Rock Engineering System (RES) [Hudson, 1992], modulable en fonction du choix des paramètres utilisés et permettant de définir un indice de probabilité d'atteinte (Rockfall Instability Index, RII);
- la méthode Rockfall Hazard Assessment Procedure (RHAP), utilisée par la région Lombardie (Italie) et permettant une évaluation rapide de la probabilité d'atteinte et du risque;
- la méthode du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées [LCPC, 2001], basée sur une démarche détaillée opérationnelle et permettant par une approche qualitative d'évaluer l'occurrence d'une instabilité selon une échelle comportant 5 classes;
- la méthode MATTEROCK [Rouiller et al, 1998], basée sur une analyse détaillée de la stabilité et fournissant une carte de périmètre d'atteinte de chutes de blocs par unité de temps;
- la méthode Historique, Géomécanique et Probabiliste (HGP) [Hantz et al, 2003], qui aborde l'évaluation de l'aléa par une approche globale et associe la fréquence d'éboulement d'un secteur donné, à la probabilité de rupture d'un massif déterminée par une approche géomécanique, empirique ou

statistique;

- la méthode Rock Hazard Rating System (RHRS) [Pierson et al., 1990], développée spécifiquement pour le domaine routier et constituant une méthode opérationnelle qui fournit une carte de périmètre d'atteinte de chutes de blocs en fonction de la morphologie, de la fréquentation et des caractéristiques géomécanique des roches;
- la méthode Rock Mass Rating (RMR) [Bieniawski, 1993], développée spécialement pour les travaux souterrains et permettant de classer les masses rocheuses d'un point de vue géomécanique, sans en évaluer la rupture. Une adaptation [Romana, 1993], appelée Slope Mass Rating (SMR), a étendu son application aux talus routiers (versants reprofilés).

Ces différentes méthodes font référence à la qualité de la roche, aux discontinuités, aux venues d'eau et à différents paramètres extérieurs qui influencent la stabilité. Elles permettent de définir une zonation spatiale de l'aléa en termes probabilistes. Néanmoins, elles ne permettent pas de rendre compte de l'évolution temporelle de cet aléa et donc d'obtenir une appréciation réelle du risque.

Une autre approche permet d'intégrer cette problématique, il s'agit de **l'approche instrumentale**. Dans ce cas, il s'agit de détecter des indices physiques d'évolution de l'instabilité vers la rupture et de quantifier les paramètres pertinents par des mesures instrumentales continues. L'instrumentation permet d'appréhender les mécanismes qui s'opèrent au sein de la masse instable, en corrélant les différents paramètres mesurés tels que l'ouverture des fractures, la pluviométrie, la piézométrie, etc. Néanmoins, ces méthodes ne sont pas toujours adaptées aux phénomènes présentant une phase d'accélération rapide. En effet, ce type de phénomènes survenant de manière brutale présente pendant sa phase d'accélération des déplacements très rapides, dont l'amplitude est nettement inférieure à la résolution des capteurs de mesure de déplacement classiques. C'est une problématique qui sera abordée dans cette thèse afin de trouver d'autres paramètres observables pertinents.

Parmi les méthodes d'évaluation de l'aléa citées précédemment, et dans le cadre de l'instrumentation d'une instabilité rocheuse, nous utilisons la grille de caractérisation du LIRIGM [Dussauge-Peisser, 2002]. L'objet n'est pas ici d'évaluer la probabilité de rupture de l'aléa mais de décrire précisément l'instabilité afin de définir les meilleures techniques instrumentales à mettre en œuvre.

La caractérisation de l'instabilité, dans le cadre de cette méthode, se présente sous la forme d'une fiche descriptive des paramètres à prendre en compte pour l'évaluation du risque (cf. **Annexe A-2**). L'intérêt de cette fiche réside dans sa structuration permettant de rendre la collecte de données la plus objective possible. Elle comporte quatre rubriques :

- les paramètres Statiques (S), relatifs à l'analyse de la stabilité actuelle ;
- les paramètres Dynamiques (D), indices de mouvement ;
- les facteurs d'évolution Continus (FC) ;
- les facteurs d'évolution aléatoires/Discontinus (FD), ou facteurs déclenchants.

Par la description des paramètres afférents à la nature de l'instabilité, chaque rubrique est affectée d'une note allant de 0 à 10. Une note élevée marque un caractère très défavorable. De plus, chaque rubrique est affectée d'un indice de qualité de l'observation, noté a, b et c, permettant de distinguer une observation sûre, d'une observation non vérifiée (ou non accessible).

Cette démarche, détaillée pas à pas, constitue un outil très intéressant en vue de définir une instrumentation car elle permet une évaluation la plus objective possible. Le jugement final, à savoir l'évaluation de l'instabilité, reste ainsi du ressort de l'expert.

2. Surveillance des instabilités rocheuses

Les instabilités rocheuses ne constituent pas, en France et dans le monde, le risque naturel le plus meurtrier. Néanmoins, une enquête effectuée en Rhône-Alpes montre que parmi les glissements de terrain, les érosions torrentielles et les éboulements rocheux, ce sont ces derniers qui occasionnent les travaux les plus coûteux pour mettre en sécurité les itinéraires [LCPC, 2001]. En France, le risque de mouvement de terrain (*famille regroupant tous les types d'instabilités gravitaires*) concerne environ 4500 communes.

Pour se préserver de ces risques, deux grandes familles de protection sont habituellement utilisées :

- les protections actives, dont le but est d'intervenir sur l'aléa en s'opposant aux phénomènes et qui consistent par exemple à réaliser des opérations de stabilisation, confortement, drainage, terrassement, minage, purge, etc. ;
- les protections passives, qui agissent sur les conséquences du phénomène et qui correspondent à la réalisation d'ouvrages type barrage, écran, fosse, merlon, piège à blocs, déviateur, etc.

2.1. La mise sous surveillance

Lorsque les travaux de protection ne peuvent être envisagés, au moins à court terme, une autre solution consiste à mettre le site sous surveillance. La surveillance n'a pas d'action directe sur la conséquence du phénomène, en limitant par exemple sa propagation, mais intervient de manière indirecte en alertant de l'imminence d'un danger. On distingue différents degrés de surveillance.

L'observation permet de mettre en évidence l'existence de zones instables dans un massif. C'est une action ponctuelle, visuelle, et non instrumentée, effectuée par un expert dans le cadre de la définition d'un aléa ou de son suivi. L'inspection visuelle d'un site (observations qualitatives : apparition de nouvelles fissures, de venues d'eau, état de la fracturation, structure géologique, etc.) constitue une base indispensable pour assurer une surveillance fiable, qui ne se réduit en aucun cas à l'interprétation directe de mesures.

L'auscultation constitue la première étape de l'instrumentation d'un site. Elle permet l'examen régulier du site au moyen de capteurs de mesure, qu'ils soient à lecture directe (visuelle sur site) ou automatique (par un appareillage à enregistrement de données sur site). Ce contrôle effectué de manière régulière fournit des informations précises sur l'évolution de l'instabilité [LCPC, 1994].

La surveillance, proprement dite, se distingue de l'auscultation par son objectif de gestion de la sécurité. L'objectif de la surveillance est d'assurer un contrôle total ou partiel de l'instabilité. Elle doit fournir des informations précises sur l'évolution de l'état de stabilité d'un massif rocheux. Le recueil régulier et périodique des données, permet une exploitation et interprétation des informations liées à la stabilité du massif selon une échelle de temps adaptée à la nature du phénomène [LCPC, 1994]. Dans ce cadre, le contrôle est effectué uniquement à l'aide de capteurs et appareillage à enregistrement automatique, intégrant une unité de gestion des alertes. L'évaluation de la stabilité du massif est effectuée à chaque mesure afin qu'une procédure d'alerte adaptée au contexte du site puisse être déclenchée instantanément.

Le système de surveillance se différencie donc du système d'auscultation par :

- l'analyse des données en temps réel (selon une échelle de temps adaptée à l'évolution du phénomène);
- la prise en compte de contraintes temporelles.

Autrement dit, le système de surveillance ne doit pas simplement délivrer des résultats concernant la stabilité du massif rocheux, il doit les délivrer dans des délais imposés.

Un des principaux avantages de la mise sous surveillance d'un site réside dans sa rapidité de mise en œuvre, permettant ainsi de faire face à des problématiques urgentes. Il peut par exemple s'agir de rétablir la circulation routière sur un axe stratégique menacé par un aléa d'éboulement rocheux. Le système de surveillance peut être mis en place et fonctionnel dans un délai de 48 heures alors que les moindres travaux de confortement demandent au minimum plusieurs semaines de réalisation. Hormis l'urgence, la mise sous surveillance est envisagée de manière temporaire, dans l'attente d'une décision politique ou de travaux de confortement ou de protection, mais aussi dans le cas où aucun ouvrage de protection n'est en mesure de réduire significativement le risque.

2.2. Techniques instrumentales utilisées en surveillance

La surveillance fait appel à un vaste panel d'outils et de méthodes mis en œuvre afin de suivre au mieux l'évolution d'un massif instable. L'instrument et la (ou les) méthode(s) qui lui sont appliqués doivent permettre de mesurer les paramètres caractérisant la stabilité du massif et l'évolution des facteurs déclenchants.

Néanmoins, parmi toutes les techniques de mesure existant actuellement, un nombre limité d'entre elles peut être utilisé pour la surveillance des instabilités rocheuses. En effet, le recours à une instrumentation dépend :

- de la compatibilité de la technique avec la mesure de la grandeur physique recherchée et de sa vitesse d'évolution;
- des contraintes environnementales du site (température, humidité, milieu corrosif, poussière, bruit, etc.);
- de la capacité de la technique à s'intégrer dans un processus de mesure automatisé dans le cadre d'un système de gestion d'alerte.

Différentes techniques instrumentales peuvent être utilisées dans le cadre de la surveillance des instabilités gravitaires. Une liste détaillée est fournie en annexe (cf. **Annexe A-3**).

Ces techniques peuvent être regroupées en 5 principales méthodes instrumentales :

- la mesure des déformations structurelles (en surface et en profondeur) ;
- la mesure des vibrations ;
- la détection d'objets en mouvement ;
- la mesure de niveau et de pression ;
- la mesure météorologique.

Parmi ces méthodes, il existe un choix plus ou moins varié de techniques permettant de réaliser les mesures. Par exemple, la méthode de mesure des déformations regroupe un vaste choix de techniques et en particulier la mesure des déformations superficielles qui regroupe les techniques d'extensométrie, topographie, géodésie, radar, vidéométrie et interférométrie. Par contre, il n'en est pas de même pour la mesure du niveau de la nappe phréatique, qui ne peut être déterminé que par

piézométrie.

Néanmoins, lorsqu'une méthode présente un panel de techniques disponibles, le choix de la technique à mettre en œuvre sera fonction de la nature de l'objet instrumenté. La caractérisation de l'aléa est primordiale afin de sélectionner la technique la mieux adaptée.

Ainsi un mécanisme de rupture brutale nécessite une technique ayant un temps de réponse et de traitement des données très rapide. De plus, si l'instabilité se situe dans une zone très difficile d'accès, il faudra alors privilégier une technique de mesure à distance.

D'autre part, dans le cadre de la surveillance d'une zone menacée, la sécurisation du site peut imposer en elle-même des contraintes dans le choix de la technique. Par exemple, la nature des enjeux peut imposer que la technique instrumentale soit opérationnelle de jour comme de nuit.

Enfin, les contraintes environnementales du site à instrumenter limiteront l'utilisation de certaines techniques. Il peut par exemple s'agir de techniques nécessitant une ressource énergétique trop importante, dont les besoins de maintenance réguliers ne sont pas adaptés aux conditions d'accès difficiles, etc.

Finalement, les techniques instrumentales s'attachent tout particulièrement à la manière d'effectuer la mesure alors que le système de surveillance quant à lui, vise à l'intégration des techniques instrumentales choisies dans un système de gestion d'alerte.

2.3. Système de surveillance : définition et méthodes opérationnelles

2.3.1. Définition d'un système de surveillance

Un système de surveillance est un système de mesure qui intègre des outils de traitement de l'information permettant d'analyser en temps réel l'évolution d'un phénomène. Le dispositif de mesure et d'analyse est relié et synchronisé à un dispositif de gestion d'alerte ayant pour but de sécuriser la zone menacée en cas de crise.

On distingue trois grands types de systèmes de surveillance :

- le premier type, dit « tout ou rien », est le plus simple (*par exemple le Détecteur Routier d'Avalanches, DRA*). Son principe repose sur un simple contact électrique, qui est activé par rupture d'une boucle électrique ou par le mouvement d'un balancier (*par exemple au passage d'une avalanche*). Un signal électrique est transmis jusqu'à une balise en bordure de route qui déclenche des feux rouges ;
- le deuxième type regroupe toutes les stations de mesure téléométrées. La station de mesure, sur site, est programmée pour acquérir périodiquement les données et est capable de transmettre une alerte sur dépassement de seuil, soit localement vers un dispositif d'avertissement, soit à distance sous la forme d'un SMS, d'un message vocal ou d'un courriel. Certaines, plus évoluées, peuvent être interrogées à distance (par téléphone, GSM ou Internet) afin d'accéder aux données et à la configuration de la station ;

- enfin, le système de télésurveillance le plus élaboré et le plus complet est un système qui permet de centraliser l'information de plusieurs sites sous surveillance par une gestion automatisée. De plus, il doit être équipé d'outils d'analyse, de gestion et de représentation visuelle de l'information, afin de fournir aux experts des outils d'aide à la décision, permettant d'assister les responsables dans la gestion de crise.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons exclusivement à ce dernier type de système.

Les systèmes de télésurveillance sont spécifiques à un aléa et aux types d'enjeux. C'est pourquoi il n'existe pas véritablement de solution « clé en mains ». Les systèmes actuels intègrent des technologies qu'il est nécessaire d'adapter ou modifier en fonction des besoins. Une grande part de développement logiciel « sur mesure » est en outre nécessaire pour coordonner l'ensemble du système.

2.3.2. Systèmes de télésurveillance opérationnels

Les systèmes de surveillance des mouvements de terrain sont relativement récents. Nous présentons, ci-dessous, quelques uns d'entre eux portés à connaissance. Cette présentation n'est probablement pas exhaustive compte tenu de la difficulté à recenser ces expériences.

Le projet européen INTERREG « RiskYdrogé » [Interreg IIIA, 2006] a permis d'analyser trois systèmes de télésurveillance: Eydenet (Italie), GeSSRI (France) et Guardaval (Suisse). Ces trois systèmes ont pour objectif de gérer des problématiques de mouvements de terrain à l'échelle régionale et nationale. L'analyse réalisée montre tout d'abord que le développement d'outils de télésurveillance est relativement récent : GeSSRI (2000), Eydenet (2000) et Guardaval (2003).

Le système GeSSRI, développé par le CETE de Lyon pour la surveillance du site de Séchilienne (Isère), est un système bien plus mature que les autres compte tenu qu'il intègre la longue expérience de surveillance acquise sur le site des Ruines de Séchilienne depuis 1988, date de mise en œuvre des premiers instruments de mesure automatisés. Le système a largement évolué grâce à une meilleure connaissance de l'aléa et à l'évolution des techniques instrumentales. Face aux enjeux concernés par cet aléa, l'accent a surtout été mis sur la sûreté de fonctionnement et la gestion des alertes [Duranthon, 2004].

Le système Eydenet, développé par la société ISMES, présente des caractéristiques très performantes de gestion d'alerte et d'aide à la décision, attestant d'une réflexion aboutie sur la problématique [Lazzari, 1999].

Le système Guardaval, développé par le CREALP, est un système plus récent. A la différence des deux autres systèmes, Guardaval s'articule sur une architecture client-serveur avec une intégration vers Internet. La gestion des alertes est simplifiée mais le but fixé de centralisation des informations des différents sites surveillés dans le canton du Valais est atteint [Rouiller, 2004].

L'INERIS développe depuis plus de vingt ans des systèmes de télésurveillance appliqués à la gestion des risques du sol et du sous-sol. Elle a mis au point les systèmes de télésurveillance SYTGEO (géotechnique) et SYTMIS (microsismique) dédiés au suivi des ouvrages et à la gestion des risques du sol et du sous-sol. Le système SYTMIS a d'ailleurs été installé sur la falaise de craie de Mesnil-Val (Normandie) dans le cadre du projet européen PROTECT (PRediction Of The Erosion for Cliffed Terrains), visant à améliorer la connaissance des éboulements côtiers

[Busby, 2004]. Le système a permis de mesurer l'activité microsismique lors de l'éboulement du 23 juin 2002.

Développé par les sociétés GEOLITHE et LEAS, un système de surveillance en continu des éboulements rocheux par écoute acousto-sismique est en fonctionnement depuis l'été 2001 sur le site de La Rochaille (Alpes de Haute Provence). Le système de surveillance permet de sécuriser en permanence une portion de la Route RD900 (Col de Larche) au moyen de feux, panneaux de signalisation lumineux et barrières basculantes. Il était initialement prévu pour une durée de trois ans afin de permettre au Conseil Général des Alpes de Haute Provence d'organiser les travaux d'une galerie de protection. Compte tenu de ses performances, le système a été prolongé de cinq ans (jusqu'en 2009).

Concernant le domaine de la surveillance des avalanches, il y a lieu de mentionner le système islandais Watchman. Ce dernier, développé depuis 1996 par l'administration publique des routes en collaboration avec l'université d'Islande (*Reykjavik*), permet de sécuriser la route côtière de la région des Fjords de l'Ouest, où les accidents dus aux avalanches sont très fréquents [Bessasson, 2007]. Son fonctionnement est basé sur la détection sismique et sur l'analyse automatique des signatures sismiques. Ainsi en cas de reconnaissance d'un signal d'avalanche, un message téléphonique est aussitôt envoyé à la station de contrôle sur site qui déclenche la fermeture de la route.

2.3.3. Méthodes de surveillance : seuils et critères d'alerte

Les méthodes de surveillance vont permettre de déclencher des procédures d'alerte à partir de l'analyse des données reçues du (ou des) dispositif(s) de mesure. Pour cela des seuils doivent être définis préalablement afin que le système informatisé automatique soit en mesure d'évaluer les données.

La définition des seuils est une problématique extrêmement complexe à laquelle on ne peut répondre de façon exhaustive. Elle nécessite d'abord la définition des paramètres pertinents à suivre, sachant que ces paramètres varient suivant le type d'aléa surveillé.

Ainsi la définition de seuils s'affine généralement au cours de l'auscultation grâce à l'amélioration des connaissances des facteurs d'évolution de l'instabilité. Cette approche, par approximations successives (« *learn-as-you-go* »), est la plus souvent utilisée. Néanmoins, lors de la mise sous surveillance d'une instabilité présentant déjà des signes d'accélération des valeurs seuils sécuritaires sont souvent fixées à des niveaux très bas de manière à rendre le système très sensible.

Les valeurs seuil peuvent être absolues ou relatives et s'attachent à la mesure ainsi qu'éventuellement à sa dérivée (i.e. vitesse).

Comme explicité précédemment lorsqu'un site est suivi depuis plusieurs années, les valeurs seuil peuvent être fixées en fonction des données historiques. A Séchilienne par exemple, les seuils d'alerte prennent en compte la vitesse journalière moyenne sur l'année N-1 (1er juillet au 30 juin), pour au moins trois capteurs appartenant à une liste pré-définie [Duranthon, 2004].

Cette méthode est aussi utilisée dans le cas du mouvement de terrain de la Becca di Nona (Aoste, Italie), où les seuils d'alerte, définis à 1.2 et 2.4 mm/h, ont pu être fixés sur la base des déplacements maximaux observés durant la réactivation du phénomène en octobre 2000, soit 4.5 à 6 mm/h [Interreg IIIA, Tamburini, 2006].

Dans le cas de mouvements présentant une phase d'accélération lente et progressive, il est possible d'élaborer un modèle cinématique d'évolution permettant d'évaluer une

date probable d'occurrence de l'éboulement. C'est le cas du Piton de la Becqua sur la commune de la Perrière (Savoie) qui a permis au LRPC d'élaborer un modèle de divergence ayant constitué une aide significative à la prise de décision [Effendiantz, 2000]. Deux capteurs de déplacement mesurent l'ouverture de la fissure arrière de l'éperon. A partir d'un pas de mesure d'un quart d'heure est calculée la vitesse moyenne sur 24 heures (V_{moy}). Le modèle retenu, repose sur l'évaluation de l'intervalle de temps nécessaire pour enregistrer un déplacement de 10 mm (*seuil fixé grâce aux données d'auscultation de 1975 à 1999*), soit $\Delta t = 10 / V_{moy}$. Le modèle hyperbolique (en $1/V$) proposait un pronostic jugé trop prudent car il aurait conduit à une évacuation injustifiée dès la première crise en février 1999, soit un mois avant l'éboulement. C'est le modèle exponentiel qui a été retenu pour la gestion de crise. Ce modèle, représentant $\log(\Delta t)$ en fonction du temps, a servi de base à la décision d'évacuation 14 jours avant l'éboulement.

Parmi les autres méthodes empiriques, Saiton [Saiton, 1965] propose une relation entre la vitesse de déplacement (V) et temps (t), avec des coefficients empiriques (c , m) qui doivent être adaptés en fonction de chaque site : $\log(t) = c - m \cdot \log(V)$.

L'approche développée par Voight [Voight, 1988, 1989], basée sur l'évolution des déplacements superficiels, est également couramment employée. La méthode part du principe qu'à l'approche de la rupture la vitesse des déplacements croît de manière exponentielle. En représentant l'inverse de la vitesse en fonction du temps, l'intersection du prolongement analytique de la courbe avec l'axe des abscisses donne une estimation de la date de rupture.

Malgré ces expériences, la définition d'un seuil reste très difficile à appréhender. Le déclenchement d'une alerte tient compte d'une part des seuils d'alerte mais aussi de critères permettant de combiner des données multi-sources.

Ainsi, lors de l'éboulement du Meidji (Commune de Saint-Nicolas, Valais) en novembre 2002, les autorités suisses ont fait évacuer la zone 24 heures avant l'éboulement. Un système de surveillance basé sur des mesures de déplacement par extensométrie et topométrie avait été mis en place quelques mois avant. Néanmoins, ce n'est pas sur la base d'un dépassement de seuils que la décision a été prise par les experts mais en comparant les vitesses de déplacement couplées à l'analyse du comportement géomécanique [Interreg IIIA, Pointer, 2006].

Un critère d'alerte peut être défini de différentes manières et dépend essentiellement de la bonne connaissance du site et de l'aléa. La typologie suivante a été reprise de l'étude comparative menée dans le cadre du projet INTERREG [Interreg IIIA, Ornstein, 2006].

Le cas le plus simple est le critère unique :

Exemple : SI ($V_{extenso} > 2 \text{ mm/h}$)

Le critère corrélé permet de sectoriser l'instabilité par groupes de capteurs de même type :

Exemple : SI ($V_{extenso_1} > 2 \text{ mm/h}$) ET ($V_{extenso_2} > 2 \text{ mm/h}$)

Lorsque plusieurs types de données sont disponibles, on peut utiliser un critère combiné :

Exemple : SI ($V_{extenso_1} > 2 \text{ mm/h}$) ET ($V_{pluie} > 14.8 \text{ mm/h}$)

Le critère de persistance est basé sur un des trois critères précédent (unique, corrélé ou combiné) auquel est ajouté une condition de répétabilité :

Exemple : SI (<critère_unique>) apparaît 2 fois de suite

Le critère statistique utilise des outils tels que la covariance ou la régression linéaire. Il est basé sur un critère simple néanmoins la comparaison ne s'effectue pas avec une valeur seuil définie préalablement mais avec une valeur attendue, estimée par exemple par une régression linéaire (d'ordre 1) sur une période de référence (période connue de 24 à 72 heures) :

Exemple : SI (Vextenso_1 > Vreg_lin_24h)

A partir de ces critères, il est possible d'établir toutes les combinaisons souhaitées en fonction des connaissances du site et de l'instabilité.

2.3.4. Remarques générales sur les méthodes de surveillance

L'expérience montre que la définition des seuils et critères d'alerte s'effectue souvent au cas par cas et est affinée à partir d'une auscultation préalable de l'instabilité. Il faut ainsi rester prudent sur l'utilisation de modèles déterministes, qui s'attachent le plus souvent à l'extrapolation d'une seule variable (le déplacement). Or les fluctuations sur les déplacements (ouverture de fracture) ne sont pas nécessairement représentatives, de manière exhaustive, de la stabilité du massif rocheux. Par ailleurs, l'état de stabilité au moment de la mise sous surveillance n'est connu qu'avec une grande incertitude. La mise sous surveillance est souvent décidée lorsqu'un mouvement à été observé et confirmé. Enfin, les conditions aux limites géomécaniques et structurales du massif rocheux, y compris la localisation des surfaces de rupture, ne sont souvent pas connues précisément.

Ainsi si les modèles peuvent être validés a posteriori, leur application a permis de montrer qu'ils ne fonctionnent qu'en phase terminale de crise, c'est à dire pendant la phase d'accélération définitive avant la rupture [Rocher, 1992].

Les instabilités gravitaires de grande ampleur, telles que les Ruines de Séchilienne, La Clapière, ou le glissement de Randa, ainsi que les cas de glissements présentant une phase d'accélération croissante et graduelle, tels que les sites de La Perrière et du Meidji, qui ont fait l'objet d'études détaillées, constituent des références importantes pour l'établissement de seuils.

La mise sous surveillance est souvent décidée lorsqu'un mouvement à été observé et confirmé. L'état de stabilité à ce moment-là n'est connu qu'avec une grande incertitude. En particulier, les conditions aux limites géomécaniques et structurales du massif rocheux, y compris la localisation des surfaces de rupture, ne sont souvent pas connues précisément et doivent donc l'être pour mieux appréhender la stabilité réelle de la zone potentiellement instable.

La grande variété des instabilités potentielles en massif rocheux, qui peuvent atteindre l'échelle de l'instabilité de versant de grande ampleur -comme celles des Ruines de Séchilienne, de Randa ou de la Clapière-, ou bien celle des blocs rocheux des Gorges de la Bourne ou des Grands Goulets dans le Vercors, implique des niveaux de complexité et d'interaction, et donc des dynamiques très différentes. Il est donc clair que l'on ne peut rechercher un modèle unique pour rendre compte de cette dynamique. L'identification de grandes classes de dynamique de mouvements gravitaires est elle-même un objectif à atteindre. Repérer la place d'une instabilité parmi ces grandes classes est une aide pour la détermination des paramètres observables pertinents, ainsi que pour leur utilisation pour suivre et peut-être prévoir l'évolution de cette instabilité (par exemple, [Rochet, 1992 ; Effendiantz et Rochet, 2000]).

L'expérience montre que la définition des seuils et critères d'alerte s'effectue souvent de façon empirique, au cas par cas et est affinée à partir d'une auscultation préalable de l'instabilité (par exemple, [Effendiantz et Rochet, 2000]). Il est également nécessaire de tester un ensemble de paramètres et non pas un seul. Il faut également déterminer quels sont les ensembles de paramètres pertinents. Il faut ainsi rester prudent sur l'utilisation de modèles qui s'attachent à l'extrapolation d'une seule variable (le déplacement). Les fluctuations des déplacements (ouverture de fracture) ne représentent pas nécessairement très bien la dynamique interne fine de la stabilité du massif rocheux. Par exemple, un bloc associé à un massif par quelques ponts rocheux répartis à la surface d'une fracture arrière verticale peut rester immobile ou se déplacer de façon infime et éventuellement non mesurable, alors que l'état des ponts rocheux évolue sous l'effet de transformations physico-chimiques (transfert de matière, par exemple) lentes mais continues. Cette dynamique profonde ne sera pas représentée correctement par les mesures de déplacement. La question est de savoir si les mesures acoustiques, ou l'utilisation du bruit sismique acquis en continu peut permettre de connaître mieux l'évolution de l'état de ce type de fracture et des ponts rocheux qu'elle contient.

Ainsi si les modèles peuvent être validés a posteriori, leur application a permis de montrer qu'ils ne fonctionnent qu'en phase terminale de crise, c'est à dire pendant la phase d'accélération définitive avant la rupture.

Les instabilités gravitaires de grande ampleur, telles que les Ruines de Séchilienne, La Clapière, ou le glissement de Randa, ainsi que les cas de glissements présentant une phase d'accélération croissante et graduelle, tels que les sites de La Perrière et du Meidji, qui ont fait l'objet d'études détaillées, constituent des références importantes pour l'établissement de seuils.

2.3.5. Présentation de sites sous surveillance

Nous avons recensé, en annexe, une liste non exhaustive de sites, qui ont fait ou font l'objet d'une surveillance avec gestion d'alerte, en France et dans les pays de l'Arc alpin (cf. **Annexe A-4**).

L'aspect de la sécurité constitue l'objectif majeur de ces sites, ce qui signifie qu'en plus de la mesure, ces systèmes de surveillance transmettent l'information (par télémétrie) vers un centre de traitement, capable de générer des alertes opérationnelles.

2.4. Auscultation des instabilités par écoute microsismique

L'écoute microsismique est une technique qui consiste à mesurer et analyser les vibrations émises lors de ruptures dans les massifs rocheux sous contrainte. Au sein d'une instabilité rocheuse, l'énergie emmagasinée se libère brutalement sous la forme de rupture et génère des ondes élastiques se propageant dans le milieu. Leur magnitude étant très faible (souvent négative ou nulle), on appelle ces séismes des nano-séismes.

Les réseaux microsismiques sont apparus à partir des années 60 grâce aux avancées technologiques en instrumentation, transmission et traitement des données. En 1981, on recense déjà plus de 100 réseaux microsismiques permanents dans le monde auxquels s'ajoutent les nombreux réseaux de mesures temporaires [Lee & Stewart, 1981]. Les applications sont nombreuses. La majorité des réseaux installés sont principalement utilisés pour l'étude des tremblements de terre. Mais l'écoute microsismique s'étend à d'autres domaines. Elle est utilisée entre autre, dans la surveillance des exploitations souterraines et pétrolifères [Smith et al., 1974, Senfaute 1995, 2000, Mendecki, 1997], ainsi que dans la surveillance volcanique [Endo & Murray, 1991, Scarpa et al., 1996]. Par contre, elle n'a pas encore été validée comme système de surveillance opérationnel pour le suivi des instabilités rocheuses. Néanmoins, différentes expérimentations ont été menées et ont démontré un fort potentiel dans la prévision des éboulements [Verdier, 1993, Senfaute et al., 2003, Clément, 2004, Gunzburger, 2004, Amitrano et al., 2005, Spillmann, 2007]. Ces expériences d'écoute microsismique appliquées à la surveillance des instabilités rocheuses sont encore rares mais les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence qu'un éboulement rocheux est précédé d'une activité microsismique liée à la déstabilisation du massif. [Amitrano et al., 2005] ont observé un accroissement d'activité sismique avant l'éboulement de la falaise de craie de Val-Mesnil ; ils ont montré que cet accroissement suivait une loi puissance qui peut être interprétée comme un précurseur à la rupture. Ils ont également mis en évidence le fait que la taille moyenne des événements avait tendance à augmenter lorsque le massif se rapproche de la rupture. On remarque que certaines sources sismiques, très localisées, ne sont pas détectées par tous les capteurs sismiques du réseau en place. En effet, la structure géomécanique des instabilités rocheuses étant très fracturée, les discontinuités constituent généralement des filtres naturels à la propagation des ondes sismiques. A cette caractéristique s'ajoute la nature des matériaux les constituants qui peuvent aussi jouer un rôle atténuateur. C'est le cas pour l'éboulement de la falaise de Mesnil-Val (Normandie) dont les signaux sismiques n'ont été détectés que par un seul capteur situé à la limite de la zone de rupture. Les autres capteurs, entourant la zone à des distances d'environ 50 m n'ont rien détecté. Cette forte atténuation peut être partiellement expliquée par la porosité de la craie (environ 45%) [Senfaute et al., 2003].

3. Conclusion

La mise sous surveillance d'un aléa ne peut être établie qu'après une première phase d'identification et de qualification. Le système de gestion d'alerte est ensuite défini sur la base des objectifs de sécurité recherchés.

En résumé les éléments indispensables pour la conception et la mise en œuvre d'un système de surveillance sont les suivants :

- adéquation des techniques instrumentales avec le type d'aléa : la technique de mesure doit notamment être adaptée à la cinématique de l'aléa;
- adéquation des méthodes instrumentales avec la dynamique du dispositif de mesure ; l'évaluation de la déformation ne se faisant qu'à chaque nouvelle mesure;
- adéquation des seuils d'alerte au type d'aléa et au contexte environnemental;
- adaptation des techniques et méthodes instrumentales et des règles de surveillance aux objectifs de sécurité ;
- adéquation des dispositifs d'avertissement aux types d'enjeux;
- présentation conviviale et synthétique des informations de surveillance et du fonctionnement du système; l'utilisation, par exemple, de support cartographique et photographique permet d'apporter un véritable outil visuel d'aide à la décision pour les gestionnaires qui sont rarement des techniciens;
- vérification de la fiabilité des données par des mesures manuelles périodiques;
- mise à niveau du système de surveillance au fur et à mesure de l'évolution de l'aléa.

Il est donc nécessaire d'avoir à la fois une connaissance approfondie de l'objet (instabilité rocheuse), de l'instrumentation et des systèmes de contrôle pour mettre au point un système de surveillance opérationnel. Par la suite, nous décrivons les performances que doit atteindre un tel système et les moyens que nous avons utilisés pour y parvenir. Puis nous montrerons les résultats obtenus sur deux sites instables, très différents l'un de l'autre par leur dynamique.

CHAPITRE 2 :

Conception d'une instrumentation multi-paramètres

Le besoin systématique de télémétrie, la nécessité d'un système simple et centralisé permettant la mesure en continu de plusieurs paramètres, à la fois à haute et basse fréquence, nous ont conduit à développer notre propre station de surveillance ainsi que nos propres outils de gestion et d'analyse de données plutôt que d'adapter des outils existants. Les instruments existants, notamment les stations d'acquisition sismiques, n'ont généralement pas les performances requises. En effet, la nécessaire intégration d'outils incomplets et disparates n'aurait fait qu'augmenter la complexité de la chaîne de mesure. Il ne s'agissait pas du choix le plus rapide à réaliser à court terme mais certainement le plus efficace et fiable à long terme.

La principale motivation à la conception d'une station de mesure multi-paramètres repose sur le fait qu'elle permette de répondre parfaitement à nos besoins spécifiques, c'est-à-dire :

- disposer d'un équipement capable d'acquérir à la fois des signaux à haute fréquence (sismique) et des données lentes (déformation, météorologie) en continu sur de longues périodes de temps ;
- disposer d'une solution télémétrée simple à mettre en œuvre ;
- disposer d'une solution d'acquisition modulaire et totalement maîtrisée afin d'optimiser les coûts de maintenance ;
- réduire le plus possible la consommation pour des applications à long terme sur des sites isolés ;
- disposer de capacités de stockage le plus élevées possibles de façon à pouvoir réaliser des enregistrements en continu à très haute fréquence ;
- réduire le plus possible le niveau de bruit de la chaîne de mesure pour pouvoir effectuer des études de bruit sismique, notamment la détection de fréquences pures de faible intensité, y compris à hautes fréquences ;
- implémenter nos propres algorithmes d'acquisition, de traitement et de transmission de l'information.

1. Développement d'une station de mesure multi-paramètres

1.1. Présentation de la nouvelle station : SAFIR

L'instrumentation des instabilités rocheuses fait appel à diverses techniques et méthodes et constitue un domaine d'expérimentation en constante évolution. La diversité des sites étudiés et des objets mesurés nécessite une grande **versatilité** du système de mesure qui doit pouvoir être modifiable aisément.

Par ailleurs, les différentes techniques mises en œuvre sur un site ne reposent pas toutes sur le même principe de mesure et nécessitent donc une interface spécifique pour chacune d'entre elles. Notre développement s'est ainsi orienté vers un système **modulaire**, rendant ainsi chaque élément interchangeable afin d'en faciliter l'adaptabilité et la maintenance.

De plus, notre objectif vise à instrumenter des objets en milieu naturel, dans un environnement difficile (basse température, pluie, neige, poussière), dans des sites isolés et dont l'accès est souvent rendu impossible par de mauvaises conditions météorologiques. Il est donc primordial que le système **consomme peu d'énergie**, qu'il soit **robuste** et qu'il puisse gérer automatiquement son fonctionnement dans le but de pérenniser la mesure. De plus, il doit être téléométré, l'objectif étant non seulement de surveiller en permanence des sites peu accessibles, mais aussi de connaître l'état de fonctionnement du matériel.

Enfin, de manière à faciliter la mise en œuvre des équipements dans le cadre d'installations permanentes ou temporaires (intervention d'urgence pour gestion de crise), le système sera de **faible encombrement** et facilement manipulable.

Cette nouvelle station a été appelée **SAFIR**, acronyme de **Station d'Acquisition multi-Fonction pour les Instabilités et les Risques**.

1.2. Architecture de la station de mesure

L'architecture de notre station SAFIR s'appuie sur un prototype développé à partir de 1998 au LGIT - Université de Savoie. De par notre volonté de concevoir un système de mesure modulaire, nous avons divisé la chaîne de mesure en trois parties, regroupées en deux modules (cf. **Figure 3**) :

- le module analogique, composé du conditionnement et de la numérisation du signal;
- le module numérique, permettant le traitement et le stockage de l'information.

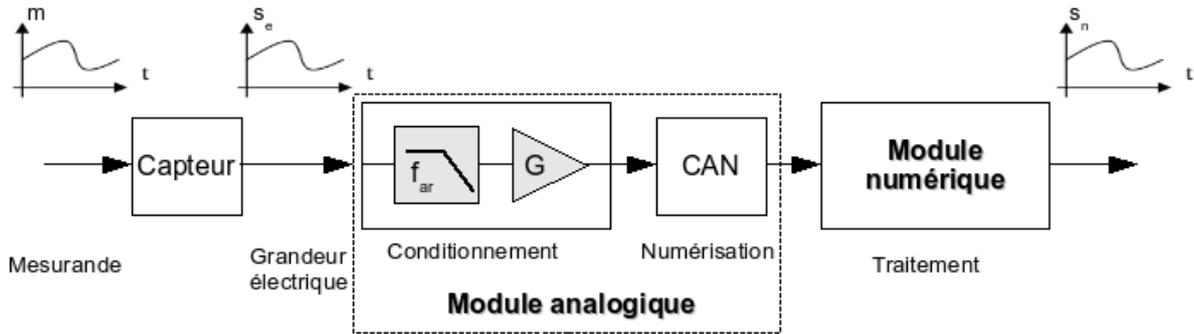


Figure 3 : Chaîne de mesure de la station SAFIR

Le capteur convertit la grandeur physique (le mesurande) en une grandeur électrique. Puis, le signal électrique est amplifié et filtré (conditionnement électronique), avant d'être acheminé vers le convertisseur analogique numérique (CAN). Le signal binaire ainsi obtenu est traité par le module numérique, qui gère l'analyse, le stockage et la transmission des données. La communication entre ces deux modules s'effectue par un bus standard QSPI rendant les modules totalement indépendants l'un par rapport à l'autre.

1.2.1. Module analogique

Le module analogique constitue l'interface d'entrée du signal électrique provenant du capteur. Il est nécessaire de différencier deux familles de capteurs qui vont influencer la conception de notre interface de conditionnement du signal : un capteur peut être considéré soit comme un générateur, soit comme une impédance. Dans le premier cas on parle de capteur actif : c'est le cas du sismomètre (cf. **Annexe B-1** pour le fonctionnement d'un capteur sismique). Le capteur délivre un signal électrique équivalent à une charge (*un courant ou une tension*) portant directement l'information liée au mesurande. Dans le second cas on parle de capteur passif : c'est le cas, par exemple, de l'extensomètre. Le capteur délivre un signal équivalent à une impédance (*résistance, inductance ou capacité*) qu'il est nécessaire d'intégrer dans un circuit électrique afin d'en récupérer l'information sur le mesurande.

L'interface de conditionnement du signal sera donc spécifique :

- au type de capteur qui fournit le signal porteur de l'information sur le mesurande;
- et au CAN qui impose le format d'entrée du signal électrique pour la conversion numérique.

Idéalement, la réalisation d'une mesure ne doit pas modifier la valeur du signal mesuré. Chaque élément de la chaîne de mesure constitue une source d'incertitude qui peut être minimisée en adaptant l'impédance de sortie du capteur avec l'impédance d'entrée de la chaîne de mesure. L'impédance d'entrée de la chaîne de mesure contrôle l'énergie qui circule du capteur vers le module analogique. La perte de signal peut être estimée par :

$$perte = \frac{E^2}{Z} \quad (2.1) \quad \text{avec } Z \text{ l'impédance d'entrée du module analogique et } E \text{ le potentiel mesuré.}$$

Pour minimiser la perte de signal, il faut donc que l'impédance d'entrée du module analogique soit grande. En règle générale, l'impédance d'entrée doit être 100 fois supérieure à l'impédance de sortie du capteur afin de réduire l'incertitude de mesure de 1%.

Nous avons conçu deux interfaces de conditionnement, l'une pour les données lentes issues principalement de capteurs passifs, l'autre pour les données rapides issues exclusivement des capteurs sismiques.

Interface de conditionnement pour capteurs lents

L'interface pour capteurs « lents », correspond au conditionnement des mesures finalement échantillonnées à moins de 1 Hz. La réponse de ce type de capteur est considérée comme statique car les variations de la valeur d'entrée sont suffisamment lentes pour que cette valeur soit considérée comme constante. Généralement, on utilise des capteurs passifs dont l'impédance est liée au mesurande par une fonction linéaire. L'interface de conditionnement va permettre de convertir la grandeur électrique de sortie du capteur pour l'adapter à la plage d'entrée du CAN. Un pont d'impédances (cf. **Figure 4**) va permettre d'adapter les niveaux mais dans certains cas, il est nécessaire d'utiliser un amplificateur opérationnel en montage suiveur pour adapter les impédances.

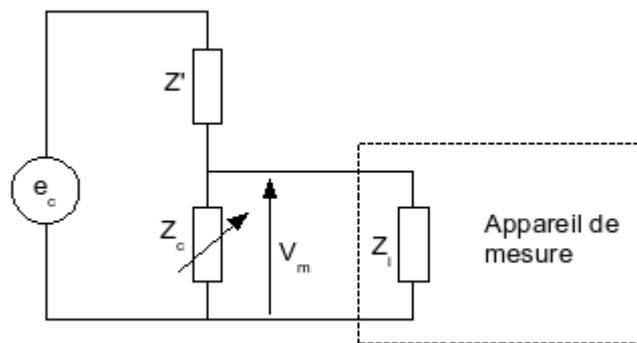


Figure 4 : Mesure d'un capteur résistif dans un montage potentiométrique

Le capteur, d'impédance Z_c , en série avec une impédance Z' , est alimenté par une source e_c . Le circuit ainsi formé constitue le conditionneur. La tension V_m mesurée aux bornes du capteur par l'intermédiaire d'un appareil de mesure d'impédance d'entrée Z_i est définie par :

$$V_m = e_c \cdot \frac{(Z_c Z_i)}{(Z_c Z' + Z_i (Z_c + Z'))} \quad \text{avec } Z_i \gg Z_c$$

$$V_m = e_c \cdot \frac{Z_c}{(Z_c + Z')} \quad (2.2)$$

La caractéristique primordiale du circuit de mesure est que son impédance d'entrée Z_i doit être très supérieure à Z_c de façon à minimiser l'influence de Z_i sur la mesure.

Les capteurs résistifs sont les plus couramment utilisés car l'interface de conditionnement est simple à réaliser. Dans notre cas, ces capteurs sont des extensomètres pour la mesure de déplacements. Néanmoins, la mesure d'un capteur résistif doit être effectuée avec précaution. En effet, il faut éviter qu'une impédance parasite s'ajoute à la mesure, ce qui peut se produire facilement dans les cas

suivants :

- la température ambiante ainsi que la température créée par auto-échauffement (effet Joule) peuvent entraîner une variation de l'impédance du capteur ;
- si le capteur est éloigné de la station de mesure, la longueur des câbles de liaison constitue une impédance supplémentaire au circuit, qui varie en fonction de la température pouvant ainsi provoquer une perturbation aléatoire sur la mesure ;
- une autre cause de perturbation peut être créée par la résistance d'isolement du capteur : l'humidité et la corrosion étant les principales sources d'altération de la résistance d'isolement.

Il n'existe pas de solution radicale à l'élimination de ces parasites, en particulier dans nos applications de mesure en milieu naturel. Néanmoins, quelques précautions permettent de les réduire. Il est conseillé tout d'abord d'utiliser des capteurs offrant un indice élevé de protection (norme IP). De plus, une mesure de la température à proximité du capteur permet de corriger les variations thermiques d'impédance.

La mesure du signal électrique en sortie du capteur peut s'effectuer soit par une mesure de tension, soit par une mesure de courant. Lorsque la longueur des câbles entre le capteur et l'interface de conditionnement est grande, la mesure est effectuée par boucle de courant. Le signal est alors directement lié au courant qui circule dans la boucle et n'est pas affecté par la chute ohmique de tension dans la ligne, ce qui autorise des transmissions sur des longueurs supérieures au kilomètre.

Enfin, une autre source d'erreur sur la valeur mesurée peut provenir de la variation de la tension de référence du capteur, ce qui nécessite l'emploi d'un régulateur pour fixer cette tension de référence.

Interface de conditionnement pour capteurs sismiques

L'interface analogique sismique permet de conditionner un signal d'entrée, qui n'est plus une constante mais une fonction du temps $x(t)$. L'interface de conditionnement, développée par Jacques Grangeon (LGIT, Université de Savoie), comprend, de manière simplifiée, un étage d'amplification et un étage de filtrage. La consommation de l'électronique a été optimisée par l'utilisation d'une source d'alimentation mono-tension, ce qui a fortement compliqué la conception de la carte. Les détails techniques de l'interface sont présentés en annexe (cf. **Annexe B-2**).

La conception et le choix des composants électroniques ont été orientés en fonction des objectifs du projet, à savoir : faible consommation, bas niveau de bruit, pilotage par logiciel, robustesse et faible coût. De plus, la réalisation de l'interface tient compte des caractéristiques du convertisseur analogique-numérique utilisé, à savoir sa plage et impédance d'entrée (cf. **Annexe B-3**).

L'étage d'amplification est primordial car même quand il n'augmente pas directement le niveau du signal (gain), il permet l'adaptation d'impédance entre le capteur et le convertisseur. La conception de l'étage d'amplification a été réalisée, d'une part, de manière à rendre le gain paramétrable par logiciel grâce à des potentiomètres à impulsion (DCP), et d'autre part pour fournir une plage d'amplification variée et étendue grâce à un double étage d'amplification (cf. **Annexe B-2**).

Pour palier au problème de repliement de spectre, l'interface de conditionnement comprend un filtre anti-repliement (*passé bas type Butterworth d'ordre 5, atténuation 30 dB/octave*), dont la fréquence de coupure est rendue réglable par une horloge externe réalisée au moyen d'un circuit RC. De la même manière que l'amplification, le

module numérique pilote directement un potentiomètre à impulsions (*DCP*) qui, en faisant varier la résistance du circuit de l'horloge, agit sur le réglage de la fréquence de coupure du filtre. La plage de réglage s'étend de 50 Hz à 5 000 Hz par pas de 50 Hz.

1.2.2. Module numérique

Le module numérique gère toute la chaîne de mesure jusqu'à la phase de traitement de l'information. Il ordonne le séquençement de l'acquisition, organise le flux de données, effectue les traitements et gère le stockage et la transmission des données.

Le module numérique repose sur la carte CF2 de Persistor Instruments Inc. Le module fonctionne exclusivement à 3,3 V (E/S et Bus de données) et dans une gamme de températures extrêmes allant de -40°C à +85°C. Il fonctionne autour du microcontrôleur MC68LK332 de Motorola, qui constitue le cœur du module et est secondé par un second microcontrôleur, le MSP430 de Texas Instrument, qui est utilisé pour la gestion d'énergie et l'horloge système. L'avantage de ce type de circuit est de réduire fortement la consommation du module quant il n'y a pas de traitement à effectuer. En mode veille, le module ne consomme ainsi que 6 μ A et en fonctionnement bas régime, la consommation s'élève à 4 mA.

Le module numérique comporte un mini système d'exploitation, PicoDOS, constitué d'un ensemble de bibliothèques développées spécifiquement pour le fonctionnement de la carte CF2. Il dispose d'une mémoire interne de 1 Mo et d'un lecteur de CompactFlash. La programmation du module s'effectue en langage C par l'intermédiaire de l'environnement de développement, Metrowerks CodeWarrior, permettant de compiler des applications pour architectures embarquées.

Les caractéristiques du module numérique sont fournies en annexe (cf. **Annexe B-4**).

1.3. Fonctionnement et caractérisation de la station de mesure

La station SAFIR constitue un véritable système embarqué, c'est-à-dire un système dédié à un ensemble de tâches spécifiques et prédéfinies. L'interaction avec l'utilisateur est limitée car le système a pour objet de fonctionner de manière totalement automatique. A la mise sous tension, le système effectue les tâches pour lesquelles il a été programmé.

Nous présenterons dans un premier temps la méthodologie mise œuvre pour le pilotage de la chaîne de mesure par le module numérique. Suite à quoi, nous caractériserons les éléments clés de la chaîne d'acquisition.

1.3.1. Algorithmes d'acquisition

L'étape d'initialisation de l'acquisition

La configuration de la chaîne de mesure va varier en fonction des objectifs de la surveillance et du contexte du site. Dans ce cas, les paramètres d'initialisation ne pourront pas être figés. Nous avons choisi de regrouper ces paramètres dans un fichier texte de manière à ce qu'il puisse être lu et modifié à partir de n'importe quel système informatique. Le nom du fichier de configuration n'est pas imposé. Il suffit de le citer comme argument au programme principal pour qu'il soit reconnu. Par convention, nous l'avons toujours appelé `SAFIR.CFG`.

Son format est simple : <identifiant>=<paramètre>

Nous présentons en annexe, un exemple de fichier de configuration (cf. **Annexe B-5**).

Le fichier est divisé en trois parties regroupant :

- les paramètres généraux relatifs à la station;
- les paramètres spécifiant les modules périphériques à initialiser;
- les paramètres décrivant chaque voie de mesure.

Avant tout cycle de mesure, il est nécessaire d'affecter (manuellement ou automatiquement) une valeur à tous les paramètres de l'acquisition. Cette étape d'initialisation est réalisée à la mise sous tension de la station et s'organise de la manière suivante :

- vérification du mode de démarrage (*Normal ou Safe Mode*);
- désactivation de tous les périphériques internes au CPU pour réduire toute consommation d'énergie superflue;
- définition de la fréquence d'horloge du CPU (définie selon le type de l'application embarquée);
- lecture du fichier de configuration et allocation mémoire des variables;
- réglage des paramètres analogiques (gain, fréquence anti-aliasing);
- activation des périphériques définis dans le fichier de configuration;
- initialisation des périphériques par leur séquence propriétaire (commandes NMEA pour le GPS, commandes HAYES pour le GSM, etc.);
- synchronisation horaire avec le GPS;
- préparation de l'unité de stockage des données;
- initialisation du CAN via la liaison série QSPI;
- initialisation de la période de génération des interruptions (PIT).

Lorsque toute la séquence d'initialisation s'est déroulée sans erreur, la station lance la boucle de mesure.

L'acquisition des données

Afin de régulariser l'échantillonnage dans le temps, les acquisitions sont gérées au niveau du microcontrôleur par des interruptions matérielles. Ces interruptions peuvent être programmées selon deux horloges au moyen du PIT (*Periodic Interrupt Timer*). La première horloge fournit une période de 100 μ s et la seconde de 51 ms.

La fréquence d'interruption sera définie par un multiple de la période d'horloge selon un registre de 8 bits (=256 possibilités). L'intervalle des fréquences est donc compris entre 100 μ s et 25.5 ms pour la première horloge et 51 ms et 13.005 s pour la seconde. Le microcontrôleur permet de programmer jusqu'à 8 PIT distincts.

Pour programmer une interruption matérielle, il faut tout d'abord déclarer un vecteur. Ce vecteur va associer une entrée physique du microcontrôleur à une tâche (*handler*). L'interruption matérielle se résume au déclenchement d'une conversion analogique-numérique via le bus QSPI.

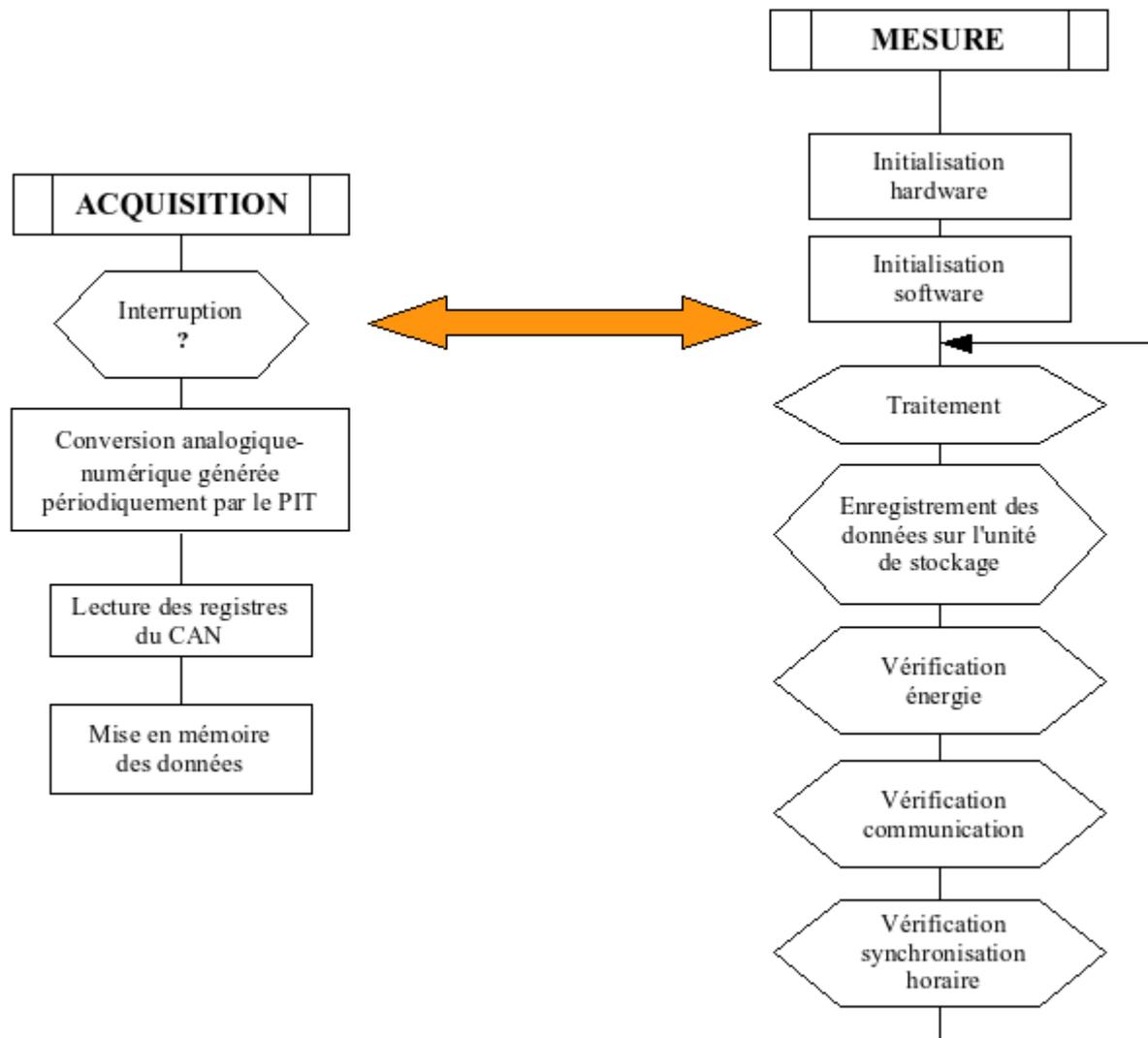


Figure 5 : Organigramme de fonctionnement de la station SAFIR

Comme le montre l'organigramme de fonctionnement de la station (cf. **Figure 5**), la tâche d'acquisition s'exécute en parallèle au programme principal. Ce fonctionnement constitue ainsi les prémisses d'un système multitâche à temps partagé. Le code d'acquisition est totalement indépendant du programme principal de mesure. En effet, le programme principal effectue les tâches de fond et est interrompu périodiquement par la tâche d'acquisition.

La problématique de l'acquisition à haute fréquence

A haute fréquence, le problème d'optimisation du système d'acquisition repose principalement sur le temps d'exécution des différentes tâches. Ainsi, plus ce temps est réduit, plus le système est disponible pour traiter les données. Nous nous sommes donc efforcés d'optimiser les algorithmes pour obtenir un temps d'exécution le plus court possible.

Parmi les tâches, nous avons différencié les tâches de traitement, effectuées en temps réel, et les tâches de fond, effectuées en temps différé.

L'exécution en temps réel des tâches signifie que la donnée est traitée et analysée périodiquement, dès qu'elle est fournie par le convertisseur analogique-numérique.

Les tâches de fond, liées à l'enregistrement des données et au fonctionnement de la station, sont effectuées pendant le temps libre (= *temps d'inactivité du microcontrôleur*).

Les temps caractéristiques des différentes tâches d'acquisition sont récapitulés sur le chronogramme suivant (cf. **Figure 6**) :

- T_a : durée d'interrogation du CAN par le microcontrôleur;
- T_c : durée de conversion du CAN pour 8 voies;
- T_r : durée des traitements périodiques des données;
- T_d : durée des traitements différés;
- T_e : période d'échantillonnage;
- T_l : durée libre pour les tâches de fond;

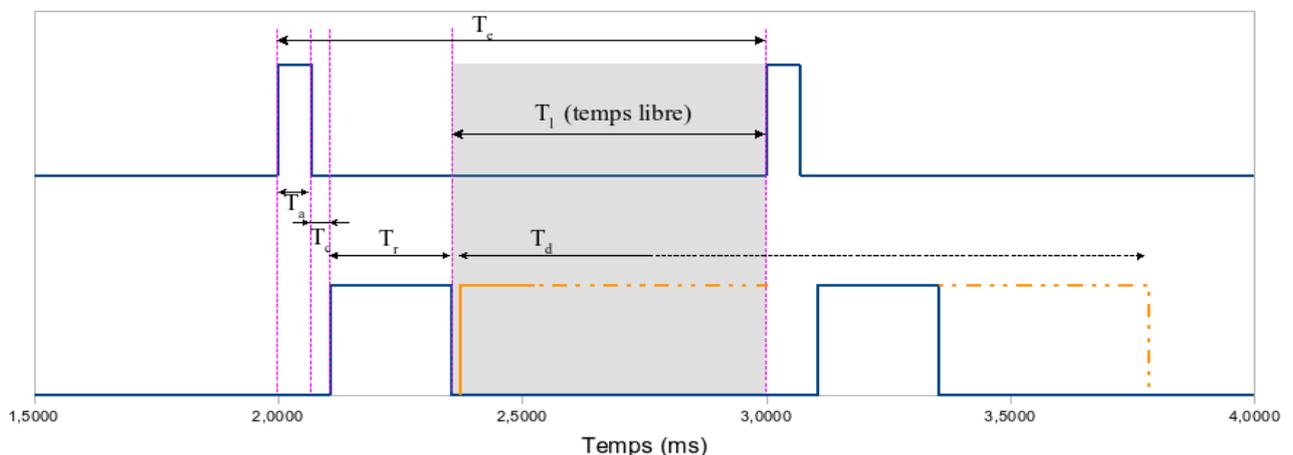


Figure 6 : Chronogramme des tâches d'acquisition

Les temps T_a et T_c dépendent directement de l'électronique (interrogation du CAN, liaison QSPI). Le temps de traitement périodique, T_r , comprend au minimum le stockage de la donnée dans une mémoire temporaire (*buffer*). C'est aussi pendant ce temps que l'on effectue les traitements au fil de l'eau, tels que les algorithmes de segmentation sismique. Le temps restant, T_l , est utilisé par le microcontrôleur pour effectuer les tâches de routine comme par exemple l'enregistrement d'un paquet de données sur l'unité de stockage. La durée des tâches de routine, T_d , peut être supérieure au temps libre entre deux acquisitions successives, T_l . Les tâches seront alors exécutées par étapes.

L'optimisation du système d'acquisition réside donc dans la détermination du meilleur compromis entre deux conditions :

- d'une part, la période d'échantillonnage doit être supérieure aux temps d'acquisition afin que les tâches différées puissent se réaliser :

$$T_e \gg T_a + T_c + T_r \quad (2.5)$$

- d'autre part, le *buffer* de données doit avoir une taille suffisante pour absorber le retard pris pendant l'exécution des longues tâches différées (T_d) :

$$T_d < N \cdot T_i \quad (2.6) \quad \text{avec } N \text{ le nombre d'échantillon}$$

Pour satisfaire ces conditions, la taille du *buffer* de données doit pouvoir contenir un nombre d'échantillons tel que :

$$N > \frac{T_d}{(T_e - T_a + T_c - T_r)} \quad (2.7)$$

L'optimisation de la taille du *buffer* est d'autant plus importante qu'elle correspond à la quantité de données stockées dans la mémoire volatile de la station, ce qui signifie qu'en cas d'arrêt brutal de la station cette quantité de données est perdue.

Une des principales caractéristiques du module numérique est de pouvoir régler sa vitesse de travail (*fréquence d'horloge du CPU*) permettant ainsi d'adapter les performances de calcul à la consommation du module. Par expérimentation, on montre que le réglage de la fréquence d'horloge du CPU sera conditionné par la fréquence d'échantillonnage (*ou temps d'acquisition*). Prenons le cas de l'opération de mise en mémoire des données après échantillonnage (*méthode de bufferisation des données*). Un premier algorithme, MFB, a été développé en utilisant uniquement des variables de programmation statique. Malheureusement, cet algorithme n'était pas assez rapide pour gérer une fréquence d'échantillonnage de 2000 Hz. Un nouvel algorithme, PP, a donc été développé et a permis de passer la barrière des 2000 Hz grâce à l'utilisation de registres mémoire de bas niveau.

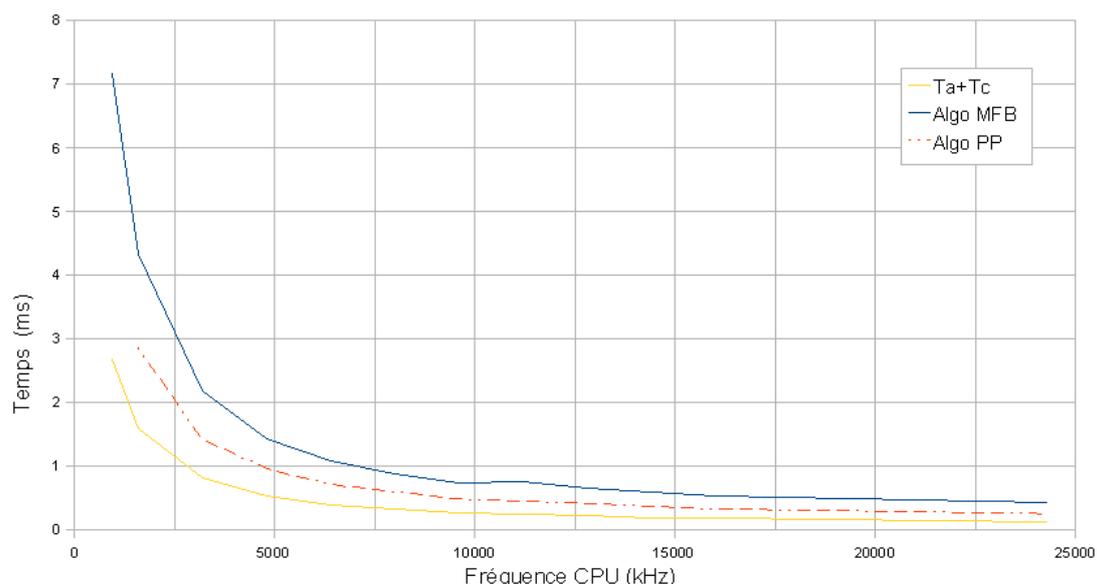


Figure 7 : Évolution des temps d'acquisition en fonction de la fréquence d'horloge du CPU

La figure précédente (cf. **Figure 7**) montre l'importance de la performance de l'algorithme de traitement des données. Par exemple, pour un échantillonnage à 1000 Hz ($t_{\text{emps}} = 1\text{ms}$), la fréquence minimum d'horloge du CPU sera de 5000 kHz en utilisant l'algorithme PP au lieu de 7500 kHz avec l'algorithme MFB. Par ailleurs, la courbe (T_a+T_c) représentée sur la figure précédente, fixe la limite du système d'acquisition. Grâce à l'optimisation de l'algorithme de traitement et à performance égale, la fréquence d'horloge du CPU peut être diminuée permettant ainsi de réduire la consommation électrique de la station.

1.3.2. Précision de l'horloge interne (RTC)

Le module numérique utilise un quartz à 40 kHz, dont la propriété est d'osciller à une fréquence stable lorsqu'il est stimulé électriquement. Il est relié au superviseur, le MSP430, qui fournit à son tour un signal pour la synchronisation de l'horloge du microcontrôleur MC68LK332. Une des caractéristiques du quartz réside dans sa tenue en température. Il est généralement dimensionné pour avoir une courbe de température parabolique centrée sur 25°C, de sorte que la fréquence varie peu autour de la température ambiante. Le quartz utilisé dans le module CF2 varie de ± 0.04 ppm/°C, avec une tolérance de ± 30 ppm à 25°C.

Une autre caractéristique du quartz provient du fait que sa fréquence de résonance effective peut être différente de la fréquence nominale et qu'elle peut très légèrement varier à long terme. La documentation du quartz utilisé donne une diminution pour la première année de l'ordre de ± 5 ppm max. La fréquence se stabilise ensuite pendant les années ultérieures.

La dérive de l'horloge interne a été évaluée en synchronisant le signal d'horloge avec le pulse d'un récepteur GPS dont la précision est de 1 ms. Nous avons ainsi enregistré à intervalles réguliers l'horloge du module numérique et l'horloge GPS à 1 ms près (cf. **Figure 8**). Après 12 jours, nous mesurons une dérive moyenne de l'ordre de 9.13 ppm (à température ambiante).

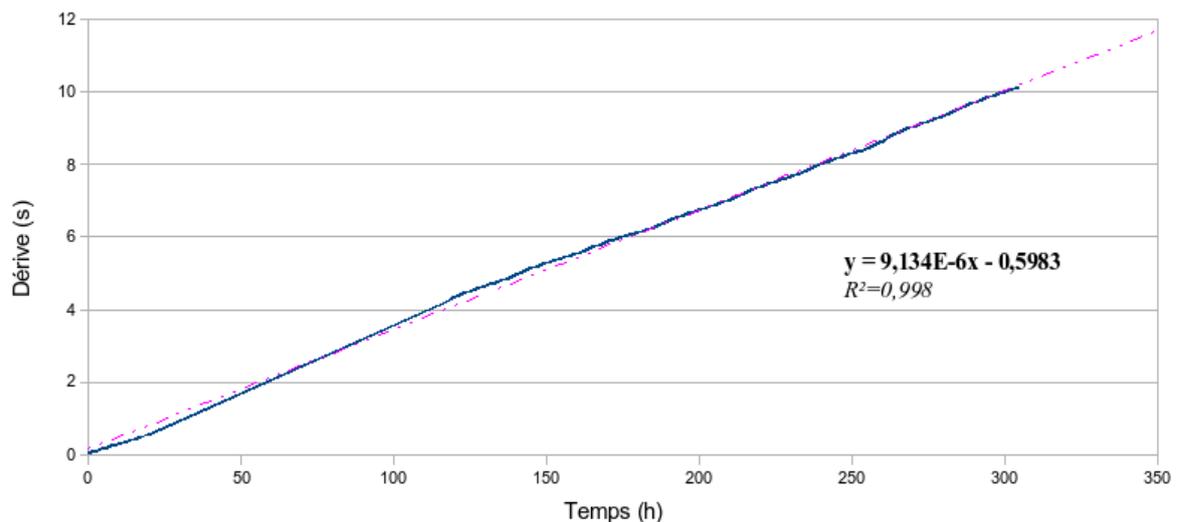


Figure 8 : Dérive de l'horloge interne du module numérique

En moyenne, le module numérique perd 1 seconde toutes les 30 heures. Par l'utilisation d'un module GPS en natif dans la station, il sera ainsi possible d'enregistrer cette dérive pour pouvoir la corriger par la suite. Il faut noter cependant que pour une application ne faisant intervenir qu'une seule station, cette dérive ne posera pas de problème.

Une solution permettant de diminuer la dérive de l'horloge interne, consiste à changer le quartz par un composant plus précis, à ± 1 ppm par exemple, et de type TCXO (*Temperature Controlled Crystal Oscillator*). La dérive serait alors réduite à 1 seconde tous les 6 jours.

1.3.3. Précision de la fréquence d'échantillonnage (PIT)

Les tests effectués sur le module de la génération précédente (modèle CF1 équipé d'un CPU MC68CK338) ont montré que la réduction de la fréquence du CPU augmentait l'imprécision de la fréquence d'échantillonnage [Idelon, 2001]. Pour obtenir une précision supérieure à 2% sur la fréquence d'échantillonnage, l'expérimentation a mis en évidence qu'il fallait choisir un ratio, tel que : $F_{CPU} / F_{ech} > 40000$

Pour le modèle CF2, les résultats sont bien meilleurs. L'expérimentation montre que la fréquence d'échantillonnage est précise à 0.01%.

Pour ce faire, nous avons effectué une série de mesures en laboratoire sur un pont de résistances de 100 Ohms câblées sur les 8 entrées de la carte. Nous avons fait varier la fréquence d'échantillonnage (gamme : 100 Hz, 200 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz) et la fréquence d'horloge CPU (gamme : 1600 kHz, 3200 kHz, 4800 kHz, 6400 kHz, 11200 kHz, 16000 kHz). Les résultats obtenus sont représentés sur la figure suivante (cf. **Figure 9**).

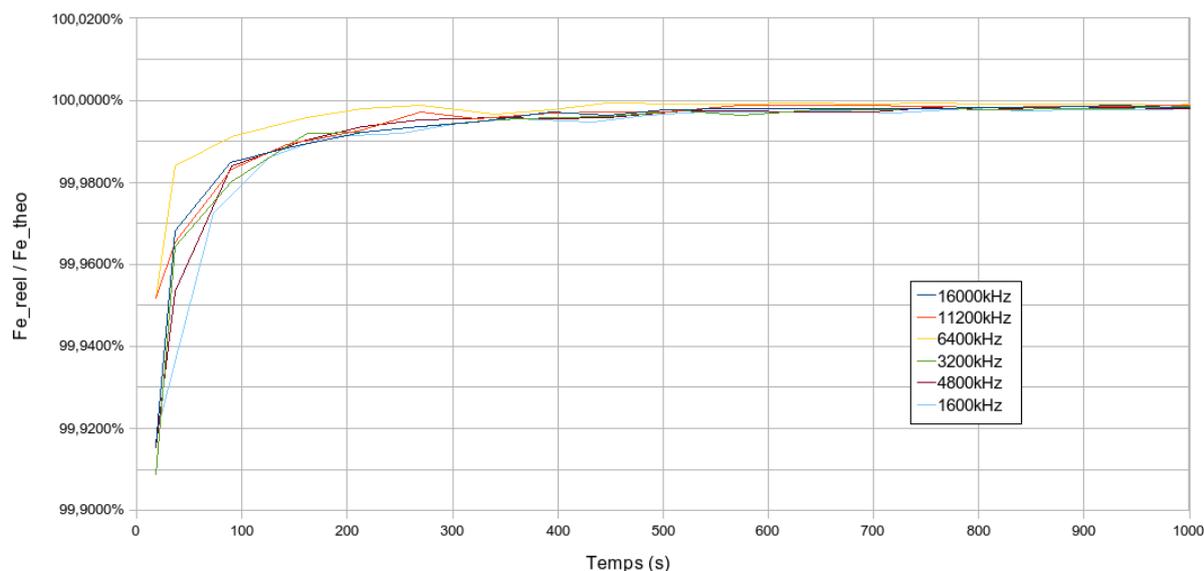


Figure 9 : Précision de la fréquence d'échantillonnage en fonction du temps, pour différentes valeurs de la fréquence d'horloge

Tout d'abord, on remarque que la précision de la fréquence d'échantillonnage s'améliore dans le temps. On obtient 100 ppm de précision au bout d'environ 100 s, 10 ppm au bout d'environ 10 à 15 min, et 1 ppm au bout d'environ 1 heure (pour $F_{CPU} > 10$ MHz).

D'autre part, on constate que la précision sur la fréquence d'échantillonnage ne dépend pas de la fréquence d'horloge du CPU, ce qui n'ajoute pas de contraintes au réglage de la fréquence CPU pour réduire la consommation de la station.

1.3.4. Consommation

Une des principales caractéristiques du module CF2, ayant orienté notre choix sur ce type d'architecture, est son mode basse consommation évolué. Pour réduire la consommation du module numérique, nous avons plusieurs possibilités.

La première opération consiste à éteindre tous les périphériques autour du CPU qui consomment et qui ne sont pas utilisés. C'est le cas de la liaison série (MAX3222), des I/O (TPU), du générateur d'interruption périodique (PIT), du bus QSPI, etc. Ces opérations sont effectuées dans la procédure d'initialisation de la station.

Le mode le plus économique est lorsque le CPU MC68LK332 n'a pas de traitement à faire. Il se met en veille automatiquement. C'est le superviseur MSP430 qui se charge alors de gérer les interruptions et de réveiller le CPU. Dans ce cas, l'énergie nécessaire au module CF2 est limitée à la seule consommation du MSP430 qui correspond à moins de 10 μ A et fonctionne grâce à une pile lithium dédiée. Ce fonctionnement est particulièrement bien adapté au mode de mesure lent.

Une autre façon d'économiser de l'énergie consiste à réduire la fréquence d'horloge du CPU. En effet, de par la technologie CMOS du circuit intégré, la consommation du processeur varie pratiquement linéairement avec sa vitesse de fonctionnement (cf. **Figure 10**).

Afin d'évaluer la consommation globale de notre chaîne de mesure, nous avons effectué plusieurs séries de mesure de l'alimentation de la station en fonctionnement. Pour ce faire, nous avons connecté aux entrées de la station une charge constante (résistance de 100 Ohms) et échantillonné le signal à une fréquence de 100 Hz.

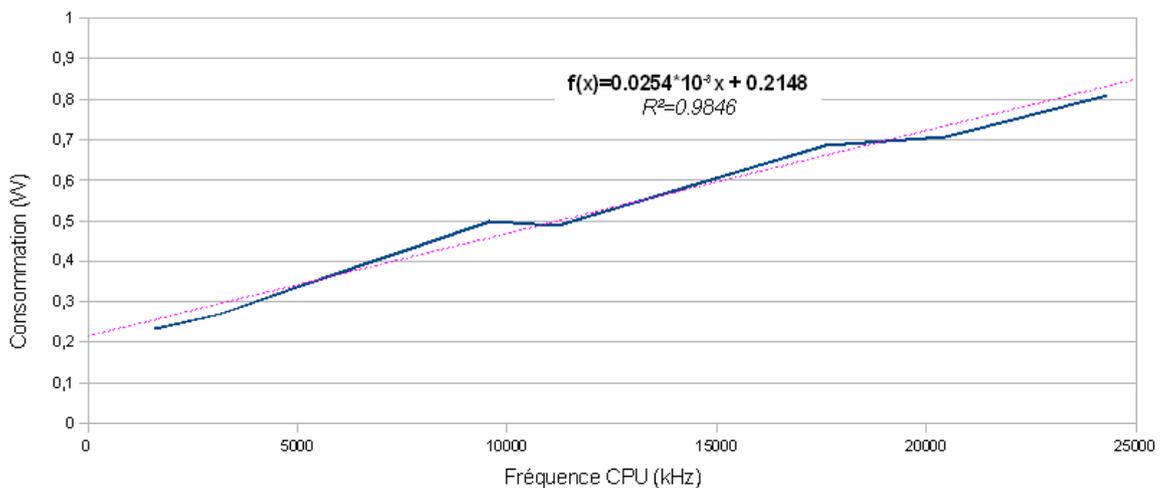


Figure 10 : Consommation du module numérique en fonction de la fréquence d'horloge du microcontrôleur

On observe que la consommation croît linéairement en fonction de la fréquence d'horloge du CPU à un rythme approximatif de 0.1 Watt par palier de 4000 kHz.

1.3.5. Fonction de transfert de la chaîne de mesure sismique

Une des caractéristiques de la chaîne de mesure est constituée par sa bande passante, qui définit l'ensemble des fréquences qu'elle est capable de traiter. Il est donc important de connaître la fonction de transfert de notre chaîne de mesure afin d'éviter tout risque de perte d'information par le traitement du mesurande.

Au moyen d'un générateur de fonctions à fréquence variable, nous avons calculé la fonction de transfert en gain de la chaîne de mesure sismique (station sismique) en mesurant le rapport entre le signal en sortie de notre station et le signal généré par le générateur (sinusoïde 20 mV crête). L'acquisition est réglée avec un échantillonnage à 1000 Hz et une fréquence de coupure (filtre anti-repliement) à 500 Hz (cf. **Figure 11**).

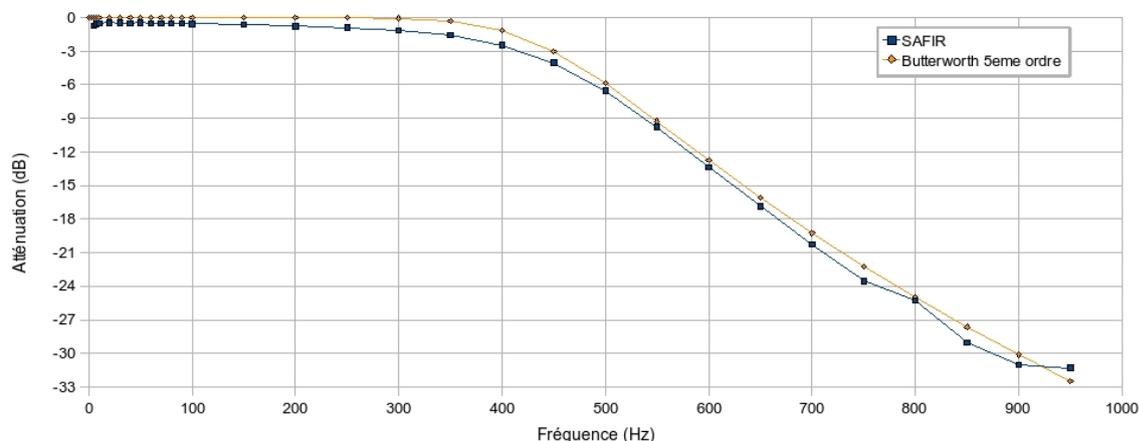


Figure 11 : Fonction de transfert de la chaîne de mesure sismique

Par cette expérience, nous vérifions que la fonction de transfert de notre chaîne de mesure correspond bien à la fonction de transfert du filtre anti-repliement de l'interface de conditionnement analogique (filtre passe-bas de Butterworth d'ordre 5). La fonction de transfert de SAFIR n'est pas représentée pour les fréquences inférieures à 5 Hz car un artefact du banc de calibration ne nous a pas permis de la déterminer. En effet, nous utilisons pour cette expérience un transformateur pour isoler la chaîne de mesure du générateur. Or la caractéristique de l'isolant galvanique utilisé indique une fréquence de coupure de 60 Hz pour 2 mW, filtrant ainsi les basses fréquences du signal fourni par le générateur.

1.3.6. Enregistrement des données et gestion des unités de stockage

Le module numérique CF2 comporte une unité de stockage intégrée sur CompactFlash, et une unité de stockage externe sur disque dur 2"½, reliée au module par l'intermédiaire d'une carte d'extension.

A la suite de l'acquisition, les données numériques, sont disponibles dans le registre du microcontrôleur MC68LK332 jusqu'à la prochaine acquisition. Elles sont copiées temporairement dans la mémoire flash du module numérique. Cette zone mémoire est organisée afin de faciliter le traitement et l'enregistrement sur une unité de stockage non volatile.

En travaillant à des fréquences d'échantillonnage élevées, il nous est rapidement apparu que l'on ne pouvait pas enregistrer les données acquises au coup par coup. Nous nous sommes donc orientés vers un mode de mémorisation par paquets. Néanmoins, l'utilisation d'une seule zone de stockage a posé des problèmes de performance. En effet, lorsque le paquet est rempli, il faut un certain temps pour le copier sur l'unité de stockage. Or il est nécessaire que l'opération s'effectue entre deux acquisitions successives afin de ne pas créer de conflit d'accès au paquet, par la tâche d'enregistrement d'une part et par la nouvelle tâche d'acquisition d'autre part.

Pour contourner cette difficulté, nous avons donc développé un mode de mémorisation à deux zones, appelé « *ping-pong* ». La zone de stockage est divisée en deux. Pendant que la tâche d'acquisition range les données dans l'une des deux zones, l'autre peut être utilisée par le programme principal pour le traitement et l'enregistrement sur l'unité de stockage (cf. **Figure 12**).

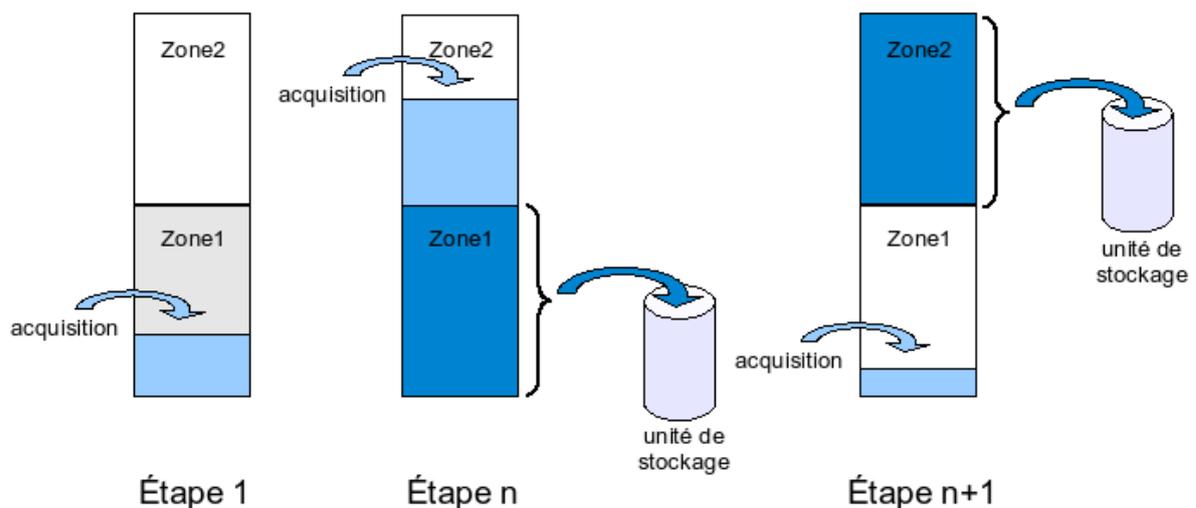


Figure 12 : Mode de mémorisation « ping-pong »

L'opération d'enregistrement des données, que ce soit sur la CompactFlash ou sur le disque dur, nécessite un certain temps que l'on peut convertir en nombre de cycles d'horloge du CPU. En augmentant la fréquence d'horloge du CPU, on réduit la durée d'enregistrement jusqu'à une limite qui dépend d'une part de la vitesse de transfert des données sur le bus de données mais surtout du temps d'accès au périphérique de stockage.

L'optimisation de l'opération d'enregistrement consiste à définir la taille du paquet de données pour qu'il puisse être copié sur l'unité de stockage avant que les deux zones de mémoire permutent. Pour cela, nous avons observé le temps d'inactivité du microcontrôleur en fonction de la taille du buffer de données à copier (cf. **Figure 13**). On remarque ainsi qu'une petite taille de buffer requiert beaucoup plus de temps CPU, ce qui risque de pénaliser les autres tâches de calcul. Nous avons donc choisi une taille de buffer d'environ 10000 échantillons qui correspond à 10 secondes d'enregistrement pour un échantillonnage à 1000 Hz.

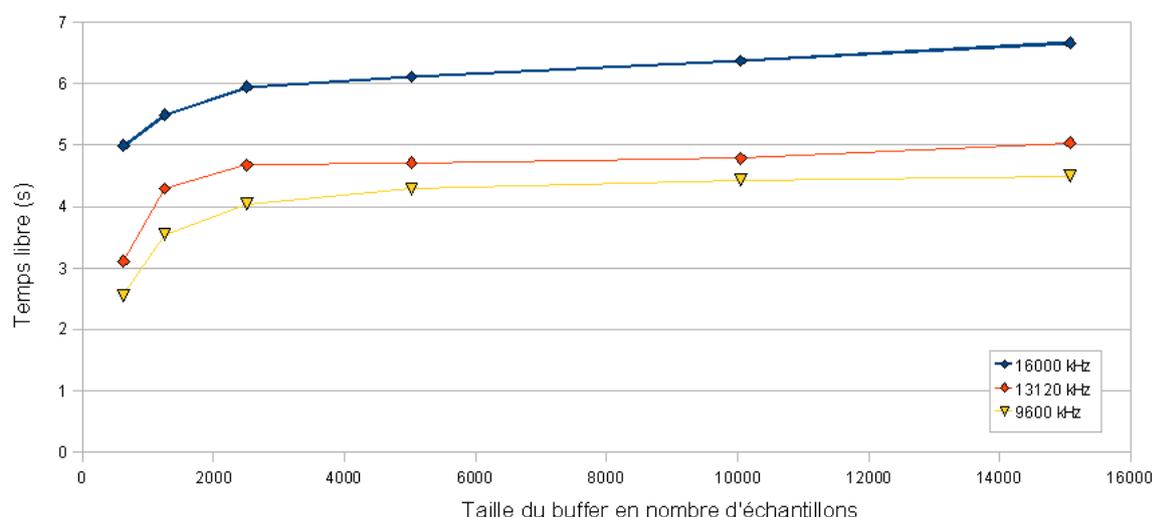


Figure 13 : Temps d'inactivité du microcontrôleur en fonction de la taille du buffer de données pour une acquisition de 15 secondes

Notons cependant que la vitesse d'écriture sur la CompactFlash dépend aussi de la taille du fichier de données (positionnement du pointeur de fichier à l'emplacement d'écriture) et du nombre de fichiers contenus sur la carte (temps d'adressage).

Structure et format de données

Les supports de stockage des données ont évolué rapidement ces dernières années et demeurent en constante évolution. Face au développement croissant des unités de masse de grandes capacités et à haut débit, le stockage des données constitue de moins en moins une limite de performance pour le système.

Notre station utilise deux types de stockage :

- la CompactFlash, pour la sauvegarde des données lentes, des événements sismiques par détection et la journalisation du fonctionnement de la station ;
- le disque dur, pour l'enregistrement continu des données à haute fréquence.

La seule limite au stockage est constituée par le système de fichier. En 2003, le module numérique ne connaissait que le système de fichier FAT16, limitant la capacité de stockage à une taille maximum de 2 Go avec une taille de cluster de 32768 octets. Une autre limitation importante est le nombre maximal de fichiers sur le disque : 65524, avec seulement 512 fichiers/dossiers possibles sous la racine. Cette architecture bien que suffisante pour l'enregistrement des données lentes, est vite devenue insuffisante pour l'enregistrement sismique.

En effet, le problème s'est rapidement présenté lorsque nous avons souhaité enregistrer en continu les données à haute fréquence et pendant de longues périodes. Les limitations du système de fichier FAT16 ne nous permettaient pas d'exploiter des disques de grande capacité (taille > 2 Go). Nous avons donc exploré plusieurs solutions dont l'implémentation du système de fichier FAT32. Ce système de fichier utilise des adresses sur 28 bits, ce qui permet d'allouer des espaces disques de grandes capacités (jusqu'à 2 téraoctets). Il en résulte une plus grande complexité de gestion, c'est-à-dire un code plus important en mémoire et une exécution plus lourde. L'implémentation du système de fichier FAT32 ne nous a pas paru adaptée à notre application. En effet, ce système de fichier, bien que présentant l'avantage de pouvoir être reconnu par la majorité des ordinateurs, présentait plusieurs inconvénients, dont notamment :

- la difficulté voire l'impossibilité de restaurer les fichiers de manière convenable si certains secteurs du disque sont défectueux, en raison, par exemple, de l'arrêt brutal de la station pendant l'écriture ;
- le ralentissement de la vitesse d'écriture sur le disque dû à la lourde gestion des adresses ;
- le formatage avant utilisation.

Compte tenu de ces inconvénients, nous avons choisi de créer notre propre système de fichier pour l'exploitation de disques de grande capacité. Notre système de fichier offre ainsi l'avantage d'être simple, souple et mieux adapté à un fonctionnement embarqué (*minimisation de l'endommagement des données en cas de défaillance technique de la station et adressage rapide*). Sur la base du transport réseau TCP/IP, les données sont encapsulées dans des trames indexées dont l'ensemble compose une session. Chaque trame contient un identifiant unique et un indice qui va permettre de recomposer les fichiers de données. Le premier secteur du disque contient la table de description des sessions (DDT) et constitue le cœur du système de fichier (cf. **Figure 14**).

Cette architecture va nous permettre de stocker 2 mois et demi de données (*enregistrement continu sur 8 voies à 1000 Hz*) sur un disque dur de 120 Go.

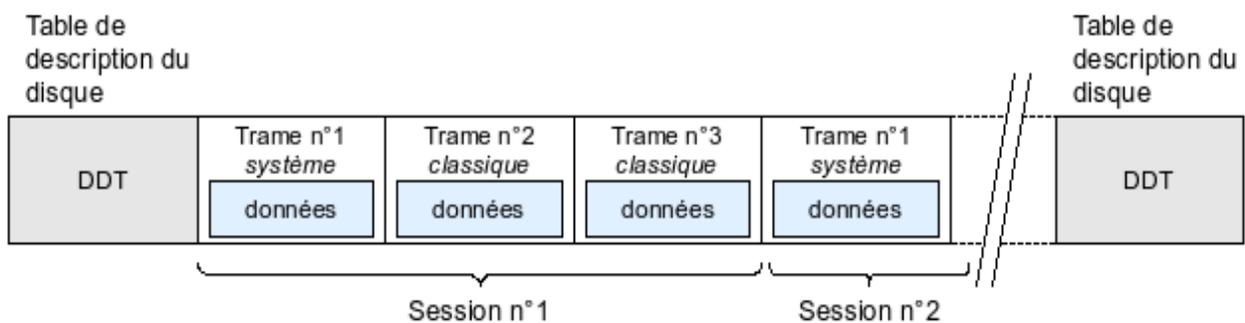


Figure 14 : Structure du système de fichier pour unité de stockage de grande capacité [Faure, 2004]

Les données peuvent être de différents types : mesures lentes, mesures rapides, texte en ascii. Devant l'origine variée de nos données, nous avons élaboré un format de fichier, le format 8S2, dont la structure s'adapte en fonction du type de données transportées. La caractéristique principale du format 8S2 est qu'il contient l'information brute telle qu'elle a été délivrée par le système de mesure. L'entête du fichier comporte ainsi tous les paramètres de configuration permettant de convertir la donnée brute en sa mesure physique correspondante. Ce choix dépend principalement de l'optimisation du système embarqué afin de limiter au maximum le travail de conversion de données par la station de mesure. C'est pourquoi chaque mesure, sous la forme de son mot binaire équivalent, est directement enregistrée au format Big Endian, utilisé par les architectures Motorola. Les mesures sont converties ultérieurement par le serveur au format Little Endian, utilisé par les architectures Intel.

1.3.7. Perturbations et mesures de bruit

Les perturbations sur la mesure peuvent avoir des origines très différentes. Elles peuvent être liées à l'environnement, à l'activité humaine, aux réseaux électriques et hertziens, mais aussi provenir de l'équipement lui-même. Toute la chaîne de mesure va ainsi être sensible aux tensions ou courants parasites qui vont se superposer au signal utile.

Réduction des erreurs de mesure

Malgré toute la rigueur que nous avons pu apporter à la conception de notre station, la mesure reste vulnérable aux perturbations dues aux mauvaises installations des équipements, à leur vieillissement, ou à l'inadéquation des composants aux conditions de terrain. Pour faire face à ce problème, nous avons donc implémenté un algorithme de réduction des erreurs de mesure basé sur le sur-échantillonnage et le calcul de moyenne. En effet, on montre qu'en moyennant un nombre n d'échantillons successifs affectés d'un bruit aléatoire gaussien, on peut réduire le bruit d'un facteur $1/\sqrt{n}$.

Cette procédure de correction est bien adaptée pour la mesure des paramètres lents, c'est-à-dire dont l'échantillonnage est inférieur à 1 Hz : on peut ainsi les sur-échantillonner en les enregistrant comme des paramètres rapides (par exemple 1000 Hz) et les moyenner (par exemple sur 1 seconde), ce qui permet une réduction du bruit (d'un facteur 30).

Dans le cas de l'acquisition sismique, la mesure corrigée est moins nécessaire dans le sens où le traitement de ces données ne se base pas sur une seule valeur mais sur un ensemble de valeurs (cf. méthode de segmentation du signal STA/LTA).

Mesure du rapport signal à bruit de la station

Nous avons cherché dans un premier temps à évaluer le bruit numérique lié à l'opération d'échantillonnage. Pour ce faire, nous avons court-circuité chaque entrée analogique de notre station au moyen d'une résistance de manière à fixer l'impédance d'entrée de la chaîne de mesure. Afin de limiter la mesure au bruit de numérisation, la carte de conditionnement analogique a été déconnectée. Les variations de mesures reflètent ainsi le bruit interne à la chaîne de mesure. L'expérience menée sur 1000 acquisitions échantillonnées à une fréquence de 1000 Hz à partir du convertisseur ADS8344 (16 bits), montre une incertitude de mesure moyenne de ± 2 points sur le mot binaire N obtenu, soit un écart type de 0,25 à 0,85 en moyenne. La figure suivante (cf. **Figure 15**) représente la distribution des valeurs numériques N obtenues pour chacune des voies de la station. Cette expérience nous permet de déduire que le nombre de bits efficaces du convertisseur ADS8344 vaut 14 bits.

On peut ensuite exprimer le rapport signal à bruit en fonction du nombre de bits efficaces du convertisseur par la formule simplifiée suivante (cf. **Annexe B-3**) :

$$SNR(dB) = 6,02 N + 1,76 \quad (2.8)$$

Le rapport signal à bruit pour le convertisseur ADS8344 vaut alors 88 dB.

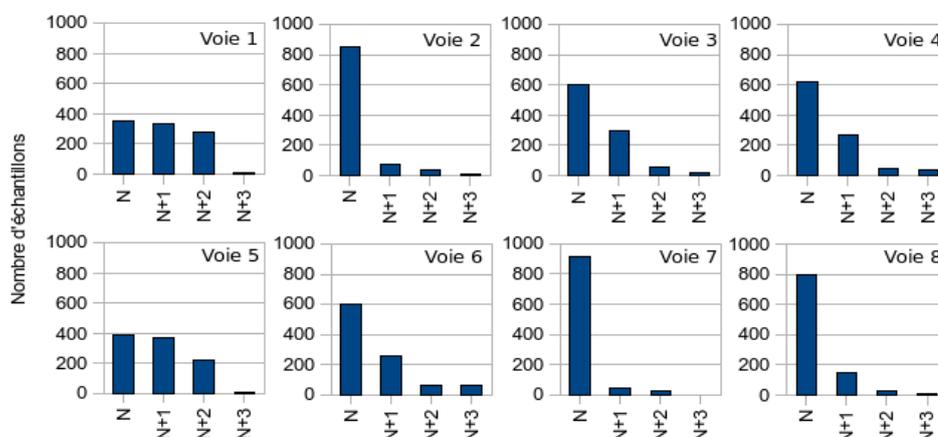


Figure 15 : Distribution des valeurs numériques obtenues sur les 8 voies de mesure de l'ADS8344 pour 1000 acquisitions

Mesure de l'inter-corrélation entre les voies d'acquisition

Nous avons ensuite cherché à évaluer les perturbations générées par un signal analogique enregistré sur une voie vers les autres voies de mesure. Pour réaliser cette expérience, nous avons injecté un signal synthétique sur la voie n°1 de notre station sismique et nous avons calculé l'inter-corrélation avec la voie n°2 sur laquelle il a été branché une simple résistance de 380 ohms simulant l'impédance d'un capteur sismique. Le signal source se compose d'une sinusoïde d'amplitude crête 100 mV et de fréquence 100 Hz. Le pas d'échantillonnage a été fixé à 1000 Hz. Le spectre d'amplitude obtenu (cf. **Figure 16**) indique clairement un pic de fréquence à 100 Hz pour les deux voies. Par contre, l'amplitude de la voie 2 est environ 13 décades en dessous du signal synthétique enregistré sur la voie 1. A partir du coefficient de corrélation calculé entre les voies 1 et 2 (égal à 0,8172), on peut estimer l'indice de couplage par l'équation de [Bormann, 2002] :

$$20 \times \log (0,8172) = -186 \text{ dB} \quad (2.9)$$

Ce résultat montre ainsi une bonne séparation entre les différentes voies d'entrée de la station.

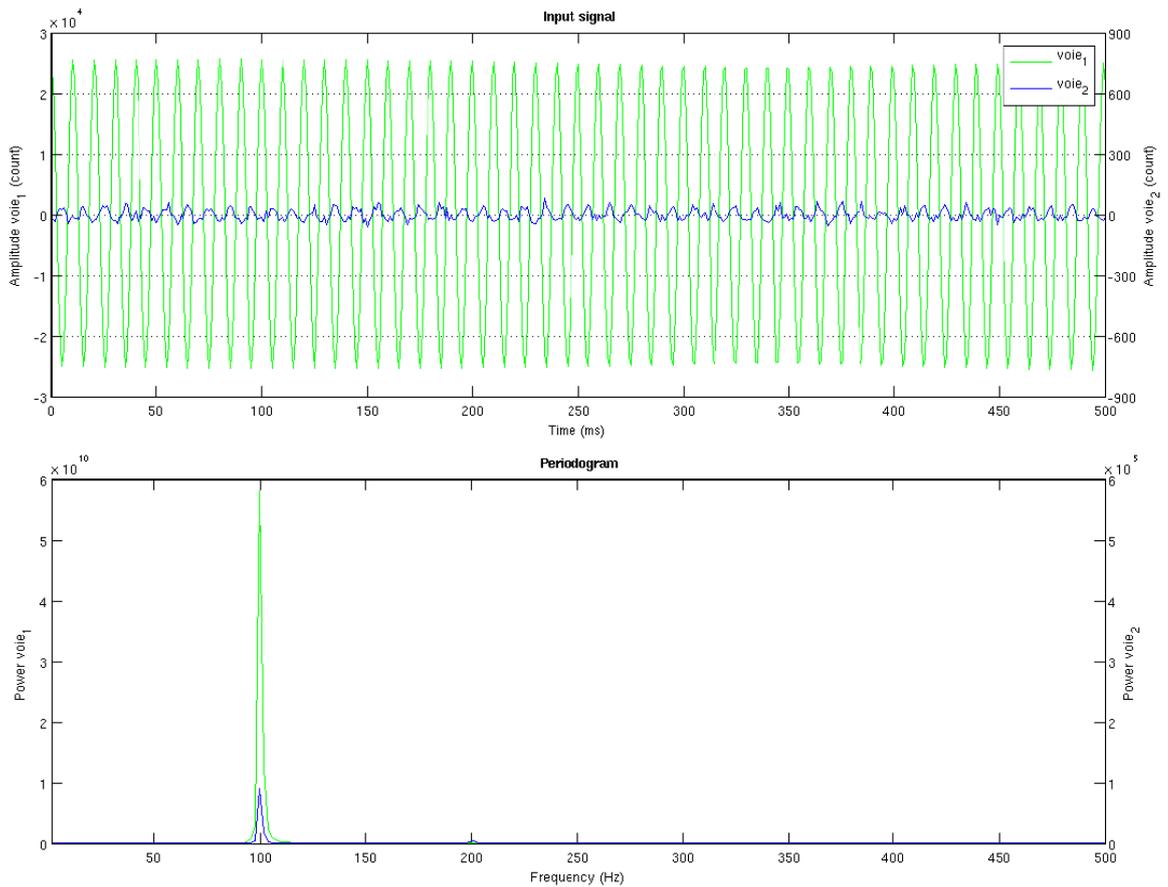


Figure 16 : Signal (en haut) et spectre associé (en bas) enregistrés sur les voies 1 & 2 de la station d'acquisition ;
 en vert, signal enregistré sur la voie (voie₁) connectée au générateur de signaux (Signal de 100 mV d'amplitude et de fréquence 100 Hz) ;
 en bleu, signal enregistré sur la voie (voie₂) non connectée au générateur

Perturbations par l'unité de stockage externe : le disque dur

Lors de nos expérimentations d'écoute micro-sismique, nous avons pu observer un type de parasites provenant de notre propre équipement. Ces perturbations sont apparues lors de l'utilisation des disques durs pour enregistrer le signal en continu et à haute fréquence. Le parasite provoquait un décalage sur le signal au moment où les données étaient écrites sur le disque. En effet, lorsque le disque se met en fonctionnement, il produit un appel en courant sur le circuit d'alimentation qui perturbe la tension de référence du circuit de mesure, produisant ainsi un signal se superposant au signal utile comme le montre la figure suivante (cf. **Figure 17**).

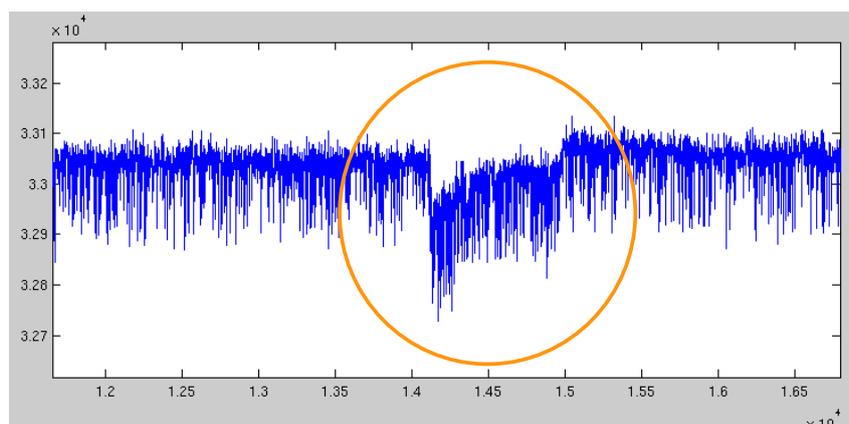


Figure 17 : Perturbation générée par l'enregistrement sur le disque dur

Pour résoudre ce problème, nous avons dû intégrer un circuit d'alimentation spécifique au disque dur afin de l'isoler totalement du circuit de référence de la mesure. Le choix des composants n'a pas été simple car en fonction du type de régulateur DC utilisé, les tests laissaient apparaître une surconsommation non négligeable du dispositif (au moins 40mA de plus) avec parfois même la persistance du signal parasite. L'isolation du circuit d'alimentation du disque dur a permis de supprimer totalement cette perturbation.

Perturbations par le dispositif d'alimentation solaire

Suite aux expérimentations menées sur l'instabilité rocheuse de Chamousset, nous avons relevé un autre type de perturbations, plus difficilement identifiable que celles générées par le disque dur, car elles n'apparaissent pas aussi nettement sur le signal. Il s'agissait en fait de perturbations liées au circuit de recharge de l'alimentation de la station par panneau solaire. Nous avons pu les mettre en évidence suite à de nombreuses expérimentations tests effectuées en montagne dans des conditions semblables à celles de l'auscultation de Chamousset, en modifiant pour chaque expérimentation un seul composant du dispositif d'alimentation. La figure suivante (cf. **Figure 18**) présente deux spectrogrammes réalisés à partir d'un enregistrement à 1000 Hz effectué avec notre station, en court-circuitant une voie de mesure avec une résistance de 380 Ohms afin de limiter la mesure au bruit électronique de la station. Pour le premier spectrogramme, l'enregistrement comprend 32 heures d'acquisition continue et a été réalisé avec un dispositif d'alimentation ne comprenant qu'une seule batterie. Le deuxième spectrogramme est constitué d'un enregistrement de 72 heures, pour lequel le dispositif d'alimentation par batterie a été complété par un circuit de recharge par panneau solaire. Il apparaît nettement des perturbations au moment du fonctionnement du régulateur solaire, perturbations que l'on retrouve à la fois à haute fréquence mais aussi à basse fréquence (entre 1 et 5 Hz).

Cette expérience nous montre que la qualité de la mesure s'étend jusqu'au choix approprié des composants du circuit d'alimentation de l'instrumentation.

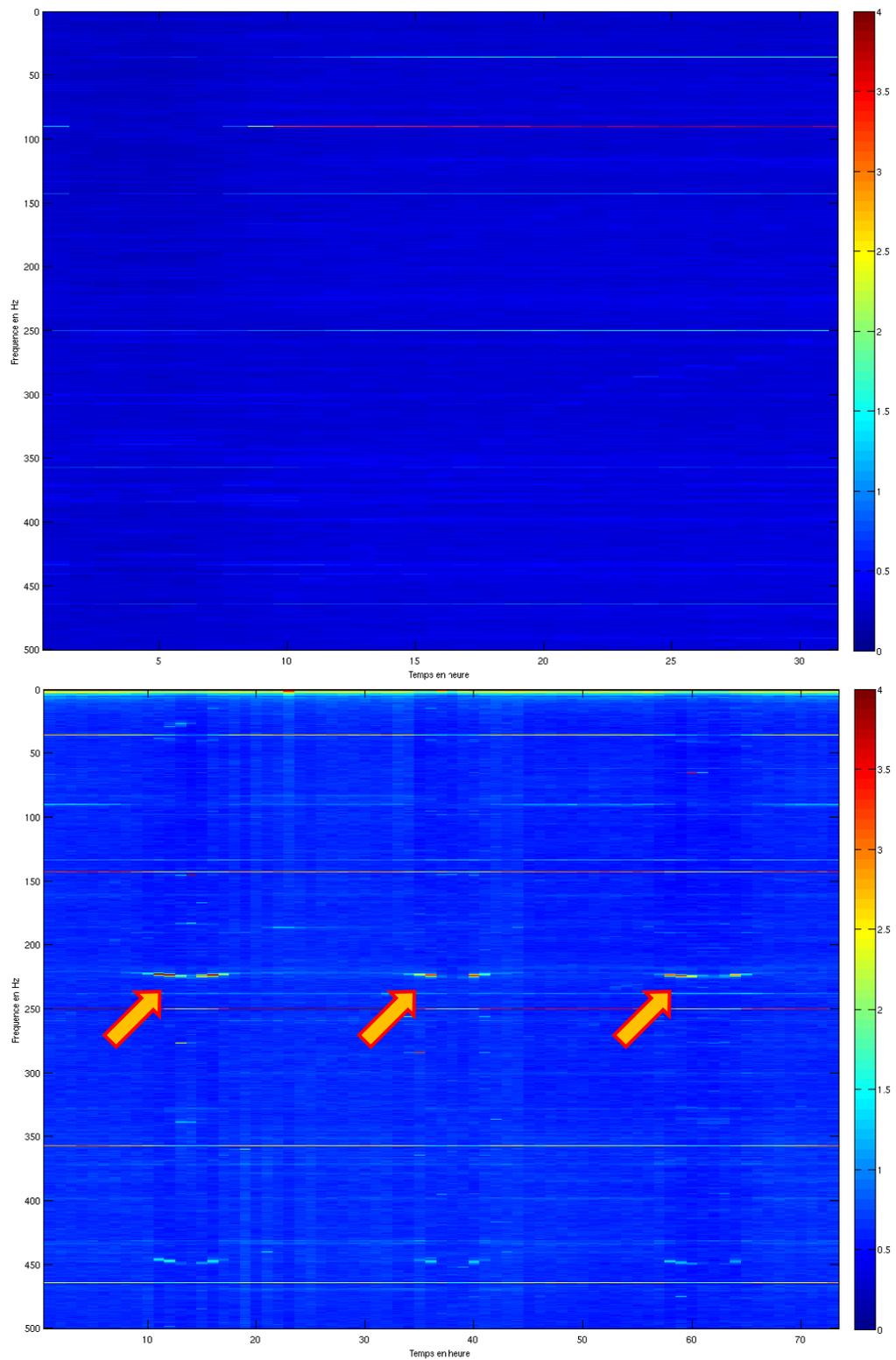


Figure 18 : Perturbation générée par le régulateur du dispositif d'alimentation solaire ;
 en haut, spectrogramme du bruit électronique de la station sur batterie seule ;
 en bas, spectrogramme du bruit électronique de la station avec batterie et panneau solaire

2. Développement d'une instrumentation GNSS de précision

Cette partie traite du développement d'une instrumentation GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de précision en vue de son application dans le suivi de la déformation des mouvements de terrain. Ce sujet n'est pas récent et l'interruption de la dégradation du signal GPS en mai 2000 par l'armée américaine a permis à cette technique d'élargir ses champs d'application. Très vite expérimentée pour la mesure des déformations des mouvements de terrain, cette technique reste néanmoins peu utilisée dans la surveillance opérationnelle, au moins en France. Le frein à ce développement est le coût élevé du point de mesure par rapport à la précision obtenue. C'est pourquoi la plupart des expérimentations de terrain sont effectuées de manière temporaire par la réalisation de campagnes de mesures. Néanmoins, les résultats encourageants obtenus aussi bien sur le site de Séchilienne [Duranthon, 2000] que sur les glissements de terrain de Super-Sauze [Malet et al, 2002] et de La Clapière [Pambrun, 2008, séminaire LGIT] montrent que l'on peut mesurer des déplacements avec une précision de 2 mm avec des récepteurs bi-fréquence et des sessions d'au moins 60 minutes. L'objectif de notre développement consiste à vérifier la précision que l'on peut obtenir avec un réseau de récepteurs mono-fréquence bon marché sur de courtes lignes de base (<15 km). Nous montrerons ensuite l'influence de la durée des sessions sur cette précision. Nous verrons ainsi qu'une précision de 2 mm peut être obtenue au détriment d'une durée de session plus longue.

2.1. Le positionnement par satellite

Le terme GNSS (*concept européen*) représente l'ensemble de tous les systèmes de navigation par satellite en intégrant les notions de sécurité qui font défaut aux systèmes actuels (intégrité, disponibilité, précision). Il englobe ainsi les systèmes GPS (1996), GLONASS (1997) et Galiléo (prévu pour 2008). A ce jour, le système Galiléo n'étant pas encore opérationnel, l'instrumentation que nous avons développée s'articule donc autour du système GPS.

Le système GPS (*Global Positioning System*), appelé aussi NAVSTAR (*NAVigation System by Timing And Ranging*) est un système américain de positionnement par satellites. Ses applications sont tellement nombreuses et en constant accroissement que ce terme intègre aujourd'hui notre vocabulaire courant. Le GPS de navigation constitue l'application la plus répandue. On l'utilise, dans ce cas, dans son mode naturel (absolu) et en temps réel. Le positionnement absolu est calculé à partir du code C/A obtenu par au moins 4 satellites. L'interruption en mai 2000 de la dégradation du SA (*Selective Availability*) par l'armée américaine, a permis d'améliorer considérablement la précision pour l'utilisation civile (la précision est passée de 20 m à environ 5 m).

Le signal GPS généré par les satellites est basé sur une fréquence fondamentale (10,23 MHz) dont la stabilité est assurée par des horloges (oscillateurs) atomiques embarquées d'une très grande fiabilité (horloges césium et rubidium). A partir de cette fréquence, le satellite génère deux ondes (L1 et L2) modulées par des codes pseudo-aléatoires (code C/A et code P). La modulation consiste à augmenter la phase de 180° lorsque le code change de parité (0 ↔ 1). La mesure de la pseudo-distance, c'est-à-dire sur le code C/A de L1 et (ou) le code P de L2, s'effectue à partir du calcul de la durée de propagation du signal entre le satellite et le récepteur.

Le principe consiste à générer une réplique du signal satellite (par le récepteur), et à le comparer au signal provenant du satellite. Après synchronisation des codes, le récepteur mesure le décalage en temps qui permet de déterminer la pseudo-distance en mètres entre le satellite et le récepteur. L'erreur de mesure est liée au décalage des horloges entre le récepteur et le satellite.

Un positionnement plus précis peut être atteint par les mesures de phase sur les ondes porteuses L1 et L2. Le principe est le même que précédemment. Le récepteur compare la phase du signal reçue avec la phase d'un signal généré qui est la réplique du signal du satellite. Néanmoins, la comparaison fournit seulement le déphasage car le nombre de cycles entre le satellite et le récepteur reste inconnu et ne peut pas être mesuré. Cette inconnue est appelé ambiguïté entière. Pour s'en affranchir, la méthode consiste à calculer le nombre de cycles reçus d'un satellite à partir de sa première mesure, et de continuer les mesures avec ce satellite sans interruption de signal. Une interruption de signal provoque un saut de cycle, c'est à dire une autre valeur pour l'ambiguïté entière qui entraînera une mesure aberrante si le saut n'est pas détecté et corrigé.

D'autres paramètres vont intervenir sur la précision du positionnement. On notera néanmoins que plusieurs de ces erreurs ne seront pas significatives sur la précision de mesure de courtes lignes de bases. On peut notamment citer :

- *la position des satellites*. Les messages de navigation radiodiffusés en temps réel contiennent seulement des orbites prédites (*ou ultra-rapides*). Elles ont une précision de l'ordre du mètre. Des orbites avec une précision centimétrique sont disponibles en temps différé librement sur Internet. Pour un positionnement relatif, on peut exprimer l'ordre de grandeur de l'erreur sur une ligne de base d'un kilomètre par le rapport entre l'erreur radiale d'orbite et la distance satellite-récepteur (environ 20000 km) [Duquenne, 2005]. On constate que l'erreur est très inférieure au millimètre, ce qui ne devrait pas affecter la mesure ;
- *les effets ionosphérique et troposphérique*. L'ionosphère (50 à 1000 km d'altitude) se comporte comme un milieu dispersif du fait de son ionisation par les radiations solaires. Elle aura pour effet d'allonger le temps de propagation des signaux GPS. L'erreur provoquée, qui peut atteindre 50 m sur la distance, peut être éliminée par la méthode de la double différence (cf. **Annexe B-6**). Par contre, pour réduire le retard du signal GPS dû à l'influence des particules d'eau dans la troposphère (5 à 20 km d'altitude), il est nécessaire d'adopter un modèle de correction qui prend en compte les paramètres météorologiques (*température, humidité, pression*). Néanmoins, pour de courtes lignes de base, on estime que l'erreur liée à ces effets s'annule par le calcul différentiel ;
- *les trajets multiples*. Ces effets, qui affectent plus particulièrement les mesures de pseudo-distances, peuvent être réduits par le choix judicieux du matériel et de l'endroit d'observation, par une durée d'observation longue et par l'examen des résidus au post-traitement ;
- la précision instrumentale du récepteur et du centre de phase de l'antenne ;
- le type de mesure ;
- la durée d'observation ;
- le type de traitement.

2.2. Conception d'une instrumentation GPS

L'intérêt de ce développement est de concevoir une instrumentation GPS à moindre coût, permettant de mesurer des déformations avec une précision sub-centimétrique en vue de l'utiliser pour l'auscultation des mouvements de terrain. L'instrumentation repose sur un réseau de récepteurs mono-fréquence bon marché, en mode statique et en traitement différé.

2.2.1. Architecture instrumentale

Profitant des avantages de notre système de mesure modulaire, le récepteur GPS a été intégré à la chaîne de mesure comme un nouveau module autonome et indépendant. Le module GPS est géré par le module numérique via une liaison série asynchrone et selon le protocole standard NMEA, permettant ainsi de le gérer de manière totalement indépendante du matériel utilisé.

Le module GPS se compose principalement d'un récepteur et d'une antenne, avec plus précisément :

- un récepteur GPS de type AC12 de Magellan :
la carte AC12 est un récepteur GPS mono-fréquence (L1) faible coût qui présente des caractéristiques intéressantes en terme de faible consommation (50-70 mA) et d'accès à la mesure brute sur le code et la phase (*Messages MCA, PBN, SNV*). L'AC12 comporte 12 canaux de mesure dont 10 pour les signaux GPS et 2 pour les signaux SBAS (EGNOS, WAAS, etc.). Le récepteur est disponible en version OEM ce qui nous a permis de l'intégrer directement dans notre circuit électronique ;
- une antenne réceptrice de type Aero Antenna Technology AT575-75 :
l'antenne GPS permet la réception des ondes de fréquence 1575 ± 5 MHz (L1) ainsi que celles du système Glonass. Le point d'arrivée de l'onde GPS dans l'antenne doit être connu avec précision : c'est le centre de phase. Malheureusement, ce point n'est pas fixe, à l'inverse du centre géométrique de l'antenne. Il dépend de l'angle d'incidence et de l'azimut du signal. La calibration de l'antenne étant une opération complexe et onéreuse, nous avons décidé de nous en affranchir en utilisant des antennes identiques, alignées dans la même direction, permettant ainsi d'éliminer cette inconnue par calcul différentiel. De plus, afin de limiter les erreurs dues aux multitrajets, l'antenne est équipée d'un plan absorbant (*Choke Ring*) ;

2.2.2. Fonctionnement de l'instrumentation

La carte AC12 ne possède pas de mémoire interne. Elle fournit les informations sur requête ou selon un pas de temps pré-programmé. Le module numérique de la station SAFIR gère l'échantillonnage des données AC12 et la transmission des données vers le dispositif distant. L'échange de données s'effectue selon le protocole standard NMEA par l'intermédiaire d'une liaison série asynchrone. La station enregistre les données sur une période de temps continu, appelée session. Les données ne sont transférées qu'à la fin de chaque session.

Outre les commandes de configuration et de positionnement standard, la récupération des données brutes s'effectue par l'intermédiaire des messages MCA, PBN et SNV :

- le message PBN fournit les données brutes de positionnement, l'horloge récepteur, la position de l'antenne, la vitesse de l'antenne, le décalage d'horloge du récepteur et le PDOP ;
- le message MCA n'est fourni qu'en cas de suivi (*tracking*) d'au moins un satellite. Le message contient les données Doppler, la pseudo-distance (*pseudorange*) brute, les informations sur le satellite suivi ;
- le message SNV contient les éphémérides pour chaque satellite suivi ainsi que les corrections d'horloge et harmonique.

A partir de ces messages, il est possible de créer des fichiers au format standard RINEX. Les données brutes sont tout d'abord enregistrées sans traitement sur la station et transmises à la fin de chaque session vers le dispositif de post-traitement distant. A partir de là, un script automatique exécute la conversion de ces fichiers au format RINEX. Enfin, les fichiers RINEX sont traités par le logiciel de post-traitement GAMIT/GLOBK (*Massachusetts Institute of Technology, MIT*).

2.3. Expérimentation pour de courtes lignes de base

2.3.1. Protocole de mesure

L'instrumentation mise en œuvre courant 2008 comporte deux stations GPS autonomes installées à une distance de 1230 m l'une de l'autre dans un endroit suffisamment dégagé pour limiter les multitrajets. Chaque station GPS est programmée pour acquérir le signal à une période de 30 s. Les données sont enregistrées par sessions de 6 heures à l'issue desquelles un calcul de ligne de base est effectué via le logiciel GAMIT.



Figure 19 : Instrumentation GPS : Station de référence sur le toit de Myotis (gauche) et station mobile sur le toit du LGIT (droite)

2.3.2. Traitements et résultats

Le traitement de la ligne de base a été effectué en utilisant le logiciel de post-traitement GAMIT (GPS Analysis MIT), dont le principe de calcul repose sur la résolution des équations d'observations par moindres carrés. L'architecture du logiciel, assez complexe, regroupe plusieurs modules de calcul. Avant la résolution sur les composantes de la ligne de base (module *solve*), les données subissent un certain nombre de traitements pour les préparer au calcul de la solution. Les différentes opérations sont décrites dans le diagramme ci-dessous (cf. **Figure 20**). Les observations sont d'abord corrigées des effets atmosphériques et naturels (i.e. marées, mouvement du pôle, etc.) par le module *model*. Puis le module *Autcln* permet de nettoyer les données des valeurs aberrantes, des multitrajets et des sauts de cycles. Une première solution est alors calculée par le module *solve* et réitérée jusqu'à ce que l'ajustement des composantes ne dépasse pas quelques centimètres (contraintes fixées a priori dans la configuration de GAMIT), que le RMS de double différence soit compris entre 0,6 et 0,8 et que le maximum d'ambiguïté soit fixé à un entier.

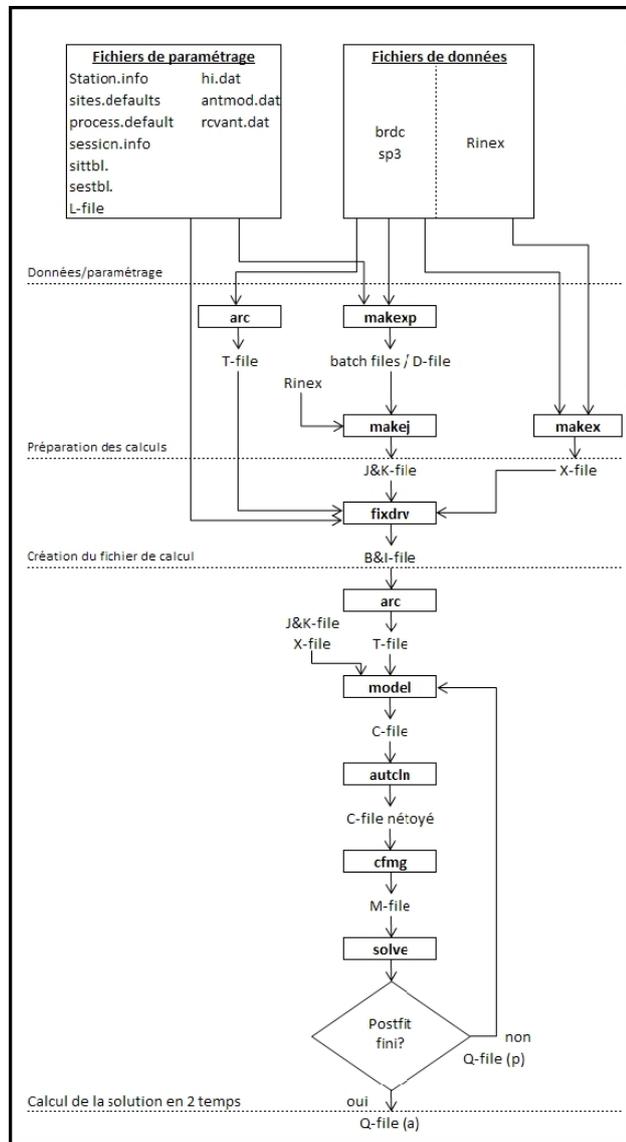


Figure 20 : Diagramme simplifié de l'exécution d'un calcul avec GAMIT [Adeline, 2008]

Les résultats présentés ci-dessous concernent l'expérimentation menée entre les jours 170 et 178 de l'année 2008. La ligne de base a été évaluée à une moyenne de 1230,061 m. avec une incertitude de ± 1 mm. (cf. **Figure 21**).

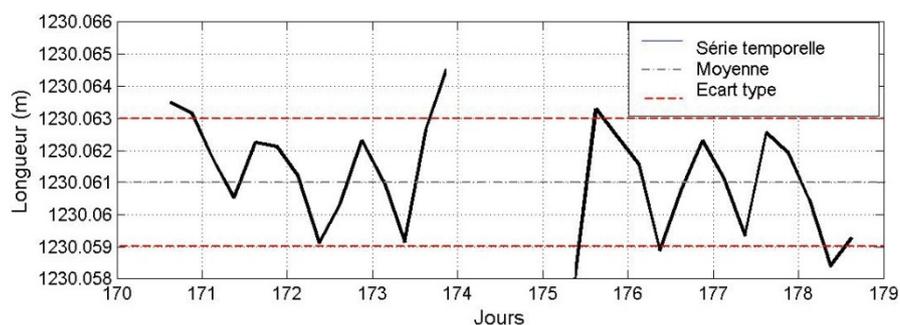


Figure 21 : Mesure GPS pour une courte ligne de base
Moyenne=1230,061 m ; écart type (1σ)=1 mm.

Un dysfonctionnement du récepteur de la station mobile s'est produit entre les jours 174 et 175, ce qui explique le manque de solution à cette période. La périodicité quasi journalière observée n'a pas été confirmée comme une fluctuation due aux effets ionosphériques ou aux multitrajets. En effet un calcul similaire a été effectué sur les données de quatre stations du réseau RGP présentant une configuration similaire à la notre (ligne de base de 2,5 et 1,5 km). Les résultats obtenus sur cette même période montrent aussi une fluctuation périodique quasi journalière (cf. **Annexe B-6**). De plus, ces calculs sur les stations du réseau RGP nous permettent de valider notre méthodologie de traitement avec un écart type du même ordre de grandeur que notre ligne de base. L'influence journalière provient en fait de la répartition de la couverture satellite au dessus du site. Cette couverture s'exprime par le facteur de qualité PDOP (Position Dilution Of Precision). On montre ainsi qu'une bonne couverture satellite, c'est-à-dire répartie de façon homogène et sans masque à proximité entraînera un faible PDOP, et donc un bon positionnement. Pour notre expérience, nous avons choisi d'enregistrer des sessions de 6 h, soit 4 sessions par jour. Chaque session sera caractérisée par une valeur de PDOP à l'image de la constellation satellite pendant cette période (cf. **Figure 22**). La bonne corrélation des mesures GPS avec le modèle de PDOP indique une forte dépendance entre la qualité de la constellation satellite et la précision de mesure de la ligne de base. De plus, nous pouvons constater que les faibles PDOP, indicateurs d'un bon positionnement, correspondent aux fluctuations maximales de la longueur de la ligne de base, ce qui signifie que la « vraie » solution s'approche plus de la valeur RMS que de la moyenne arithmétique de la série.

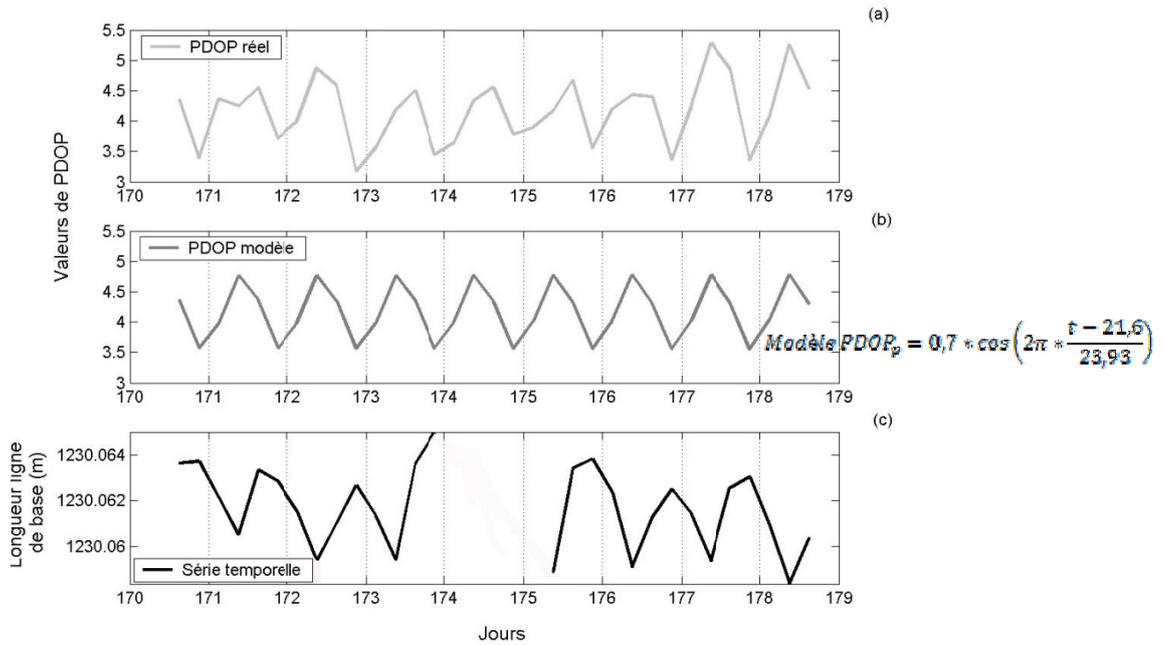


Figure 22 : Qualité de la couverture satellite sur la mesure GPS [Adeline, 2008]
 (a) PDOP mesuré, (b) modèle PDOP, (c) mesure GPS

Une expérimentation complémentaire nous a permis de simuler un mouvement centimétrique sur la longueur de la ligne de base afin de se rapprocher d'une configuration de suivi des déformations d'un mouvement de terrain. Pour ce faire, nous avons intercalé entre l'antenne GPS et son pied, une pièce mécanique mobile et réglable selon un axe par le biais d'une vis micrométrique (cf. **Figure 23**). Nous avons ensuite appliqué un déplacement de 2,4 cm à l'antenne, dans l'axe de la ligne de base. Après calcul, le déplacement mesuré par GPS est de 2,5 cm.

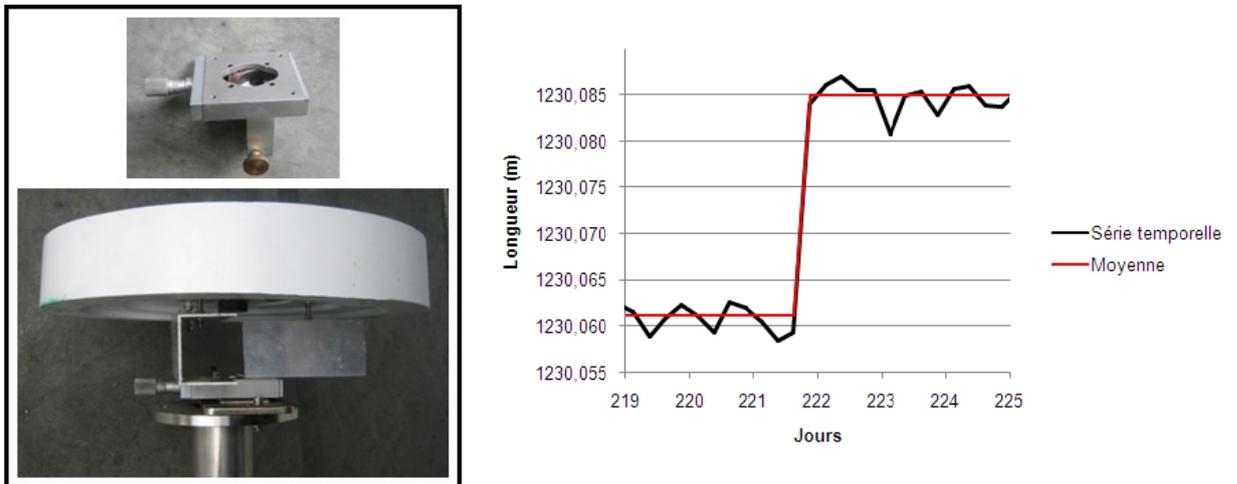


Figure 23 : Montage mécanique de l'antenne et mesure GPS d'un déplacement centimétrique

2.4. Perspectives

Le développement réalisé nous a permis de mettre au point une instrumentation GNSS capable d'assurer le positionnement relatif en mode statique avec une précision millimétrique. Cette solution présente l'avantage d'utiliser une carte OEM mono-fréquence (code et phase) bien moins onéreuse qu'un récepteur bi-fréquence nécessaire au positionnement en mode cinématique. Les résultats obtenus avec des sessions d'observation de 6 heures nous permettent d'atteindre une précision de ± 1 mm. Cette précision, liée à la qualité de la couverture satellite (PDOP), peut être nettement améliorée en utilisant des sessions de 24 h. Néanmoins, pour conserver une courte période d'observation (typiquement 6 heures, voire moins), il pourrait être envisageable de modéliser préalablement le PDOP sur une période assez longue afin de pouvoir corriger la mesure GPS à chaque session.

Au vu des résultats très satisfaisants obtenus, nous pouvons conclure que l'instrumentation développée possède les qualités pour intégrer un réseau de suivi des aléas gravitaires (i.e. mouvements de versants), caractérisés par une cinématique lente.

3. Conclusion

Dans le cadre de ce travail, nous avons développé une instrumentation multi-paramètres dédiée à la mesure des risques naturels. La station de mesure réalisée est conforme au cahier des charges prédéfini :

- acquérir des données de différents types ;
- échantillonner des signaux à haute fréquence ;
- enregistrer les mesures en continu sur un support de stockage de haute capacité ;
- fonctionner avec de faibles ressources énergétiques et dans des environnements difficiles.

La conception d'une chaîne d'instrumentation multi-paramètres ne constitue pas le choix le plus rapide, et économique en termes de temps de travail. En effet, un important effort est nécessaire pour concevoir, réaliser, caractériser et valider toute la chaîne d'acquisition. Néanmoins, la maîtrise, la compréhension et le contrôle des différents équipements constituent à long terme des atouts majeurs pour l'avenir et pour le développement de la deuxième phase du projet, à savoir la conception d'un système de surveillance.

Ce chapitre nous a permis de présenter en détail les caractéristiques et le mode de fonctionnement de notre station SAFIR. Ainsi en répondant aux objectifs fixés : échantillonner à haute fréquence, enregistrer en continu les données, avoir une faible consommation, optimiser la gestion de l'énergie et être robuste et de faible encombrement, la station SAFIR s'avère particulièrement bien adaptée à la mesure dans des environnements difficiles et isolés.

Enfin, de par la conception modulaire de la station SAFIR, il nous a aisément été possible de développer une instrumentation GNSS de précision. Dans ce cadre, nous avons montré que l'instrumentation développée à base d'un récepteur GPS mono-fréquence, nous permet d'obtenir un positionnement avec une précision millimétrique.

CHAPITRE 3 :

Conception d'un système de surveillance des risques

La station SAFIR, telle que nous l'avons décrite dans le chapitre précédent, ne représente qu'un maillon, certes essentiel, de la chaîne de surveillance. Ses fonctions sont actuellement limitées à la mesure et à l'enregistrement sur un espace de stockage interne. Ainsi, pour son utilisation dans la surveillance des risques, nous avons amélioré ses performances par l'ajout d'algorithmes d'analyse temps réel qui portent autant sur les tâches fonctionnelles qu'opérationnelles. Nous avons, de plus, développé un ensemble d'outils complémentaires autour de la station, fonctionnant sur un ordinateur distant connecté via un réseau téléométré à la station d'acquisition, l'ensemble constituant le système de surveillance en lui-même.

Un système de surveillance comprend en effet différents éléments ayant pour fonction la mesure, le stockage, l'analyse, la transmission et l'alerte. Notre système se différencie des systèmes classiques par la manière dont s'agencent ces éléments. Ainsi, nous allons voir dans ce chapitre que la fiabilité d'un système de surveillance réside principalement dans la qualité de l'interopérabilité des éléments entre eux. Dans ce but nous avons choisi d'associer mesure et surveillance au sein d'un même équipement. Les avantages portent sur une vitesse d'analyse plus élevée grâce à la réduction des temps de transmission et sur l'amélioration de la fiabilité de la gestion d'alerte par la décentralisation du traitement de l'information.

1. Un nouveau concept : la surveillance embarquée

Lorsque l'on cherche à caractériser un phénomène naturel on a habituellement recours à un système de mesure permettant l'enregistrement de données physiques caractéristiques de l'évolution du site vis-à-vis de l'aléa considéré. Tant que l'objectif se limite à l'auscultation, le système de mesure reste simple : il suffit d'acquérir des signaux et de les enregistrer.

Le système se complexifie lorsque l'objectif passe de l'auscultation à la surveillance. En effet, au delà de la mesure, le système doit étendre ses fonctions à la sécurisation et ainsi répondre à d'autres exigences : la fiabilité et la traçabilité.

Si l'on analyse les systèmes de surveillance connus, on remarque qu'ils sont en général basés sur le même modèle de surveillance. Ce modèle de surveillance classique, en forme d'étoile, présente un ensemble de points de mesure qui converge vers un nœud central au sein duquel s'effectuent toute l'analyse et la gestion des alertes. C'est notamment le cas des systèmes GeSSRI, Eydenet et Guardaval [Interreg IIIA, 2006]. Pour augmenter la fiabilité d'un tel système, le nœud central considéré comme l'élément vital du système est doublé (cas du système GeSSRI à Séchillienne).

Ainsi, ce type de modèle convient bien pour la surveillance de sites de grande ampleur. Par contre, il n'est pas adapté à la surveillance de phénomènes localisés car il présente l'inconvénient d'éloigner l'analyse de la mesure, rendant le système vulnérable par la simple fragilité d'une de ses liaisons raccordant le dispositif de mesure (M) au dispositif de surveillance (S) (cf. **Figure 24 a**).

Pour faire face à cette problématique, nous avons développé un nouveau modèle de surveillance s'organisant sous la forme d'un maillage, où chaque nœud regroupe à la fois un point de mesure et d'analyse (cf. **Figure 24 b**). Les nœuds peuvent alors dialoguer entre eux en fonction de leur répartition géographique et du type de liaison utilisée. Le gain en fiabilité est apporté par le fait que chaque nœud est capable de déclencher un processus d'alerte.

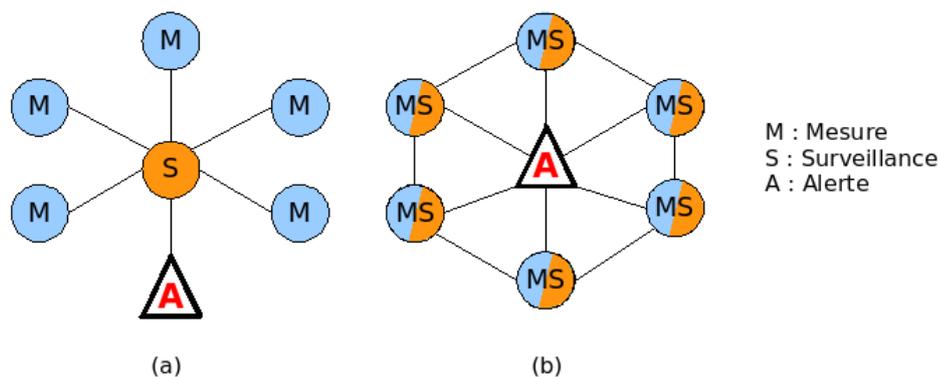


Figure 24 : Modèles de système de surveillance
(a) le modèle classique en étoile, (b) le modèle développé en toile

Notre système de surveillance se compose d'un ensemble de trois types de dispositifs (cf. **Figure 25**) :

- les **dispositifs de mesure et d'aide à la surveillance**, réunis au sein d'un unique équipement : la **station SAFIR**, permettant d'acquérir et d'analyser l'information dans un objectif directement appliqué à la gestion de la sécurité ;
- le **dispositif d'avertissement**, permettant de sécuriser les zones menacées au moyen d'une signalisation adaptée et d'alerter en cas de nécessité les autorités compétentes ;
- le **dispositif de supervision distant**, permettant de surveiller le site à distance, d'archiver les données, de procéder à leur analyse a posteriori et de fournir aux différents acteurs de la surveillance (gestionnaires, responsables, experts) une interface utilisateur conviviale, opérationnelle et sécurisée.

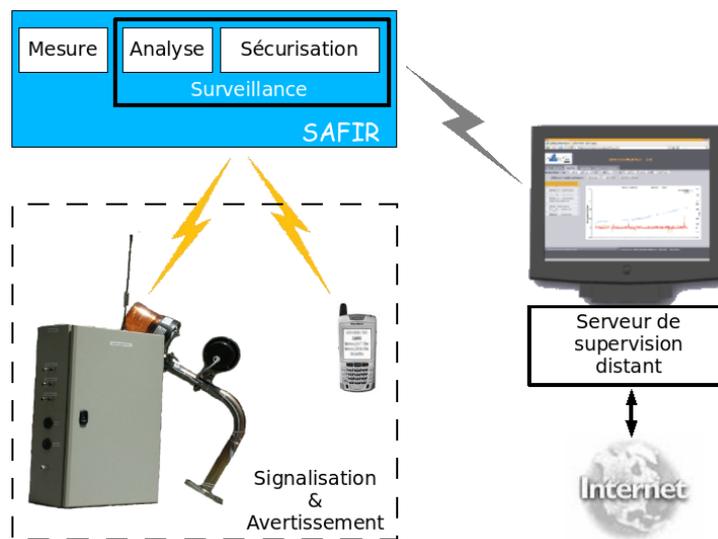


Figure 25 : Architecture du système de surveillance SAFIR-MYRSA

La station SAFIR n'est alors plus limitée à la mesure et à l'enregistrement de paramètres physiques mais va intégrer des algorithmes d'analyse et de gestion fonctionnelle et opérationnelle. La station de surveillance doit contribuer à :

- évaluer l'évolution de l'aléa en fonction d'une base de connaissance et de décision prédéfinis ;
- gérer des dysfonctionnements techniques, lorsque ces défauts mettent en péril la sécurisation du site, et l'alerte des gestionnaires afin qu'une maintenance du système puisse être organisée rapidement ;
- gérer des alertes opérationnelles par l'intermédiaire d'un dispositif de signalisation local et l'avertissement des responsables et gestionnaires qu'un état de vigilance est à observer ;
- la transmission des informations de surveillance vers un serveur de supervision distant.

Ce système de supervision distant, appelé MYRSA pour *Myotis Remote Server Application*, vient compléter le système de surveillance en fournissant un outil graphique de gestion de toutes les informations de surveillance et de fonctionnement des équipements sur site. Il est situé dans un centre opérationnel (bureau d'étude, local technique, etc.) et est en communication avec les stations sur le terrain via une liaison longue distance (type téléphone, GSM, internet).

Le serveur MYRSA est implémenté de fonctions automatisées et planifiées ayant pour tâche de :

- recueillir les données des stations de surveillance ;
- centraliser les données dans une base de données relationnelles.

Son rôle de supervision a pour objectif de fournir à tous les acteurs de la surveillance d'un site :

- une interface de gestion des données conviviale et opérationnelle ;
- un accès aux paramétrages des différents équipements en place ;
- et des outils d'analyse et d'expertise en vue d'une aide à la décision (modélisation).

2. Développement d'une station de surveillance embarquée temps réel

2.1. Détection sur seuil

Comme nous l'avons présentée dans le premier chapitre, la définition d'un seuil sur une mesure constitue le premier pas dans la construction d'un système de surveillance.

Nous utilisons principalement des capteurs ayant une réponse linéaire. Le mesurande, $s(t)$, sera une fonction linéaire de la tension, $u(t)$, en sortie du capteur.

$$s(t) = A.u(t) + B \quad (3.1) \quad \text{avec } A \text{ la sensibilité du capteur et } B \text{ l'offset.}$$

Cette relation se traduit sur la station SAFIR par :

$$s(t) = A.G.m(t) + B \quad (3.2) \quad \text{avec } m(t) \text{ le mot binaire en sortie du CAN et } G \text{ le gain électronique de la chaîne d'acquisition.}$$

La grandeur physique est de ce fait directement proportionnelle au mot binaire fourni par la station de mesure. Les différents seuils sont préalablement fixés dans le fichier de configuration de la station au format de l'unité de la grandeur physique mesurée. Ils sont convertis, à l'initialisation, en mots binaires afin d'optimiser l'algorithme de détection à une seule comparaison.

Dans certains cas, le seuil n'est pas directement applicable à la grandeur physique mesurée. Par exemple, dans le cadre du suivi de l'ouverture d'une fracture on s'intéresse généralement à sa vitesse d'ouverture plutôt qu'à la mesure de déplacement fournie par l'extensomètre.

Il est alors nécessaire de calculer la dérivée de la mesure brute. Pour ce faire, nous avons configuré un registre en mémoire qui permet de sauvegarder par l'intermédiaire d'un *buffer circulaire* les données sur une période préalablement fixée (période qui dépend de la vitesse d'évolution souhaitée).

Le calcul de la dérivée est évalué à chaque acquisition par :

$$s(t) = A.G. \frac{m(t+h) - m(t)}{h} + B \quad (3.3)$$

2.2. Détection sismique

2.2.1. Détection d'un signal sismique

Dans le cadre de la surveillance sismique, on s'intéresse à l'énergie libérée par des événements nanosismiques. Ces événements sont d'amplitudes très faibles, ce qui rend difficile leur détection.

La première étape de la détection sismique consiste à repérer un signal émergeant dans le bruit de fond. Il existe plusieurs méthodes de segmentation du signal sismique intervenant dans différents domaines : temporel, fréquentiel, temps-fréquence. De par les ressources limitées de notre station embarquée et face à nos objectifs de surveillance temps réel, nous avons orienté notre implémentation vers le domaine temporel. Les traitements nécessitant d'avantage de ressources sont implémentés sur le serveur distant (MYRSA), sur lequel ne repose pas de contrainte critique temps réel.

La méthode de détection la plus simple est la méthode de détection par seuil (*trigger*) (cf. § 2.1). Néanmoins, cette méthode peut poser des problèmes de fausse détection pour la détection sismique. En effet, étant donné que nous cherchons à observer des ondes sismiques de très faible énergie, nous procédons à une importante amplification du signal (de 10 à 1000 fois). L'électronique est donc rendue très sensible aux parasites et peut ainsi provoquer des détections intempestives.

Pour y remédier, nous utilisons la méthode de détection STA/LTA (*Short Time Average / Long Time Average*), très utilisée en sismologie [Stewart, 1971, Allen, 1982, Baer & Kradolfer, 1987]. Le principe consiste à calculer la valeur moyenne de l'amplitude absolue du signal recueillie dans deux fenêtres glissantes. La première fenêtre, plus petite que la deuxième, est sensible aux événements sismiques. La deuxième fenêtre fournit une information sur le bruit de fond sismique. On fixe ensuite un seuil limite sur le rapport entre ces deux moyennes, au delà duquel on considère qu'il y a une activité sismique.

Cette méthode nous fournit trois variables paramétrables (longueurs des deux fenêtres, seuil) avec lesquelles nous pouvons filtrer certains types d'événements non souhaités. La longueur de la petite fenêtre est un paramètre très sensible. Plus on la diminue, et moins il y aura d'inertie dans la détection. Par exemple, pour éviter qu'un pic de bruit électronique (*spike*) dû à une perturbation déclenche une détection intempestive, on agira plus particulièrement sur la longueur de la fenêtre STA. Autre exemple : si la mesure est perturbée par une activité humaine à proximité (bruit de machine, engins), on augmentera la longueur de la fenêtre LTA, indicateur du bruit de fond.

Concernant notre station, l'algorithme de segmentation a été optimisé afin d'éviter d'effectuer des calculs de moyenne à chaque acquisition, opérations mobilisant des ressources CPU importantes. A l'initialisation, on calcule la constante de détection (*Coef*) qui sert de base à la comparaison de la condition de détection. De plus, l'algorithme nécessite de sauvegarder les mesures temporairement afin de les utiliser pour la mise à jour des sommes STA et LTA à chaque acquisition (fenêtres glissantes).

L'algorithme de détection sismique STA/LTA peut s'écrire de la manière suivante :

Configuration	Taille_STA en nombre d'échantillons Taille_LTA en nombre d'échantillons Seuil_ratio_STALTA = 4
Initialisation	Coef = Seuil_ratio_STALTA * (Taille_STA / Taille_LTA)
Détection	$STA_i = STA_{i-1} + x_i - x_{i-Taille_STA} $ $LTA_i = LTA_{i-1} + x_i - x_{i-Taille_LTA} $ SI (STA > Coef * LTA) ALORS // Détection sismique FIN SI

L'emploi des tableaux est couramment utilisé dans la programmation de haut niveau. Malheureusement, du point de vue de la performance, l'algorithme est alourdi d'opérations supplémentaires. En effet, pour accéder à un élément, il faut calculer l'indice, puis l'adresse avant de pouvoir accéder à l'élément en mémoire. En guise d'illustration, prenons l'exemple simple de la somme des mesures de la fenêtre STA. Le code s'écrit de la manière suivante :

```
SomSTA[i] = SomSTA[i-1] - Mesure[0] + Mesure[i]
```

avec Mesure[0] représentant le 1^{er} élément du tableau de mesure et Mesure[i] le dernier, correspondant à la mesure en cours.

Si l'on compte le nombre d'opérations de cette ligne de code, nous obtenons : une soustraction (i-1), quatre calculs d'adresse pour accéder aux valeurs dans les tableaux, trois chargements en mémoire, une soustraction, une addition et pour finir un stockage de la nouvelle valeur. Soit au total onze opérations élémentaires, auxquelles on pourrait ajouter les opérations liées à la taille des objets en mémoire (par exemple 2 par indice pour un entier sur 2 octets).

L'optimisation des algorithmes dans un système embarqué intervient au niveau du nombre d'opérations effectuées par le CPU. Pour réduire le nombre d'opérations, c'est-à-dire l'utilisation d'indices et de calcul d'adresse, nous utilisons des variables (pointeurs) qui vont pointer directement sur la donnée en mémoire. Le code précédent s'écrit alors :

```
*ptrSomSTA += *ptrMi - *ptrM0
```

avec ptrM0 représentant l'adresse en mémoire de la 1^{ère} mesure et ptrMi l'adresse en mémoire de la dernière mesure

Grâce à cette optimisation, le nombre d'opérations est réduit à six et peut encore être diminué en utilisant un mode d'adressage auto-incrémenté (incrémenté simultanément au chargement en mémoire).

De plus, l'évaluation des sommes STA et LTA s'effectue sur la norme d'un signal sans composante continue. Or, les caractéristiques de notre circuit électronique nous imposent un signal analogique compris entre 0 et 2,5 V centré sur 1,25 V. L'incertitude sur les composants électroniques, de l'ordre de 1 %, fait que l'offset obtenu peut varier

d'environ 0,01 V d'une carte à une autre, soit approximativement 260 points en binaire. La composante continue est évaluée numériquement sur la station par un calcul de moyenne sur une durée prédéfinie (paramètre *NoiseListening* dans le fichier de configuration). La valeur moyenne est ensuite enregistrée dans un fichier pour des calculs post-traitement.

La définition de la composante continue est primordiale car on montre que pour une variation supérieure à 0,14 % seulement, un événement sismique n'est plus détecté (cf. **Figure 26**). Cette variation maximum correspond à 47 points en binaire, soit à une variation de tension de 1,8 mV. Cela ne signifie pas que le signal d'entrée doit être centré dans l'intervalle [1,249 1,251] Volts, mais que la composante continue du signal doit rester stable dans le temps.

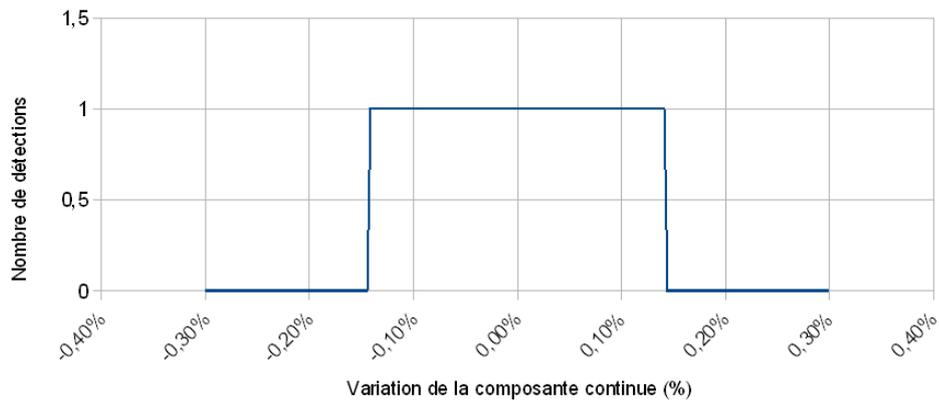


Figure 26 : Influence de la variation de la composante continue sur la détection STA/LTA

Nous avons donc programmé une procédure d'initialisation de la composante continue à chaque démarrage de la station, qui est ensuite réitérée régulièrement par le calcul d'une moyenne glissante selon un pas de temps défini dans le fichier de configuration de la station.

Par ailleurs, dans la continuité de notre analyse de la gestion des temps (cf. chapitre 2 §1.3.1), nous avons mesuré le temps de traitement requis pour la détection sismique afin d'évaluer les conditions limites de la station. Dans cette expérimentation, le temps de traitement comprend les temps d'acquisition et de traitement de la mesure. La limite sera donc atteinte lorsque le temps de traitement dépassera la période d'échantillonnage. Sur la figure suivante, nous avons représenté le temps de traitement nécessaire pour une détection sismique sur 1 et 8 voies en fonction de la fréquence d'horloge du microcontrôleur. On observe qu'avec une seule voie en détection (courbe *T_stalta_process_1_ch*, **Figure 27**) il est possible d'échantillonner jusqu'à 5000 Hz. Par contre, avec les 8 voies en détection, la fréquence d'échantillonnage maximale décroît à 1000 Hz (courbe *T_stalta_process_8_ch*, **Figure 27**).

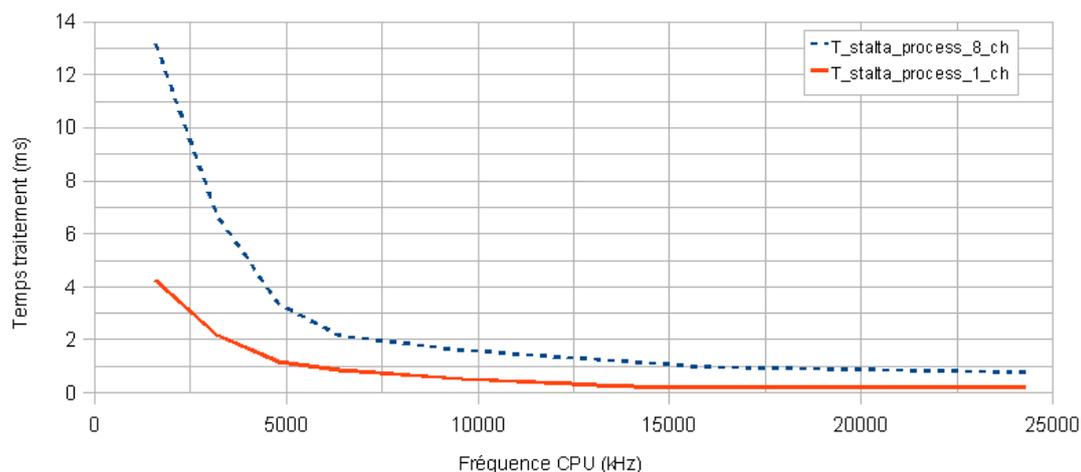


Figure 27 : Évolution des temps de traitement sismique en fonction de la fréquence d'horloge du CPU

L'échantillonnage à plus haute fréquence impose donc d'évaluer la détection non plus toutes les acquisitions mais toutes les N acquisitions. Nous avons représenté dans le tableau ci-après, le nombre de décimations nécessaires du calcul de détection sismique en fonction du nombre de voies de mesure et de la fréquence d'échantillonnage (cf. **Tableau 1**).

FREQUENCE (Hz)	NOMBRE DE VOIES EN DETECTION							
	1	2	3	4	5	6	7	8
500	1	1	1	1	1	1	1	1
1 000	1	1	1	1	1	1	1	1
2 000	1	1	1	1	2	2	2	2
5 000	1	1	2	2	4	4	6	6

Tableau 1 : Décimation du cycle de calcul de détection sismique en fonction de la fréquence d'acquisition et du nombre de voie en détection

2.2.2. Réglage des paramètres de détection sismique

La méthode STA/LTA de détection automatique d'ondes sismiques permet de dissocier un signal émergeant du bruit de fond à condition que les paramètres de configuration soient adaptés au type de signal que l'on cherche à détecter. En effet, la méthode STA/LTA ne se limite pas à la segmentation du signal sismique mais peut également jouer un rôle discriminant. C'est pourquoi, afin de mieux comprendre l'influence des paramètres longueurs des fenêtres STA et LTA sur la détection, nous les avons étudiés sur quelques signaux caractéristiques. Cependant, nous n'aborderons pas l'influence du paramètre seuil de détection compte tenu du fait que son rôle discriminant n'intervient que sur le niveau d'énergie du signal, tandis que les paramètres longueurs des fenêtres agissent sur la signature du signal.

Séisme de Monétier-les-Bains du 05/10/2007-06h05

Prenons comme premier exemple le séisme de Monétier-les-Bains du 05/10/2007-06h05 (Référence SISMALP : NNW Briançon (05), Lat. = 45.01, Long. = 6.65, Mag. = 3.4) (cf. **Annexe C-1**). Nous avons enregistré ce séisme (cf. **Figure 28**) avec notre station sismique des Grands Goulets (Vercors), présentée au cours du chapitre 4.

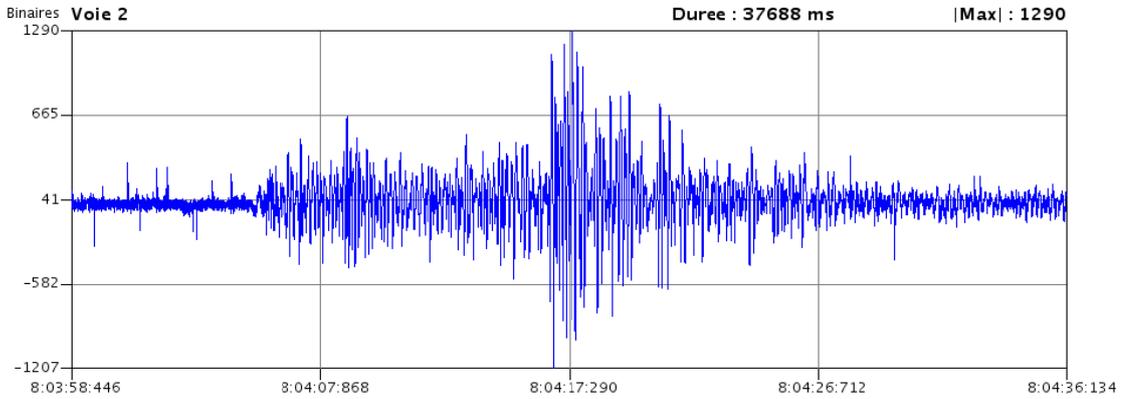


Figure 28 : Séisme de Monétier-les-Bains du 05/10/2007-06h05 enregistré par la station SAFIR des Grands Goulets

A partir de cet enregistrement, nous avons cherché à évaluer la détection en fonction des paramètres longueurs des fenêtres STA et LTA. Nous avons fixé les valeurs seuils du ratio STA/LTA à 3 pour la détection et à 1 pour la fin d'événement. Nous avons ensuite fait varier la longueur des fenêtres STA et LTA. Nous observons tout d'abord que pour une fenêtre STA comprise entre 0,1 et 1 seconde et pour une fenêtre LTA comprise entre 10 et 800 secondes, l'événement est toujours détecté (cf. **Figure 29**). D'autre part, le nombre de détections augmente lorsque la taille de la fenêtre diminue. Un seul événement peut donc être interprété comme une succession de plusieurs événements. Cependant, si l'on reporte la durée effective du signal (environ 23 secondes) sur le graphique de la **Figure 29b** (zone en pointillé), on peut définir la taille de la fenêtre LTA la mieux adaptée à la détection de ce type de signal. En effet, une bonne approximation est obtenue pour un LTA compris entre 50 et 120 secondes.

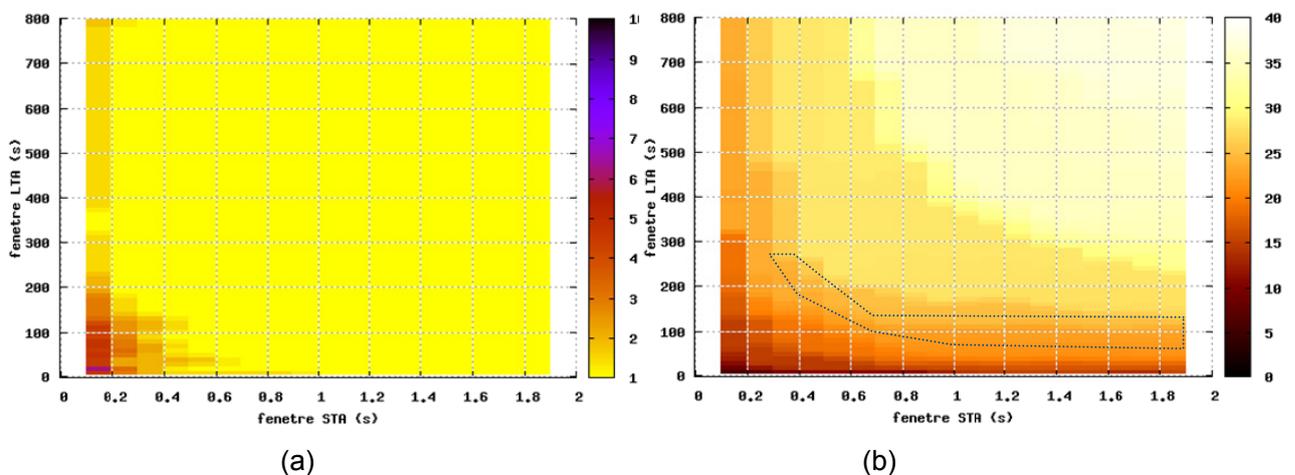


Figure 29 : Influence des longueurs des fenêtres STA & LTA sur la détection d'un séisme
 (a) Nombre de détections, (b) durée du signal détecté en seconde

Signaux nanosismiques, Chamousset, octobre 2007

Nous avons renouvelé l'expérience sur deux types de signaux nanosismiques acquis par notre station SAFIR dans le cadre de l'auscultation de l'écaïlle rocheuse de Chamousset (Vercors, cf. **Chapitre 4**). La station fonctionnait en mode continu avec enregistrement sur disque dur avec un échantillonnage à 1000 Hz.

Premier type de signal : signal nanosismique de rupture

Le premier signal (cf. **Figure 30**) est issu du capteur situé sur l'écaïlle rocheuse. Il est très impulsif et caractérise bien une rupture au sein du massif rocheux.

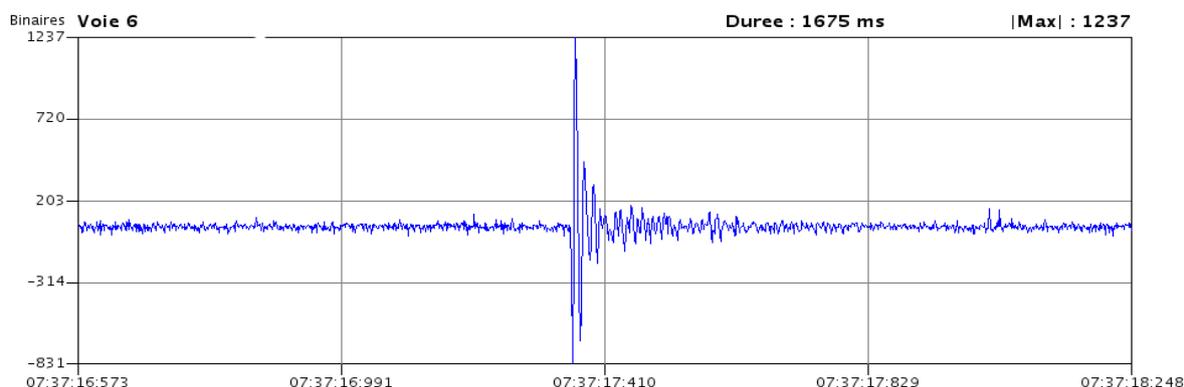


Figure 30 : Signal nanosismique de rupture rocheuse
Chamousset 21/10/2007-07:37:17

Comme précédemment, nous avons fixé les valeurs seuils du ratio STA/LTA à 3 pour la détection et à 1 pour la fin d'événement. Nous constatons (cf. **Figure 31a**) que ce type de signal sismique n'est détecté que pour une longueur de fenêtre STA inférieure à la durée du signal. La durée du signal étant d'environ 270 ms, lorsque la taille de la fenêtre STA atteint 250 ms et quelque soit la valeur de LTA, le signal n'est plus détecté.

D'autre part, on remarque que pour obtenir une valeur correcte de la durée du signal, la taille de la fenêtre STA doit être inférieure à 150 ms (cf. **Figure 31b**).

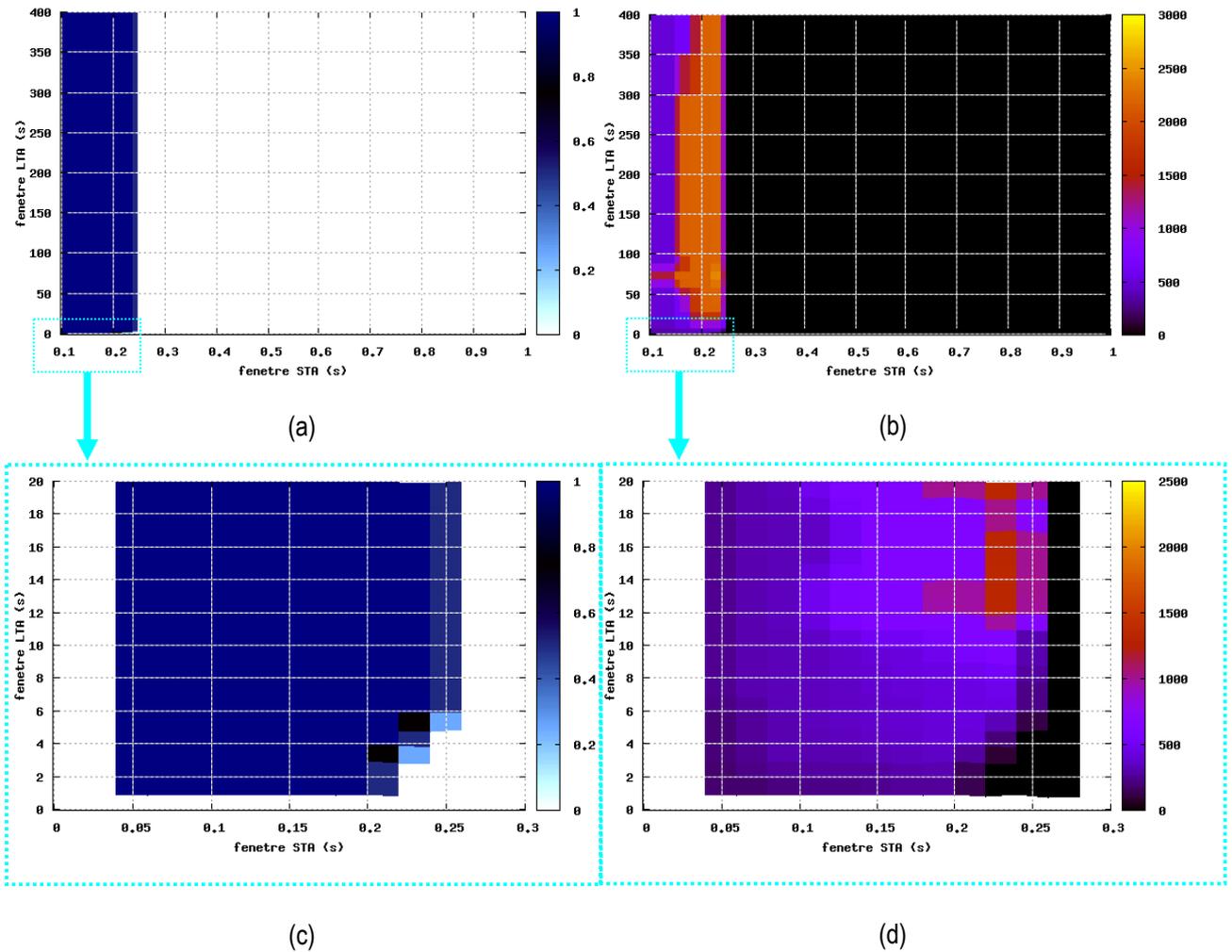


Figure 31 : Influence des longueurs des fenêtres STA & LTA sur la détection d'un nanoséisme
 (a) Nombre de détections, (b) Durée du signal détecté en ms,
 (c) Nombre de détections (zoom), (b) Durée du signal détecté en ms (zoom)

Deuxième type de signal : Grappe de signaux nanosismiques

Le deuxième type de signal nanosismique se caractérise par une succession de petits événements rapides (cf. **Figure 32**). Chacun des signaux de cette séquence ressemble assez au premier type et présente une durée comprise entre 100 et 300 ms.

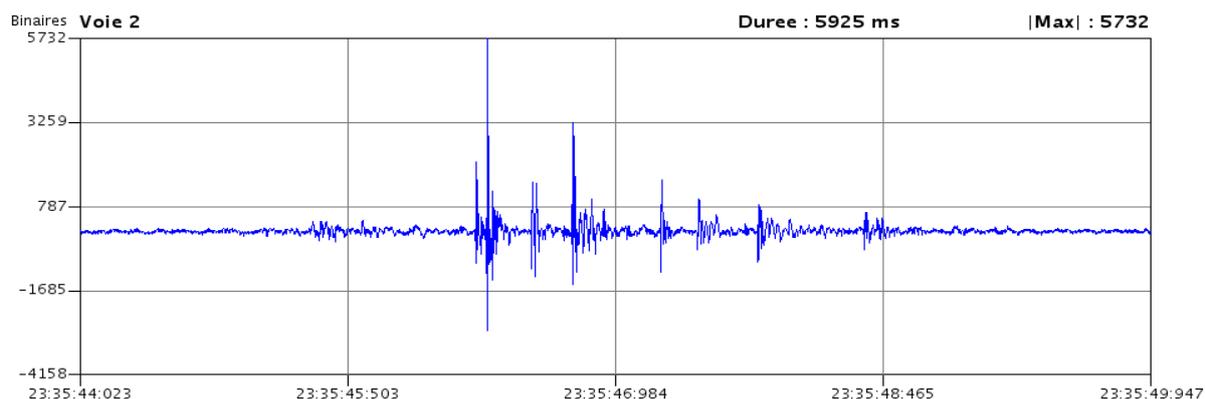


Figure 32 : Signal nanosismique de rupture rocheuse
Chamousset 21/10/2007-23:35:45

On constate tout d'abord qu'il est très difficile de détecter séparément chacun des signaux. Comme le montre la figure suivante (cf. **Figure 33a**), dans la majorité des cas, il n'y a qu'une seule détection caractérisant toute la séquence, dont la durée globale est de 2,5 s. Les paramètres de détection permettant une caractérisation fine du signal se rapprochent du cas précédent, c'est-à-dire une faible longueur de fenêtre STA et une fenêtre LTA < 60 s (cf. **Figure 33b**).

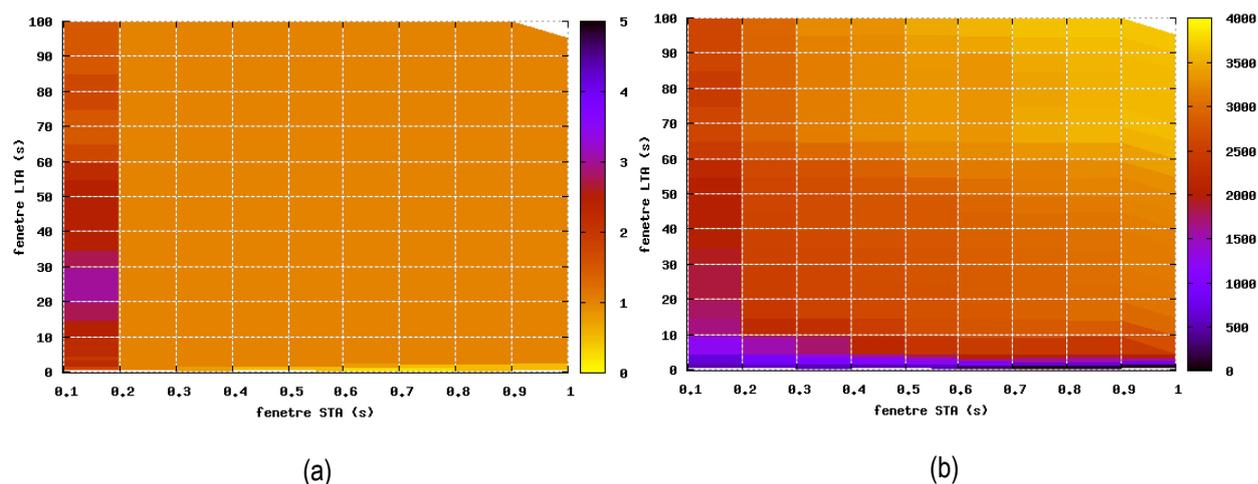


Figure 33 : Influence des longueurs des fenêtres STA & LTA
sur la détection d'une grappe de nanoséismes,

(a) Nombre de détections, (b) durée du signal détecté en ms ou durée max si plusieurs détections

Par ces trois exemples, on montre toute la difficulté de réglage des paramètres longueurs des fenêtres STA et LTA. En effet, il n'est pas possible de définir des paramètres standards permettant de détecter tous les types de signaux. La différence de réglage se situe essentiellement entre la caractérisation des événements sismiques longs et courts.

Nous pouvons néanmoins établir, en conclusion, deux règles permettant une bonne caractérisation du signal à détecter :

- la longueur de la fenêtre STA doit être inférieure à la durée du signal à détecter ;
- la longueur de la fenêtre LTA doit être approximativement 10 fois supérieure à la durée du signal à détecter.

2.2.3. Caractérisation des signaux sismiques

La classification automatique des signaux sismiques est une pratique assez répandue dans la surveillance volcanique. Elle utilise principalement les descripteurs temporels (énergie, durée, etc.) et fréquentiels, mais les méthodes de classification se sont largement diversifiées par l'utilisation, entre autre, des réseaux de neurones, des ondelettes, de la théorie Bayésienne, des modèles de Markov caché [Allen, 1978, Bache, 1993, Ohrnberger, 2001, Scarpetta, 2005, Orozco, 2006]. Face à la quantité importante de données qu'un observatoire de surveillance volcanologique doit gérer, la classification des signaux sismiques en temps réel peut s'avérer être un outil opérationnel précieux pour la gestion de crise.

Dans un autre domaine, la classification automatique a été appliquée à la reconnaissance des avalanches. Des expérimentations ont été menées au Centre d'Étude de la Neige (CEN / Météo France) et ont abouti sur la réalisation d'un prototype (système SARA). Ce système combine environ 25 descripteurs issus des trois domaines de représentation : temps, fréquence et polarisation, à partir d'une approche basée sur la logique floue [Leprettre, 1996]. Néanmoins, cette méthode n'avait pu aboutir à un système réellement opérationnel à cause du temps de traitement important et de la nécessité de disposer de la totalité du signal pour la reconnaissance automatique. Le système de détection des avalanches islandais, bien que profitant de technologies plus récentes et utilisant un nombre réduit de descripteurs et une classification statistique et supervisée (méthode des plus proches voisins), présente des résultats similaires [Bessason, 2007]. Le système n'a pas vocation à gérer le risque en temps réel bien que l'auteur spécifie que le résultat de l'analyse est fourni sur un site internet environ 2 minutes après la détection de l'événement. Ce système, bénéficiant d'un retour d'expérience de plus de 10 ans et bien que présentant encore quelques erreurs de classification, constitue une aide certaine à la qualification du risque avalancheux.

Dans le cadre de notre travail et dans un objectif de classification automatique des signaux sismiques de rupture rocheuse, nous avons sélectionné plusieurs descripteurs caractéristiques des formes d'ondes spécifiques. Ces descripteurs sont évalués par la station de surveillance dont les ressources limitées nous imposent d'optimiser au mieux leur choix et leur calcul. En effet, dans le cas des traitements temps-réel, le temps d'exécution constitue un point critique du système dont il faut tenir compte dans la conception des algorithmes. Ainsi, le caractère évanescent des données contraint le traitement à s'effectuer dans un temps limité : la mesure acquise par la station n'est disponible que pendant un court laps de temps. Pour appliquer plusieurs traitements à un même jeu de données, il est donc nécessaire de réaliser ces opérations simultanément à l'acquisition puisque les données ne peuvent pas être « rejouées ».

Par conséquent, nous avons réduit notre choix à neuf descripteurs, servant de base à la caractérisation des signaux sismiques, avec notamment :

- **la date de détection** (à la milliseconde près), pointée automatiquement par la méthode STA/LTA ;
- **la durée de l'événement** (T_d), définie par la période où le ratio STA/LTA est supérieur à un seuil de détection prédéfini et se termine quand ce ratio est inférieur au seuil de fin de détection prédéfini ;
- **l'amplitude crête**, correspondant à la valeur absolue maximale atteinte pendant la durée de l'événement :

$$A_c = \text{MAX}(|x(t)|) \quad (3.4)$$

- **Le rapport STA/LTA crête**, évalué à chaque nouvelle donnée et permettant de détecter un signal sismique dans le bruit. Il équivaut en quelque sorte au facteur signal sur bruit ; ce rapport est évalué en continu, même au cours d'un événement ;

$$\left(\frac{STA}{LTA}\right)_c = MAX\left(\frac{STA(t)}{LTA(t)}\right) \quad (3.5)$$

- **la puissance du signal**, correspondant à l'intégrale du signal au carré sur la durée de l'événement ; elle constitue un indicateur sur l'ampleur de l'événement.

$$P = \int_0^{T_d} x^2(t).dt \quad (3.6)$$

- **l'amplitude RMS**, permettant de mesurer l'énergie contenue dans le signal.

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{P}{T_d}} \quad (3.7)$$

- **le facteur crête**, correspondant au rapport de l'amplitude crête par la valeur RMS du signal. Une valeur haute indiquera un signal plutôt impulsif, tandis qu'une valeur basse indiquera une enveloppe plus arrondie ;

$$F_c = \sqrt{\frac{A_c}{A_{RMS}}} \quad (3.8)$$

- **la fréquence instantanée**, évaluée par comptage du nombre de passages par zéro du signal (*zero-crossing*). Cet algorithme a été et est toujours utilisé à cause de sa simplicité, bien qu'il ne mesure pas vraiment la fréquence moyenne [Lunt, 1975]. Néanmoins, la fréquence instantanée constitue un paramètre de base qui définit la localisation temporelle du contenu spectral du signal [Sun, 1993].

$$F_{ZC} = \int_0^{T_d} G\{x(t).x(t-1) < 0\} dt \quad (3.9) \text{ avec } G \text{ une fonction booléenne qui vaut } 1 \text{ si son argument est vrai ou } 0 \text{ sinon}$$

- **le facteur de répartition du signal**, permettant de détecter les signaux qui n'ont pas une amplitude naturelle, c'est-à-dire qui restent en dessous ou au dessus l'axe des abscisses. Ce type de signal est souvent observé lors de perturbations. Pour un signal naturel, ce facteur est proche de 1. Il correspond au rapport des puissances hautes et basses du signal :

$$F_R = \sqrt{\frac{P_h \{tel\ que\ x(t) > 0\}}{P_b \{tel\ que\ x(t) < 0\}}} \quad (3.10)$$

Le choix des descripteurs n'est pas strict. Ce dernier a été défini tout d'abord afin d'optimiser le temps de traitement de la station sans la surcharger de calculs complexes. D'autre part, les descripteurs ont été sélectionnés en fonction du type d'information fournie afin de permettre une première caractérisation grossière du signal détecté en discriminant ainsi les « vrais » signaux des perturbations. L'association des descripteurs choisis dans un arbre de décision utilisant la logique floue constitue la base d'une classification permettant ainsi de mieux qualifier une crise sismique. Cette méthode est détaillée ci-après (§ 2.3.2).

2.3. Télémétrie

La transmission de l'information vers les dispositifs de gestion et/ou d'alertes constitue le nerf du système de surveillance. En effet en cas d'un dysfonctionnement de transmission, c'est la sécurisation des enjeux qui est remise en cause. La fiabilité du système de surveillance passe donc avant tout par la fiabilité des liaisons permettant l'interopérabilité des dispositifs entre eux (liaisons de communication et connexions). Le réseau de communication constitue par conséquent la clé de voûte de l'efficacité du système de surveillance et d'alerte. Il est important de noter que tous les sites surveillés présentés dans le **Tableau 3** comprennent une télémétrie.

Ainsi lorsque l'aléa à surveiller est étendu sur une large zone, cela pose un problème de taille dans le choix du type de communication à mettre en œuvre.

Les moyens de communication dont nous disposons aujourd'hui se divisent en deux catégories : la communication filaire et la communication hertzienne. Dans les deux cas, il est possible de transmettre tous types d'informations, qu'elles soient analogiques ou numériques. Pour mémoire, on peut citer quelques technologies les plus utilisées (cf. **Annexe C-2** pour plus de détail) :

- la liaison filaire cuivre ;
- la liaison filaire par fibre optique ;
- la radio (bandes UHF, VHF, à élargissement de spectre, etc...) ;
- le GSM ;
- les liaisons satellite (MétéoSat, Argos) ;
- et les liaisons sans fil nouvelle génération (Wi-Fi, WiMax, ZigBee, etc...).

Dans le cadre de nos investigations, nous avons privilégié certaines technologies. Nous présentons, dans le tableau ci-dessous, leurs caractéristiques et spécifions les domaines d'utilisation pour lesquels nous les préconisons (cf. **Tableau 2**). Il va de fait que le choix de la technique à mettre en œuvre va dépendre essentiellement des caractéristiques du site et des contraintes techniques instrumentales.

TECHNOLOGIE	DISTANCE	DEBIT	REACTIVITE	VULNERABILITE
FILAIRE CU	< 200 m	Haut	Haute	Haute
ZIGBEE (ISM 2,4GHZ)=	< 100 m	Moyen	Moyenne	Faible
RADIO (ISM 400-800MHZ)	< 10 km	Faible	Moyenne	Faible
GSM	> 10 km	Moyen	Très faible	Faible

Tableau 2 : Liaisons de communication mises en œuvre et conditions d'utilisation

Ainsi, le premier paramètre à évaluer est la distance de la liaison. En effet, pour les courtes distances, nous utilisons généralement une liaison filaire tandis que pour les longues distances, c'est la liaison GSM qui s'impose. Dans des cas de surveillance pendant travaux, pour des questions de facilité de mise en œuvre et afin de ne pas perturber les opérations de chantier, on préférera utiliser des liaisons ZigBee ou radio.

Le deuxième paramètre à prendre en considération est le type d'informations que l'on souhaite transmettre. Il peut s'agir de mesures, d'alertes ou d'informations techniques. Le type d'informations va conditionner le débit nécessaire et surtout la réactivité de la communication. Ainsi, lorsque l'on veut transmettre des données sismiques en continu, il faut prévoir une liaison haut débit. Par contre, si l'objectif est la transmission des alertes, alors il faut privilégier une réactivité en adéquation avec les enjeux à sécuriser.

Enfin, la liaison doit être adaptée au contexte environnemental du site. Dans le cas, où il est nécessaire d'établir une liaison qui traverse la zone menacée, il sera alors préférable de choisir une liaison sans fil, bien moins vulnérable que la liaison filaire.

Outre le fait que le choix de la technologie influe sur la fiabilité de la communication, cette dernière a été améliorée par le développement d'un protocole de communication avec correction d'erreurs et accusé de réception. Ce protocole a été développé en particulier pour les liaisons radio point-à-point, c'est-à-dire pour deux équipements communicant directement l'un avec l'autre sans intermédiaire (à l'inverse du GSM qui requiert les services d'un opérateur téléphonique). Le système de contrôle des erreurs est effectué à plusieurs niveaux, avec :

- un premier niveau, géré par le matériel et dépendant donc du type et des fonctionnalités de l'équipement utilisé. Ce mode est généralement transparent pour les équipements en amont ;
- un deuxième niveau de contrôle logiciel : il s'agit du protocole que nous avons développé. Son principe consiste à encapsuler le message à envoyer dans une trame à laquelle on ajoute un contrôle de redondance cyclique (CRC). La redondance est obtenue par une fonction de hachage sur l'ensemble du message à envoyer. Il existe différentes fonctions de hachage. Pour gagner en rapidité de communication, nous utilisons la plus simple à savoir le calcul de la somme de tous les octets du message et l'application d'un modulo 256 au résultat pour obtenir un CRC sur 8 bits. Le protocole fonctionne ensuite sur accusé de réception, c'est-à-dire que chaque message, signé par un expéditeur, doit être authentifié et validé par le destinataire. Des délais d'attente préprogrammés permettent de réitérer automatiquement l'envoi du message un certain nombre de fois et de gérer des dysfonctionnements en cas de non-réponse du destinataire du message. Une version, appelée « haute surveillance », a été développée pour une sécurité optimale de la liaison de communication. Son fonctionnement est dit « en sécurisation positive » : l'émetteur transmet en permanence un signal à intervalle de temps régulier, que le récepteur interprète comme un battement de cœur. Ce fonctionnement permet de détecter instantanément un défaut de liaison. On notera cependant que cette version du protocole nécessite une source d'énergie plus importante du fait de la communication constante des équipements.

Ce protocole a été implémenté sur tous les réseaux de communication radio point-à-point mis en œuvre pendant ce travail de recherche (cf. Chapitre 4) et a fourni de bons résultats vis-à-vis des objectifs fixés.

2.4. Gestion des alertes

2.4.1. Informations fonctionnelle et opérationnelle

On distingue deux types d'informations dans un système de surveillance :

- l'information opérationnelle, liée à la mesure du phénomène géologique et à la sécurisation des enjeux ;
- et l'information fonctionnelle, liée au fonctionnement de l'instrumentation.

L'information opérationnelle constitue l'élément fondamental de la surveillance car elle est directement liée à la gestion de la sécurité. La surveillance ne peut néanmoins être gérée convenablement qu'à la condition que les équipements fonctionnent correctement, d'où l'importance fondamentale en parallèle de l'information fonctionnelle. Dans ce cas, l'instrumentation ne se limite plus seulement à la mesure des paramètres physiques, mais intègre une gestion exhaustive du bon fonctionnement de ses composants. Le diagramme suivant (cf. **Figure 34**) montre le rôle prépondérant des deux types d'informations opérationnelle et fonctionnelle dans la gestion d'alertes et dans la sécurisation des enjeux. Au même titre qu'un dépassement de seuil sur un capteur, un défaut technique peut être à l'origine du déclenchement d'une alerte (de type intempestif).

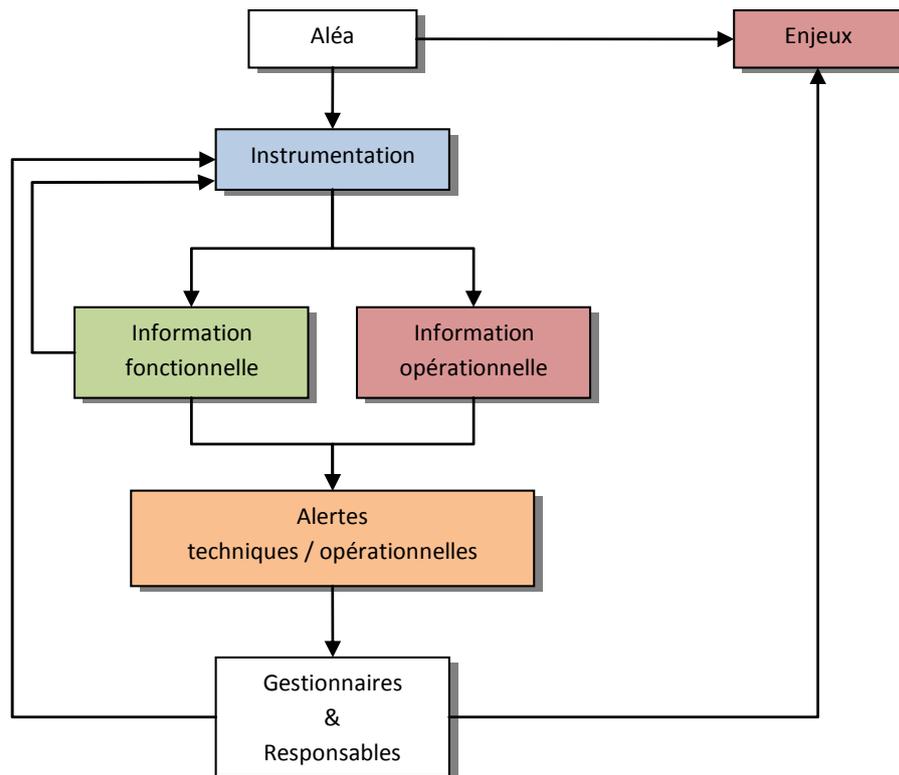


Figure 34 : Diagramme de gestion opérationnelle et fonctionnelle du système de surveillance

2.4.2. Elaboration d'un diagnostic au moyen de la logique floue

Une fois la mesure acquise, le rôle du système de surveillance est d'analyser les données disponibles en vue d'un diagnostic instantané sur l'état de stabilité de l'aléa. L'intégration de critères d'alerte, comme spécifié dans le premier chapitre, constitue une première étape dans l'analyse des données. Néanmoins, afin d'améliorer la fiabilité du système de surveillance, il est nécessaire que ce dernier intègre un processus d'analyse plus complet afin d'aider l'expert dans l'appréhension des phénomènes et les responsables dans la gestion des risques.

Le fait de concevoir un système de mesure et de surveillance présente l'avantage indéniable de pouvoir agir au cœur même du système. Ainsi, nous nous sommes efforcés de retranscrire une démarche au plus près de la réflexion tenue par l'expert face à un risque. Cette dernière s'inspire tout d'abord des méthodes de classification des signaux sismiques développées dans le cadre de la surveillance volcanique et des avalanches de neige. Néanmoins, de par la diversité des mesures réalisées et l'évolution à différentes échelles des paramètres mesurés, nous avons cherché à élaborer une méthode plus exhaustive afin d'intégrer toutes les informations fournies par le système, caractérisant tout autant l'instrumentation que l'aléa.

La grande difficulté de la gestion d'alerte réside dans l'analyse de critères purement intuitifs. En effet, il est très difficile de détailler simplement les règles de décision que l'on aborde lorsque l'on élabore notre jugement. Ainsi, face à un problème complexe, l'expert réagit notamment en fonction de son intuition, élément qu'il est très difficile de formaliser et donc de retranscrire en code machine. Considérons par exemple le cas d'une mesure sur un capteur qui dépasse son seuil d'alerte. Avec cette seule information, il y a autant de probabilités qu'il s'agisse de l'ouverture d'une fracture, que d'une perturbation ou d'un dysfonctionnement au niveau de la chaîne de mesure. Afin de lever le doute, l'expert recherchera d'autres indices complémentaires et notamment ceux fournis par l'instrumentation. Ainsi, une redondance d'information enregistrée par un second capteur sur le paramètre suivi, un autotest de la chaîne d'acquisition, une mesure témoin effectuée par le dispositif de surveillance, sont autant d'informations qui pourront être utilisées par l'expert pour aboutir à un diagnostic.

L'un des moyens auquel on peut avoir recours pour automatiser une prise de décision consiste à utiliser une méthode de classification dont l'objectif est d'identifier des classes d'appartenance. Une première approche probabiliste fondée sur les règles de décision de Bayes permet ainsi de minimiser le risque d'erreur de classification par la définition de probabilité d'appartenance à chacune des classes. Néanmoins, bien que reposant sur des outils mathématiques éprouvés, les probabilités nécessitent un échantillon test pour apprentissage, échantillon généralement non disponible dans le cas de la surveillance des instabilités rocheuses. De plus, il apparaît souvent difficile de définir des règles de décision sur la base de critères d'évaluation plus ou moins subjectifs. Dans ce cas, il est alors possible d'utiliser des techniques de classification floues qui constituent une approche type « système à base de règles de connaissance ».

En effet, la logique, dont le raisonnement a été énoncé par Aristote, nous fournit deux états uniques : 1 (vrai) et 0 (faux), formant la base des systèmes numériques actuels. Ainsi bien qu'un bon nombre de systèmes de contrôle se suffisent d'un diagnostic à deux états possibles, la gestion d'alerte ne peut se limiter à un tel raisonnement. C'est pourquoi nous nous sommes orientés vers la logique floue, dont les principes ont été définis par Lotfi Zadeh en 1965 [Zadeh, 1965]. La logique floue propose une infinité d'états ayant des degrés de vérité différents. Les deux états, 1 (totalement vrai) et 0 (totalement faux), sont ainsi complétés par un certain nombre d'états intermédiaires qui vont permettre d'adapter le diagnostic à l'imprécision de l'information. En effet, les variables ne sont plus caractérisées par des seuils arbitraires. En logique booléenne,

un seuil d'alerte fixé à 5 mm divisait les mesures en deux classes. Un déplacement de 1 mm ou de 4,9 mm appartenait alors à la même classe, dite « normale », tandis qu'un déplacement de 5,1 mm était considéré comme une alerte, alors qu'il est très proche de 4,9 mm. En logique floue, on ajoute à une variable, un degré d'appartenance à un ensemble, par le biais d'une fonction d'appartenance, qui permet de nuancer un tel jugement. L'étendue des valeurs possibles va constituer un sous-ensemble flou identifié par un terme du langage courant (cf. **Figure 35**). La mesure $M (=4,9 \text{ mm})$ va donc appartenir au sous-ensemble « pré-alerte » avec un degré d'appartenance (μ) de 0,8 et au sous-ensemble « alerte » avec un degré d'appartenance de 0,2.

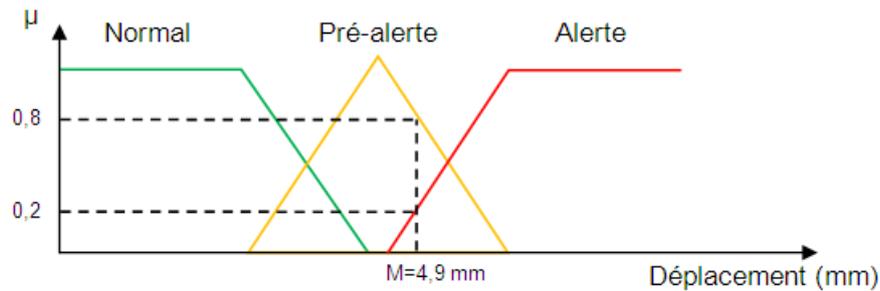


Figure 35 : Exemple de sous-ensemble flou de déplacement

Les fonctions d'appartenance (μ) peuvent prendre n'importe quelle forme. Toutefois, pour simplifier l'expertise, on utilisera le plus souvent des fonctions linéaires, telles que représentées sur la figure précédente (cf. **Figure 35**), permettant de définir des zones totalement vraies ou totalement fausses au sein d'un même ensemble. Par exemple, la fonction d'appartenance du sous-ensemble « pré-alerte » caractérise une mesure entachée d'une incertitude ε . Elle est représentée par une fonction triangulaire tel que :

$$\mu(x) = \max\left\{0; 1 - \frac{x - x_0}{\varepsilon}\right\} \quad (3.11) \quad \text{avec } \mu(x) \text{ la fonction d'appartenance}$$

La logique floue présente donc l'avantage de ne pas nécessiter la fixation de seuils stricts a priori pour la transformation ou l'interprétation des variables quantitatives et d'utiliser des termes aisément compréhensibles et applicables. De plus, compte tenu de la complexité à modéliser le phénomène d'instabilité en lui-même, la logique floue va nous permettre de modéliser plutôt le comportement de l'expert face au problème.

2.4.3. Construction des règles de connaissances

Pour commencer, on peut définir de manière simple une règle de connaissances par la combinaison de critères d'alerte permettant d'aboutir à un diagnostic sur l'état de stabilité de la masse rocheuse. Pour illustrer nos propos, plaçons-nous dans la situation d'un expert face à des mesures d'ouverture d'une fracture. Une première règle que nous pourrions être tentés de proposer en observant les données pourrait être : « si le déplacement augmente alors il est probable que la masse se déstabilise ». On note tout d'abord qu'une règle de connaissances se présente sous la forme d'une structure conditionnelle :

SI <prémisse> ALORS <conclusion>.

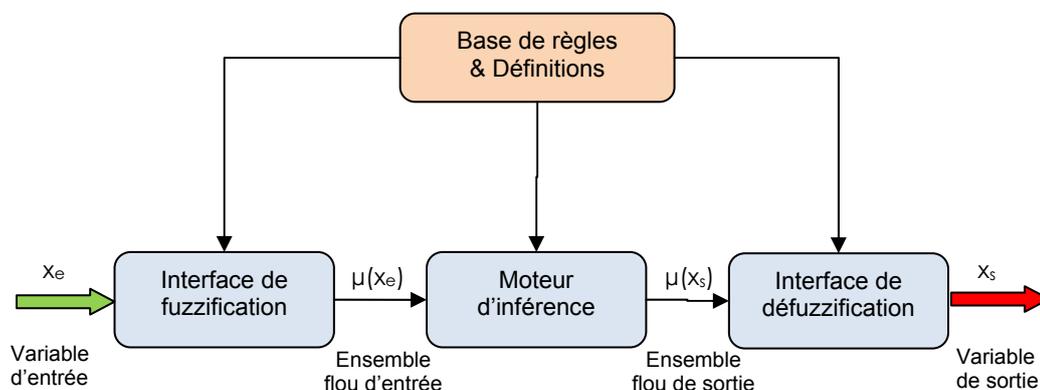
La prémisse, que l'on appelle valeur de vérité μ , est marquée d'un caractère imprécis par le terme « augmente », tandis que la conclusion, à laquelle se rattache l'incertitude du diagnostic et matérialisée par le terme « probable », marque le jugement totalement subjectif de l'expert. Face à l'absence d'observations complémentaires sur le phénomène surveillé, ce raisonnement reste le plus réaliste. Cet exemple de règle reflète bien la connaissance généralement imparfaite de l'expert. Elle est incertaine (l'expert doute sur sa validité) et imprécise (l'expert a du mal à l'exprimer clairement).

Pour modéliser l'incertitude dans une règle de connaissances utilisant la logique floue, nous allons intégrer dans la règle un indice de confiance permettant de qualifier la fiabilité de la conclusion. Nous nous inspirons pour cela, de la méthode développée dans le cadre de la reconnaissance des signaux sismiques d'origine avalancheuse [Leprettre, 1996]. L'indice de confiance, ou degré de vérité, va permettre de modérer la conclusion et donc la décision finale. Nous obtenons alors :

SI <prémisse> ALORS (<conclusion> . <degré_de_vérité>)

Cette règle s'énonce ainsi : « si la prémisse est vérifiée, alors la conclusion est vraie au degré de vérité fixé ». Le degré d'appartenance ou degré de vérité sont des notions similaires.

La construction des règles de connaissances va ainsi s'articuler autour d'un modèle flou tel qu'il est représenté sur la figure suivante (cf. **Figure 36**). Sa structure comprend quatre modules dont la base de règles qui constitue la base de connaissances apportées par l'expert. La première étape consiste à transformer la variable d'entrée, x_e , en un sous-ensemble flou, c'est la fuzzification. La variable réelle (par exemple « déplacement=4,9 mm ») est affectée à un sous-ensemble flou par l'intermédiaire d'une fonction d'appartenance (par exemple « déplacement élevé est



vrai à 0,9 »).

Figure 36 : Structure des règles de connaissances

Une règle peut combiner plusieurs valeurs de vérité permettant d'aboutir à une conclusion. Pour cela on peut utiliser les opérateurs de logique classique tels que ET, OU, NON. Cependant, les plus répandus sont ceux dits « de Zadeh » car ils permettent de reproduire avec plus de nuances le raisonnement humain, à savoir prudent ou modéré. Ces opérateurs sont notés :

- $\mu(A \text{ OU } B) = \text{MAX}(\mu(A), \mu(B))$ pour le caractère prudent

Le degré de vérité de la proposition « A OU B » est le maximum des degrés de vérité de A et de B. Exemple :

- « Déplacement élevé » est vrai à 0,8
 - « Température basse » est vrai à 0,4
 - « Déplacement élevé OU température basse » est vrai à 0,8
 - $\mu(A \text{ ET } B) = \text{MIN}(\mu(A), \mu(B))$ pour le caractère modéré
- Le degré de vérité de la proposition « A ET B » est le minimum des degrés de vérité de A et de B. Exemple :
- « Déplacement élevé » est vrai à 0,8
 - « Température basse » est vrai à 0,4
 - « Déplacement élevé ET température basse » est vrai à 0,4

Les valeurs de vérité sont alors évaluées par un moteur d'inférence qui constitue le diagnostic flou proprement dit. Il applique les règles aux variables floues afin de tirer des conclusions. Les règles étant définies avec des termes linguistiques, la conclusion sera donc marquée d'une part d'une incertitude et d'autre part de la subjectivité de l'auteur des règles.

La vérité $\mu(x_s)$ obtenue en sortie des règles d'inférence n'étant pas directement interprétable pour un système embarqué, la dernière étape consiste donc à convertir cet ensemble flou en une vérité du monde réel, c'est le processus de défuzzification.

Il existe plusieurs méthodes pour extraire une valeur réelle de la fonction d'appartenance du sous-ensemble conclusion. La première solution, la plus simple, consiste à prendre le premier maximum de la fonction $\mu(x_s)$ (FOM, First Of Maximum). Une autre solution, la plus souvent rencontrée, consiste à calculer le barycentre de l'ensemble flou (COG, Center Of Gravity) :

$$x_s = \frac{\int x \mu(x) dx}{\int \mu(x) dx} \quad (3.12)$$

Cette méthode requiert des temps de calcul raisonnables et donne de bons résultats.

En guise d'illustration, la figure suivante (cf. **Figure 37**) représente le processus de construction d'une règle de connaissances à partir de la logique floue. La première règle se compose d'un double prédicat « Température basse » et « Déplacement élevé » combiné par un opérateur modéré : $\text{MIN}(\mu(A), \mu(B))$. La conclusion de cette première règle aboutit à la conclusion : « Alerte éboulement » est vraie à 0,4. La deuxième règle comporte un seul prédicat « Pluviométrie élevée » qui aboutit à la conclusion : « Pré-alerte » est vraie à 0,5. L'ensemble flou de sortie « Conclusion Eboulement » intègre les deux sous-ensembles conclusion. La variable de sortie, x_s , correspondant au niveau d'alerte à déclencher. Elle peut être évaluée dans ce cas, soit de manière modérée par le premier maximum, x_{s2} , soit de manière prudente par le calcul du barycentre, x_{s1} .

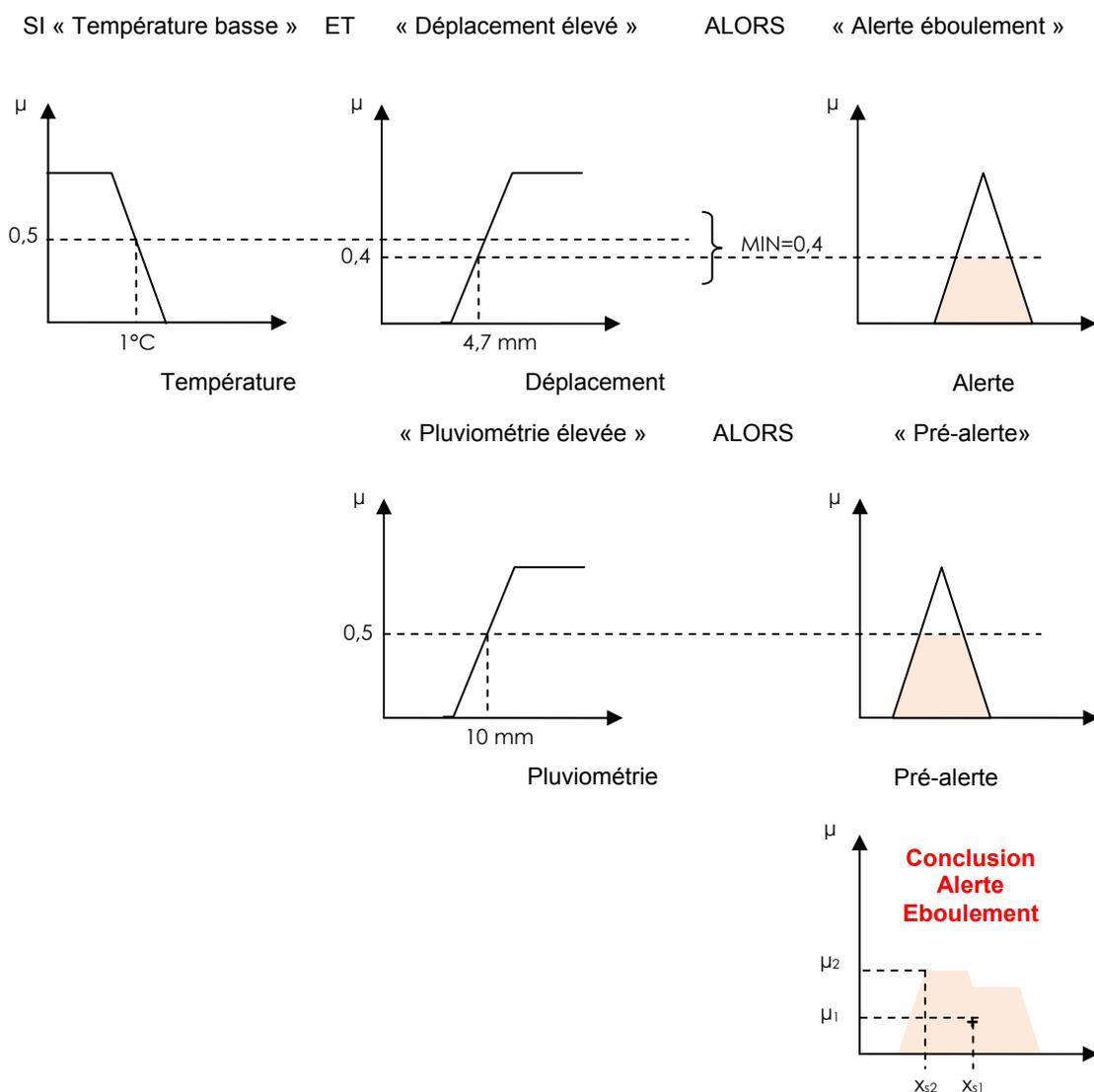


Figure 37 : Exemple de processus de résolution d'une règle d'alerte

2.4.4. Implémentation de la base de connaissances dans la station SAFIR

La définition de règles de décision par logique floue, telles que définies précédemment, permet de fournir un diagnostic intégrant en outre des informations sur le degré d'imprécision et d'incertitude des mesures réalisées. Comme représenté dans la structure des règles de décision (cf. **Figure 36**), chaque étape fait ainsi référence à une base de règles comprenant :

- la définition des variables d'entrée ;
- la définition des sous-ensembles flous d'entrée ;
- la définition des fonctions d'appartenance pour chaque sous-ensemble ;
- la définition des opérateurs de connaissances ;
- la définition des méthodes d'appartenance ;
- la définition des conclusions.

Ces différents paramètres sont spécifiques au contexte de surveillance dans sa globalité, en intégrant les caractéristiques d'un site particulier, d'un aléa précis et d'un niveau de sécurisation donné. Compte tenu de l'importante diversité de ces paramètres, nous avons choisi d'externaliser la définition de la base de règles dans un fichier de configuration indépendant, au même titre que la configuration instrumentale de la station de surveillance. Pour cela, nous nous appuyons sur la norme internationale IEC 61131-7, dont l'objet concerne la logique floue appliquée aux automatismes de contrôle industriel. La norme définit ainsi un langage de référence dédié au contrôle flou pour favoriser la portabilité des programmes entre les différents systèmes.

Le langage est formaté sous forme de balises permettant de définir les différents paramètres énoncés précédemment. L'exemple de processus de résolution d'une règle d'alerte présenté précédemment peut alors être programmé de la manière suivante :

```

FUNCTION_BLOCK

VAR_INPUT
    Temperature REAL; (* RANGE(-30 .. 50) *)
    Deplacement REAL; (* RANGE(0 .. 100) *)
    Pluviometrie REAL; (* RANGE(0 .. 50) *)
END_VAR

VAR_OUTPUT
    Eboulement REAL; (* RANGE(0 .. 10) *)
END_VAR

FUZZIFY Temperature
    TERM Basse := (-30, 1) (0, 1) (3, 0) ;
END_FUZZIFY

FUZZIFY Deplacement
    TERM Grand := (2, 0) (10, 1) (100, 1) ;
END_FUZZIFY

FUZZIFY Pluviometrie
    TERM Grand := (5, 0) (20, 1) (50, 1) ;
END_FUZZIFY

FUZZIFY Eboulement
    TERM Pre-Alerte := (2, 0) (5, 1) (8, 0) ;
    TERM Alerte := (5, 0) (7, 1) (10, 0) ;
END_FUZZIFY

DEFUZZIFY Cmd_Alarme
    METHOD: CoG;
END_DEFUZZIFY

RULEBLOCK Security

AND:MIN;
ACCU:FOM;
RULE 0: IF (Pluviometrie IS Grand) THEN (Eboulement IS Pre-Alerte);
RULE 1: IF (Deplacement IS Grand) THEN (Eboulement IS Pre-Alerte);
RULE 2: IF (Temperature IS Basse) THEN (Eboulement IS Pre-Alerte);
RULE 3: IF (Deplacement IS Grand) AND (Temperature IS Basse) THEN
(Eboulement IS Alerte);

END_RULEBLOCK

END_FUNCTION_BLOCK

```

Les différentes balises ainsi que leur contenu sont les suivantes :

- la balise VAR_INPUT contient la définition des variables d'entrée ainsi que leur étendue de mesure ;
- la balise VAR_OUTPUT regroupe les conclusions ;
- les balises FUZZYFY définissent toutes les fonctions d'appartenance. Chaque fonction, spécifiée par la balise TERM, est associée à une liste de points pour lesquels le degré de vérité vaut 1 ;
- la balise RULEBLOCK décrit les règles de décision qui seront évaluées par le moteur d'inférence ;
- la balise DEFUZZIFY est utilisée pour interpréter physiquement l'action à produire suite au diagnostic ;
- la balise ACCU spécifie le type d'algorithme utilisé pour le calcul de défuzzification ;
- la balise AND :MIN définit le type d'opérateur et son action conjuguée : MIN correspond ici à l'opérateur modéré.

Dans l'exemple précédent, la conclusion « Alerte » entraînera une action définie par la commande « Cmd_Alarme », comme le déclenchement d'une signalisation routière ou encore l'envoi d'un message texte par GSM.

L'intérêt d'avoir externalisé la base de règle réside principalement dans la grande facilité d'ajout et de modification des règles au fur et à mesure de l'apprentissage du système et de la connaissance du site surveillé. Par ailleurs, de par sa forme très simplifiée n'importe quel utilisateur est en mesure de modifier le fichier sans avoir recours au programmeur du système embarqué. Actuellement, nous avons limité l'implémentation aux fonctions d'appartenance linéaires et au calcul de défuzzification par les méthodes FOM (*First Of Maximum*) et COG (*Center Of Gravity*).

L'exemple précédent a permis d'illustrer l'utilisation de la logique floue pour des variables physiques, telles que le déplacement et la température. Dans un système de surveillance plus complet, on va maintenant intégrer des variables et règles liées à l'écoute microsismique ainsi qu'à l'instrumentation. Ainsi, pour les signaux sismiques, nous allons avoir recours aux descripteurs définis préalablement. On pourra alors par exemple fixer les règles suivantes :

```
IF (Facteur_Repartition IS Petit) THEN (Signal IS Perturbation)
IF (Duree IS Longue) AND (Facteur_Crete IS Petit) THEN (Signal IS Seisme)
IF (STALTA IS Grand) AND (Facteur_Crete IS Grand) THEN (Signal IS Rupture)
```

Dans le cadre de ce travail, l'objet n'est pas de réaliser une classification exhaustive des signaux sismiques mais de différencier une activité sismique naturelle des perturbations afin de pouvoir caractériser une crise sismique dans un processus de gestion d'alerte. C'est ainsi que l'on peut définir une règle d'alerte sur l'exemple suivant :

```
IF (Activite_sismique IS Grand) THEN (Eboulement IS Pre-Alerte)
```

Les règles de décision liées à l'information fonctionnelle sont par ailleurs tout autant fondamentales pour fiabiliser la sécurisation. La base de règles sera donc complétée de fonctions permettant de détecter tout dysfonctionnement. Par exemple, on peut citer les règles suivantes :

```
IF (Impedance_Capteur IS NULL) THEN (Defaut IS Capteur_HS)
IF (Impedance_Capteur IS INF) THEN (Defaut IS Coupure_Liaison)
```

```
IF (Tension_Batterie IS Basse) THEN (Defaut IS Panne_Alimentation)
IF (GSM IS No_Reponse) THEN (Defaut IS Panne_GSM)
IF (Com_Balise_Alarme IS No_Reponse) THEN (Defaut IS Panne_Alarme)
```

De manière générale, on constate par expérience que l'instrumentation et la surveillance d'un site instable sont généralement mises en œuvre lorsque l'aléa est à un niveau d'évolution avancé. L'état de stabilité n'est alors pas connu lors de la mise en place du système ce qui pose le problème de la définition des règles de connaissances.

En effet, le système nécessite que soit définies clairement les fonctions d'appartenance aux sous-ensembles flous, comme par exemple, le sous-ensemble « Grand » de la variable « Déplacement ». Or, en fonction du type d'instabilité, le terme « Grand » peut varier de plusieurs ordres de grandeur. Il est donc nécessaire que toute période de surveillance puisse être précédée d'une période de « calage » qui va permettre d'adapter les fonctions d'appartenance aux caractéristiques du site.

3. Développement d'un serveur de supervision et d'analyse distant

3.1. Nécessité d'un outil de supervision distant

L'acquisition de données à haute fréquence implique une gestion et un stockage approprié. Les limites de la station de surveillance, dues en majeure partie au traitement au fil de l'eau et à la surveillance continue, ne permet pas une analyse a posteriori. Le seul moyen pour permettre de traiter les données a posteriori est donc de transmettre les informations vers un dispositif distant pour lequel les contraintes de puissance et de gestion temps réel n'ont plus les mêmes impacts que pour le système embarqué.

L'objet du serveur de supervision distant, dénommé MYRSA, est de disposer d'un outil de collecte des informations opérationnelles et fonctionnelles afin de fournir aux exploitants et gestionnaires un outil d'expertise des risques et de maintenance des équipements. Le rôle du serveur n'est pas lié à la gestion d'alerte car ces fonctions sont intégrées dans la station de surveillance. Par contre, à l'image d'un observatoire, le serveur distant permet de réunir et d'organiser les données grâce à des outils adéquats. En effet, la bonne gestion de l'information est un gage de qualité pour une gestion efficace de crise et permet ainsi de fournir des bases pertinentes aux responsables et gestionnaires locaux des infrastructures et de la sécurité, devant engager des actions urgentes face à cette crise.

La tâche principale du serveur distant est donc de centraliser toutes les informations des stations de surveillance dans des bases de données. Afin d'étendre l'utilisation du serveur de supervision aux différents acteurs du site surveillé, une interface client-serveur va permettre d'accéder aux informations de surveillance via le réseau internet.

Par ailleurs, grâce à la fusion des informations dans des bases de données il est possible d'améliorer l'appréhension et la connaissance des caractéristiques des phénomènes surveillés.

3.2. Choix d'une architecture client / serveur

Le développement d'une architecture client-serveur se fonde sur deux objectifs :

- tout d'abord, il s'agit de centraliser l'information des stations de surveillance sur un serveur de données distant ;
- puis, il s'agit de fournir aux différents acteurs de la surveillance des outils de gestion et de visualisation des informations.

Ces fonctionnements s'intègrent donc totalement dans un modèle client-serveur dont l'objet est la mise en commun de ressources soit de type donnée, soit de type applicatif.

Tout d'abord, le serveur de supervision MYRSA va intégrer des services de réception de données qui permettent aux stations de surveillance sur site de transmettre régulièrement et automatiquement leurs informations (cf. **Figure 38**).

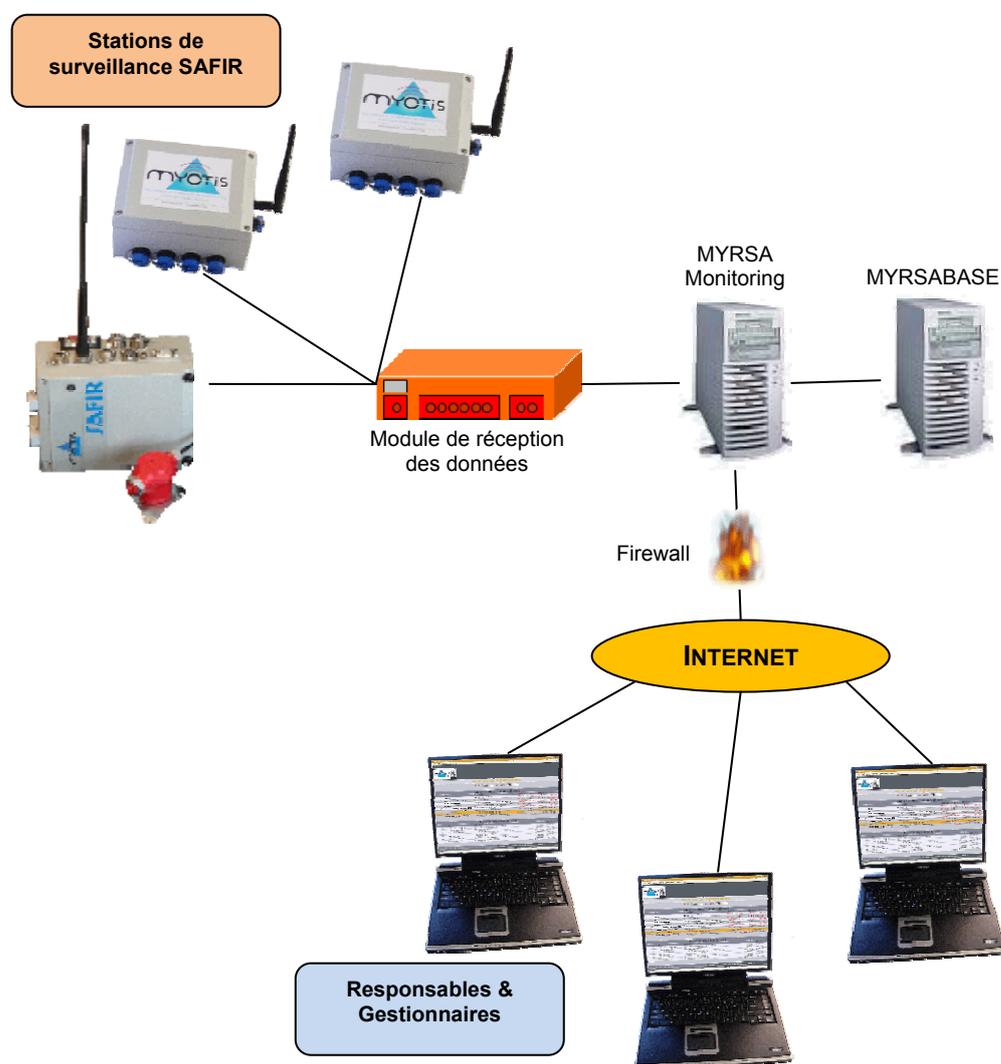


Figure 38 : Représentation de l'architecture client-serveur développée

A leur réception, les données sont analysées et enregistrées dans une base de données, MYRSABASE, dont la typologie est détaillée ci-après. Une interface Web a été développée pour organiser et accéder aux informations de surveillance. L'application, MYRSA Monitoring, simplifie le traitement et l'analyse des données grâce à des outils graphiques intégrés dans l'interface (cf. Chapitre 3 §3.4).

3.3. Typologie et structuration des données

Toutes les informations recueillies des stations de surveillance sont structurées dans un système de gestion de bases de données relationnelles (SGBD-R). Un moteur de base de données permet ensuite de stocker et de restituer ces informations. Le dialogue avec le moteur de base de données repose sur un langage d'interrogation structuré, SQL (*Structured Query Language*). Le principal atout d'un SGBD-R est

l'aspect relationnel, qui signifie que le système est capable de gérer des relations entre des entités et de maintenir l'intégrité de ces relations. Il permet d'éviter les difficultés de gestion de fichiers classiques, de type séquentiel indexé. Le SGBD-R intègre en natif des fonctions de gestion de données évoluées, capables d'automatiser toutes les tâches de « bas niveau » (maintenir les index, gérer les conflits d'accès, autoriser les annulations de modification, etc.) mais aussi d'assurer des fonctions de plus haut niveau (mise à jour d'enregistrements répondant à des critères spécifiques, fournir des résultats synthétiques utilisant des calculs statistiques et des regroupements, etc.).

Les informations issues des stations de surveillance sont structurées en plusieurs entités liées entre elles par des associations (cf. **Figure 39**). Chaque entité permet de regrouper les informations du même type sous la forme d'attributs, constituant le plus petit élément insécable d'information. Les principales entités sont :

- l'entité SITE, contenant l'ensemble des informations relatives aux sites instrumentés (nom, type d'instabilités, géologie, description, date de début et de fin d'instrumentation, etc.) ;
- l'entité RESEAU, permettant de différencier différents réseaux de mesure sur un même site. Cela peut correspondre à différents types de mesures (déformation, météo, sismiques, etc.) ou différentes implantations dans le cas notamment de grandes zones à surveiller ;
- l'entité CAPTEUR, contenant les caractéristiques des capteurs utilisés (date d'installation, réseau de rattachement, date d'étalonnage, type, étendue de mesure, précision, etc.) ;
- l'entité DONNEE, contenant toutes les mesures ;
- l'entité ALERTE, comprenant toutes les alertes et défauts issus de l'analyse des stations de surveillance ;
- l'entité OBSERVATION, regroupant toutes les informations renseignées par les différents acteurs de la surveillance. Le technicien en instrumentation y rentrera les dates et objets d'intervention et de maintenance, le géologue, des observations sur le contexte géologique et structural, le gestionnaire, des tests et acquittements d'alertes, etc.

La cardinalité d'un lien entre une entité et une association est le minimum et le maximum de fois qu'un enregistrement de l'entité peut être concerné par l'association. Elle peut être déterminée, et notée 0 ou 1, ou indéterminée, et notée n. On obtient ainsi un schéma entité-association complet (cf. **Figure 39**), qui modélise au mieux la problématique de surveillance sans être dépendant d'un logiciel. On remarque par exemple, que l'instrumentation réunit un ou plusieurs réseaux et capteurs et s'effectue sur un site et un seul. Chaque capteur peut effectuer des mesures mais chaque mesure ne fournira qu'une seule donnée. Ainsi, la surveillance d'un site générera des alertes sur l'un des réseaux et/ou capteurs du site.

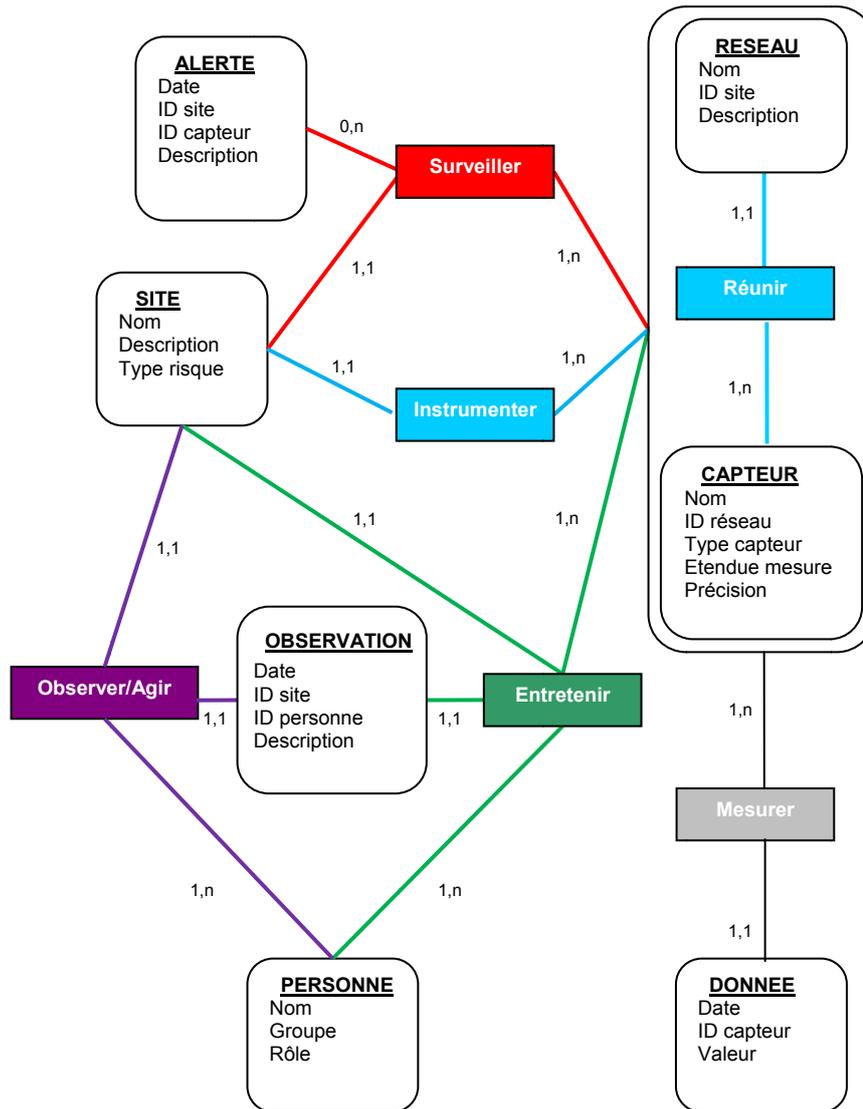


Figure 39 : Modèle conceptuel des données

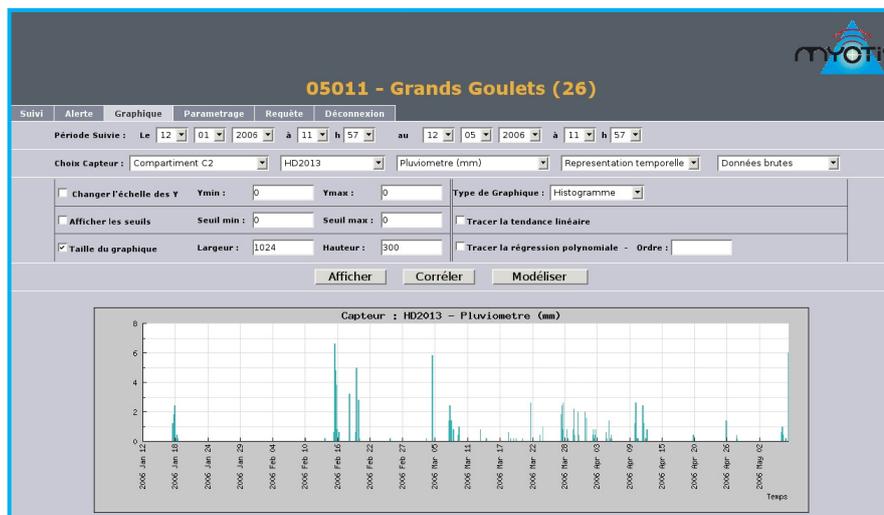


Figure 40 : Interface de supervision : outil d'analyse graphique

3.4. Interface de supervision

L'interface de supervision constitue l'applicatif partagé par tous les acteurs de la surveillance d'un site. Elle est hébergée sur le serveur MYRSA et est interrogeable par tous les clients par l'intermédiaire d'une adresse Internet.

Elle comporte trois pages. La page principale constitue le tableau de bord du site. Elle comprend un plan de localisation de l'instrumentation sur lequel sont matérialisés tous les capteurs par des icônes, dont la couleur s'adapte en fonction de l'état du capteur (alerte, normal, panne). Cette page intègre les dernières mesures réalisées pour l'ensemble des capteurs ainsi que la date et heure des dernières communications locales et distantes. Par ailleurs, cette page se remet à jour automatiquement et régulièrement afin de permettre aux gestionnaires de visualiser rapidement un résumé synthétique de l'état du système de surveillance (instruments et surveillance).

La deuxième page constitue l'outil d'analyse graphique des données (cf. **Figure 40**). Elle est préconfigurée pour visualiser l'évolution des derniers 30 jours sur tous les capteurs en un seul clic. Un formulaire permet à l'utilisateur de spécifier les différents paramètres graphiques qu'il souhaite afficher tels que la durée d'observation, l'échelle des graphiques, la tendance et la modélisation des données, la corrélation entre différents capteurs. En outre, des champs spécifiques à la base de données permettent d'effectuer des requêtes sur les mesures (par exemple, le nombre de valeurs au dessus d'un seuil, la distribution des signaux sismiques selon chacune des classes préconfigurées, etc.) ainsi que d'obtenir rapidement une synthèse statistique sur un échantillon de données (moyenne, min, max, écart type, etc.).

La troisième page est propre à la configuration du système de surveillance. Elle permet à l'utilisateur de paramétrer son système de surveillance en définissant et agençant chacun des éléments de l'instrumentation. La procédure de paramétrage est organisée par étape :

- en premier lieu, il faut définir un réseau de mesure auquel sera rattaché une station SAFIR ou un groupe de stations ;
- ensuite, il faut décrire chacun des capteurs de manière très précise (par exemple en indiquant son réseau de rattachement, le type de capteur, le type de mesure, l'étendue de mesure, la date d'étalonnage, la voie analogique, les coefficients de linéarité, la période d'échantillonnage, la période de sauvegarde, les paramètres d'alerte, etc.) ;
- la dernière étape permet de valider la configuration du système et de créer un fichier de configuration qui sera téléchargé sur la ou les stations SAFIR (opération effectuée en local ou à distance par télémaintenance).

Compte tenu du nombre important de paramètres de configuration à prendre en compte, la procédure de paramétrage peut sembler assez longue. Néanmoins, nous nous sommes efforcés de structurer l'interface de manière conviviale en y ajoutant des outils de vérification clairs afin d'orienter facilement l'utilisateur en cas d'erreur de paramètres. Par ailleurs, toutes les valeurs de configuration sont archivées dans la base de données MYRSABASE afin de conserver un historique détaillé de l'évolution instrumentale des sites.

Enfin, cette interface et ses outils d'aide ont été conçus de manière à être utilisés par tous les types d'utilisateur (gestionnaires, responsables, experts) même non spécialisés.

4. Eléments de réflexion pour la mise en place d'un système de surveillance

Ce que l'on définit habituellement par fiabilité d'un système réside dans sa capacité à remplir sa tâche d'acquisition, de surveillance et de transmission de l'alerte. Cette fiabilité du système de surveillance passe tout d'abord par la fiabilité des différents dispositifs le constituant, mais aussi, pour une grande part, de la fiabilité des liaisons permettant l'interopérabilité des dispositifs entre eux (cf. **Chapitre 3 §2.4**).

On a vu précédemment que la surveillance en temps réel, dans le sens de la gestion d'alerte, devait s'adapter à la cinématique du type d'instabilité surveillée, pouvant correspondre à plusieurs heures dans le cas d'une instabilité de versant et à moins d'une seconde pour des phénomènes brusques tels que la rupture d'un surplomb. Ainsi, la taille du réseau d'instrumentation est un élément primordial à prendre en compte dans la conception d'un système de surveillance. Dans le cas où le site à surveiller requiert un réseau d'instruments étalé et complexe, alors le système de gestion des alertes devra prendre en compte les délais de transmission, contrôle et traitement de l'information afin d'être capable de déclencher une procédure d'alerte dans un délai conforme au phénomène, ce qui constitue souvent la problématique la plus complexe.

Concernant l'équipement proprement dit, la fiabilité est assurée par un choix judicieux des composants électroniques : assurant un compromis équilibré entre robustesse (fonctionnement en milieu naturel difficile), précision, dynamique, et coût. Ensuite interviennent les phases de réalisation et d'installation du dispositif sur site. Or c'est au cours de cette dernière phase que se créent la majorité des désordres qui apparaîtront en phase d'exploitation. Par exemple, l'installation de capteurs en paroi, dans des endroits souvent difficiles d'accès, nécessite la plus grande rigueur. Il faut être vigilant pendant leur mise en place de manière à ne pas dégrader la mesure (qualité des scellements, de l'étanchéité des connexions, de la fixation des différents équipements). Dans le cas d'installation permanente (exploitation à long terme), les accès aux différents équipements doivent être facilités afin de rendre la maintenance la plus aisée possible.

Par ailleurs, l'installation d'un système de mesure dans un site isolé pose le problème de l'énergie, ceci étant particulièrement vrai lorsque l'on utilise des équipements consommateurs d'énergie tels que la radio. Le dimensionnement des panneaux solaires doit donc être calculé sur la base d'un fonctionnement dans les conditions météorologiques les plus défavorables s'étendant pendant une période suffisamment longue de manière à ne pas dégrader le système de surveillance.

Afin d'optimiser le fonctionnement de l'instrumentation et l'efficacité de la surveillance, nous avons implémenté dans la station SAFIR des fonctions de gestion automatique de l'alimentation. Ainsi, lorsque l'alimentation disponible est suffisante, la station fonctionne dans un mode dit « normal », c'est-à-dire que chaque dispositif fonctionne selon le mode pour lequel il a été programmé. Plusieurs modes dit « dégradés » sont par ailleurs programmés afin que le système adapte automatiquement son fonctionnement en cas d'insuffisance au niveau de l'alimentation. Lorsque la limite d'alimentation est atteinte et qu'un dysfonctionnement est atteint, les dispositifs d'alarme sont activés et un message est instantanément envoyé au service de maintenance. Grâce à ces fonctions, la station va être capable de diminuer automatiquement sa consommation journalière afin que la batterie puisse être rechargée plus rapidement. Nous évitons ainsi que la batterie franchisse son seuil critique de décharge nécessitant une intervention de maintenance sur site.

5. Conclusion

Le système de surveillance développé repose sur un modèle en toile, où chaque nœud est composé de notre station SAFIR associant mesure et surveillance. Ainsi, de par la redondance des liaisons de communication et la décentralisation de l'analyse du risque, le système développé constitue une nette amélioration des systèmes de surveillance classiques en étoile.

Par ailleurs, les caractéristiques de la station SAFIR ont été complétées par un algorithme de gestion d'alerte utilisant la logique floue. Compte tenu de l'ajout de fonctions spécifiques à la surveillance, un travail algorithmique conséquent a donc été réalisé afin d'éviter d'épuiser les ressources et performances de la station.

Ainsi la gestion d'alerte a été modélisée sous la forme d'un arbre décisionnel dont les nœuds s'agence selon des règles floues pour fournir des conclusions intermédiaires ou terminales.

Le recours à la logique floue s'avère particulièrement bien adapté lorsque qu'entrent en jeu une expertise, une prise de décision nuancée, la prise en compte de phénomènes non-linéaires, de paramètres subjectifs, voire de facteurs de décision contradictoires.

CHAPITRE 4 :

Application à la surveillance des instabilités rocheuses

Au cours de ce travail de recherche et dans le cadre des activités de la société MYOTIS, nous avons instrumenté plus de 16 sites concernés par une problématique d'instabilité gravitaire. Ces sites instables s'étendent dans toute la France, jusqu'aux falaises bordant la route RN1 sur l'île de la Réunion. Ils sont présentés dans le tableau de la page suivante (cf. **Tableau 3**).

SITE	ALEA	ENJEUX	INSTRUMENTATION	DATES
Morzine (74)	Écroulement plusieurs Mm ³	RD338 Rivière La Dranse Habitations	Extensométrie Convergence Écoute sismique	2008-en cours
La Turbie (06)	Éboulement 190m ³	Personnel chantier Habitations	Extensométrie	fév. 2008
Chamousset (38)	Éboulement 21000m ³	aucun	Extensométrie Écoute sismique	août-nov. 2007
Moutiers (73)	Écroulement plusieurs Mm ³	Voie ferrée RN90	Sismique	2006-en cours
Ile de la Réunion	Éboulement 2000m ³	RN1	Extensométrie	2006-en cours
Les Gets (74)	Éboulement 80m ³	Personnel chantier RD	Extensométrie	avr. 2006
Morzine (74)	Avalanches	VC1 Habitations	Acousto-sismique Météo	2005-en cours
Villeneuve Loubet (06)	Éboulement 80m ³	Personnel chantier RD2085	Extensométrie Inclinométrie	sept.-déc. 2005
Les Rousses (39)	Éboulement 150m ³	RD436	Extensométrie	juil. 2005- mars 2006
Tunnel Mont Blanc (74)	Glissement de terrain	Tunnel du Mont Blanc	Inclinométrie	mai 2005-nov. 2006
Les Grands Goulets (26)	Éboulement 3600m ³	Personnel chantier RD518	Extensométrie Météo Écoute sismique	2005-en cours
A40 – Nantua (01)	Éboulement	Autoroute A40	Fibre optique Extensométrie	2005-en cours
La Bourne (38)	Éboulement	Personnel chantier RD531	Extensométrie	mai-oct. 2004
Villefranche-sur-Mer (06)	Glissement de terrain	Personnel chantier Route basse corniche	Extensométrie	fév.-mars 2004
Mont Dore (63)	Coulée de boue	RD983 Habitations	Détecteurs chocs	jan.-juin 2004
Etampes (91)	Éboulement	Personnel chantier	Extensométrie	2004
Carrière St André (06)	Écroulement plusieurs Mm ³	Personnel exploitation	Tachéométrique Extensométrique	2003-en cours

Tableau 3 : Liste des sites instrumentés et surveillés entre 2003 et mars 2008 utilisant le système SAFIR-MYRSA

1. Systèmes de surveillance mis en œuvre pendant cette thèse

En application aux développements présentés précédemment dans ce mémoire, plus de 16 sites naturels ont été instrumentés avec notre architecture SAFIR-MYRSA, préalablement décrite. Les techniques instrumentales mises en œuvre sont principalement l'extensométrie, la mesure météorologique et l'écoute sismique. Ces instrumentations ont toutes pour objet la surveillance et la sécurisation d'un site vis à vis d'un aléa de type instabilité gravitaire. Les systèmes de télésurveillance avec gestion de la sécurité mis en œuvre l'ont été soit de manière temporaire dans l'attente de travaux de confortement, soit dans le cadre d'une surveillance permanente lorsque d'autres types de protections n'ont pu être envisagées. Un site fait néanmoins exception : il s'agit de l'auscultation de l'écaille de Chamousset qui ne concerne aucun enjeu et qui a été réalisée avant tout dans un objectif d'étude et de recherche.

Dans ce chapitre d'applications, nous avons choisi de présenter plus particulièrement les deux sites suivants :

- Chamousset (Vercors sud, 38) : auscultation d'une écaille rocheuse ;
- Gorges des Grands Goulets (Vercors nord, 26) : surveillance d'un compartiment rocheux.

Ces deux sites présentent certaines similitudes :

- un aléa similaire de type instabilité rocheuse et présentant un mécanisme de rupture brutale ;
- une instrumentation comprenant le même type d'équipement, à savoir la mesure des déformations et des paramètres météorologiques et un dispositif d'écoute microsismique.

Néanmoins, la grande différence entre ces deux sites est que l'écaille de Chamousset s'est éboulée en novembre 2007 et que le compartiment des Grands Goulets est, à ce jour, toujours en place.

Nous proposons donc d'étudier avec un intérêt particulier les signaux précurseurs de l'éboulement de Chamousset de manière à pouvoir utiliser le retour d'expérience acquis pour l'instabilité des Grands Goulets.

2. Auscultation de l'écaille rocheuse de Chamousset (Vercors)

L'intérêt de cette première application repose sur le fait que cette instabilité s'est éboulée pendant la période d'étude. L'étude de l'écaille rocheuse de Chamousset est partiellement transposable à l'appréhension de l'évolution de la masse rocheuse C2 des Grands Goulets, dont l'étude sera présentée ci-après. Elle présente par ailleurs des similarités avec l'étude de la falaise crayeuse instable de Mesnil-Val, en Normandie (Senfaute et al., 2003 ; Amitrano et al., 2005) ainsi qu'avec l'étude du massif rocheux instable de Randa (Spillmann et al., 2007).



Figure 41 : Écaille de Chamousset vue vers le Sud (Photo P. Mourot 01/08/2007)

Suite à l'observation d'un garde du Parc du Vercors de l'ouverture croissante de la fracture sommitale de l'écaille (**Figure 41**), nous avons installé, durant l'été 2007, une instrumentation composée à la fois d'un dispositif de mesure des déplacements et d'un dispositif d'écoute micro-sismique.

2.1. Contexte géographique et géologique

Le Massif du Vercors est constitué principalement de roches sédimentaires dont la morphologie a été sculptée par la formation des Alpes et l'érosion post-glaciaire qui lui ont donné ce relief original (lapiaz, dolines, cavités) et encaissé (Gorges de la Bourne et de la Vernaison).

La zone étudiée se situe dans le Trièves, à environ soixante kilomètres au Sud de Grenoble. L'écaille rocheuse de Chamousset était accrochée à la falaise de la barrière orientale du Massif du Vercors, au niveau de la Tête Chevalière (1951 m.). Surplombant le village de Chichilianne, cette longue barrière borde les hauts plateaux de la partie méridionale du massif. On remarquera en effet, qu'à partir du Pas de l'Aiguille, les falaises urgoniennes du Nord Vercors ont laissé place au calcaire à forte prédominance marneuse du Barrémien (Figure 42).

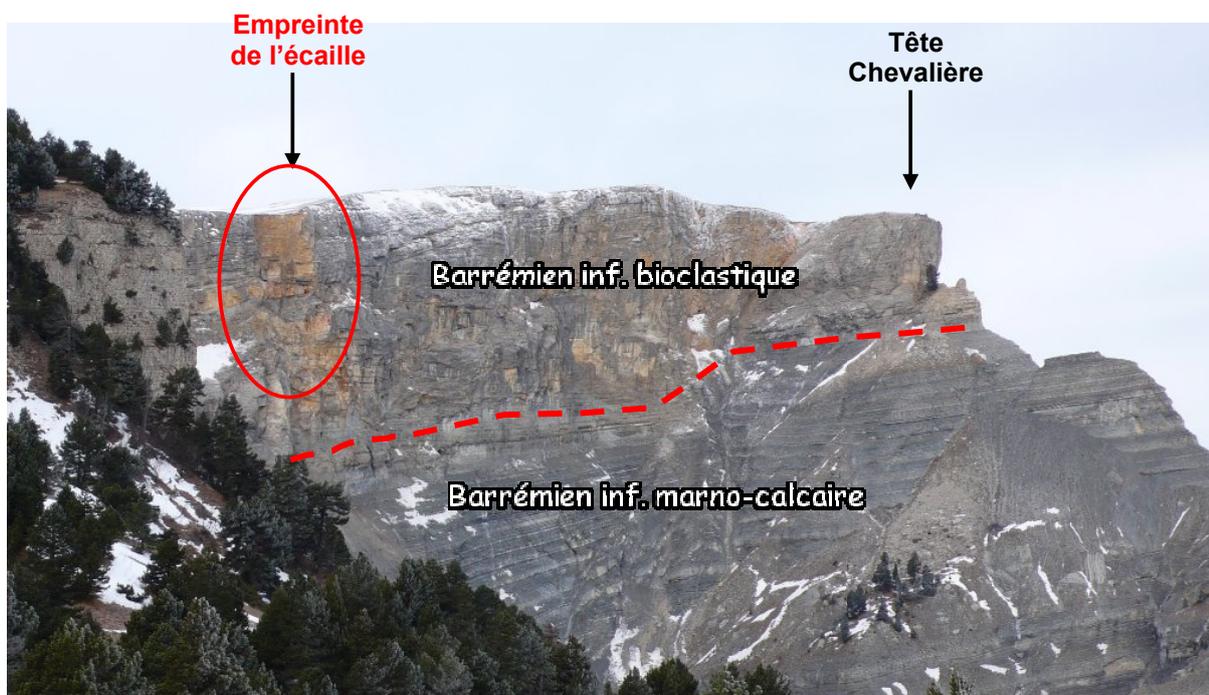


Figure 42 : Falaise de la Tête Chevalière vue du Pas de l'Essaure après l'éboulement de l'écaille (Photo P. Mourot, 26/11/2007)

La falaise se divise en deux formations. La partie supérieure est constituée d'une roche calcaire très fracturée, dont le relief escarpé est le siège de nombreuses instabilités. Elle repose sur un épais banc à alternance de calcaires et marnes, modelé en petits ressauts qui couronnent d'abruptes ravines ouvertes (Figure 42). Le talweg à l'aplomb de la barre rocheuse présente de nombreux blocs de toutes tailles attestant d'un phénomène de chute de blocs très actif.

L'écaille de Chamousset est délimitée du bord de la falaise par une fracture d'origine tectonique de direction Nord-Sud, dont l'ouverture approximative en surface s'étendait, au début de l'auscultation, sur 80 cm de large sur 30 m de long (Figure 41). Cette fracture découpe le massif en profondeur par un plan subvertical et parallèle à la falaise. On peut noter par ailleurs que cette fracture se retrouve plus au Sud, où elle découpe la bordure du plateau isolant d'autres instabilités rocheuses.

Deux vols héliportés avant et après l'éboulement ont permis d'une part de photographier la zone étudiée (Figure 43 et Figure 44) et d'autre part de réaliser deux levés LIDAR de la falaise qui ont permis de cartographier l'écaille en trois dimensions et d'estimer ainsi un volume éboulé à environ 21 000 m³ (Annexe C-4).



Figure 43 : Photographie de l'échelle avant l'éboulement (Photo LGIT)



Figure 44 : Photographie de l'échelle après éboulement (Photo LGIT)

2.2. Instrumentation

2.2.1. Description de l'instrumentation

L'instrumentation (**Tableau 4**), décidée en urgence et réalisée avec de très faibles moyens, a été mise en place le 1^{er} août 2007. Elle se compose de deux capteurs extensométriques fixés à l'intérieur de la fracture et d'une petite antenne sismique installée en surface le long de la fracture sommitale (**Figure 45**). Tous les capteurs sont reliés à une seule station SAFIR qui enregistre les données en continu sur un disque dur. L'alimentation du dispositif est délivrée par une batterie 12 V rechargée par un panneau solaire de 18 W. L'installation n'est pas télémétrée.

Suite à différents problèmes techniques et face à l'évolution de l'instabilité, l'instrumentation a été modifiée le 11/10/2007, avec notamment :

- le remplacement de l'extensomètre nord qui était arrivé en bout de course, par un autre de course supérieure afin d'adapter l'étendue de mesure du capteur à la vitesse d'ouverture de la fracture ;
- l'ajout de trois géophones verticaux 4,5 Hz en complément du géophone trois composantes.

Le dispositif a été démonté le 26/11/2007 suite à l'éboulement de l'écaille.

CAPTEUR	NOMBRE	TYPE	PERIODE ENREGISTREMENT	OBJET
Extensomètre Sud	1	potentiométrique à câble EM=100mm, linéarité=0,1%	Continue 1000 Hz Rééch 5 min	Mesure de l'ouverture de la fracture
Extensomètre Nord	1	potentiométrique à câble EM=100mm puis 375mm, linéarité=0,1%	continue 1000 Hz Rééch 5 min	Mesure de l'ouverture de la fracture
Géophone (GeoNd, GeoSd, GeoEc)	3	4,5Hz, verticale EM [0,1:0,4] mm/s	continue 1000 Hz	Ecoute micro-sismique
Géophone (Geo3d)	1	4,5Hz, 3D EM [0,1:0,4] mm/s	continue 1000 Hz	Ecoute micro-sismique

Tableau 4 : Descriptif de l'instrumentation de l'écaille de Chamousset

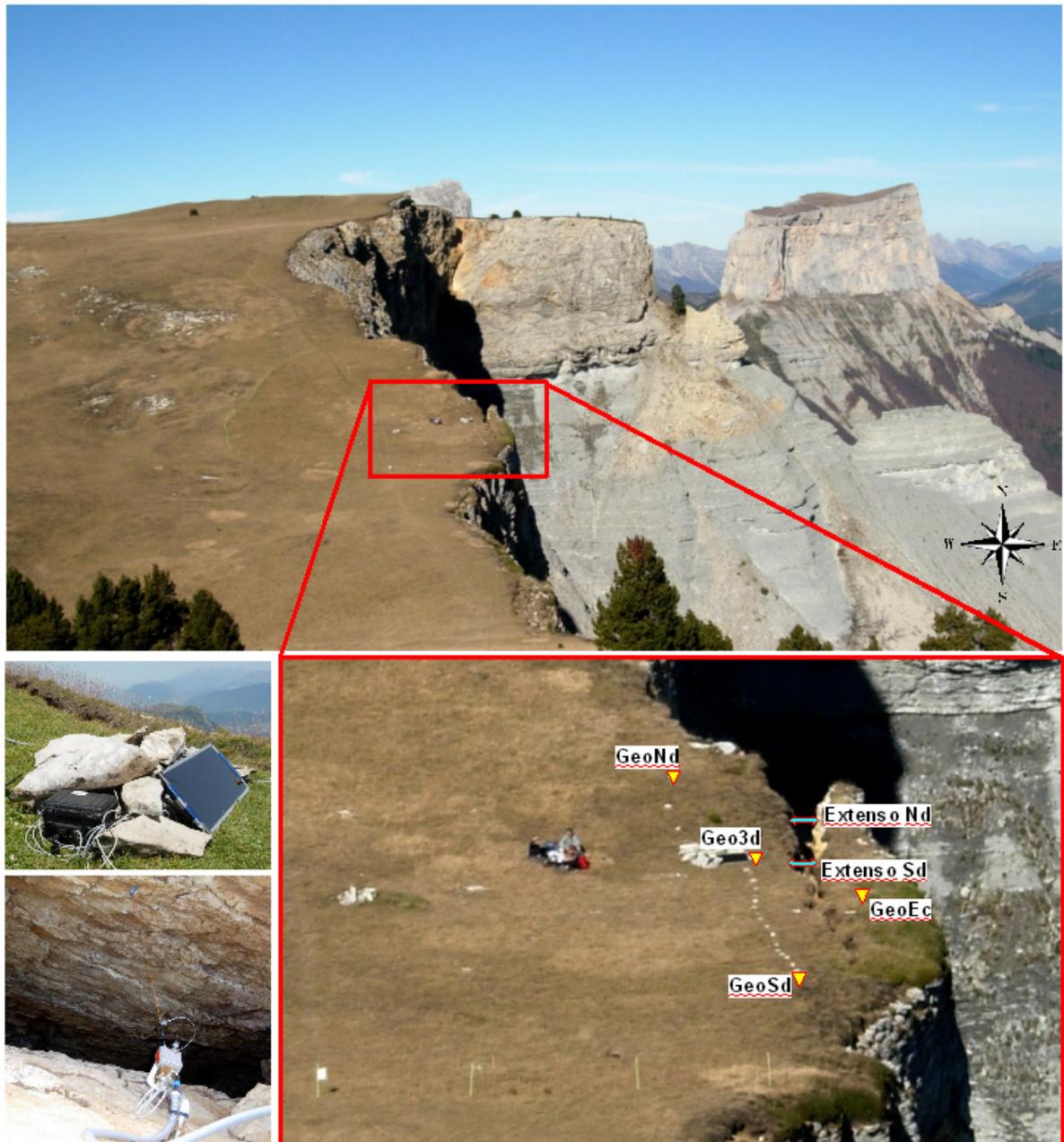


Figure 45 : Localisation et instrumentation de l'écaille de Chamousset
(haut) Panorama de l'écaille de Chamousset avec Mont Aiguille,
(bas droite) Localisation des capteurs,
(bas gauche) Station de mesure avec son panneau solaire et capteur extensométrique (Extens o Nd) situé dans la fracture arrière de l'écaille

Les extensomètres se composent d'un capteur potentiométrique à câble en inox (coefficient de dilatation thermique $\lambda_1 = 25.10^{-6} / ^\circ\text{K}$) montés avec une tresse en polyuréthane de 75 cm (coefficient de dilatation thermique $\lambda_2 = - 4,8.10^{-6} / ^\circ\text{K}$). Le montage extensométrique réalisé garantit un coefficient de dilatation faible (inférieur à $5.10^{-6} / ^\circ\text{C}$) et un biais maximal de l'ordre de 0,1 mm. Cependant le biais principal ne provient pas de la dilatation, mais de la dépendance de la résistance mesurée (à l'aide d'un montage en pont diviseur de tension) envers la température. En effet le coefficient de dérive en température de la résistance est donné par le constructeur à $25.10^{-6} / ^\circ\text{K}$. Dans le cas de l'extensomètre nord, la course maximale est de 375 mm et la résistance de 10 k Ω . La variation de la résistance est donc de 0,25 $\Omega/^\circ\text{K}$, ce qui correspond à une variation de longueur mesurée de $10^{-2} \text{ mm}/^\circ\text{K}$. Une amplitude thermique de 20 $^\circ\text{C}$ provoque donc une variation de longueur mesurée de 0,2 mm. Dans le cas de l'extensomètre sud, la course maximale est de 100 mm et la résistance de 5 k Ω . On trouve alors une variation de longueur mesurée de $2,5.10^{-3} \text{ mm}/^\circ\text{K}$ soit 0,05 mm pour une amplitude thermique de 20 $^\circ\text{C}$. En cumulant les biais d'origines mécanique et électrique, on peut estimer l'ordre de grandeur du biais d'origine thermique à une valeur de $\pm 0,2 \text{ mm}$ pour l'extensomètre nord, et environ $\pm 0,1 \text{ mm}$ pour l'extensomètre sud pour une amplitude thermique de $\pm 10^\circ\text{C}$ autour de la température moyenne.

2.2.2. Synthèse de fonctionnement

L'instrumentation a rencontré plusieurs dysfonctionnements dus à une succession de problèmes d'alimentation. De plus, l'absence de télémétrie et l'isolement du site ne nous ont pas permis de suivre au plus près le fonctionnement du dispositif et de remédier aux pannes rapidement. Les problèmes rencontrés sont liés d'une part au mode d'auscultation discontinue ainsi qu'à l'isolement du site.

Le tableau suivant représente les périodes de fonctionnement de l'instrumentation (Tableau 5).

INTERVENTIONS	<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">01/08/07 ↓</div> <div style="text-align: center;">10/10/07 ↓</div> <div style="text-align: center;">27/10/07 ↓</div> <div style="text-align: center;">05/11/07 ↓</div> </div>														
SEMAINE	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
FONCTIONNEMENT															

Tableau 5 : Période de fonctionnement de l'instrumentation et chronogramme des interventions

L'auscultation a été interrompue à trois reprises à cause de l'épuisement des ressources de la batterie :

- la première interruption (sem. 33) est due à une défaillance du régulateur solaire qui ne permettait pas la recharge de la batterie ;
- la deuxième interruption (sem. 44) est due à l'insuffisance de la capacité du panneau solaire. En effet, la réduction de l'ensoleillement due au changement de saison et au mauvais temps soudain ne permettait plus de recharger la batterie. Un panneau solaire a donc été ajouté au dispositif et la batterie remplacée ;

- lors de notre intervention du 27 novembre 2007, nous avons d'une part pu constater que l'écaille s'était éboulée mais aussi que la station s'était arrêtée le 10 novembre suite à un défaut d'alimentation, causé par la neige qui avait totalement recouvert les panneaux solaires.

2.3. Auscultation du mouvement de l'écaille

La fracture arrière de l'écaille, ouverte sur environ 80 cm, a été instrumentée par deux capteurs de déplacement (extensomètres). Les mesures extensométriques ont été réalisées à la même fréquence d'échantillonnage (1000 Hz) que les données sismiques. Les extensomètres sont arrivés en bout de course après deux mois d'auscultation. La rapide évolution de l'écaille (environ 1,5 mm/jour), nous a amenés à changer le capteur nord de course 100 mm par un autre de course 375 mm afin d'éviter de se retrouver rapidement en butée de mesure. L'inconvénient d'augmenter l'étendue de mesure du capteur est que le biais sur la mesure de l'ordre de $\pm 0,1$ mm pour le capteur de course 100 m passe à $\pm 0,2$ mm pour le capteur de 375 mm.

2.3.1. Influence météorologique

Afin de rechercher si l'évolution de l'instabilité présentait une corrélation avec les conditions météorologiques, nous avons comparé l'ouverture de la fracture aux mesures de température et de pluviométrie de la station météorologique du Jardin du Roi (altitude 1740 m) située sur le Plateau du Vercors à environ 4 kilomètres au Sud de l'écaille (**Figure 46**). On remarque tout d'abord que les pluies d'août n'influencent pratiquement pas l'ouverture de la fracture. Sur une période aussi courte d'auscultation, il est néanmoins difficile de conclure avec certitude quant à l'influence de la pluviométrie sur l'instabilité de la masse rocheuse même si l'expérience montre que les précipitations influencent fortement le déclenchement des instabilités [Durville, 2004]. Par contre, nous observons une nette accélération des déplacements sur les deux capteurs extensométriques suite à un épisode de gel-dégel (période du 22-23 octobre 2007). Phénomène que l'on observe à nouveau juste avant l'éboulement. En effet, d'après les mesures de température, on note qu'une longue période de gel s'est installée à partir du 8 novembre, atteignant un minima de -12°C le 16 novembre. Puis, la température remonte brutalement à 0°C le 17 novembre pour descendre à nouveau dans la nuit à -7°C . Le 18 novembre, le temps se radoucit nettement avec des températures autour de 3°C , redoux qui se poursuit jusqu'au 24 novembre favorisant ainsi la pluie et/ou les chutes de neige comme le montre le graphique de la pluviométrie (**Figure 46**). La rupture a eu lieu entre le 10 et le 27 novembre 2007. Cet épisode climatique constitue peut-être le facteur déclencheur de la rupture.

2.3.2. Variations à moyen et long terme des données extensométriques

Les données extensométriques sont généralement utilisées pour suivre la dynamique à moyen et long terme de la zone instable instrumentée. Dans notre cas, les données acquises initialement à 1000 Hz sont moyennées sur une durée de 5 minutes (30000 échantillons) et donc ré-échantillonnées à cette période, ce qui permet de filtrer (passe-bas) les éventuelles oscillations courtes périodes et de diminuer la composante aléatoire du bruit de mesure d'un facteur d'environ 500.

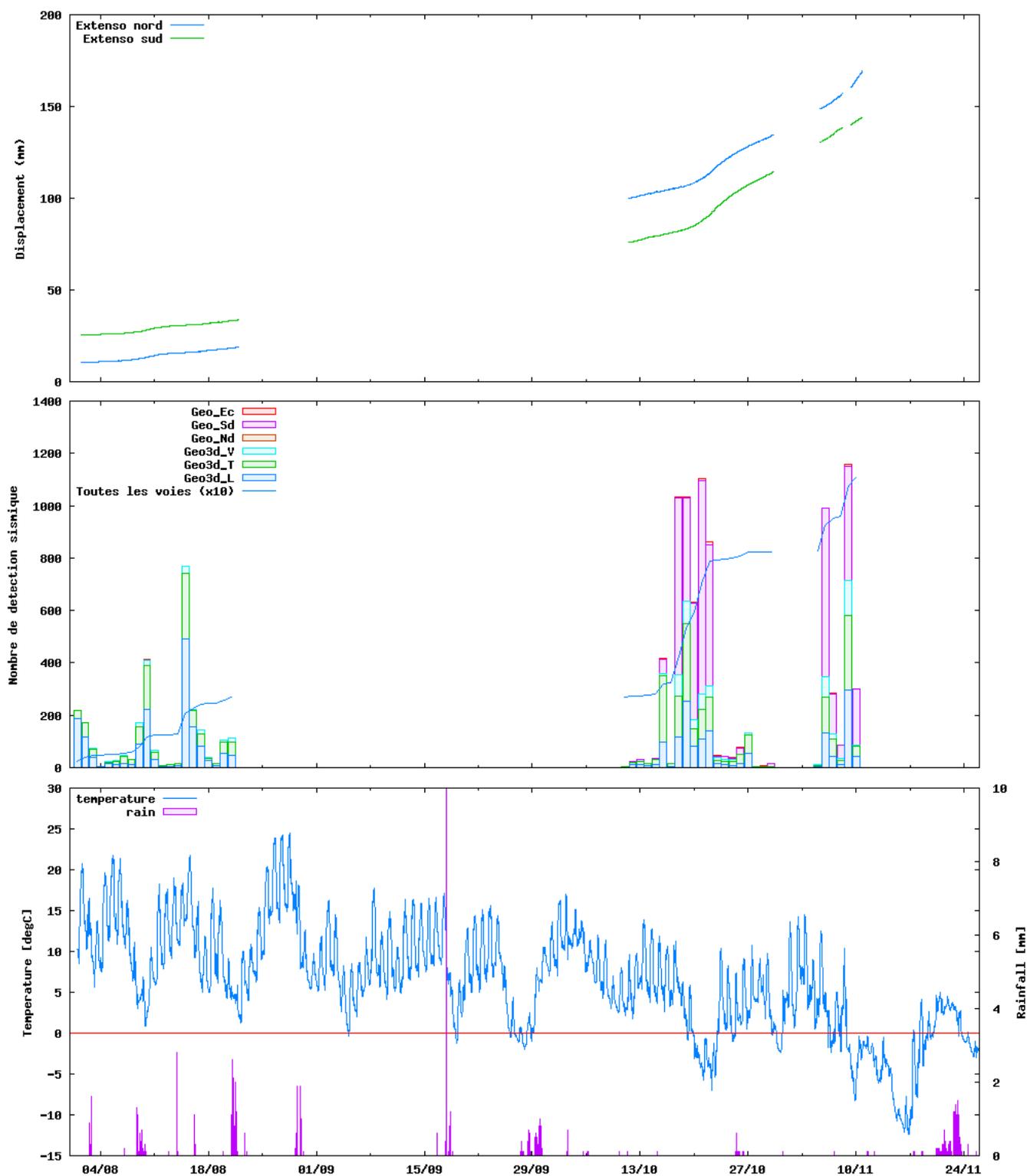


Figure 46 : Séries temporelles des mesures effectuées sur l'écaille de Chamousset
 (haut) Déplacement (en mm) en fonction du temps (bleu : extensomètre N ; vert : extensomètre S) ;
 (milieu) Histogrammes : nombre de séismes par jour, en fonction du temps, pour chaque capteur (bleu clair :
 géophone 3C, composante verticale ; bleu foncé, géophone 3C, composante N-S ; Vert : géophone 3C,
 composante E-W ; mauve : géophone S ; rouge : géophone Ecaille ; brun : géophone N) ;
 Courbe bleue : nombre de séismes cumulés, en fonction du temps.
 (bas) Mesures météorologiques du Jardin du Roi (4km au sud de l'écaille) ; courbe bleue : température
 en °C ; courbe mauve : hauteur journalière d'eau de pluie en mm.

La représentation temporelle des données extensométriques montre, tout d'abord, une augmentation régulière, pendant toute la durée de l'expérience, de la distance entre les deux lèvres de la fracture séparant le massif de l'écaïlle (**Figure 46**). La distance maximale mesurée est de 160 mm pour l'extensomètre nord et de 120 mm pour l'extensomètre sud, obtenue en une centaine de jours, soit environ 1 à 2 mm par jour en moyenne. On note par ailleurs, que cette augmentation de l'écartement tend à s'accroître avec le temps. Sur l'ensemble de la période étudiée, les données peuvent être ajustées à l'aide d'un modèle en t^2 (**Figure 47**). D'autres variations temporelles ont été observées, qui se manifestent par des accélérations limitées dans le temps : du 07/08 au 13/08 et du 20/10 au 27/10. Ces accélérations correspondent à des périodes de nano-sismicité plus intenses. Enfin, les deux extensomètres montrent les mêmes variations temporelles de la distance mesurée (**Figure 46**).

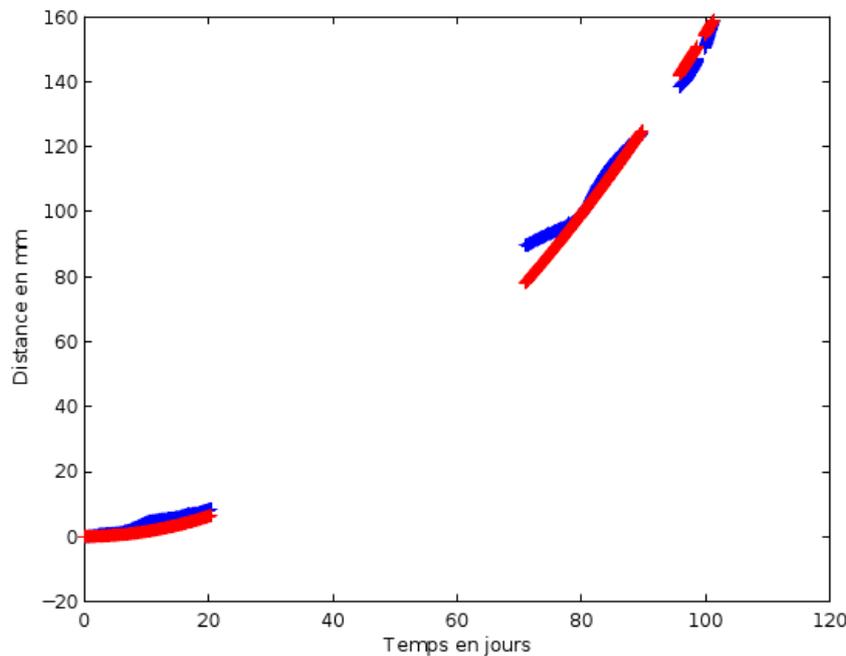
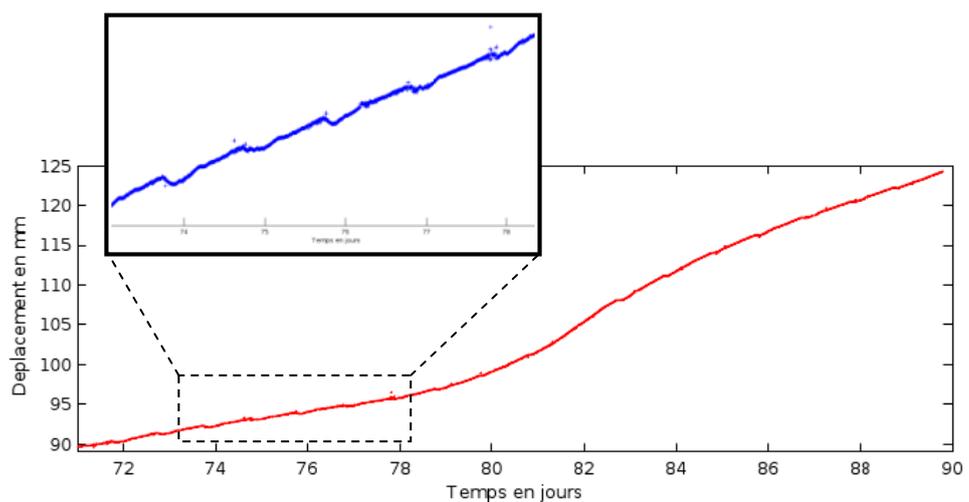
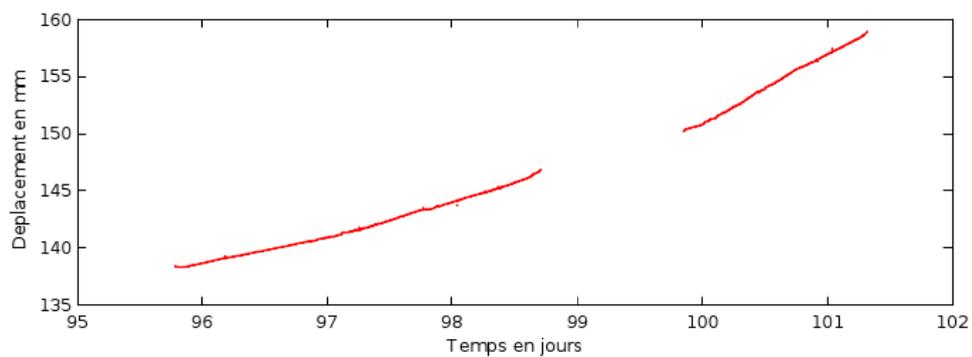


Figure 47 : Déplacement mesuré (extensomètre Nord, bleu) et ajustement en t^2 (rouge)

Pour caractériser la variation à long terme des mesures extensométriques, il est utile de représenter la vitesse relative de l'écaïlle par rapport au massif. Certains auteurs proposent, par exemple, d'estimer le temps restant à la rupture en représentant l'inverse de la vitesse en fonction du temps [Voight, 1988, Effendiantz et Rocher, 2000]. La représentation de la vitesse de l'écaïlle (**Figure 48**) fait apparaître une complexité plus grande du signal extensométrique à court terme. Elle montre parfois des variations périodiques journalières, correspondant à des variations d'amplitude crête à crête en déplacement d'environ 0,4 mm, dont l'ordre de grandeur est proche de celui du biais d'origine thermique. Ces variations sont plus marquées pendant la période où les amplitudes thermiques sont les plus importantes (**Figure 48a**). Une représentation de la vitesse moyenne en fonction de l'heure de la journée (**Figure 50**) montre une dépendance de la vitesse avec l'heure de la journée, notamment au mois d'octobre, où l'amplitude thermique est la plus importante. De telles variations du signal extensométrique, de faible amplitude et à moyen terme ne peuvent être interprétées sans correction de l'effet thermique. Les données extensométriques montrent également d'assez fortes variations non-périodiques durant le mois de novembre (**Figure 48b**).



(a) octobre 2007



(b) novembre 2007

Figure 48 : Déplacement et vitesse du mouvement de l'écaille
(a) mois d'octobre 2007 (b) mois de novembre 2007

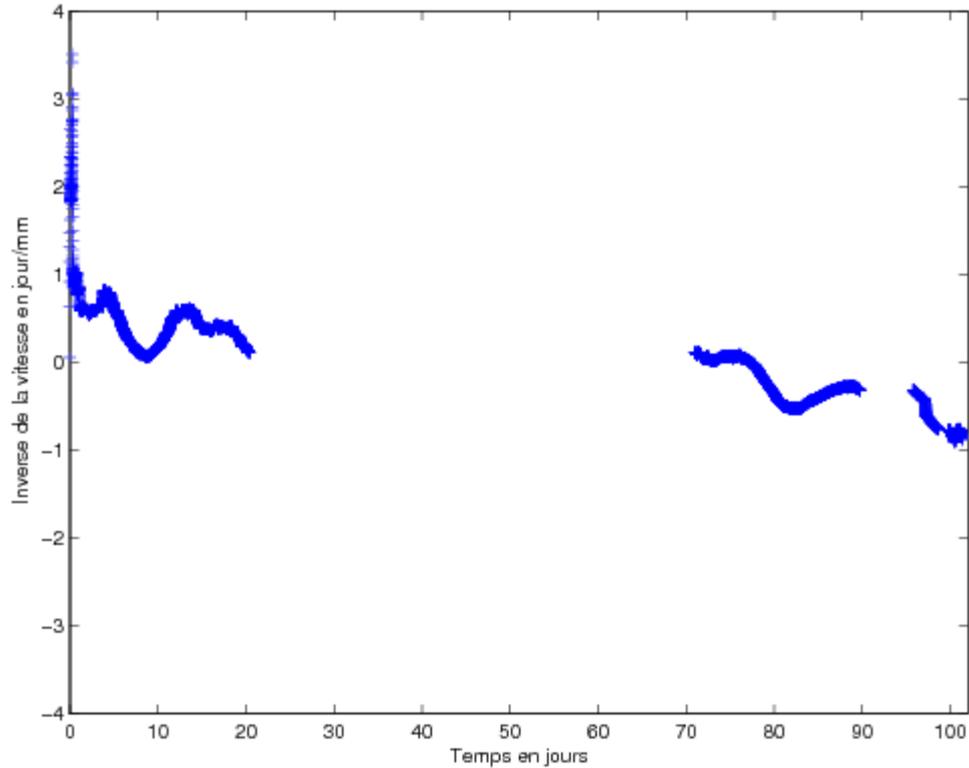


Figure 49 : Logarithme de l'inverse de la vitesse de déplacement en fonction du temps (extensomètre N)

On voit donc que la vitesse mesurée montre des variations importantes, d'origines et d'échelles temporelles variées. Pour utiliser l'approche de Voight (1988), il est nécessaire de lisser suffisamment les mesures. Nous avons donc choisi de lisser la vitesse calculée sur 72 h. La représentation de l'inverse de la vitesse (**Figure 49**), montre bien une diminution moyenne de l'inverse de la vitesse en $t^{-\alpha}$, α restant proche de 1 ($\alpha \in [0,61;1,30]$), ce qui est cohérent avec une accélération constante du mouvement. L'inverse de la vitesse montre également de fortes fluctuations, concomitantes avec une augmentation de la pluviométrie (en août) ou une période de gel (en octobre). Ces observations montrent que plusieurs causes concourent à l'augmentation de la vitesse et rend délicate l'utilisation de l'approche de Voight (1988) sur ce type d'instabilité de petite échelle. L'amplitude des fluctuations sur la tendance moyenne à long terme donne en effet une mesure de l'incertitude que l'on peut obtenir sur une estimation du temps restant à la rupture soit à l'aide de la tendance à long terme, soit à partir des fluctuations à moyen-court terme.

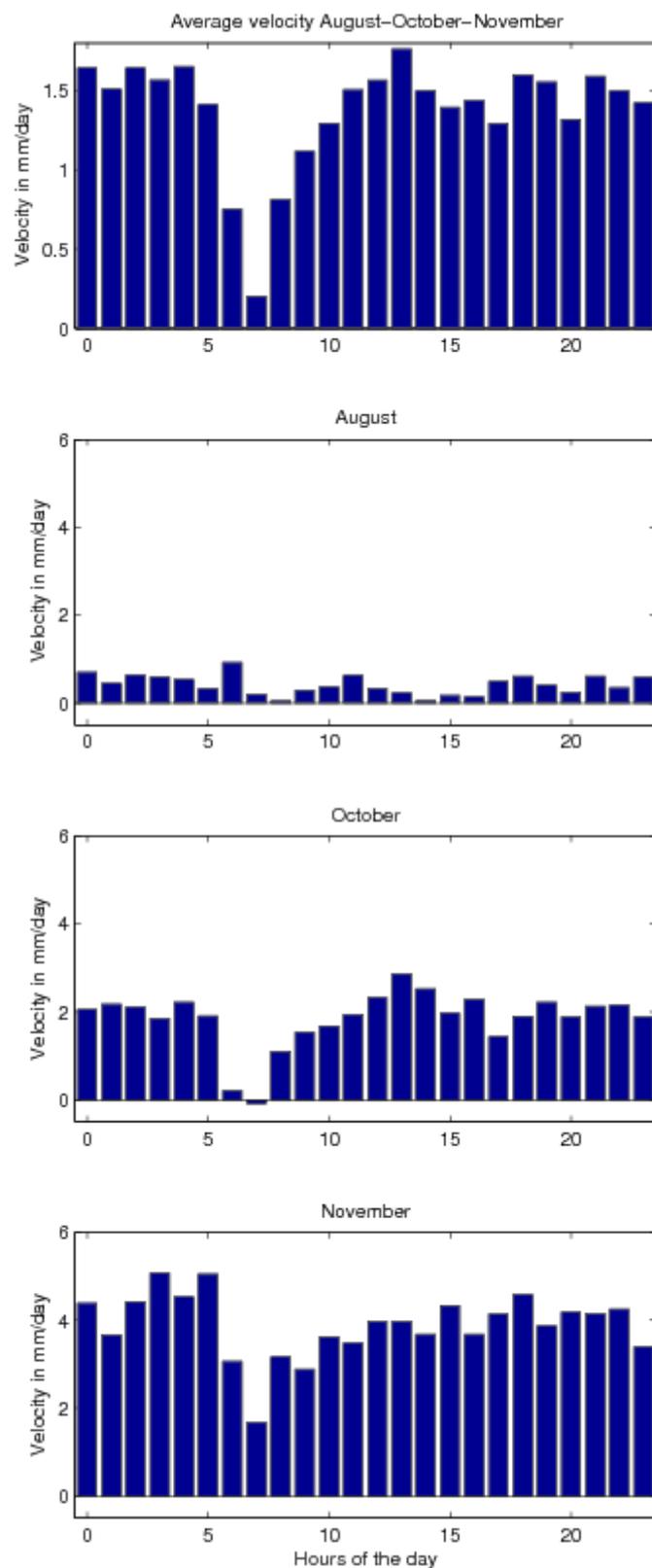


Figure 50 : Histogrammes des vitesses du mouvement relatif écaïlle-massif, en fonction de l'heure de la journée : (a) moyenne des vitesses sur la période d'acquisition ; (b) vitesses pour le mois d'août ; (c) vitesses pour le mois d'octobre ; (d) vitesses pour le mois de novembre.

2.3.3. Variations à court terme des données extensométriques

Bien que le signal extensométrique soit généralement considéré comme variant lentement, au moins à l'échelle de plusieurs heures, il nous a paru tout de même intéressant d'examiner le signal « brut » échantillonné à 1000 Hz (**Figure 51**).

Ce signal brut révèle, de façon a priori étonnante, une variation sinusoïdale qui domine le signal. Ce signal perdure plus ou moins pendant toute la période d'observation. La fréquence de ce signal sinusoïdal varie entre 0,1 et 5 Hz, et son amplitude est de l'ordre de 1,5 mm (3 mm crête à crête). Cette amplitude est par conséquent significative compte tenu de la précision de mesure de l'ordre de $\pm 0,2$ mm. Ce signal pourrait provenir d'une vibration d'origine instrumentale, par exemple de la vibration du câble extensométrique. En effet, il s'agit du dispositif le plus long de l'extensomètre, tendu, suivant les courses, entre 5 à 7 N. La fréquence du mode fondamental d'une corde tendue avec une tension T , de masse linéique μ et de longueur L est définie par :

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (4.1) \quad \text{Rmq. : la corde étant fixée à ses deux extrémités, sa longueur correspond à une demi-longueur d'onde}$$

Pour une tension nominale de 5 à 7 N, une masse linéique de 1 à 1,5 g/m et une longueur de 1 m on trouve une fréquence propre de l'ordre de 30 à 40 Hz, soit une période de 0,025 à 0,03 s bien inférieure aux périodes mises en évidence dans le signal.

Un périodogramme lissé a donc été calculé sur une fenêtre de 60 secondes de signal, le 18 octobre, de façon à faire apparaître l'ensemble des fréquences qui peuvent être contenues dans le signal extensométrique. Les résultats (**Figure 51**) montrent un spectre de raies jusqu'à 500 Hz. L'une d'entre elles a une amplitude 8 fois plus importante que les autres, à une fréquence d'environ 0,2 Hz, qui correspond à la fréquence observée directement dans le signal extensométrique temporel.

Parmi les autres raies, on note un ensemble de raies équidistantes en fréquence, l'intervalle étant de 35 Hz. Cet ensemble ressemble fortement à un groupe d'harmoniques. On trouve effectivement une fréquence à 35 Hz, d'amplitude à peu près équivalente aux harmoniques supposées, qui pourrait être celle du mode fondamental. Cette fréquence correspond justement à la fréquence calculée (Equation 4.1). Etant donné l'écart existant entre la fréquence de 0,2 Hz (période de 5 s bien visible sur le signal temporel) et celles de 35 Hz, la question se pose de savoir si la fréquence de 0,2 Hz n'est pas significative d'une oscillation de l'écaille.

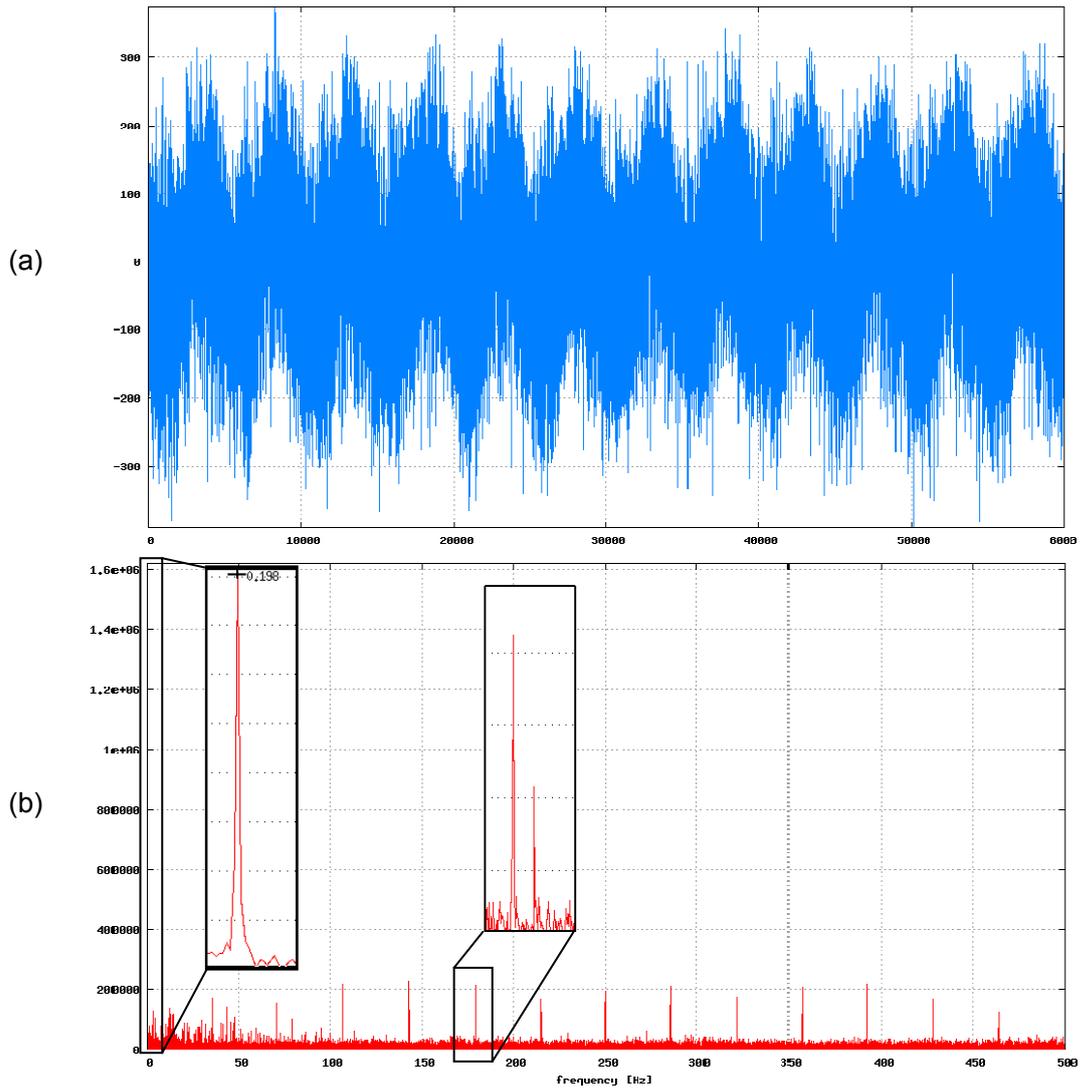


Figure 51 : Mesures extensométriques échantillonnées à 1000 Hz pour une durée de 60 s
 (a) Signal en fonction du temps, en millisecondes (b) Spectre avec zoom sur fréquences 0,2 Hz et 178 Hz

2.4. Analyse du mouvement de l'écaille

2.4.1. Analyse des variations des oscillations de l'écaille à court terme

Par la suite, nous avons examiné la possibilité que cette oscillation dominante de période 5 secondes (observée par exemple le 18 octobre dans le signal extensométrique), soit liée à la variation de distance entre les deux lèvres de la fracture, c'est-à-dire à l'oscillation de l'écaille instrumentée. On rappelle que les dimensions caractéristiques de l'écaille sont de l'ordre de 3 à 15 m d'épaisseur, 100 m de hauteur, 60 m de largeur (**Annexe C-4**). La période de 5 secondes peut-elle être une période propre de l'écaille ? Dans le cas où l'écaille oscille, on peut faire l'hypothèse qu'elle le fait sous l'action de son poids et d'une force de rappel élastique. Pour discuter des ordres de grandeur et des relations entre les grandeurs caractéristiques, il est pratique de concevoir un modèle simple. On peut pour cela proposer un modèle de pendule de torsion à axe de rotation horizontal (**Figure 52**).

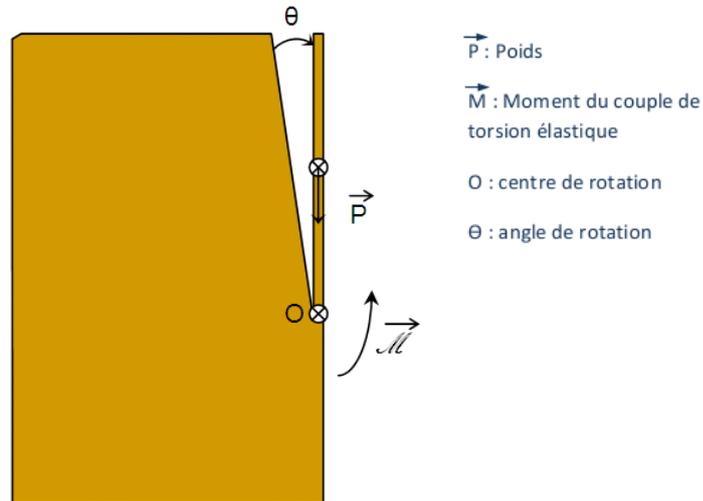


Figure 52 : Représentation schématique du modèle de l'écaille proposé : pendule de torsion à axe horizontal

L'équation d'un tel mouvement est, pour de petites variations de θ :

$$\ddot{\theta} + \frac{C - \frac{mgh}{2}}{J} \theta = 0 \quad (4.2)$$

où m est la masse de l'écaille, h sa hauteur, g l'intensité de l'accélération de la pesanteur, C la constante de torsion du pendule équivalent, et J le moment d'inertie de l'écaille par rapport à son axe de rotation supposé être à sa base et horizontal.

Le terme $C\theta$ correspond à la force de rappel élastique représentant la résistance (à court terme) de la roche à l'arrachement de l'écaille.

Les solutions de cette équation dépendent du signe du terme $C - \frac{mgh}{2}$:

- si $C < \frac{mgh}{2}$ les deux racines de l'équation caractéristique (4.2) sont réelles et la solution est une combinaison de fonctions exponentielles ; si à l'instant initial $\theta = \theta_0$ et $\dot{\theta}_0 = 0$ alors :

$$\theta = \theta_0 \cosh \sqrt{\frac{\frac{mgh}{2} - C}{J}} t \quad (4.3)$$

Cette solution correspond au cas où la résistance des ponts rocheux n'est pas suffisante pour retenir l'écaille, celle-ci se décroche.

- si $C > \frac{mgh}{2}$ les deux racines de l'équation caractéristiques sont imaginaires et la solution est une fonction sinusoïdale ; si à l'instant initial $\theta = \theta_0$ et $\dot{\theta}_0 = 0$ alors :

$$\theta = \theta_0 \cos \sqrt{\frac{C - \frac{mgh}{2}}{J}} t \quad (4.4)$$

Dans ce dernier cas l'écaille prend un mouvement oscillatoire de période :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{C - \frac{mgh}{2}}} \quad (4.5)$$

On peut en déduire une constante $C = \frac{mgh}{2} + \frac{4\pi^2}{T^2} J$ (4.6)

On voit donc que la résistance élastique de la roche tend à diminuer lorsque la période augmente à hauteur d'écaille constante.

Pour une hauteur de l'écaille (supposée triangulaire) $h \sim 100$ m, une épaisseur de 10 m et une largeur à la base de 100 m on trouve un volume de 5.10^4 m³ et donc une masse de l'ordre de 10^8 kg et un moment d'inertie :

$$J = \frac{1}{3} m h^2 \quad \text{de l'ordre de } 5.10^{11} \text{ kg.m}^2$$

en considérant l'écaille comme une plaque rectangulaire en rotation par rapport son côté de base, horizontal.

On peut en déduire une constante C également de l'ordre de 5.10^{11} N.m. La fracture étant ouverte à son sommet d'environ 1 m, le moment de rappel élastique correspondant est de l'ordre de 5.10^9 N.m. La force de traction équivalente, appliquée au centre de gravité et provoquant ce moment est de l'ordre de 10^8 N. Si cette force est appliquée sur une surface de 5.10^3 m², la contrainte de traction appliquée est de l'ordre de 2.10^4 Pa, ce qui est de l'ordre de grandeur de la cohésion macroscopique pour une roche fracturée. Cette valeur de cohésion est une valeur minimale. Si la surface de contact est moins importante, la cohésion sur cette surface devra être plus élevée pour maintenir l'équilibre. Les ordres de grandeurs des quantités respectives

étant cohérents, la période de 5 secondes mise en évidence est donc compatible avec une oscillation de l'écaille.

On peut résumer en calculant la contrainte normale (de traction) appliquée sur toute ou partie de la surface $S = \alpha hl$ de la fracture arrière (où $\alpha \in [0,1]$ représente la fraction de la surface totale de la fracture sur laquelle la contrainte appliquée est non nulle) :

$$\sigma_n = \frac{2C\theta}{\alpha h^2 l} \quad (4.7)$$

soit, en remplaçant C par son expression et en prenant $J = \frac{1}{3}mh^2$

$$\sigma_n = \frac{m\theta}{\alpha l} \left(\frac{g}{h} + \frac{4\pi^2}{3T^2} \right) \quad (4.8)$$

Si l'on s'intéresse maintenant aux variations de la période d'oscillation de l'écaille avec ses caractéristiques géométriques et mécaniques, l'équation (4.5) tend à montrer que celle-ci peut varier fortement au voisinage de l'équilibre limite. Nous allons examiner successivement la variation de T avec la hauteur h de l'écaille et avec la constante C. En effet, en différenciant suivant h on trouve :

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{2} \frac{\Delta h}{\frac{2C}{mg} - h} + \frac{\Delta h}{h} \quad (4.9)$$

Cette équation montre que lorsque l'écaille est éloignée de l'équilibre limite, la dépendance de la période d'oscillation envers la hauteur de l'écaille est simple. La mesure effectuée en pratique étant celle de la fréquence, lorsque l'écaille est stable, on voit que :

$$\Delta f = -f \frac{\Delta h}{h} \quad (4.10)$$

Pour une hauteur de l'ordre de 100 m et une fréquence de l'ordre de 0,1 Hz :

$$\Delta f \sim 0,001 \Delta h$$

La dépendance de la fréquence envers la hauteur de l'écaille est donc très faible lorsque l'écaille est stable. Par contre, au voisinage de l'équilibre limite, le terme

$$\frac{1}{\frac{2C}{mg} - h}$$

peut prendre des valeurs très élevées et amplifier fortement l'effet de la variation de hauteur de l'écaille.

En différenciant suivant C on trouve que

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta C}{C - \frac{mgh}{2}} \quad (4.11)$$

Cette équation montre également qu'au voisinage de l'équilibre limite la période peut dépendre fortement de la variation de la force de rappel, c'est-à-dire de la variation de la résistance de la roche au niveau de la fracture arrière.

Par conséquent, la mesure précise de la fréquence des oscillations (suivant leur mode fondamental ou leurs harmoniques) constitue un moyen de détecter à quel point l'écaille se rapproche de l'équilibre limite. Cependant la variation de cette fréquence dépend de façon critique de la valeur de la résistance de la roche dans la fracture arrière, de sa variation et de la dynamique de cette variation. L'apparition d'un glissement du spectre vers les basses fréquences, même faible, peut précéder de peu l'instabilité. La variation des caractéristiques géométriques et mécaniques de l'écaille peut être importante sans entraîner de variations mesurables de la fréquence lorsque l'écaille est éloignée de l'instabilité, alors qu'une faible variation de ces caractéristiques peut entraîner une forte variation du spectre à l'équilibre limite. La simple mise en évidence d'un glissement du spectre vers les basses fréquences est donc un fort indice de l'évolution de l'écaille vers l'équilibre limite.

2.4.2. Analyse des variations des oscillations instrumentales à court terme

La fréquence observée de 5 Hz semble a priori très éloignée de la fréquence fondamentale du capteur extensométrique (35 Hz). Cependant l'observation détaillée des harmoniques, équidistantes de 35 Hz, bien visibles dans le spectre des données extensométriques (**Figure 51b**) montre que leurs fréquences sont en fait dédoublées : chaque harmonique est constituée d'un doublet de fréquences, dont la différence est toujours égale à 0,4 Hz. Or l'existence de couples de vibrations à des fréquences proches l'une de l'autre provoque l'apparition de battements :

$$A_0 \cos \omega_1 t + A_0 \cos \omega_2 t = 2A_0 \cos \left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t \right) \cos \left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \right) \quad (4.12)$$

L'amplitude de la vibration de pulsation élevée $\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \sim \omega_1 \sim \omega_2$ est modulée par une enveloppe de pulsation basse $\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}$.

Dans notre cas la demi-différence de fréquence est exactement égale à 0,2 Hz, et les quatre doublets d'harmoniques d'amplitudes sensiblement égales ont une double somme qui correspond à peu près à l'amplitude de l'oscillation à 0,2 Hz. On peut donc penser que l'oscillation de fréquence 0,2 Hz observée, bien que de fréquence basse, soit un battement du câble extensométrique. L'origine des doublets de fréquence observés peut provenir de la nature du câble installé, constitué de deux câbles « en série » composés de matériaux différents. La mise en évidence des fréquences propres de l'écaille les plus basses, dont l'intérêt a été souligné au paragraphe précédent, ne peut donc probablement pas se faire de façon économique avec ce montage extensométrique, même si l'oscillation de l'écaille était relativement importante en son sommet (de l'ordre du mm par exemple). Il faudra donc éventuellement réaliser un autre montage ou avoir recours à un autre type de capteur. Plus sûrement, c'est l'utilisation des données sismologiques qui renseignera sur ces modes propres, le capteur le mieux adapté étant le capteur sismologique large-bande.

2.4.3. Analyse des variations à long terme

Les mesures extensométriques mettent en évidence des variations à long terme de grande amplitude et robustes par rapport à l'erreur de mesure. Les résultats montrent une accélération progressive du déplacement de l'écaïlle vers l'Est. Cette accélération témoigne de l'entrée dans une phase de fluage tertiaire, qui mène inévitablement à la rupture si les conditions de chargement ne sont pas modifiées (diminution de la charge). Cette tendance est bien ajustée par une loi en t^2 , t représentant le temps écoulé depuis le début de l'expérience. Ce modèle en t^2 n'est pas anodin : il correspond à un mouvement à accélération constante, bien que faible. On trouve en effet une accélération de $0,0155 \text{ mm/jour}^2$ soit environ $2 \cdot 10^{-15} \text{ m/s}^2$ pour rendre compte des données mesurées.

Un premier niveau d'interprétation peut être trouvé dans l'évolution de la solution de l'équation différentielle (4.2) au voisinage de l'équilibre limite. En effet, lorsque la résistance élastique de la roche devient inférieure au moment moteur (dû à la gravité), la solution prend la forme donnée par l'équation (4.3). Or il se trouve que

$\cosh x \sim 1 + \frac{x^2}{2}$ pour x petit ; on peut donc en déduire qu'au voisinage de l'équilibre limite :

$$\theta = \theta_0 \left(1 + \frac{\frac{mgh}{2} - C}{2J} t^2 \right) \quad (4.13)$$

soit

$$\theta - \theta_0 = \theta_0 \frac{\frac{mgh}{2} - C}{2J} t^2 \quad (4.14)$$

c'est-à-dire, en terme de longueur

$$s - s_0 = h\theta_0 \frac{\frac{mgh}{2} - C}{2J} t^2 \quad (4.15)$$

($s - s_0$) étant l'abscisse curviligne parcourue par l'écaïlle depuis le début de l'expérience, qui correspond à la distance mesurée par l'extensomètre.

On voit donc qu'une résistance élastique de la roche suffisamment faible peut rendre compte de l'ajustement à un modèle en t^2 dans le cadre du modèle simple régi par l'équation (4.2). On peut envisager d'utiliser l'ajustement à ce modèle en t^2 pour

estimer l'écart en contrainte à l'équilibre limite. La valeur du terme $h\theta_0 \frac{\frac{mgh}{2} - C}{2J}$

(trouvée par ajustement) est de l'ordre de 10^{-15} ms^{-2} , ce qui conduit à une valeur de l'ordre de 10^{-2} du terme $\frac{mgh}{2} - C$ et donc une différence de contrainte normale

appliquée quasiment nulle (de l'ordre de 10^{-10} !). Une différence de contrainte normale sur la fracture arrière de l'ordre de 100 Pa correspond à une accélération de l'ordre de

10^{-5} ms^{-2} , bien supérieure à celle qui est mesurée. La quasi-nullité de la valeur de la différence de contrainte normale calculée ne constitue donc pas un argument qui permette de valider le modèle. Une accélération faible nécessite que l'écaïlle soit très proche de l'équilibre limite. Néanmoins, un modèle simple basé sur la simple compétition du poids de l'écaïlle et de la résistance élastique de la roche, supposée constante, ne permet pas d'expliquer cette accélération. C'est pourquoi nous nous sommes demandés si un affaiblissement de la résistance de la roche pouvait permettre d'expliquer cette faiblesse de l'accélération. Cela peut sembler a priori improbable : les observations faites ci-dessus amènent à penser qu'une faible accélération devrait être causée par un affaiblissement extrêmement réduit. On peut également envisager l'intervention d'une force supplémentaire : on peut en effet considérer que la fracture est remplie par un coin de matière suffisamment rigide, ayant un mouvement lent vers le bas, et dont l'accélération serait constante. Dans ce cas, ce mouvement vers le bas peut aussi communiquer à l'écaïlle une accélération horizontale constante. Ces deux conjectures seront l'objet de modélisations ultérieures.

2.5. Étude de la sismicité discrète

2.5.1. Caractérisation de la sismicité

L'analyse des enregistrements sismiques a été effectuée post-acquisition à partir des enregistrements continus. Sur l'ensemble des enregistrements, il faut différencier deux périodes correspondant aux modifications apportées à l'instrumentation, à savoir :

- période du mois d'août 2007 : seul le géophone tri-dimensionnel *Geo3d* a détecté des événements ;
- période à partir du 11 octobre 2007 : les 3 géophones *Geo3d*, *GeoEc* et *GeoSd* ont détecté des événements. Le géophone *GeoNd* n'a malheureusement pas détecté d'événements à cause d'un mauvais réglage de l'étage d'amplification de la voie.

Les événements sismiques ont été détectés à partir de la méthode de segmentation STA/LTA [Allen, 1982, Baer, 1987] avec les paramètres suivants :

- taille de fenêtre STA = 0,1 s ;
- taille de fenêtre LTA = 60 s ;
- seuil de détection RSB ≥ 3 sur toutes les voies.

Pendant la période d'auscultation, nous avons répertorié au total 11 082 signaux nano-sismiques sur les cinq voies de mesure (*Geo3d-L*, *Geo3d-T*, *Geo3d-V*, *GeoSd*, *GeoEc*). Ces signaux correspondent à 8 310 événements sismiques distincts.

Les nano-séismes sont beaucoup plus nombreux à être enregistrés sur le massif que sur l'écaïlle (**Figure 53** et **Tableau 6**). On dénombre en effet 55 événements enregistrés sur l'écaïlle, dont 17 qui n'ont pas été enregistrés par les autres géophones, alors que 6398 événements ont été enregistrés sur le massif, soit un rapport de presque 1 à 120 en faveur de la sismicité enregistrée sur le massif. Seuls 38 nano-séismes ont été enregistrés simultanément sur l'écaïlle et sur un autre géophone situé sur le massif, et 21 nano-séismes simultanément par les trois géophones du réseau. D'autre part, le géophone trois composantes nous permet de constater que sa composante longitudinale est plus sensible à l'activité nano-sismique que sa composante verticale. En effet, sur les 3 805 événements détectés par ce capteur, 85 % concernent exclusivement les 2 composantes horizontales.

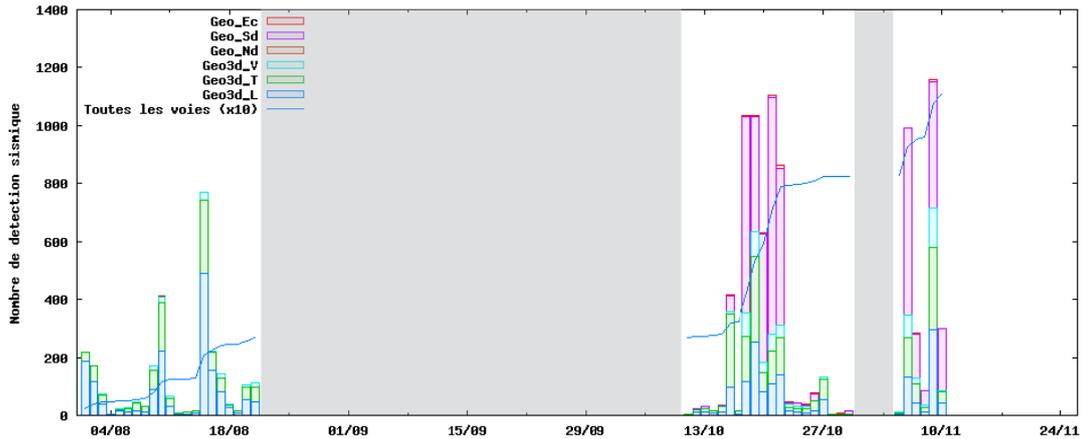


Figure 53 : Activité sismique enregistrée pendant la période d'auscultation
 Courbe bleue : nombre d'événements sismiques par jour cumulés sur toutes les voies, en fct du temps.
 Histogramme : nombre d'événements sismiques par jour, pour chaque capteur (bleu clair : géophone 3C, composante verticale ; bleu foncé, géophone 3C, composante N-S ; Vert : géophone 3C, composante E-W ; mauve : géophone S ; rouge : géophone écaille ; brun : géophone N).
 Grisé : période sans données.

NOMBRE DE CAPTEURS AYANT DETECTE LE MEME EVENEMENT	NB D'EVENEMENTS	%
1^{ère} période (août 2007)		
1 capteur	1 857	22,3%
2^{ème} période (octobre-novembre 2007)		
1 capteur	6 173 (Geo3d=1 947 GeoSd=4 209, GeoEc=17)	74,3%
2 capteurs	259	3,1%
3 capteurs	21	0,3%
TOTAL	8 310	100,0%

Tableau 6 : Répartition de la quantité d'événements sismiques détectés en fonction du nombre de capteurs

Pour estimer les caractéristiques générales de la sismicité enregistrée, nous avons représenté le nombre de nano-séismes enregistrés en fonction de leur amplitude maximale et de leur durée (**Figure 54**).

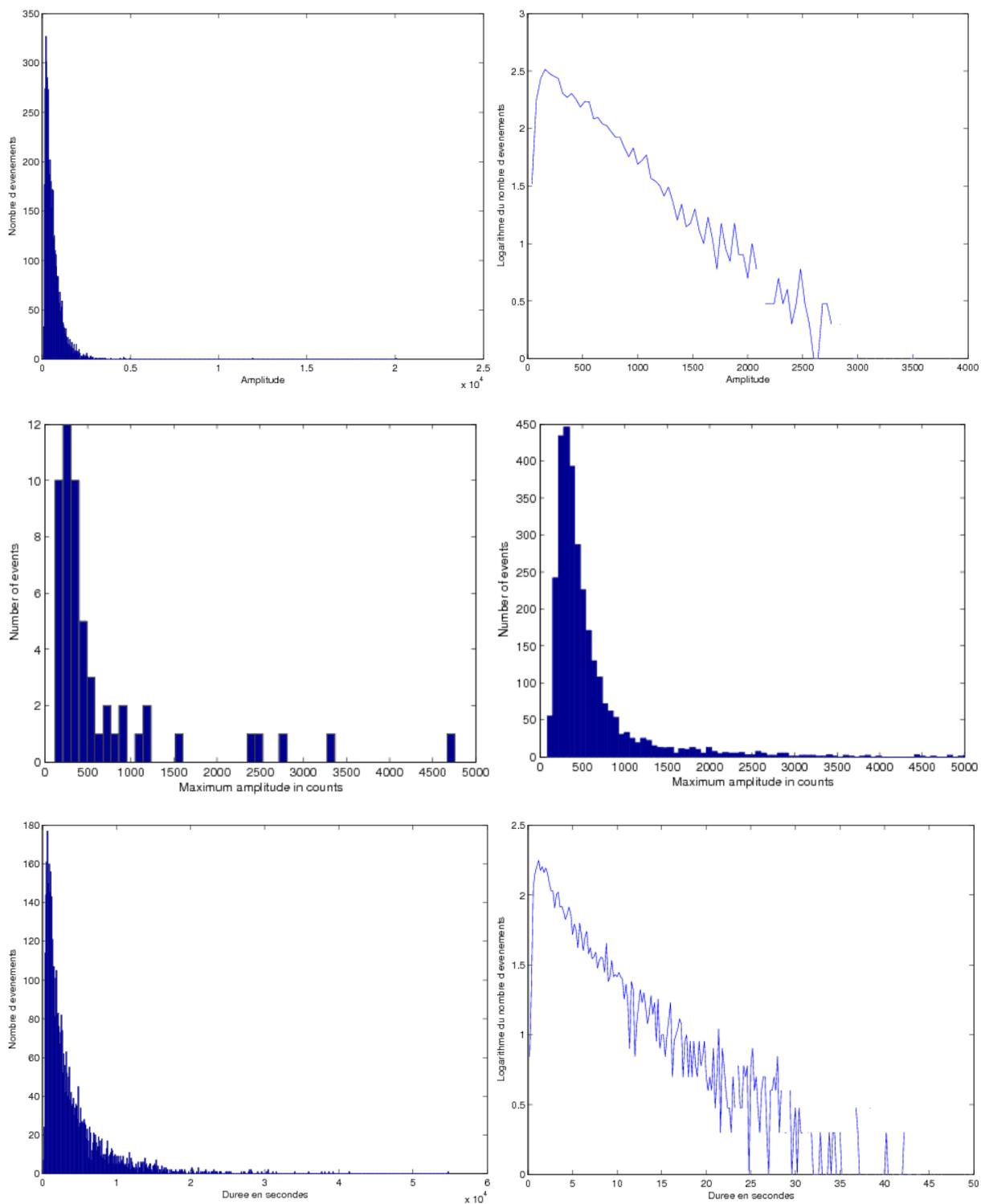


Figure 54 : Nombre d'événements sismiques détectés en fonction de leur amplitude :
 (a) géophone Sud, (b) géophone Sud echelle log,
 (c) géophone installé sur l'écaille, (d) composante Est-Ouest du géophone 3 composantes ;
 Nombre d'événements sismiques en fonction de leur durée :
 (e) géophone Sud, (f) géophone Sud echelle log,

Nous avons également représenté (**Figure 55**) la distribution de l'énergie sismique (loi de Gutenberg-Richter) en estimant l'énergie sismique à partir de l'amplitude du signal et de sa durée :

$$E \approx \sum_1^{durée} A^2 \Delta t \quad (4.16) \quad \text{où } \Delta t \text{ est le pas d'échantillonnage.}$$

La représentation du nombre de séismes en fonction de l'énergie (**Figure 55**) montre que la distribution des événements est complète sur plus de deux ordres de grandeur.

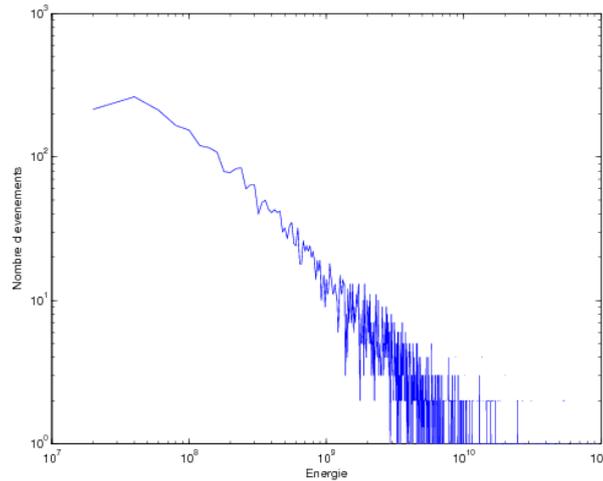


Figure 55 : Distribution de l'énergie sismique libérée par les séismes discrets.

2.5.2. Typologie schématique des signaux rencontrés

L'objectif de ce paragraphe n'est pas de prétendre « classer » les nano-séismes enregistrés mais plutôt de faire un premier tri dans l'ensemble des données enregistrées, suivant des critères de fréquence dominante et de durée de signal. L'observation directe des séismes dans le domaine temporel et celle de leur spectre (**Figure 56**) permet en effet de mettre en évidence un certain nombre de caractéristiques remarquables. Quelques signaux sont de type impulsif, d'une fréquence dominante de l'ordre de 100 à 150 Hz et de durée courte (inférieure à la seconde) (**Figure 56a**). Ils constituent le type de signaux a priori « attendu » dans un massif rocheux proche de la rupture dans le sens où ils semblent reproduire, à petite échelle, les caractéristiques des signaux sismiques classiquement enregistrés en microsismicité. Mais ils ne constituent pas la classe la plus nombreuse. Un bien plus grand nombre de signaux ont une fréquence dominante de l'ordre de 50 à 80 Hz et une durée remarquablement longue, pouvant aller jusqu'à la minute de signal (**Figure 56b**), tout en conservant les mêmes caractéristiques spectrales tout au long du signal. Une observation attentive montre qu'ils peuvent être constitués par la concaténation de nombreux événements plus petits, très proches en temps. Une troisième caractéristique de la nano-sismicité enregistrée est l'existence de signaux de fréquence dominante très basse, comparable à un trémor, aussi bien sur le massif que sur l'écaille (**Figure 56c**). Certains de façon très remarquable (**Figure 56d**), se terminent par un signal beaucoup plus haute fréquence, laissant penser qu'ils peuvent induire eux-même une rupture. Ces signaux sont particulièrement bien enregistrés sur la composante horizontale Est-Ouest, alors qu'ils peuvent être relativement absents des composantes verticales. Une fréquence dominante fréquente est 4,5 Hz, que l'on retrouvera dans le paragraphe suivant lors de l'analyse spectrale du signal continu.

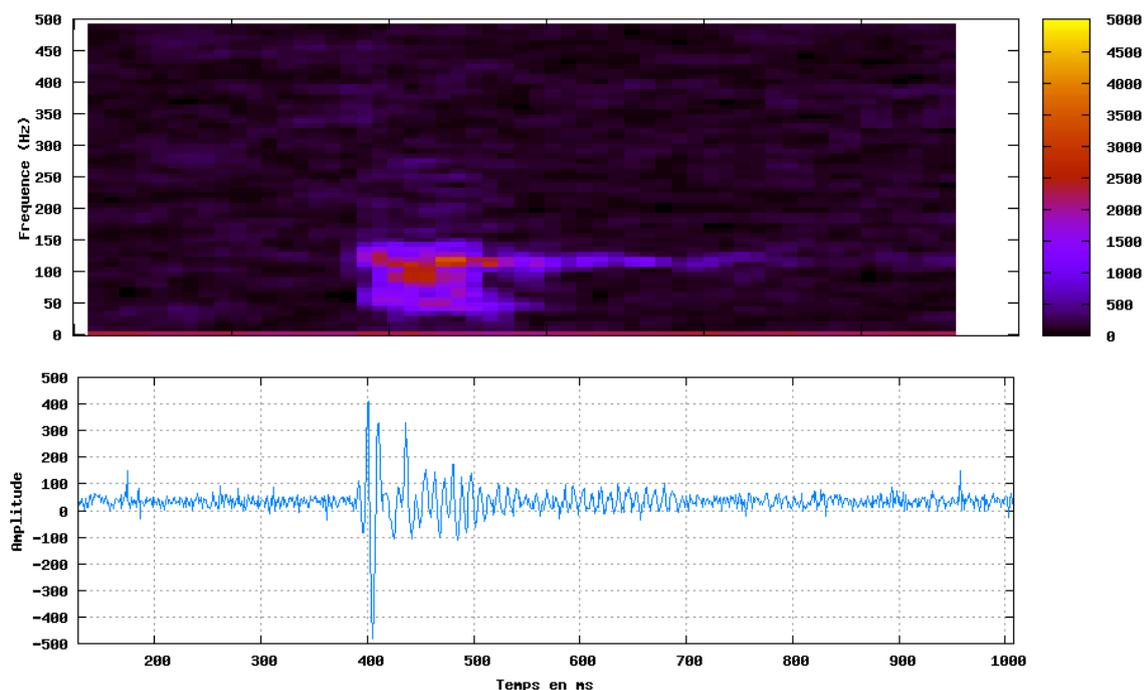


Figure 56 (a) : Signal en fonction du temps (en bas) et spectrogramme (en haut) représentant un nano-séisme impulsif, haute fréquence et de courte durée (*Capteur massif*).

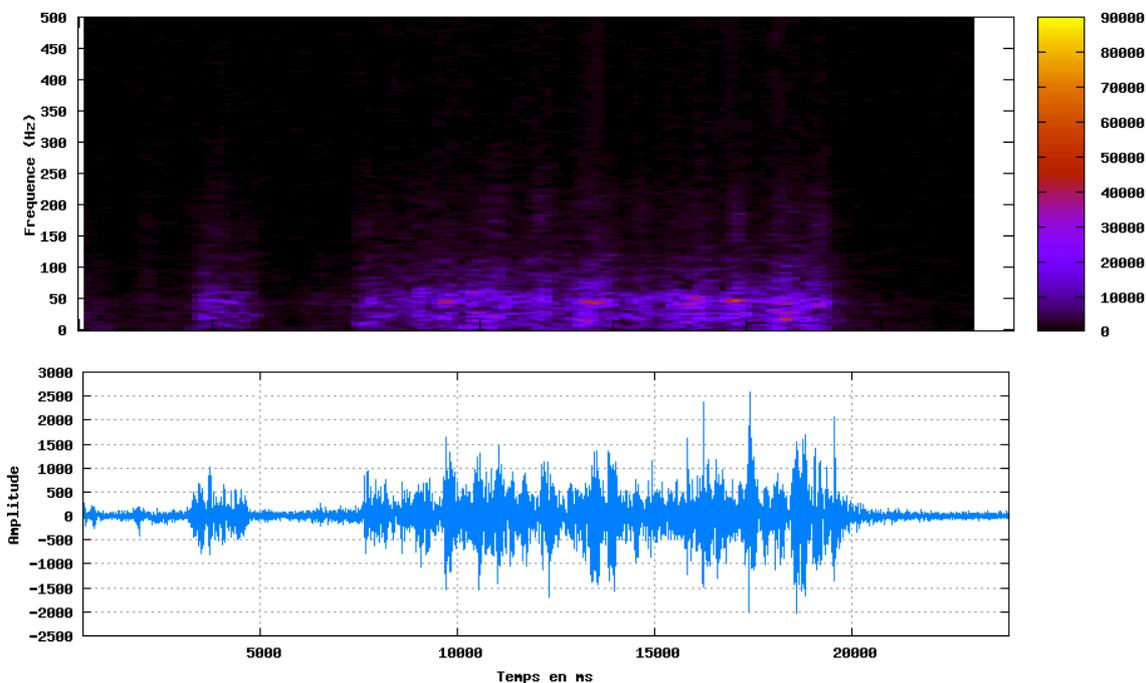


Figure 56 (b) : Signal temporel (en bas) et spectrogramme (en haut) représentant un nano-séisme haute fréquence et de longue durée (*Capteur massif*)

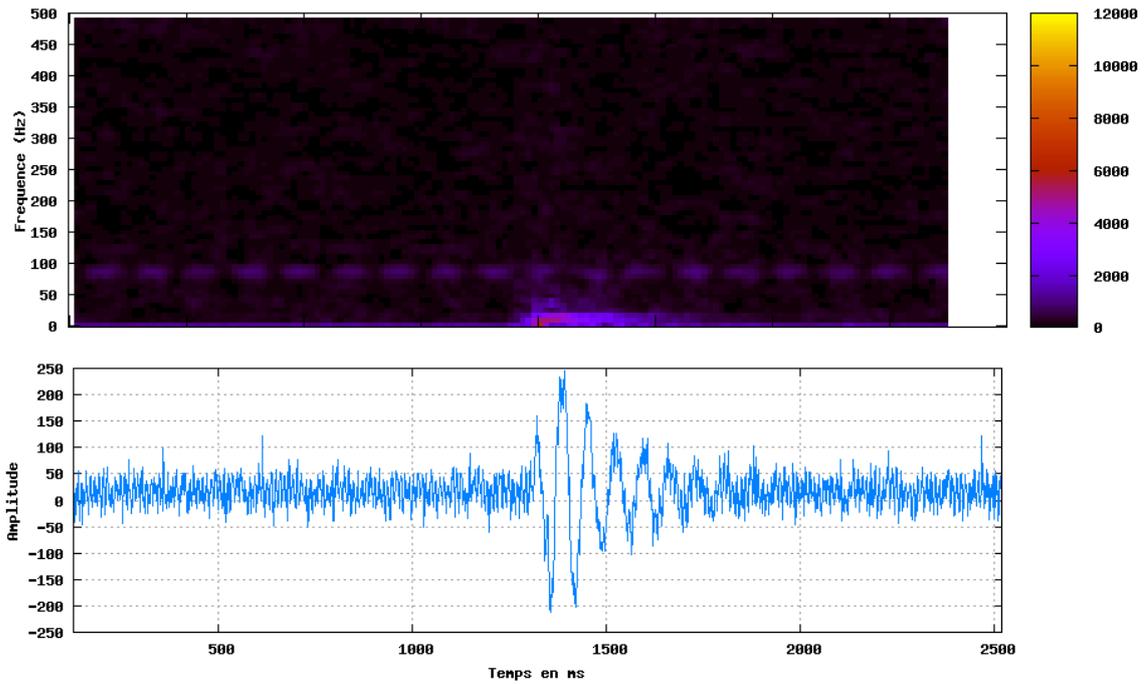


Figure 56 (c) : Signal en fonction du temps (en bas) et spectrogramme (en haut) représentant un événement nano-sismique basse fréquence (*Capteur massif, composante horizontale*)
On note une raie à 90 Hz qui provient d'un artefact du géophone

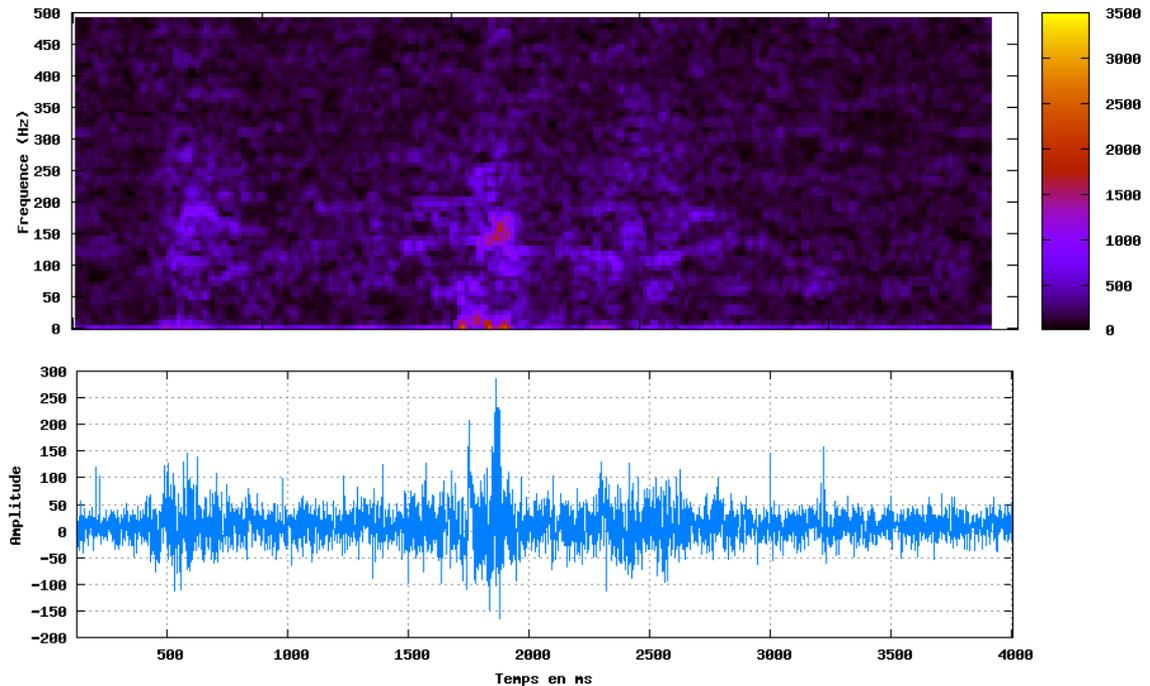


Figure 56 (d) : Signal en fonction du temps (en bas) et spectrogramme (en haut) représentant un événement nano-sismique basse et haute fréquence (*Capteur écaille*)

Pour représenter de façon plus exhaustive la distribution de l'énergie sismique en fonction du temps, nous avons construit un spectrogramme à partir de l'ensemble des spectres calculés pour les événements discrets enregistrés. On voit (**Figure 57**) que certaines fréquences perdurent, de façon remarquable, pendant l'essentiel de la durée d'observation.

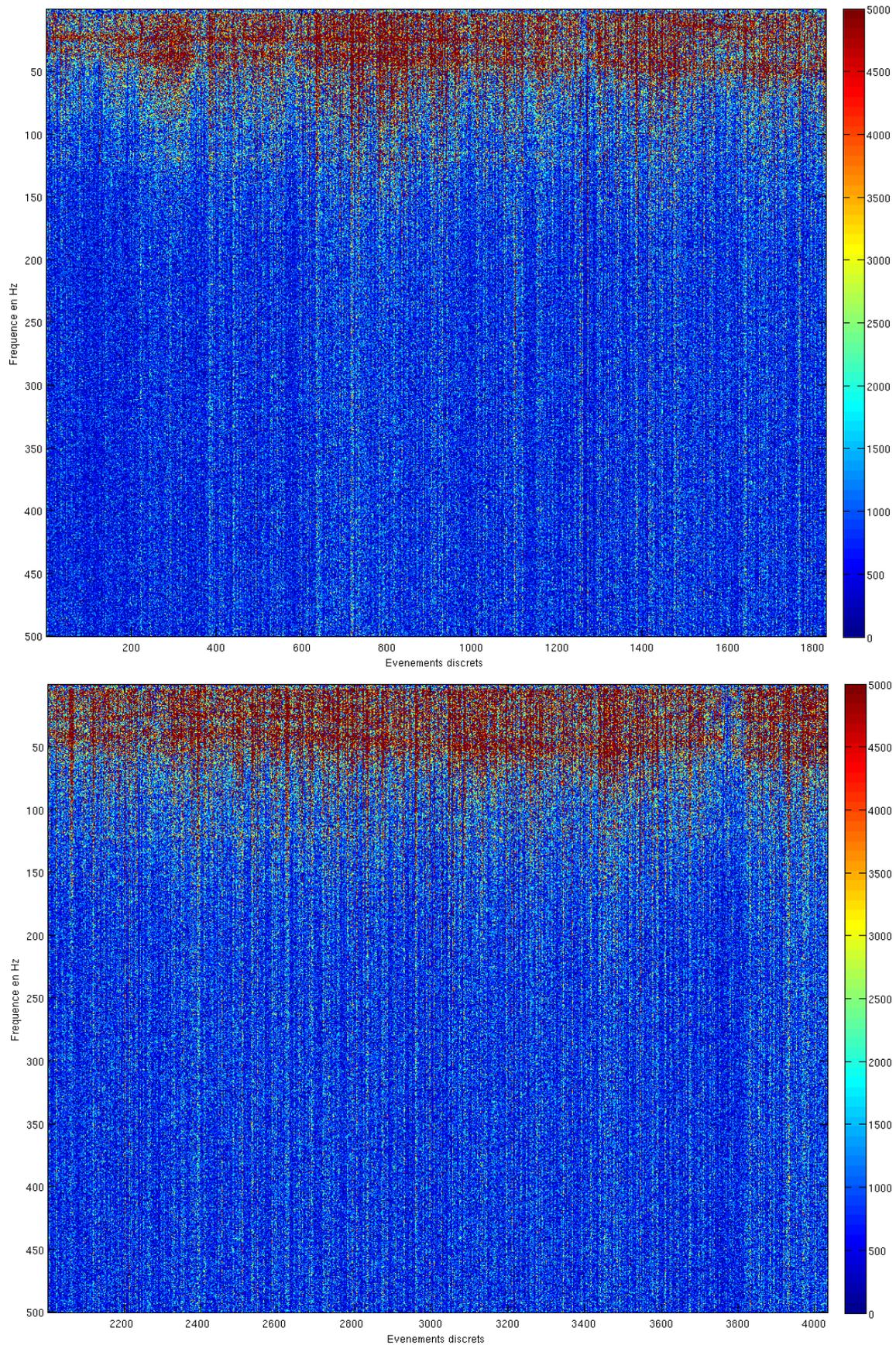


Figure 57 : Assemblage en spectrogramme réalisé pour les événements sismiques enregistrés par le géophone situé sur le massif (Geophone Sud), en octobre et novembre

Ces fréquences témoignent du fait que les sources de nanoséismes sont reproductibles et qu'elles rompent des sources qui ont en commun non seulement leur taille, mais aussi probablement certains détails d'une taille plus faible. On peut remarquer des glissements en fréquence, significatifs de modifications de la source : un glissement vers les hautes fréquences correspond à une diminution de la taille des sources.

2.5.3. Source des événements discrets

Si le processus source à l'origine des événements impulsifs, haute fréquence, de courte durée et relativement rares qui constituent le premier type de nano-séismes évoqués dans le paragraphe précédent paraît a priori classique (rupture d'une surface très limitée dans la roche), les deux autres types de signaux sont par contre beaucoup plus originaux.

Les signaux qui montrent un spectre haute fréquence tout au long du signal sont particulièrement remarquables (**Figure 56b**), dans la mesure où les signaux sismiques habituels montrent un spectre dont la fréquence dominante diminue avec le temps : une source, qui peut être considérée comme ponctuelle à grande distance, émet de façon impulsive un train d'onde. Le reste du champ d'onde enregistré est constitué de trains d'onde réfléchis, réfractés, diffractés, diffusés, qui arrivent donc avec des temps de propagation de plus en plus grands, car parcourant de plus grandes distances. Ils sont donc de plus en plus atténués et ont des fréquences dominantes de plus en plus basses. Un signal dont la fréquence dominante reste élevée tout au long du sismogramme ne correspond donc pas à ce modèle. Une conjecture raisonnable est qu'il corresponde à une rupture prolongée, qui concerne une source dont la taille n'est plus négligeable par rapport à la distance hypocentrale. Cette rupture prolongée est plus particulièrement visible lorsque ces événements de longue durée peuvent être décomposés en une concaténation d'événements plus courts, évoquant fortement le processus de « stick-slip » (glissement par morceaux). Dans ce cas la durée du sismogramme est significative non pas de la propagation mais de la durée de la rupture : une durée plus longue correspond alors à une surface de rupture plus grande, à vitesse de rupture constante. Ce type d'événement montre que les contraintes ne sont pas totalement relâchées à chaque incrément de rupture. Elles excèdent rapidement la résistance de la roche, même si le chargement du volume total n'a pas varié entre les occurrences de chaque nano-séisme incrémental : le volume de roche source est entré dans la phase de fluage tertiaire, également connue en Mécanique des Roches comme la « phase de propagation instable de la fissuration », qui conduit inexorablement vers la rupture totale de l'échantillon (lors d'un essai triaxial, par exemple). L'observation de ce type de signaux peut donc être comprise comme témoignant de l'entrée dans cette phase : elle permet donc de caractériser précisément l'état du volume rocheux du point de vue de sa stabilité et devrait donc intervenir comme critère d'aide à la décision, comme l'accélération de la déformation. Par ailleurs, la durée de la rupture (pour une amplitude donnée), est également un paramètre d'intérêt dont l'évolution temporelle peut être significative. Cette évolution sera étudiée dans le paragraphe suivant.

Le second groupe de signaux originaux, c'est-à-dire exhibant des caractéristiques différentes de celles que l'on attend d'une simple reproduction à petite échelle des caractéristiques de la micro-sismicité est celui des signaux basse fréquence (4,5 Hz) rappelant le « trémor » volcanique. Ce type de signal est particulièrement observé sur la composante horizontale Est-Ouest (**Figure 56c**) du capteur trois composantes installé sur le massif, plus que sur le capteur vertical installé sur l'écaille. Certains événements (les plus forts) enregistrés sur l'écaille montrent également une oscillation remarquable, notamment dans la coda, à la fréquence de 4,5 Hz, qui est une

fréquence propre possible de l'écaïlle [Lévy et al., à soumettre]. Cette fréquence est également fortement présente dans le périodogramme lissé moyenné du signal total (cf. § suivant). Il faut donc envisager que l'écaïlle oscille horizontalement et suivant une direction Est-Ouest à cette fréquence, et que ce mouvement est partiellement transmis au massif à travers la fracture, ce qui tend à montrer qu'il existe une certaine continuité du milieu à l'intérieur de celle-ci.

Cette fracture semble par contre faire barrière aux hautes fréquences, puisque la plus grande partie des signaux haute fréquence enregistrés sur le massif, y compris sur le capteur vertical, ne sont pas enregistrés sur l'écaïlle. Pour expliquer la dissymétrie de cette répartition, il faut envisager ou bien (i) que les nano-séismes aient lieu plus souvent côté massif que côté écaïlle, ou bien (ii) que le milieu éventuellement source entre massif et écaïlle ait une géométrie suffisamment complexe pour que la radiation ne s'effectue pas de façon isotrope, ou bien (iii) que l'atténuation dans l'écaïlle soit beaucoup plus forte que dans le massif.

2.5.4. Etude des variations temporelles de la sismicité

La distribution temporelle de l'activité sismique enregistrée montre que celle-ci est intermittente, avec notamment deux crises plus fortes en fin de période d'acquisition, du 18 au 22 octobre (qui correspond à une première période de gel) et du 6 au 10 novembre (Figure 46). On note qu'il n'y a pas de tendance à une augmentation régulière de la sismicité lorsqu'on se rapproche de l'instant de la rupture, comme cela est le cas pour les déformations.

La représentation de la nano-sismicité en fonction de l'heure de détection dans la journée montre une distribution intéressante (Figure 58). En effet, il y a d'une façon générale plus de nano-sismicité pendant les heures chaudes de la journée que pendant la nuit ; en novembre, un pic apparaît au moment du dégel. Cette distribution tend donc à montrer une certaine dépendance de la nano-sismicité enregistrée avec la température.

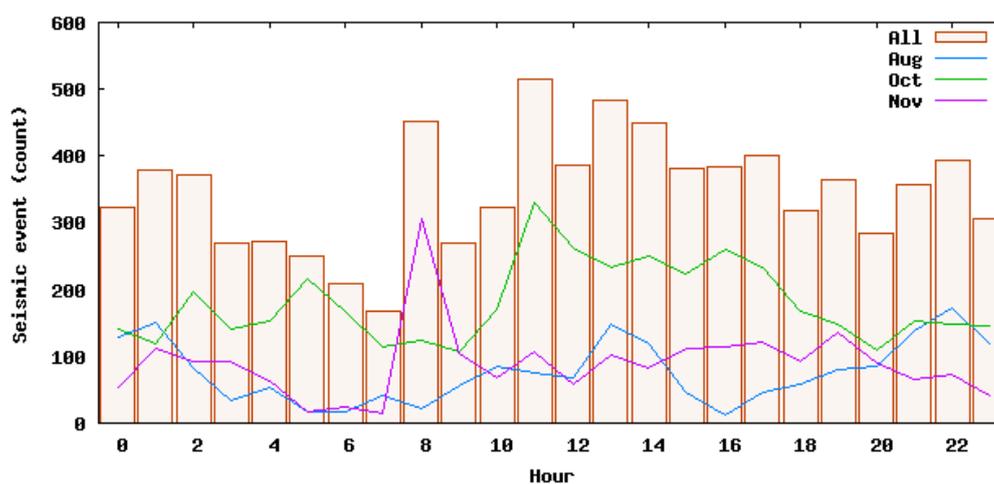


Figure 58 : Nombre d'évènements nano-sismiques en fonction de l'heure de détection dans la journée

On remarque que l'activité sismique est beaucoup plus abondante pendant la journée. En effet, l'activité sismique se corrèle bien avec la température de la roche qui est la plus froide pendant la période de 2h à 8h du matin (heure locale). Ce phénomène est d'autant plus visible sur les courbes d'octobre et novembre, où la température est régulièrement descendue en dessous de 0°C.

Par comparaison avec les courbes de déplacement, il est difficile d'observer une corrélation directe entre l'ouverture de la fracture et l'accroissement de l'activité sismique. Nous avons donc cherché à caractériser les différents types de signaux afin d'observer si leur nature évoluait avec l'instabilité.

Nous avons donc représenté l'amplitude, la durée et le rapport durée sur amplitude en fonction du temps pour l'ensemble des séismes discrets (**Figure 59** à **Figure 61**), sachant que les séismes haute fréquence et longue durée fournissent l'essentiel des détections. On remarque d'abord que certaines de ces quantités, particulièrement la durée, varient avec le temps. De façon tout à fait remarquable, le rapport durée sur amplitude montre, non pas une augmentation, mais une diminution avec le temps. Si la propagation expliquait la durée du signal, il faudrait invoquer une forte augmentation de l'atténuation avec le temps pour expliquer une diminution de la durée, augmentation qui ferait également fortement diminuer l'amplitude. Si la durée du signal est significative de la durée de la rupture, une diminution du rapport durée sur amplitude correspondrait à une diminution de la taille de la source (pour une vitesse de rupture supposée statistiquement constante). Dans ce cas cette diminution signifierait que la taille des ponts de matière restant à rompre aurait tendance à diminuer avec le temps, lorsqu'on se rapproche de la rupture : ceci correspond à un comportement « post-pic » de l'ensemble du système massif-écaïlle. Dans ce cas, le rapport durée sur amplitude serait un paramètre pertinent à mesurer pour caractériser l'état du massif rocheux et sa proximité à la rupture.

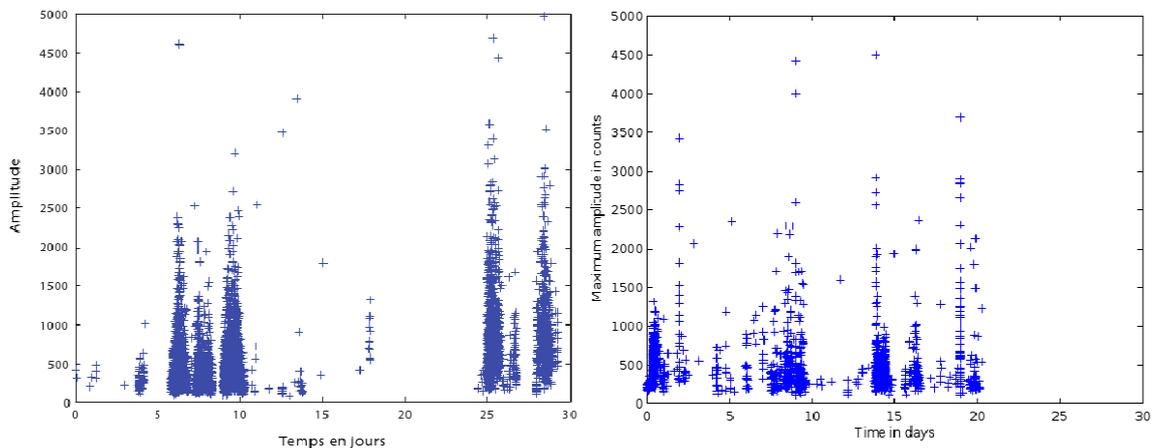


Figure 59 : Amplitude des évènements sismiques détectés en fonction de leur instant d'occurrence pour les mois d'octobre et novembre. Evènements détectés par : le géophone Sud (gauche), la composante Est-Ouest du géophone 3 composantes (droite)

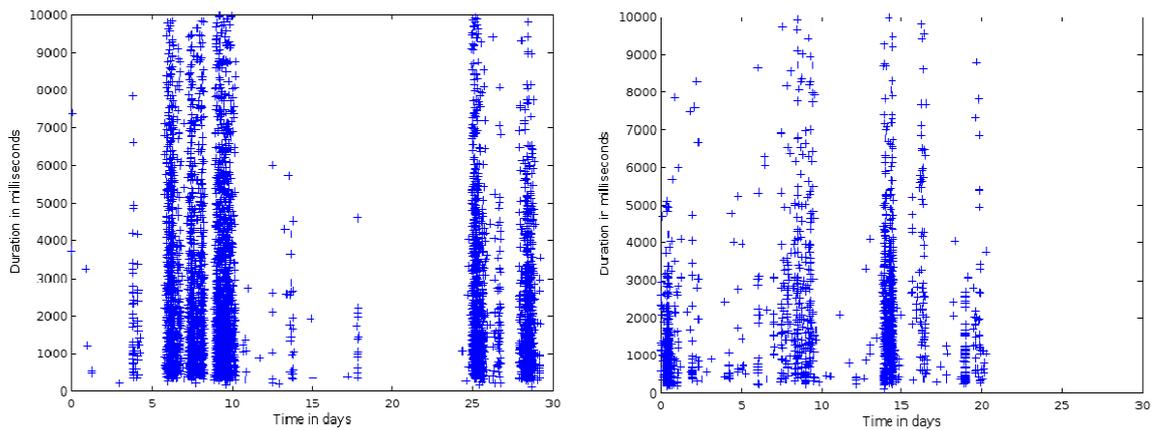


Figure 60 : Durée des évènements sismiques détectés en fonction de leur instant d'occurrence pour les mois d'octobre et novembre. Evènements détectés par : le géophone Sud (gauche), la composante Est-Ouest du géophone 3 composantes (droite)

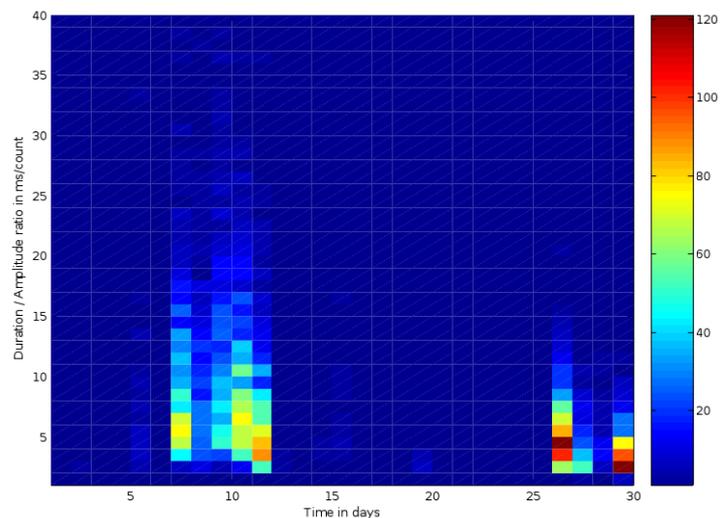


Figure 61 : Histogrammes des rapports durée/amplitude des évènements sismiques détectés par le géophone Sud (massif) en fonction de leur instant d'occurrence pour les mois d'octobre et novembre. On note un resserrement de l'histogramme et un glissement vers les faibles rapports durée/amplitude

2.6. Etude des enregistrements continus

Pendant cette expérience le signal sismique a été enregistré en continu, avec deux périodes d'interruption. L'enregistrement en continu de l'amplitude du signal sismique conduit à ce qu'une partie importante (en quantité stockée et en énergie) des données enregistrées soit constituée de bruit sismique. Dans ce paragraphe nous nous intéresserons à l'ensemble des données enregistrées en continu (bruit + signal), de façon à obtenir l'image la plus complète possible de l'information acquise. Le bruit sismique peut être porteur d'information concernant les structures à travers lesquelles l'énergie sismique se propage ; ces structures se comportent comme des filtres et imposent leur signature au bruit sismique entrant. Il peut donc être intéressant de tenter de retrouver cette information à partir de l'analyse de ce bruit. Des études récentes ont montré que l'on pouvait retrouver la fonction de transfert entre deux stations sismiques par intercorrélation des bruits sismiques enregistrés (voir par ex. Weaver et Lobkis, 2000 ; Shapiro et al., 2005 ; Weaver, 2005); ceci permet entre autres de trouver le modèle de vitesse 1D correspondant au trajet suivi entre ces deux stations. Dans cette étude nous nous intéresserons plutôt aux caractéristiques spectrales du bruit et à leur variation temporelle, un point de vue qui se rapproche de l'étude des modes propres dans une structure, comme un bâtiment par exemple. Dans un premier temps nous nous intéresserons à caractériser l'ensemble signal + bruit dans le domaine temporel. Par la suite, nous appellerons signal sismique continu (ou plus simplement « signal ») l'ensemble des données acquises en continu, qu'elles consistent en événements sismiques discrets ou en bruit sismique proprement dit.

2.6.1. Variations temporelles de l'amplitude du signal sismique continu

Le signal sismique continu enregistré entre le 11/10 et le 10/11 montre une augmentation lente mais régulière de son amplitude avec le temps (**Figure 62**).

Cette augmentation est plus importante à basse fréquence. Elle est entrecoupée de périodes où l'amplitude du signal est plus élevée ; ces périodes correspondent aux « crises » d'événements sismiques discrets. Ces crises sont intermittentes et ne modifient pas l'augmentation du niveau moyen du signal sismique continu.

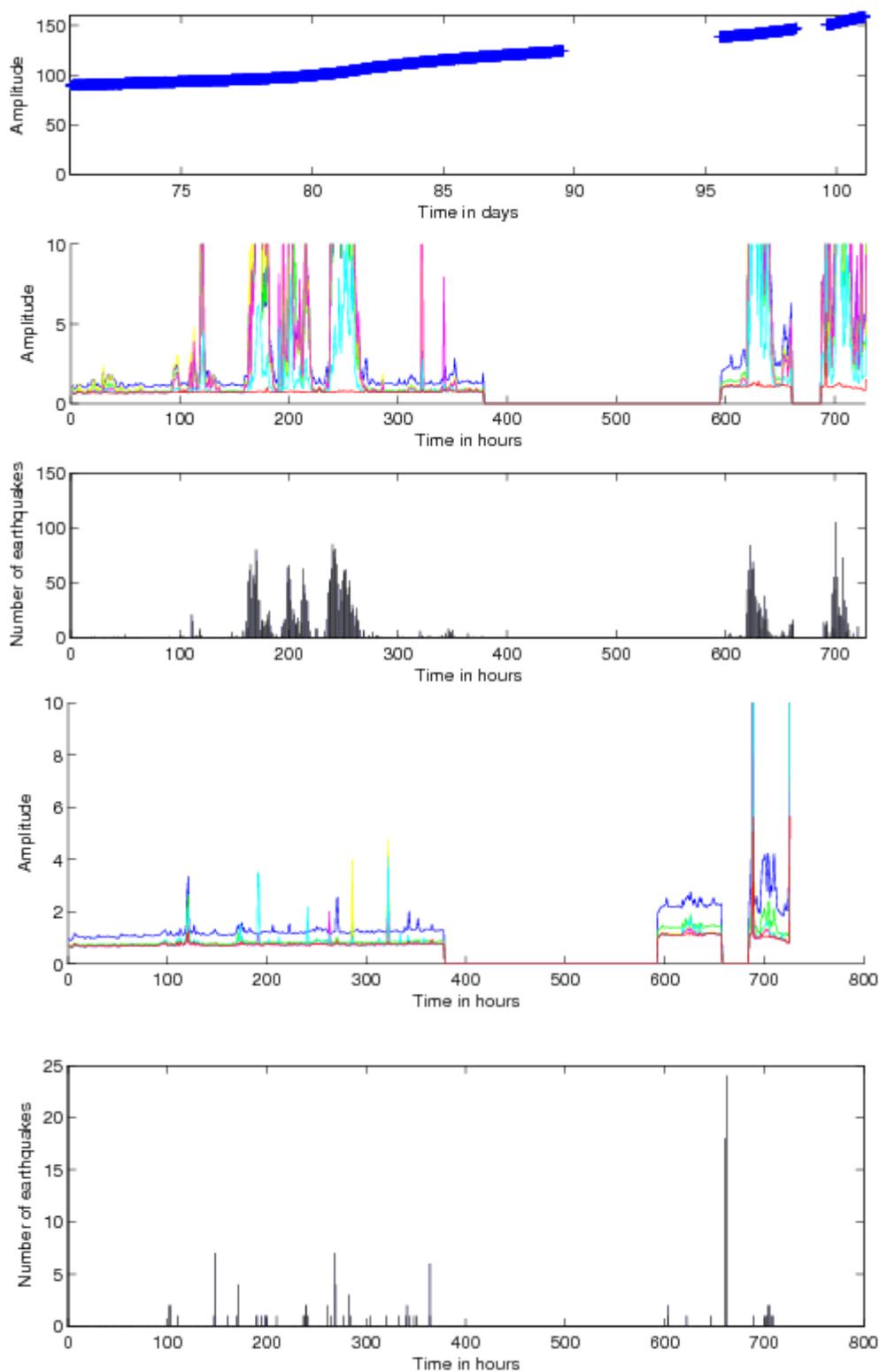


Figure 62 : (a) Distance massif – écaïlle, en mm, en fonction du temps ;
 (b) Amplitude moyenne du signal sismique enregistré par le géophone sud, en fonction du temps, pendant la durée de l'expérience, pour différentes bandes spectrales (bleu : 3-10 Hz ; vert : 10-17 Hz ; jaune : 17-35 Hz ; magenta : 35-50 Hz ; cyan : 50-120 Hz ; rouge : 120-500 Hz) ;
 (c) Nombre d'événements par heure enregistrés par le géophone sud en fonction du temps ;
 (d) Amplitude moyenne du signal sismique par heure enregistré par le géophone situé sur l'écaïlle, en fonction du temps, pour différentes bandes de fréquence (même code de couleur qu'en (b)) ;
 (e) Nombre d'événements par heure, enregistrés par le géophone situé sur l'écaïlle, en fonction du temps

2.6.2. Etude des variations fréquentielles du bruit en fonction du temps

Estimation d'un périodogramme lissé moyenné

L'estimation précise des variations fréquentielles du bruit peut être effectuée à l'aide d'un périodogramme lissé moyenné. Le périodogramme lissé est le module de la transformée de Fourier du signal sismique apodisé. L'apodisation en temps lisse le périodogramme en fréquence. Pour éviter un lissage sur un support trop large en fréquence, il faut d'une part choisir une fenêtre d'apodisation dont le spectre a une dynamique d'atténuation des lobes la meilleure possible ; nous avons choisi la fenêtre de Nuttall (1981) qui possède une des dynamiques les meilleures. Une fenêtre de Hanning ou de Blackman-Harris, qui montre des caractéristiques spectrales voisines, aurait également pu être utilisée. Pour améliorer le plus possible la résolution du spectre trouvé à l'aide de cette fenêtre (et atténuer le plus possible le trade-off existant entre largeur du lobe central et dynamique), nous avons choisi d'utiliser des fenêtres comportant un très grand nombre d'échantillons temporels ($212 = 16384$ échantillons soit environ 16 secondes de signal échantillonné à 1000 Hz, soit un pas d'échantillonnage en fréquence de $1000/16384 = 0.06$ Hz). L'utilisation d'une fenêtre de Nuttall de cette taille permet d'atteindre une résolution effective du périodogramme lissé inférieure à 0.5 Hz (soit un lissage sur moins de 8 points, 4 points de part et d'autre de l'échantillon central). Elle est bien adaptée à la mise en évidence de raies spectrales éventuellement distribuées sur une bande spectrale large. La figure suivante montre un exemple de périodogramme lissé sur un échantillon de 16.384s de signal sismique continu (**Figure 63**).

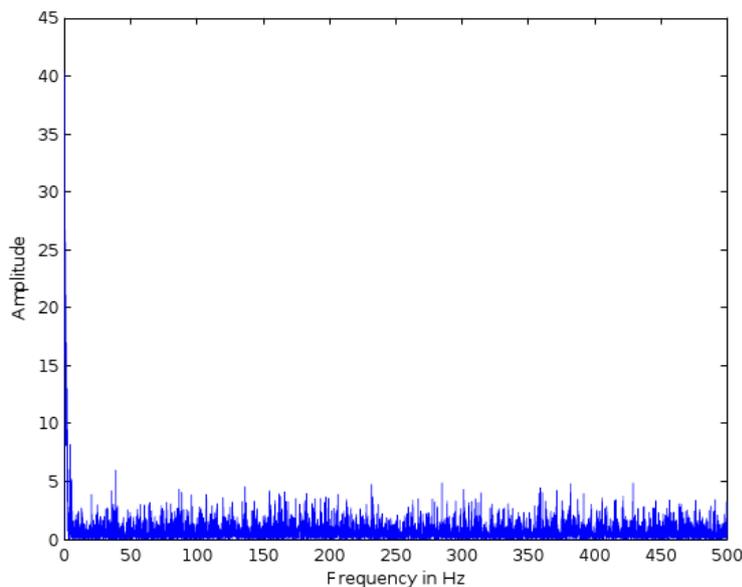


Figure 63 : Périodogramme lissé sur un échantillon de 16.384s de bruit

Le périodogramme lissé calculé comporte une composante déterministe et une composante aléatoire. L'objectif étant de faire apparaître le mieux possible la composante déterministe du signal analysé par rapport à sa composante aléatoire, il est nécessaire de moyenniser ces périodogrammes lissés. Le nombre de moyennes effectuées est en rapport avec la variabilité temporelle attendue de la composante déterministe du signal, et donc avec la dynamique du processus de rupture et la durée d'observation. Le processus évoluant et étant observé à l'échelle du mois, nous avons choisi un échantillonnage horaire de cette durée d'observation. Pour effectuer ce moyennage, nous avons utilisé une fenêtre mobile avec chevauchement de 50% sur

les fenêtres adjacentes ; un moyennage sur une durée d'une heure s'effectue donc à l'aide de 366 fenêtres de signal, dont 183 sont indépendantes. Un bruit aléatoire gaussien serait atténué plus de 10 fois par ce moyennage. La figure suivante montre un exemple de périodogramme lissé moyenné 366 fois pour un échantillon de 16.384s de signal (**Figure 64**). On voit ainsi apparaître les fréquences de faible amplitude qui composent la partie déterministe du spectre. La contribution déterministe, qui perdure à long terme, peut être très inférieure à la contribution aléatoire instantanée. On remarque dans ce périodogramme un pic d'amplitude à une fréquence légèrement inférieure à 5 Hz (**Figure 64**).

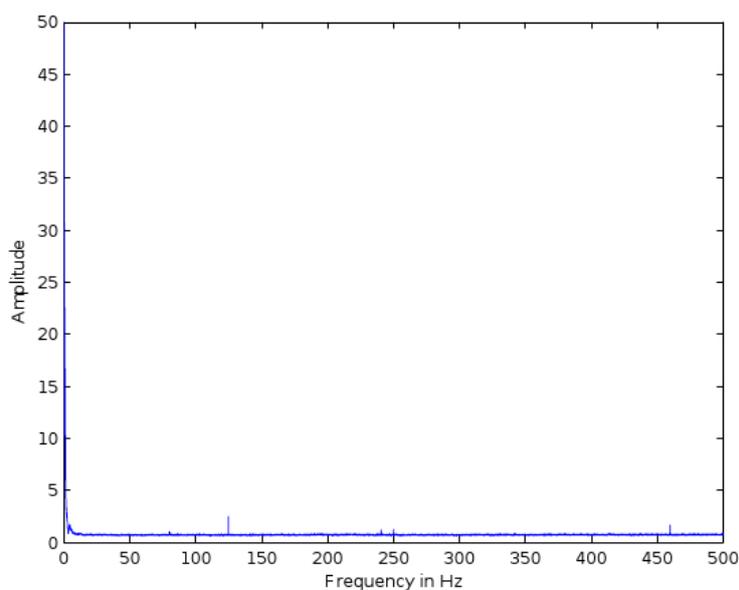


Figure 64 : Périodogramme lissé moyenné 366 fois (recouvrement de 60% des fenêtres) pour un échantillon de 16.384s de bruit (moyenne sur une heure d'enregistrement)
Noter la diminution du niveau de bruit par rapport au périodogramme lissé (Figure 62)

Nous allons par la suite étudier la variation temporelle du contenu spectral du signal sismique continu.

Représentation et analyse des variations spectrales en fonction du temps

Les périodogrammes lissés moyennés calculés pour la période du 11/10 au 10/11 sont assemblés en un seul spectrogramme (**Figure 65 a et b**) couvrant au total 560 h d'enregistrement avec deux lacunes d'enregistrement. Ces deux figures représentent les spectrogrammes calculés pour le signal enregistré par les sismomètres verticaux installés respectivement sur le massif et l'écaille instable.

L'observation des spectrogrammes (**Figure 65 a et b**) montre que l'amplitude du signal tend, d'une façon générale, à augmenter avec le temps, et que des « bouffées » intermittentes d'énergie apparaissent.

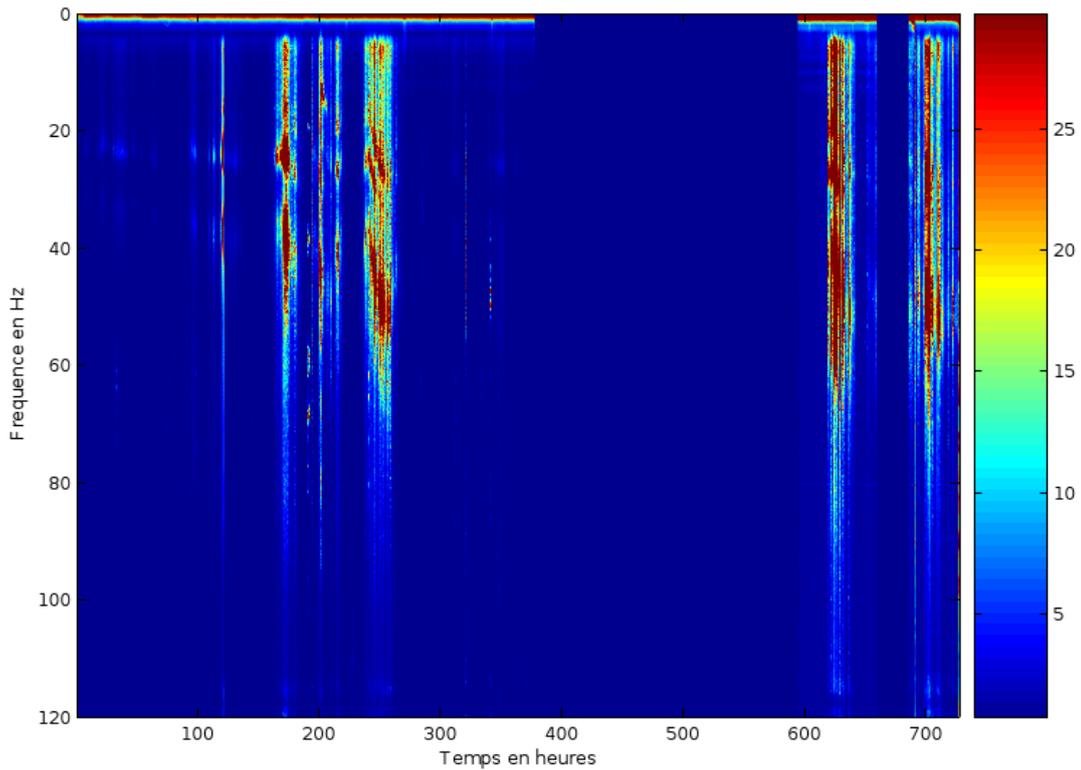
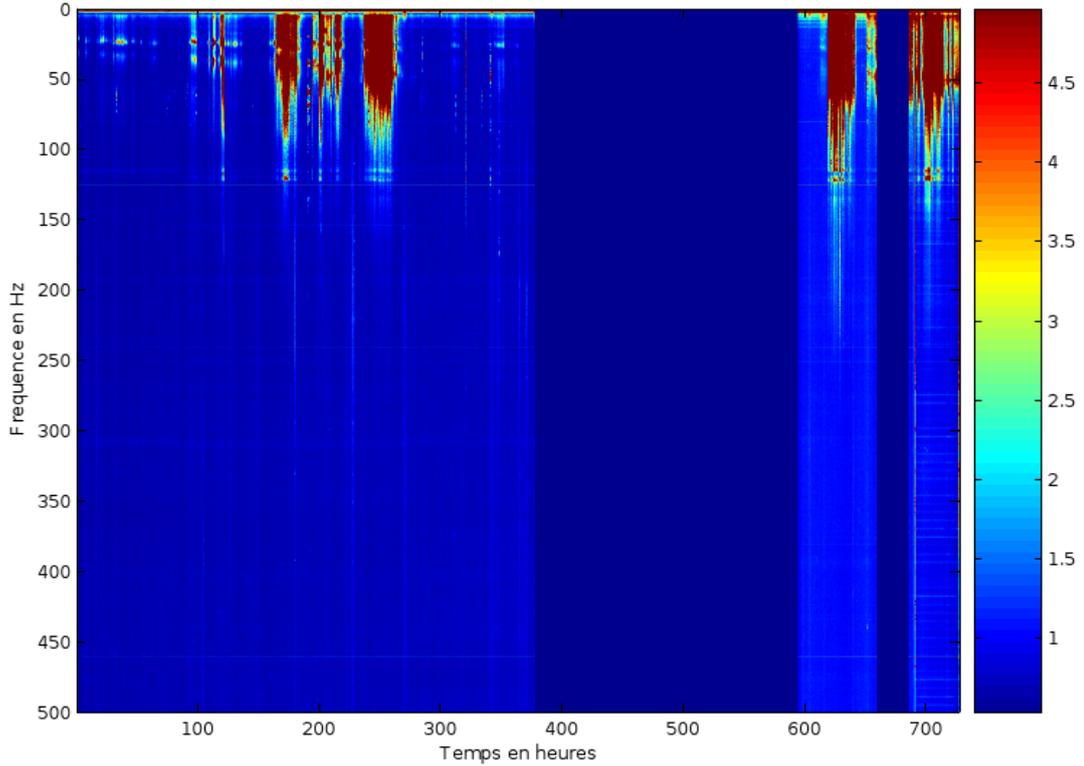


Figure 65 (a) : Spectrogramme construit à partir de l'assemblage de 560 périodogrammes lissés moyennés sur une heure d'enregistrement.

Les périodes sans enregistrement sont figurées en bleu très sombre.

Enregistrement réalisé par le capteur situé sur le massif
(haut) ensemble du spectre (bas) spectre entre 0 et 120 Hz

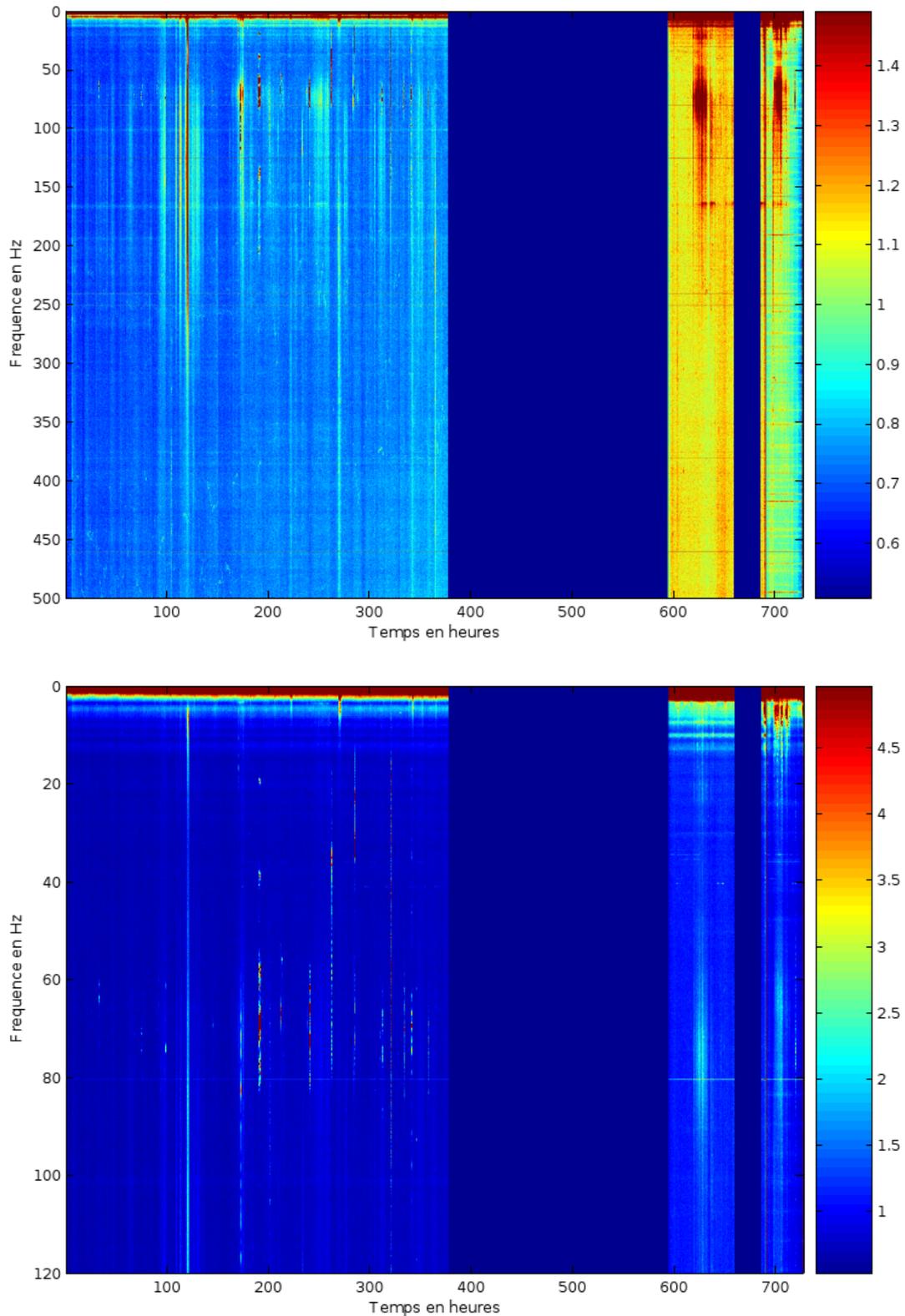


Figure 65 (b) : Spectrogramme construit à partir de l'assemblage de 560 périodogrammes lissés moyennés sur une heure d'enregistrement.

Les périodes sans enregistrement sont figurées en bleu très sombre.

Enregistrement réalisé par le capteur situé sur l'échelle
(haut) ensemble du spectre (bas) spectre entre 0 et 120 Hz

La différence la plus notable entre les spectrogrammes calculés pour l'écaille et le massif provient de l'enregistrement sur le massif de bouffées d'énergie assez intenses entre 5 et 50 Hz, peu observées sur l'écaille. Une seconde différence importante réside dans le contenu spectral : les bouffées plus rares enregistrées (en fin de période) sur l'écaille ont une fréquence dominante inférieure à 10 Hz, alors que le spectre des bouffées d'énergie reçues sur le massif s'étend jusqu'à 100 Hz. L'analyse des résultats de comptage d'évènements sismiques discrets et la comparaison, d'une part avec la valeur RMS du signal dans différentes bandes de fréquence (**Figure 62**) et d'autre part avec les spectrogrammes (**Figure 65**) montre qu'il y a une bonne corrélation entre les bouffées d'énergie intermittentes présentes dans le spectrogramme et l'occurrence d'évènements discrets, y compris en ce qui concerne la différence notée entre les spectrogrammes de l'écaille et du massif. On observe ainsi que les bouffées d'énergie plus intenses notées (**Figure 65**) dans le spectrogramme du massif entre 5 et 100 Hz entre les heures 160 et 260 (c'est-à-dire entre le 18 et le 22/10) correspondent à l'occurrence de signaux discrets plus nombreux. On remarque sur cette figure une tendance (entre 0 et 350h) à l'augmentation des fréquences dominantes, avec notamment un glissement de fréquence entre 20 et 25 Hz, ainsi qu'autour de 40 Hz. Ce détail serait-il significatif de la rupture progressive d'une aspérité, la fréquence dominante augmentant lorsque la taille de la source diminue ? Néanmoins, on ne retrouve ni sur l'écaille, ni sur le spectrogramme, ni sur la distribution temporelle des évènements discrets correspondante, la signature de cette crise sismique. Par ailleurs, pendant la période du 5 au 10/11 (heures 600 à 720, fin de l'enregistrement) on retrouve sur les deux capteurs des évènements discrets et des bouffées d'énergie enregistrées sur l'écaille (à des fréquences inférieures à 10 Hz) et sur le massif (à des fréquences allant jusqu'à 100 Hz). On note par contre que l'occurrence de ces crises ne perturbe pas l'augmentation lente et régulière du niveau de base du bruit de fond (**Figure 62**).

Cette représentation globale de l'information spectrale et fréquentielle par spectrogramme gagne à être analysée dans le détail. Nous avons pour cela représenté les variations temporelles du périodogramme en calculant des moyennes sur des périodes de temps plus longues, régulièrement espacées pendant la durée de l'expérience (**Figure 66**). Cette représentation confirme clairement l'augmentation moyenne du niveau du bruit de fond avec le temps, et en particulier sur l'écaille, une individualisation et le renforcement des modes à des fréquences supérieures à 15 Hz dans la période précédant immédiatement la rupture.

La comparaison des périodogrammes moyennés calculés sur le massif (pour les mêmes périodes que pour l'écaille, **Figure 66**) montre également une augmentation moyenne du niveau du signal enregistré pendant la période précédant la rupture. On note de même un mode énergétique à 4-5 Hz, ce qui constitue un argument en faveur de la réémission d'énergie de l'écaille vers le massif. La comparaison des périodogrammes calculés pendant la dernière période d'enregistrement (**Figure 66**) montre que :

- le niveau moyen du signal enregistré sur le massif est supérieur, au-delà de 10 Hz, à ce qu'il est pendant les périodes précédentes ;
- les modes sur l'écaille sont bien individualisés au-delà de 10 Hz alors qu'ils ne le sont pas du tout sur le massif. Par conséquent, il semble donc bien que cette partition de l'énergie, sur l'écaille, en modes à des fréquences supérieures à 10 Hz soit bien une réalité physique, et non pas un artefact, notamment instrumental.

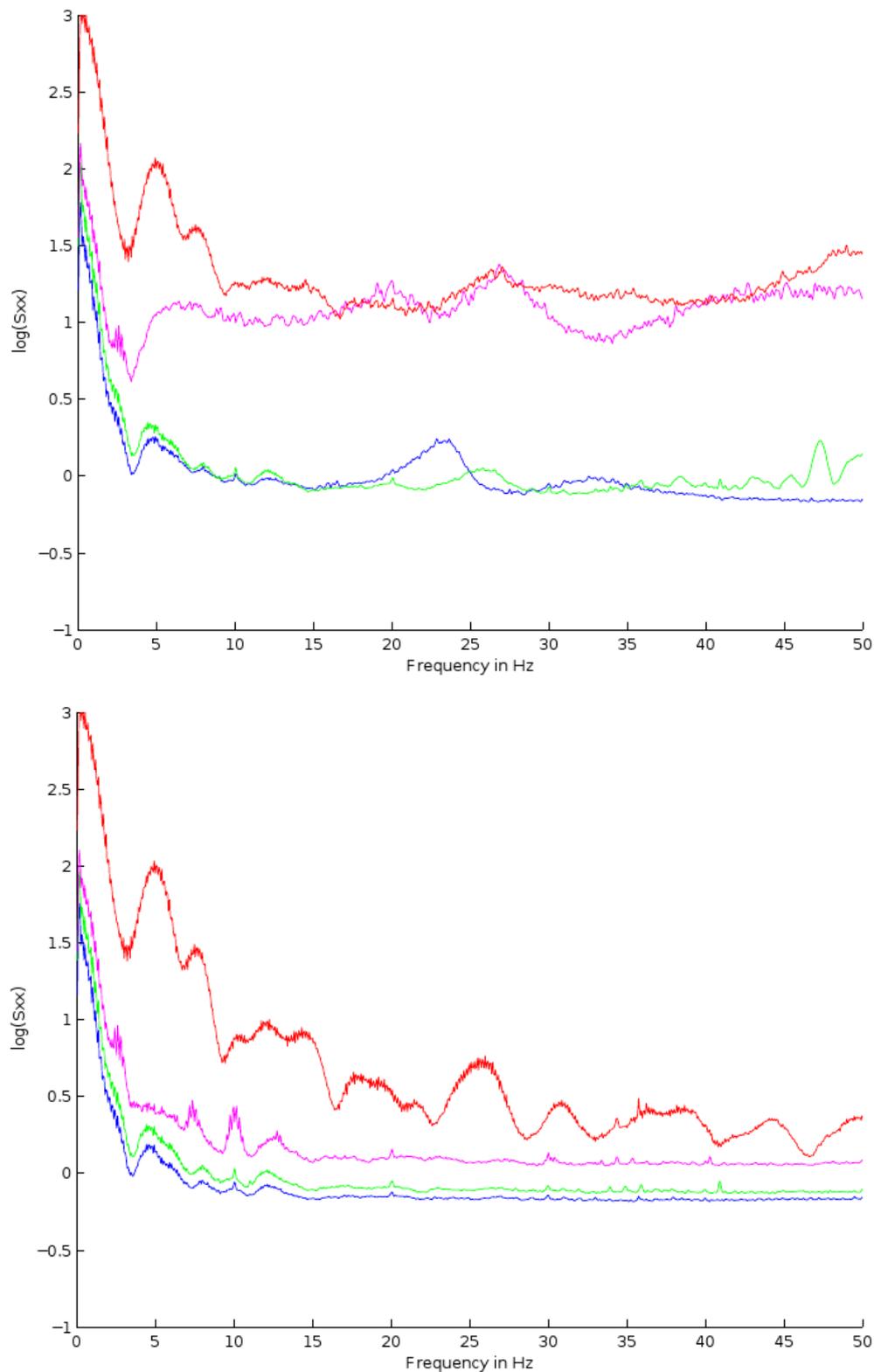


Figure 66 : Périodogrammes lissés moyennés sur différentes périodes de temps (bleu : 1-50 h ; vert : 320-360 h ; magenta : 460-520 h ; rouge : 530-560 h) ;
 (haut) Enregistrement réalisé par le capteur situé sur le massif
 (bas) Enregistrement réalisé par le capteur situé sur l'écaille

2.7. Conclusion : Expérience de Chamousset

Bien que l'instrumentation du site ait été réalisée rapidement et avec des moyens limités (notamment sans télémétrie et avec une alimentation légère), le retour d'expérience acquis sur le site de Chamousset est conséquent, compte tenu notamment de la dynamique rapide de l'écaille. Il nous a permis en effet de progresser, tout d'abord dans la connaissance des paramètres à mesurer pour mieux caractériser l'évolution temporelle des instabilités rocheuses isolées (blocs de grandes dimensions, écailles) et donc dans la spécification des caractéristiques instrumentales qu'il faut obtenir pour en faire une mesure correcte. Par ailleurs cette expérimentation a mis en évidence un certain nombre d'améliorations à produire pour obtenir une précision supérieure, notamment pour les données extensométriques. Elle nous a également permis de compléter notre connaissance des processus physiques en jeu lors de la progression d'une instabilité vers la rupture. L'ensemble des observations réalisées montrent que l'écaille de Chamousset est rentrée, dès le mois d'août 2007, dans une phase de fluage tertiaire.

Les mesures extensométriques permettent d'abord de mettre en évidence une accélération, claire à l'échelle des trois mois d'observation, mais faible (de l'ordre de 10^{-15} ms^{-2}). Cette accélération est cependant trop faible pour être expliquée par le modèle simple (pendule de torsion à axe horizontal) proposé, bien que ce modèle permette de retrouver la forme de la loi horaire du mouvement.

Les enregistrements de nano-séismes liés au mouvement de l'écaille permettent de mettre en évidence l'existence de ruptures progressives sismogènes ; ces ruptures par morceaux ont lieu par crises au cours desquelles elles apparaissent presque en continu. Ces ruptures sont enregistrées comme des signaux ayant un contenu relativement haute fréquence pendant toute la durée du signal qui peut atteindre jusqu'à près d'une minute. Ce contenu spectral permet de penser que leur durée caractérise la durée de la rupture plus que de leur propagation. Par ailleurs, leur durée, normalisée par leur amplitude, diminue à la fin de la période d'observation, ce qui tend à montrer que les surfaces rompues en fin de processus sont moins étendues qu'au début. Cette observation est assez cohérente avec une déformation de l'écaille en fluage tertiaire.

La comparaison de périodogrammes à différentes périodes sur l'écaille instable et sur le massif montre que des modes spectraux s'individualisent nettement sur l'écaille à des fréquences supérieures à 10-15 Hz, alors qu'il n'en est rien sur le massif, sur lequel on enregistre pourtant un bruit moyen d'amplitude supérieure. On peut alors penser qu'il s'agit de modes propres harmoniques de la fréquence de résonance fondamentale de l'écaille instable, plus facilement excitables lorsque le nombre de degrés de liberté de l'écaille augmente.

Le niveau de bruit de fond moyen tend à augmenter avec le temps. Dans la première partie de l'expérience, l'occurrence de crises d'événements discrets ne perturbe pas cette augmentation. Par contre cette augmentation devient plus importante dans la période précédant la rupture, et quitte le régime quasi-linéaire qu'elle avait en première période. L'occurrence de crises sismiques qui ne dégénèrent pas vers l'instabilité fait du comptage d'événements un paramètre délicat à utiliser pour caractériser l'évolution d'une instabilité

Les événements sismiques enregistrés ont une fréquence relativement basse (inférieure à 100 Hz), et peuvent avoir une fréquence dominante très basse (5 à 10 Hz), probablement dominée par la résonance de l'écaille et l'atténuation. La possibilité d'une éventuelle source basse fréquence reste à examiner plus en détail.

3. Surveillance d'un compartiment rocheux pendant le creusement du Tunnel des Grands Goulets (Drôme)

3.1. Contexte

Pour relier la Plaine du Royans au Plateau du Vercors, la route RD 518 emprunte la Vallée de la Vernaison profondément entaillée dans les formations calcaires du Vercors et limitée à l'amont par un étranglement correspondant au défilé des « Grands Goulets ».

La route RD 518 est taillée en rive droite et recoupe deux hautes falaises séparées par un versant escarpé et partiellement boisé. Elle fut creusée au milieu du XIX^{ème} siècle et mise en service en 1854. Elle est devenue route classée depuis 1939. Les phénomènes d'éboulements rocheux de plus ou moins grande ampleur se produisent régulièrement le long de cette route, menaçant quotidiennement les usagers (trafic de l'ordre de 1300 à 1650 véhicules / jour dont 2,5 % de poids lourds).

Plusieurs éboulements marquants ont ainsi affecté la RD 518 ces dernières années :

- en 1996, éboulement de 800 à 1 000 m³ détruisant une partie de la route;
- en 1998, éboulement de 100 à 200 m³;
- en février 2003, éboulement de 4 000 à 5 000 m³ détruisant la route sur environ 100 m.

L'importance et la récurrence des éboulements sur cet itinéraire ont provoqué de nombreuses fermetures de route (fermeture moyenne de 84 jours par an au cours des huit années de 1995 à 2003), entraînant ainsi des impacts économiques importants.

Devant l'intérêt majeur du site d'un point de vue fonctionnel et touristique, le Conseil Général de la Drôme a décidé d'engager des travaux portant sur la requalification de cet itinéraire et sur sa mise en sécurité. Il a donc été décidé d'aménager un nouveau tunnel, court-circuitant le défilé des Grands Goulets (cf. **Figure 67**).



Figure 67 : Localisation du compartiment C2 et du Tunnel dans les Gorges des Grands Goulets

3.1.1. Géologie et instabilités

La Vallée de la Vernaison entaille profondément la bordure ouest du Plateau du Vercors, faisant apparaître de grandes falaises calcaires de faciès urgonien (calcaire de teinte claire, très massif, en bancs épais, parfois dolomitique), qui reposent sur des formations de calcaires argileux du Valanginien et de l'Hauterivien (formations sédimentaires datant du Crétacé inférieur). Les formations urgoniennes sont parcourues par de nombreuses failles de direction nord-sud, occasionnées par l'orogénèse alpine. Ces formations sont profondément karstifiées. L'épaisseur des formations rocheuses traversées par la route RD 518 et la surplombant, la fracturation des terrains en place et l'infiltration d'eau souterraine, constituent autant de facteurs favorisant l'instabilité du massif. On peut noter par ailleurs que le canton de la Chapelle-en-Vercors figure en "zone 1b" (zone de sismicité faible) au Décret du 14 mai 1991 relatif à la prévention du risque sismique.

Ainsi, ces instabilités de terrain se traduisent notamment par la chute de pierres pouvant aller jusqu'à la chute de blocs, voir à l'arrachement de pends entiers de falaise.

3.1.2. Étude de l'aléa

L'inspection générale des falaises réalisée en 2004 par la société S.E.T.E. a permis de mettre en évidence sur la falaise inférieure, au-dessus de la route, des instabilités de plusieurs centaines à plusieurs milliers de mètres cubes, présentant des indices défavorables en terme de stabilité (fractures arrières ouvertes avec écoulement d'eau, surplombs) [SETE, 2004].

La construction du tunnel, d'une longueur de 1 700 mètres, va permettre de sécuriser efficacement une bonne partie de la route départementale RD 518 sujette aux risques fréquents de chutes de blocs et éboulements. Néanmoins, à l'aval du tunnel, la vulnérabilité de la route reste élevée et particulièrement au niveau de l'instabilité du compartiment C2 dont le volume a été estimé à plusieurs centaines de mètres cubes. Le compartiment C2 est constitué d'une masse rocheuse calcaire présentant un important surplomb. Les dimensions du compartiment C2 ont été définies approximativement à une cinquantaine de mètres de haut et de large avec une

épaisseur de 4 à 10 m (soit un volume d'environ 20 000 m³ et une masse d'environ 50 000 tonnes).

Le compartiment présente un découpage par une stratification sub-horizontale, recoupée par une fracture arrière sub-verticale et sensiblement parallèle à la paroi, qui apparaît ouverte en pied et sur le flanc est. En pied de surplomb, on observe des bancs fracturés en éléments potentiellement instables avec d'importantes marques de suintement d'eau. Le flanc ouest présente une série de fractures sensiblement verticales et rentrantes. De part et d'autre du compartiment, la paroi est relativement saine avec des aléas limités à des chutes de pierres et blocs (cf. **Figure 68**).

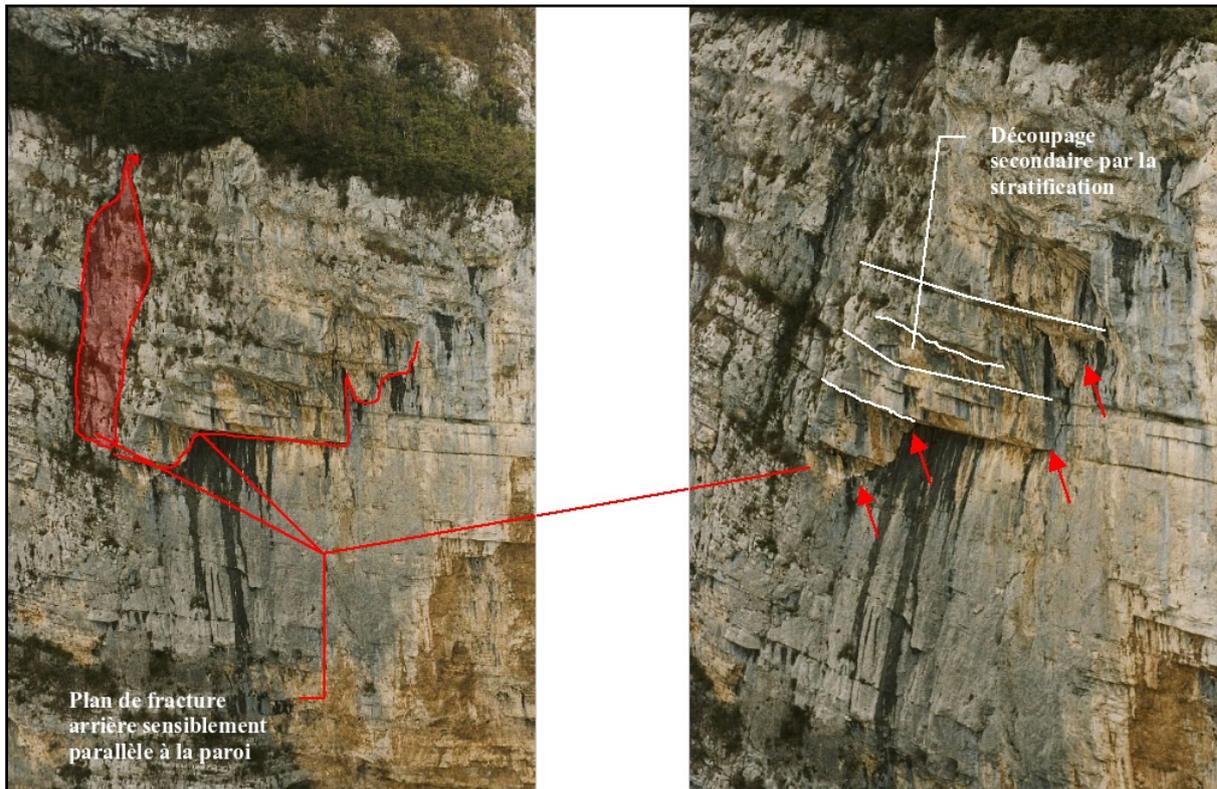


Figure 68 : Étude structurale du compartiment C2 [SETE, 2004]

Les caractéristiques structurales du compartiment C2 laissent ainsi présager un mécanisme d'instabilité de type rupture de surplomb. Ce type de mécanisme est justement celui à l'origine des derniers éboulements en grande masse sur le site des Grands Goulets (février 2003) et par analogie de contexte à celui de des Gorges de la Bourne en janvier 2004.

3.1.3. Qualification de l'instabilité C2

Compte tenu du mécanisme d'instabilité mis en jeu (rupture de surplomb), l'instabilité C2 est très complexe à qualifier.

Néanmoins, on a vu précédemment que de nombreux indices géomécaniques caractérisant l'état de stabilité naturel du massif rocheux, fournissent une probabilité plutôt forte de rupture. En effet, la fracture arrière émerge de façon visible en pied de surplomb, où elle est ouverte de plusieurs centimètres. Elle remonte sur le flanc est sur une dizaine de mètres. Cependant, la végétation et les éboulis peu actifs en pied de falaise, indiquent des chutes de pierres peu fréquentes. Sur la vire, au dessus de la tête du compartiment, il n'a pas été observé d'ouvertures ou de rejets sur fracture.

Il est probable que la stabilité de ce compartiment ne soit assurée que par des ponts de matière subsistant entre les épontes (re-cristallisation, remplissage argileux) et dont la surface pourrait éventuellement être quantifiée à l'aide d'un radar géologique [Deparis, 2007].

Par ailleurs, on peut souligner l'existence de facteurs déclencheurs. Les suintements d'eau en pied de surplomb laissent ainsi présager une altération des épontes rocheuses au niveau de la discontinuité arrière. De la mousse apparaît à ce niveau, ce qui atteste d'un phénomène actif et régulier. Les infiltrations sont envisageables par la large vire située entre les falaises inférieure et supérieure et par laquelle on accède au dessus du compartiment. Des accumulations de neige sont souvent observées sur cette vire, mais la fonte est progressive car le versant assez encaissé reste froid en hiver. Située à environ 600 mètres d'altitude dans d'étroites gorges, la zone est soumise à des cycles gel/dégel.

Cependant, il y a peu d'indices attestant de la dynamique de l'instabilité. Aucune mesure ni repère n'ont été mis en place auparavant permettant d'évaluer la probabilité de rupture de l'instabilité. Seul, les éboulements voisins passés, ayant une configuration analogue, permettent d'envisager une probabilité d'occurrence du phénomène.

Nous avons qualifié l'instabilité à partir de la méthode LIRIGM [Dussauge, 2002], dont la fiche est présentée en détail en annexe (cf. **Annexe D-1**).

Cette caractérisation HGP de l'instabilité C2 indique une probabilité de rupture plutôt forte. Bien que le manque d'indices dynamiques traduise une évolution actuelle plutôt lente, la forte activité anthropique générée par les travaux de creusement du tunnel pourrait accélérer le processus de déstabilisation. C'est pourquoi le Conseil Général de la Drôme a décidé de mettre ce compartiment sous surveillance.

3.2. Instrumentation et système de surveillance

3.2.1. Description de l'instrumentation

L'instrumentation (cf. **Tableau 7**) se compose de deux réseaux de mesures : un réseau de mesures géotechniques et météorologiques, et un réseau de mesures des vibrations. Elle a été mise en place fin juin 2005.

Les deux réseaux de mesure sont gérés par notre station de surveillance SAFIR, installée sur la vire au dessus de la masse rocheuse.

Le réseau de mesure des déformations se compose de quatre extensomètres positionnés tout autour du compartiment C2. Deux extensomètres ont été fixés sous le surplomb et fonctionnent en compression, tandis que les deux autres, fixés le long des fractures latérales et horizontales du compartiment, fonctionnent en extension.

Les capteurs de température, ainsi que le pluviomètre sont installés sur la vire à proximité de la station (cf. **Figure 69**).

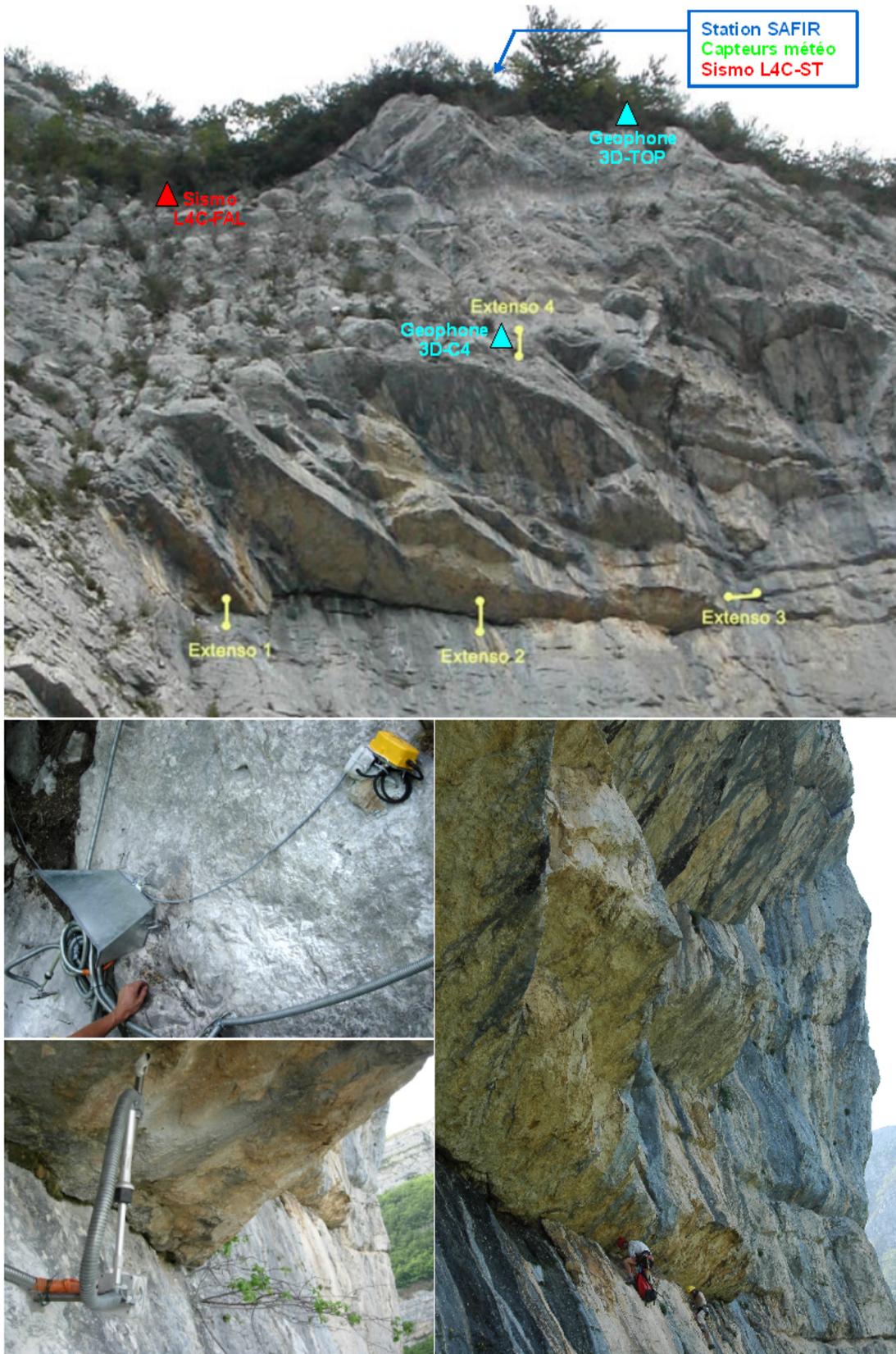


Figure 69 : Instrumentation des Grands Goulets :
vue générale du dispositif (haut),
mise en place des extensomètres sous le surplomb de la masse C2 (bas à droite),
extensomètres et capteur vibration (bas à gauche)

Le réseau de mesure des vibrations a été mis en place simultanément et se compose de deux géophones 4,5 Hz, 3 composantes. Un géophone a été scellé sur la paroi à l'aplomb du compartiment et le deuxième se trouve sur la vire, en bordure de falaise, à quelques dizaines de mètres de la station. Les deux géophones 3 composantes sont orientés Nord-Est. Le réseau sismique a été complété en avril 2006 par deux sismomètres verticaux L4C 1Hz. Un des sismomètres a été placé sur la vire, au Nord (L4C-FAL), et l'autre sismomètre à proximité de la station, au bord de la falaise supérieure (L4C-ST).

L'ensemble du dispositif fonctionne en basse tension et est alimenté par une batterie 12V, dont la recharge est assurée par un panneau solaire de 70 W. En cas de mauvaises conditions d'ensoleillement, le système peut fonctionner de manière opérationnelle pendant une dizaine de jours puis ensuite il passe dans un mode de fonctionnement dégradé (mise en veille des appareils de communication). La station SAFIR est équipée d'un module GPS utilisé pour la synchronisation horaire. Une transmission par GSM permet de suivre l'évolution du site et le fonctionnement de l'instrumentation à distance par le superviseur MYRSA, situé à Saint Martin d'Hères.

Tous les composants du système de surveillance ont été choisis pour fonctionner dans des conditions météorologiques difficiles de montagne et pour des basses températures allant jusqu'à -40°C.

CAPTEUR	NOMBRE	TYPE	ECHANTIL- LONNAGE	ENREGIS- TREMENT	OBJECTIF
Réseau de mesure géotechnique et météorologique					
Extensomètre	4	potentiométrique EM=100mm, linéarité=0,1%	1 sec.	5 min.	Suivi de l'ouverture des fractures, Suivi des mouvements de la masse rocheuse
Température de l'air	1	PT100	5 min.	5 min.	Suivi influence gel/dégel
Température rocher (50 cm de prof.)	1	LM50	5 min.	5 min.	Suivi influence gel/dégel, correction des effets thermiques
Pluviomètre	1	à auget basculeur	comptage		Suivi des précipitations
Réseau sismique					
Géophone	2	4,5Hz, 3 comp.	mode détection STA/LTA		Contrôle vibration, Activité microsismique
Sismomètre	2	L4C 1Hz, vertical	mode détection STA/LTA		Activité microsismique

Tableau 7 : Description de l'instrumentation installée sur le compartiment C2 des Grands Goulets

3.2.2. Historique du suivi instrumental

Le système de surveillance des déformations du compartiment C2 des Gorges des Grands Goulets a été mis en œuvre en juin 2005 et fut complètement opérationnel le 1^{er} juillet 2005. L'été 2005 a servi de phase de calibration, en permettant d'observer le

fonctionnement du système dans son contexte environnemental avant que ne débutent les travaux de creusement du tunnel.

Pendant l'automne 2005, des enregistrements sismiques discontinus ont été réalisés afin de mesurer le bruit de fond du site. Les tirs à l'explosif n'ont débuté qu'en janvier 2006 avec de petites charges (< 5 kg jusqu'à mi-mars 2006). Le système de surveillance des vibrations était opérationnel en janvier 2006 et la sensibilité de la mesure a été réglée suffisamment haute afin de pouvoir détecter la micro-sismicité dans le compartiment rocheux. Pendant la période d'avril à mai 2006, un disque dur externe a été raccordé à la station de mesure dans le but d'enregistrer l'intégralité des signaux sismiques et de pouvoir analyser les données a posteriori afin d'optimiser les paramètres de détection. Néanmoins cette période s'est avérée très calme puisqu'aucune activité nano-sismique n'a été détectée. Par contre, le réglage trop fort de l'étage d'amplification (étendue de mesure [-0,2;0,2] mm/s) a entraîné la saturation des signaux des tirs. En mai 2006, le réglage des gains a donc été diminué en conséquence (étendue de mesure [-1;1] mm/s).

En début d'année 2007, nous avons enregistré beaucoup de signaux parasites dus à un problème d'humidité dans les connectiques des capteurs. A la fin des travaux de déroctage par les tirs à l'explosif, en mai 2007, une nouvelle période d'enregistrement continu sur disque dur externe a été programmée dans le but d'ajuster exclusivement le niveau d'amplification à l'activité nano-sismique au sein du compartiment rocheux. Cette campagne de mesure nous a surtout permis de déceler de nombreuses perturbations sur le signal sismique dues à l'altération de la qualité des connectiques.

Pendant, un éboulement important s'est produit fin août 2007 juste à l'amont du compartiment C2, condamnant ainsi l'accès à notre instrumentation. De nouvelles interventions n'ont pu être programmées qu'en début 2008.

Le tunnel a été inauguré en juin 2008.

3.2.3. Fonctionnement du système de surveillance

Le système de surveillance (cf. **Figure 70**) et d'alerte des éboulements rocheux permet de sécuriser la zone menacée par l'éboulement du compartiment C2 et d'informer les gestionnaires et responsables des infrastructures et de la sécurité.

La tâche primaire de la station SAFIR consiste en l'acquisition du signal. L'échantillonnage des mesures extensométriques s'effectue à 1 Hz avec un enregistrement toutes les 5 minutes. Chaque mesure est sur-échantillonnée et moyennée pour réduire les erreurs systématiques. La température est mesurée et enregistrée au même pas de temps que la mesure des déplacements. Le pluviomètre est raccordé à la station par une entrée compteur qui est incrémentée à chaque basculement de l'auge, soit 0,2 mm de pluie.

Pour la mesure des vibrations, le signal est échantillonné à 500 Hz par la station SAFIR, qui opère dans un mode de détection STA/LTA. Les événements sont décrits dans un fichier de synthèse et le signal brut correspondant est enregistré dans un fichier indépendant sur une période pouvant varier de 10 à 30 secondes. La détection a été activée sur les deux géophones. Par contre, seul le sismomètre au Nord a été activé en détection car celui situé à proximité de la station provoquait de nombreux événements intempestifs dus aux bruits de pas (animaux et interventions de maintenance). Lorsqu'un signal est détecté sur un capteur, l'enregistrement s'effectue sur tous les capteurs à la fois.

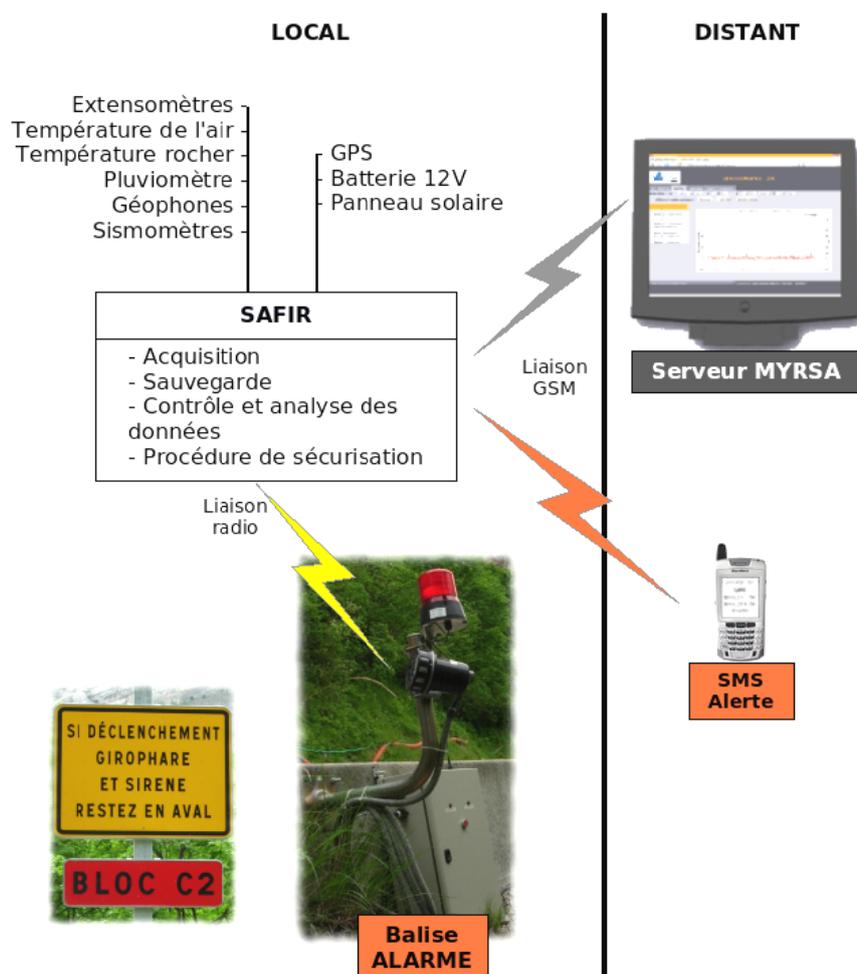


Figure 70 : Schéma du système de surveillance des Grands Goulets

L'analyse et la gestion d'alerte sont directement effectuées par la station via un logiciel spécifique à base de connaissance (cf **Chapitre 3**). Un certain nombre de règles ont été définies préalablement et adaptées au contexte du site. Ces règles sont établies à partir du savoir-faire, du retour d'expérience d'autres sites et des données du site proprement dites (issues d'une période d'auscultation préalable). Les règles sont constituées de faits dont la base peut évoluer à tout moment en fonction de la connaissance et expérience du site.

Exemple de faits issus de la base de connaissance :

- dépassement du seuil d'alarme sur la vitesse de déplacement d'un extensomètre;
- dépassement du seuil d'alarme sur le déplacement absolu d'un extensomètre;
- dépassement du seuil d'alarme pour au moins 2 extensomètres;
- alerte dégel quand la température redevient positive après une période de gel;
- dépassement du seuil d'alerte sur la pluviométrie;
- alerte sur détection d'un événement sismique dépassant un certain seuil d'énergie;
- alerte ressource batterie faible.

Exemple de conclusions issues de la base de connaissance :

- dysfonctionnement capteur ;
- dysfonctionnement alimentation ;
- vigilance (Alerte) ;
- éboulement imminent (Alarme) ;
- éboulement (Alarme).

Lorsque le système aboutit à une conclusion d'alerte, un message GSM est envoyé au responsable de la sécurité. Dans le cas d'une alarme, la station SAFIR active le déclenchement par radio des deux dispositifs d'avertissement sonore et lumineux situés en bordure de route en dessous de la masse afin d'alerter le personnel de chantier pour évacuer la zone menacée. Simultanément, des messages GSM sont instantanément envoyés aux gestionnaires du site afin qu'une cellule de crise puisse être réunie dans les meilleurs délais.

De plus, pour un suivi régulier du site, les données sont envoyées quotidiennement par GSM au serveur de supervision distant MYRSA, interrogeable par Internet, qui permet aux responsables et gestionnaires de suivre l'évolution du site à distance.

Nous avons privilégié le recours à un système de télésurveillance à la fois dans un souci opérationnel mais aussi pour la maintenance des équipements.

3.3. Auscultation des déplacements et des facteurs météorologiques

Le compartiment C2 se trouve sur une paroi orientée plein Ouest. Cette falaise est donc exposée au soleil l'après-midi mais du fait de sa situation dans les gorges des Grands Goulets, ne l'est que très peu en hiver. Ainsi, on observe sur les graphiques d'évolution des déplacements et de la température (cf. **Figure 71**), un cycle saisonnier dont l'amplitude crête s'élève à environ 0,4 mm pour les trois premiers extensomètres et atteint 1,2 mm pour l'extensomètre 4 qui est le plus exposé au soleil.

On remarque ainsi que les variations de déplacement mesurées sur les quatre extensomètres sont très corrélées avec la température. On observe par ailleurs, à plus petite échelle, que les mesures sont plus ou moins naturellement filtrées en fonction de la situation du capteur. Par exemple, l'extensomètre 2, situé complètement sous le surplomb, semble être moins affecté des variations thermiques hebdomadaires que les autres capteurs (cf. **Figure 71**).

Le capteur de température LM50 est situé à une profondeur de 50 cm dans le rocher. Sur toute la période 2006, il est rarement descendu sous la barre des 0 °C alors que la température de l'air (capteur PT100) montre de plus grandes variations thermiques journalières avec des épisodes gel-dégel plus marqués.

Par ailleurs, à l'échelle annuelle, il est très difficile de constater une influence directe des précipitations sur l'évolution des déplacements mesurés.

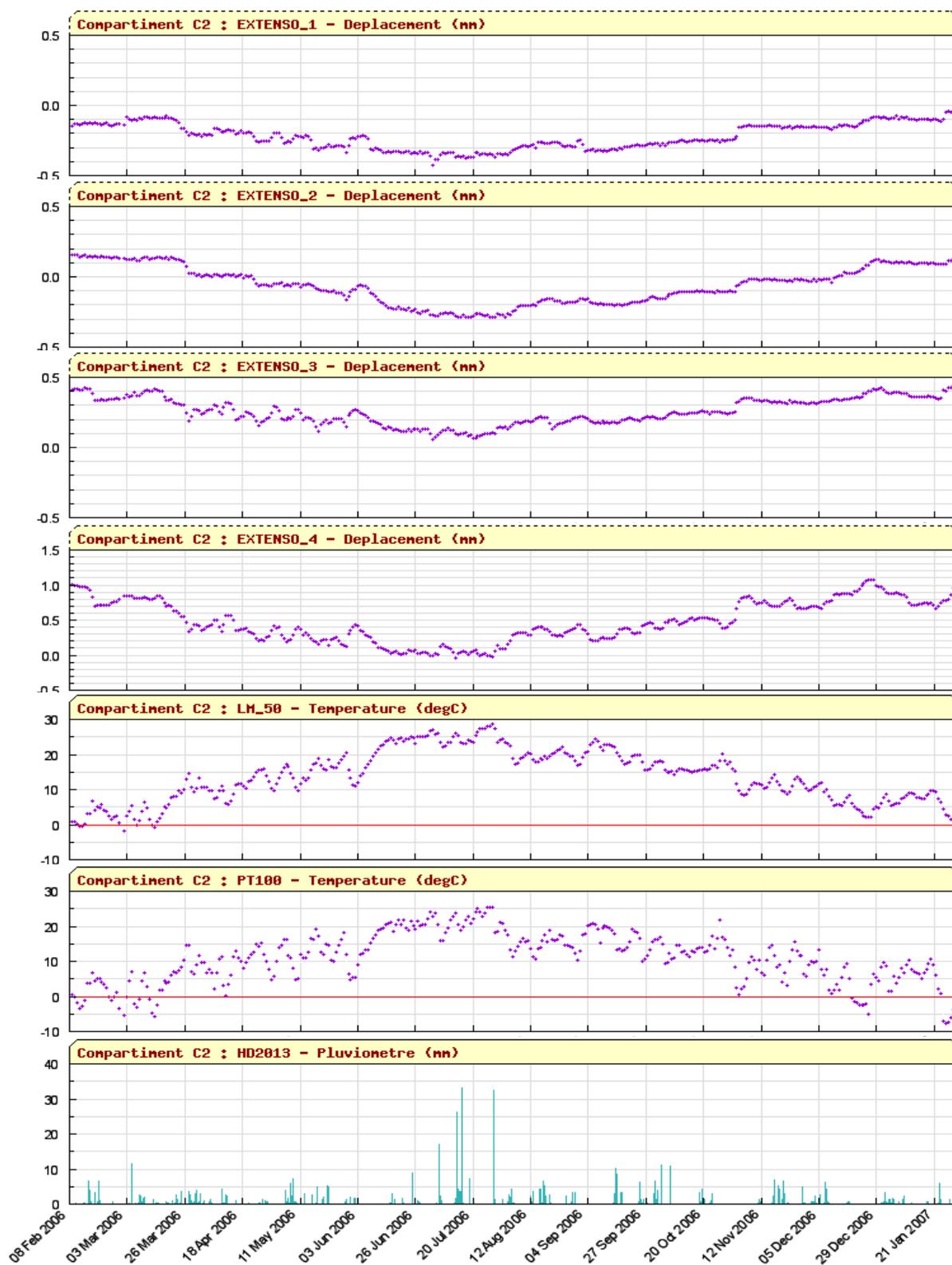


Figure 71 : Mesures brutes des déplacements, de la température (rocher & air) et de la pluviométrie sur l'année 2006 (lissage journalier)

Au vu de ces variations thermiques, nous avons cherché à corriger les données extensométriques de cette influence. Nous disposons pour cela des mesures de la température de l'air et des mesures de la température réalisées à une profondeur de 50 cm dans le rocher (à proximité de la station). Si on considère $S_{obs}(t)$ le signal observé et $N(t)$ le perturbateur, alors pour reconstituer le signal $S(t)$ « corrigé », il faut estimer une fonction G telle que :

$$S_{obs}(t) = S(t) + G[N(t)] \quad (4.17)$$

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressé à la correction des déplacements de l'effet thermique saisonnier. Pour cela, nous avons défini un modèle empirique de variation thermique à partir des mesures de température dans le rocher. La fonction a été définie par l'équation suivante et est représentée en rouge sur la figure suivante (cf. **Figure 72**) :

$$y(t) = 0.15 \cos(0.154 \cdot 10^{-3} \cdot t) \quad (4.18)$$

La correction effectuée sur la mesure des déplacements permet de supprimer efficacement la composante saisonnière.

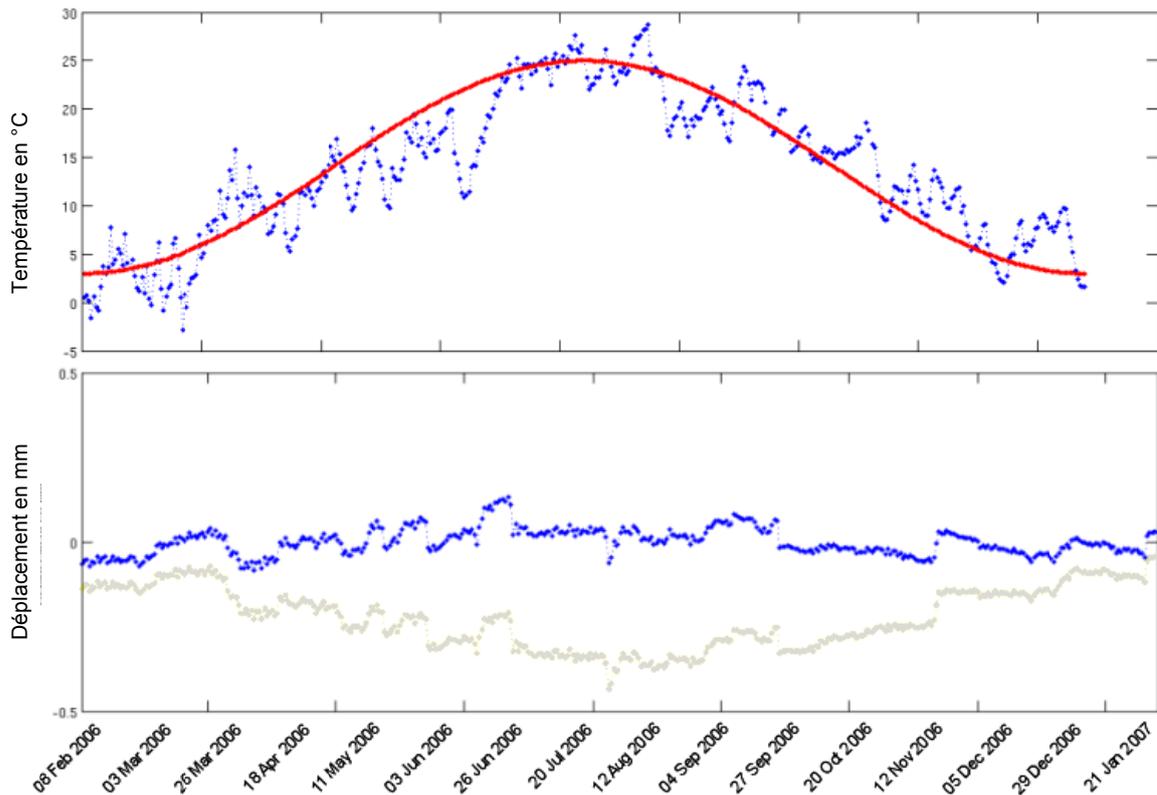


Figure 72 : Correction des mesures de déplacement des effets thermiques :
 (a) en bleu, mesures lissées de température dans le rocher, en rouge, modèle estimé en $\cos(t)$,
 (b) Mesures de déplacements de l'extensomètre 1 :
 en gris mesures brutes lissées, en bleu mesures corrigées

Face à la difficulté de corriger les effets thermiques à court terme (journaliers et hebdomadaires) avec un modèle en température, nous nous sommes naturellement orientés vers une solution instrumentale. Nous avons donc installé en juillet 2007, un capteur du même type que les capteurs en place, que nous avons fixé sur un bloc de rocher massif et compact de manière à limiter la mesure aux effets climatiques sans l'influence de l'instabilité. Pour une question de coût et de contraintes techniques, nous

avons installé un seul capteur, à proximité de la station et sur un élément rocheux n'appartenant pas à l'instabilité.

Si on considère que le capteur étalon ne subit âs de déformation dans le temps, alors les variations enregistrées sont le reflet unique des effets climatiques sur le couple capteur-rocher. Partant de cette hypothèse, nous avons alors directement corrigé les mesures des capteurs de surveillance par le capteur étalon (cf. **Figure 73**). Malgré les faibles variations enregistrées sur la période étudiée, on remarque néanmoins que la correction appliquée n'est pas totalement efficace. En effet, on observe que si les mesures du capteur étalon présentent des variations qui n'apparaissent pas sur la mesure à corriger, alors le signal corrigé fera apparaître un défaut là où il n'y en avait pas (cas sur la **Figure 73** de la perturbation du 25 Nov 2007).

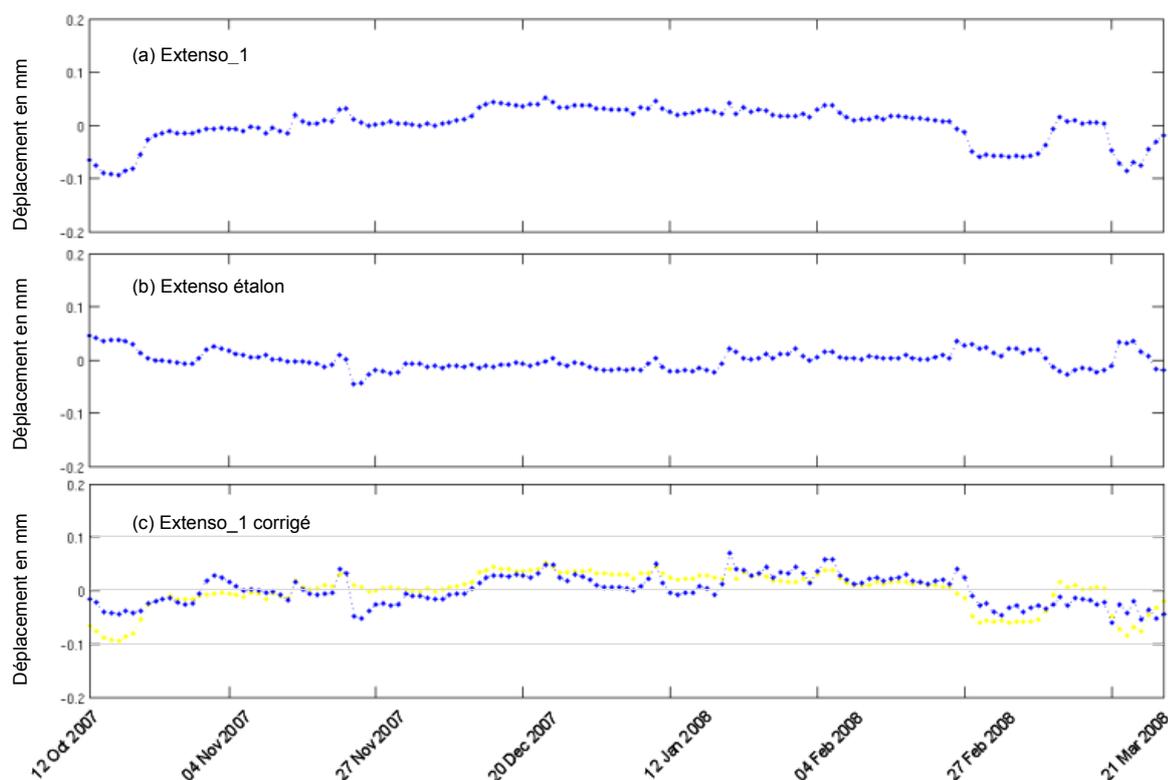


Figure 73 : Correction des mesures de déplacement par le capteur étalon ;
 (a) mesures brutes lissées du capteur Extenso_1 ;
 (b) mesures brutes lissées du capteur étalon ;
 (c) en bleu, mesures corrigées lissées du capteur Extenso_1,
 (c) en jaune mesures brutes lissées sans correction

Au vu des résultats obtenus, il apparaît que la correction des mesures de déplacement reste un problème majeur dans l'auscultation d'une instabilité rocheuse. En effet, il est extrêmement complexe de modéliser l'influence des effets thermiques sur le capteur lui-même ainsi que sur le volume de roche considéré. Face à cette problématique, les prochaines expérimentations envisagées s'attacheront à compléter la mesure au niveau du point de surveillance par l'implantation en parallèle d'un capteur étalon et d'un capteur de température à ce niveau.

3.4. Etude de la sismicité discrète

3.4.1. Caractérisation de la sismicité

Sur l'année 2006, notre station sismique a détecté environ 3 200 événements. Une première discrimination à partir du facteur de répartition du signal nous permet d'extraire environ 2 052 événements dus à des perturbations. Une deuxième discrimination basée sur le calcul de l'énergie cumulée sur toutes les voies permet d'extraire 662 événements isolés (signal sur un capteur seulement).

Il reste ainsi approximativement 480 événements potentiellement dignes d'intérêt.

La liste des tirs fournie par l'entreprise de travaux nous a permis de recenser 415 tirs à l'explosif d'une charge instantanée variant de 3 à 18 kg en fonction de l'avancement des travaux et des milieux géologiques rencontrés.

Par l'analyse des dates et heures de ces tirs, nous avons pu extraire 332 signaux sismiques détectés par notre station. Sur le modèle de ces tirs, nous avons établi un gabarit qui nous a permis d'extraire 11 événements supplémentaires présentant les caractéristiques d'un tir à l'explosif mais n'étant pas référencés dans la liste fournie par l'entreprise de travaux. D'autre part, sur les 70 tirs non enregistrés par notre station, 58 dates de tirs correspondent à des périodes de non fonctionnement de notre station, et pour les 12 restants, nous n'avons pas pu confirmer leur réalisation.

Le tableau suivant regroupe la répartition des signaux sismiques détectés.

TYPE D'EVENEMENT	NOMBRE
Tir à l'explosif	343
Séisme	142
Bruit instrumentation	2 052
Isolé (bruit animaux, chute de pierres)	662
TOTAL	3 199

Tableau 8 : Répartition de la quantité d'événements sismiques détectés en 2006 sur le site des Grands Goulets

La classe « Séisme » regroupe tous les signaux sismiques enregistrés sur tous les capteurs et qui ne sont ni des tirs et ni du bruit électronique. Nous avons cherché à les caractériser en représentant le nombre de séismes enregistrés en fonction de leur amplitude maximale et de leur durée (cf. **Figure 74**).

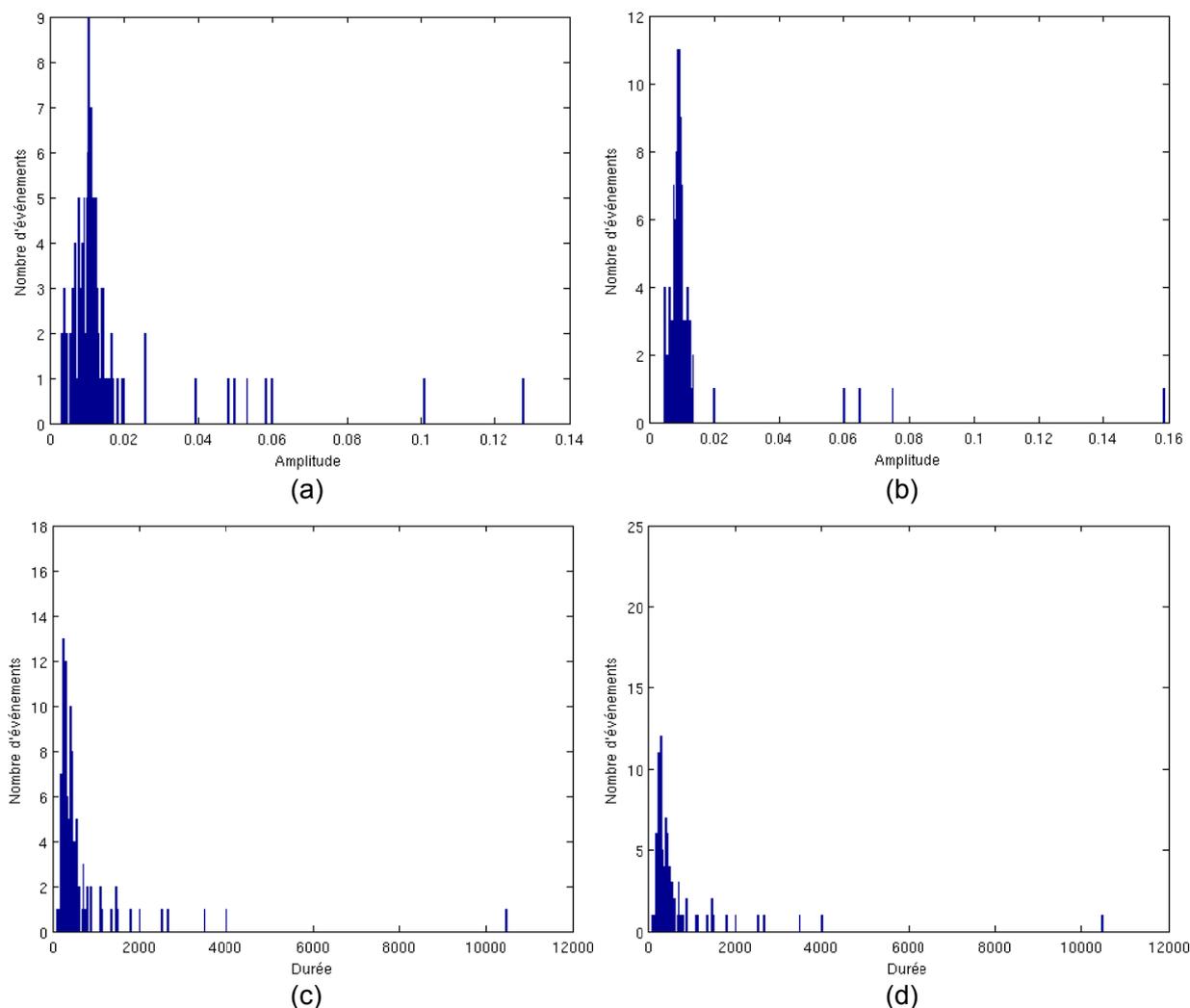


Figure 74 : Nombre d'événements sismiques de la classe « Séisme » en fonction de l'amplitude maximale et de la durée en ms du signal
 (a) et (c) Géophone compartiment (Geo3D_C4)
 (b) et (d) Sismomètre L4C-FAL

La représentation du nombre de séismes montre une répartition qui semble aléatoire et qui ne permet pas de retrouver, en particulier, les caractéristiques d'une loi de puissance.

Par ailleurs, si on représente l'activité sismique dans le temps, on remarque qu'elle est plutôt constante et assez limitée (cf. **Figure 75**). On observe néanmoins, un accroissement d'activité le 21 juillet 2006 avec 21 événements de très faible énergie (énergie légèrement supérieure au bruit de fond).

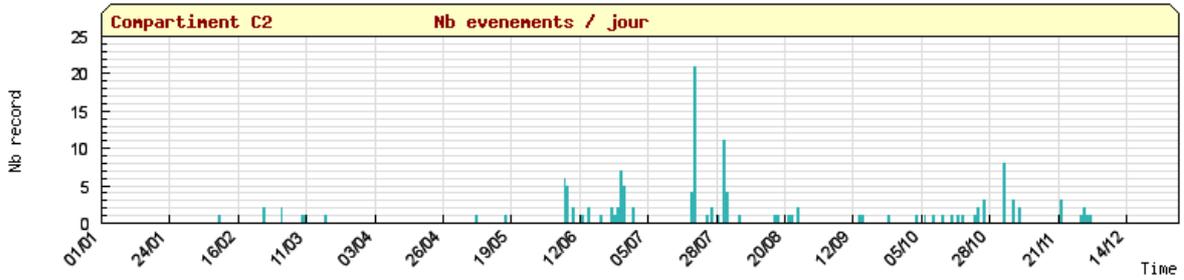


Figure 75 : Activité sismique de la classe « Séisme » pendant l'année 2006

Enfin, nous avons représenté les événements sismiques des classes « Séisme » et « Tir » sur un même diagramme amplitude en fonction de la durée (cf. Figure 76). Au vu de cette figure, on note une nette distinction entre ces deux classes.

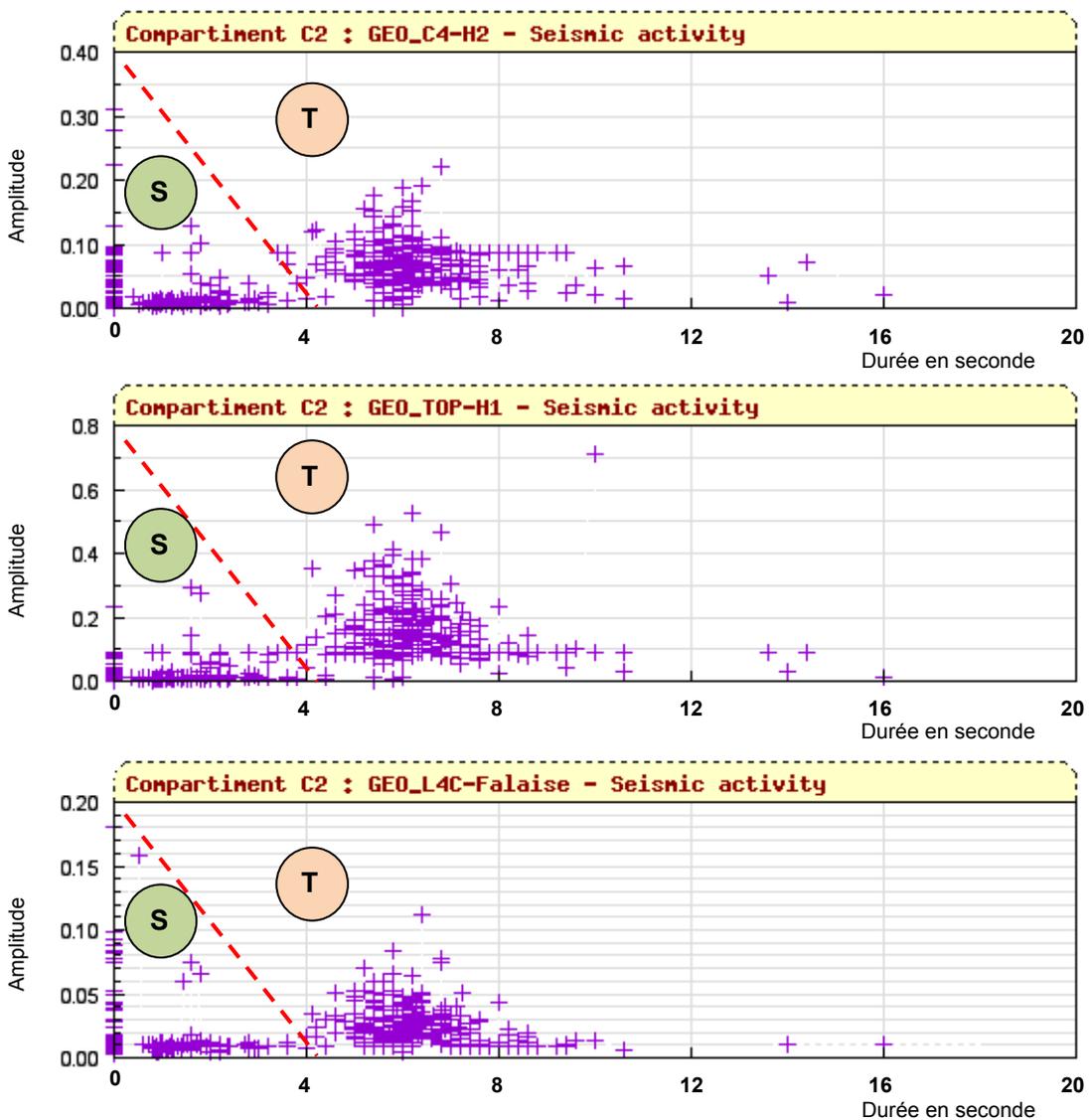


Figure 76 : Diagramme amplitude en fonction de la durée pour les événements sismiques des classes « Séisme » et « Tir » pour les 3 capteurs GEO_C4, GEO_TOP et L4C-FAL
 (T) symbolise l'espace des événements de la classe « Tir »
 (S) symbolise l'espace des événements de la classe « Séisme »

3.4.2. Typologie des signaux sismiques détectés

Les diagrammes de la **Figure 76** permettent de faire une distinction nette entre les deux classes « Tir » et « Séisme ». Ainsi, on observe que les signaux sismiques des tirs sont les plus long ; ils durent en moyenne entre 4 et 8 secondes et ont une fréquence dominante de l'ordre de 15 à 25 Hz (cf. **Figure 77**). Les signaux de la classe « Séisme », par contre, sont bien plus courts (moins d'une seconde) et sont peu énergétiques. Leur fréquence dominante est plus basse que les tirs, de l'ordre de 10 Hz (cf. **Figure 78**).

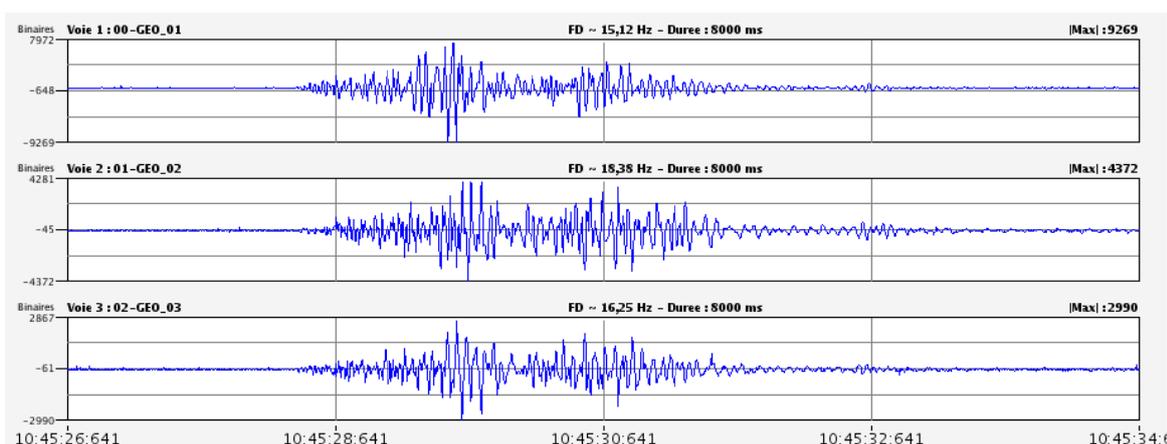


Figure 77 : Signal sismique d'un tir à l'explosif pendant les travaux de creusement du tunnel

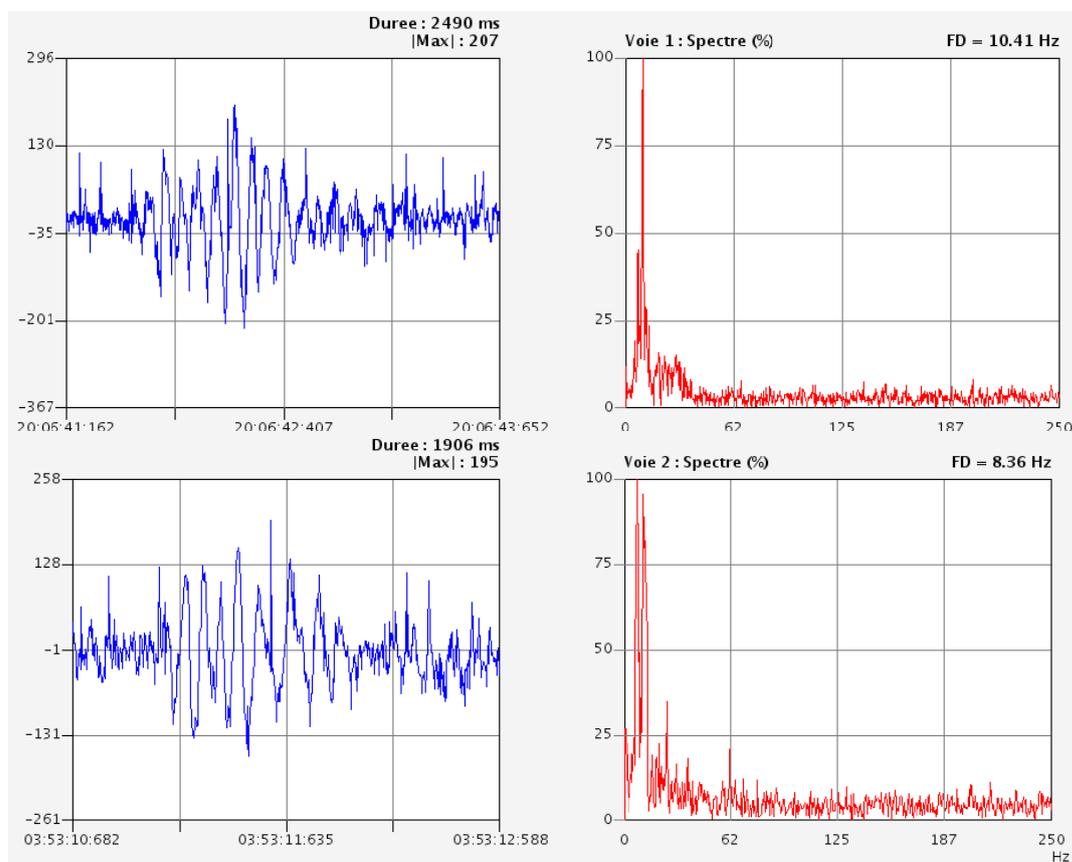


Figure 78 : Signal sismique temporel (gauche) et spectre (droite) de 2 signaux de la classe « Séisme »

Dans la classe « Séisme », nous n'avons répertorié que trois événements sismiques avec une durée de plus de 5 secondes. Le plus long est représenté ci-dessous (cf. **Figure 79**).

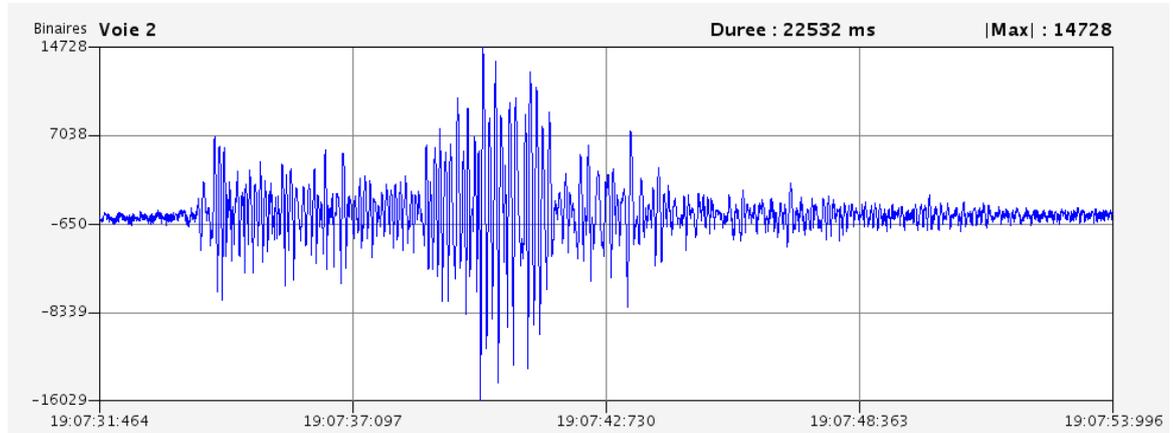


Figure 79 : Signal sismique temporel d'un séisme de longue durée enregistré le 8 mai 2006 à 18h sur le compartiment C2 des Grands Goulets

3.5. Conclusion : Surveillance des Grands Goulets

Les mesures d'extensométrie réalisées sur le compartiment C2 des Grands Goulets n'ont pas permis de mettre en évidence un mouvement du bloc surveillé. Par ailleurs, l'observation de variations annuelles des déplacements mesurées met en évidence la nécessité de les corriger par la température. De plus, nous avons pu montrer que les variations journalières des déplacements peuvent être mieux corrigées par la mesure en parallèle sur un capteur étalon (sur un volume de roche qui ne se déforme pas).

Parmi les 3200 détections effectuées par le système pendant une année, 140 événements ont pu être caractérisés comme des nanoséismes ou microséismes proches. Ce chiffre est peu élevé en comparaison à la nanosismicité enregistrée pendant l'expérience de Chamousset, alors que les volumes en jeu sont comparables.

Par la suite, l'expérience acquise lors de l'auscultation de l'écaille de Chamousset sera réinvestie pour l'étude et la caractérisation de la nanosismicité enregistrée aux Grands Goulets. En particulier, une mesure de bruit de fond en continu sera réalisée, afin de pouvoir mettre en évidence les modes propres du compartiment C2 et permettre d'améliorer l'appréhension des mécanismes en présence.

Conclusion générale et perspectives

Ce travail a tout d'abord permis de mettre au point un dispositif instrumental constituant une base solide pour l'acquisition en continu de paramètres pertinents pour le suivi temporel de la stabilité des massifs rocheux. Ce dispositif permet en effet de mesurer et stocker en continu et de façon autonome pendant de longues durées (plusieurs mois), des données haute fréquence ou lentes. La station d'acquisition mise au point peut être télécontrôlée, de façon à connaître son état de fonctionnement, à en modifier sa configuration, et à transmettre des données lentes. Cette station est par ailleurs capable de faire un pré-traitement des données (par exemple, en détectant des nano-séismes, en calculant des fréquences dominantes, des amplitudes maximales, des durées) et constitue un outil de première gestion d'alerte par l'analyse de critères de surveillance s'appuyant sur une base de connaissances. Le travail réalisé a également permis de mettre au point un système de surveillance complet, intégrant un dispositif de surveillance sur site, un réseau de communication vers des dispositifs d'alerte et distants ainsi qu'un système client-serveur de supervision distant, comprenant des outils de gestion de données (SGBD-R) et d'analyse graphique via une interface Internet. L'ensemble permet de suivre actuellement plus de 16 sites instables instrumentés en France.

Cet outil a notamment permis de suivre l'évolution des déformations subies par une écaïlle rocheuse instable, sur le site de Chamousset (Sud-Est Vercors), jusqu'à environ une semaine de son éboulement. Ce suivi temporel montre ainsi :

- une accélération, nette mais modérée, du déplacement horizontal du sommet de l'écaïlle ;
- de très nombreux nanoséismes, dus à la rupture progressive de l'écaïlle ; un grand nombre ont lieu sous une forme qui évoque une « rupture par morceaux ». Ils ont un contenu spectral haute fréquence pendant toute la durée du signal, et peuvent s'étendre jusqu'à près d'une minute. Ils apparaissent pendant des périodes de crise où ils sont très fréquents. L'étude de leur rapport durée sur amplitude montre une diminution de ce paramètre avec le temps ;

- des modes spectraux qui s'individualisent sur l'écaïlle à des fréquences supérieures à 10-15 Hz, mais qui ne sont pas observés sur le massif, où néanmoins on remarque une amplitude du signal sismique total supérieure (bruit + nanoséismes), tendant à augmenter en moyenne avec le temps ;
- l'occurrence de crises sismiques qui ne dégénèrent pas vers l'instabilité fait du comptage d'événements un paramètre délicat à utiliser pour caractériser l'évolution d'une instabilité ;
- certains événements sismiques enregistrés par le massif peuvent avoir une fréquence dominante très basse (5 à 10 Hz), probablement dominée par la résonance de l'écaïlle.

Cette étude a ainsi permis de mettre en évidence de nouveaux paramètres pertinents pour le suivi de l'évolution de ce type d'instabilités et a par conséquent permis de progresser dans la spécification des caractéristiques instrumentales à atteindre.

Ainsi le riche retour d'expérience acquis sur ce site pourra permettre d'orienter les suivis réalisés actuellement sur d'autres instabilités rocheuses (Grands Goulets, autre écaïlle à Chamousset, etc.) et de continuer à progresser dans la connaissance de ce type de phénomènes.

Références

Bibliographie

- Adeline C., 2008.** Développement d'un système GPS pour l'auscultation de mouvements de terrain de grande ampleur, Mémoire TFE Diplôme d'Ingénieur Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, CNAM.
- AFNOR, NF P95-310, décembre 1996.** Déclenchement artificiel : Principes techniques généraux, Paris, AFNOR, 12p.
- Allen R., 1978.** Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 68-5, 1521-1532.
- Allen R., 1982.** Automatic phase pickers: their present use and future prospects, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72-5, S225-S242.
- Amitrano D., Grasso, J.R., Senfaute G., 2005.** Seismic precursory patterns before a cliff collapse and critical-point phenomena. *Geophys. Res. Lett.*, 32, 1-5.
- Amitrano D., Gaffet S., Malet J.-P., Maquaire O., 2007.** Understanding mudslides through micro-seismic monitoring: The Super-Sauze (South French Alps) case study. *Bulletin de la Société Géologique de France* 178, 2, p.149-157
- Asch G., et al., 1998.** Les capteurs en instrumentation industrielle, 5ème édition, Dunod.
- Asch G., et al., 2003.** Acquisitions de données, du capteur à l'ordinateur, Seconde édition, Dunod.
- Azimi C., Desvarreux P., 1996.** Quelques aspects de la prévision des mouvements de terrains, *Revue française de géotechnique*, vol. 76, pp 63-71.
- Bache, Th.C., Bratt, S.R., Swanger, H.J., Beall, G.W., and Dashiell, F.K., 1993.** Knowledge-Based Interpretation of Seismic Data in the Intelligent Monitoring System, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83-5, 1507-1526.

Baer M., Kradolfer U., 1987. An automatic phase picker for local and teleseismic events, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 77, 1437-1445.

Beauducel F., 1998. Structures et comportement mécanique du volcan Mérapi (Java): une approche méthodologique du champ de déformations, *PhD thesis*, Université Paris 7, Institut de Physique du Globe de Paris, 243p.

Bessason B., Eiriksson G., Thorarinsson O., Thorarinsson A., Einarsson S., 2007. Automatic detection of avalanches and debris flows by seismic methods, *Journal of Glaciology*, Vol. 53, No. 182.

Besson L., 1996. Les risques naturels en montagne: Traitement, Prévention, Surveillance, Grenoble, Artès, Publialp, 438p.

Besson L., 2005. Les risques naturels. De la connaissance pratique à la gestion administrative. Collection Dossier d'experts. Institut des Risques Majeurs, Voiron.

Bieniawski Z.T., 1993. Classification of rock masses for engineering; The RMR system and future trends, in J.A. Hudson, *Rock testing and site characterization*, pp. 553-573, Pergamon Press, Oxford, UK.

Bormann P., et al., 2002. New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP), IASPEI, ISBN 3-9808780-0-7.

Busby J.P. et coll. 2004. Programme de recherche européen : PRediction Of The Erosion of Cluffed Terrains (PROTECT), Final Report, Sections 1-3.

CFGI, 2000. Caractérisation et cartographie de l'aléa dû aux mouvements de terrain, Collection Environnement – Les risques naturels, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 91p.

CGPC/IGE, 2005. Mission d'enquête sur le régime d'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles, Rapport gouvernemental, Conseil général des Ponts et Chaussées N° 2004-0304-01, Inspection générale de l'Environnement N° IGE/05/006

Chapot P., 1981. Etude des vibrations provoquées par les explosifs dans les massifs rocheux. Rapport de recherche du LCPC de Nancy No105.

Chevrie f., Guély F., 1998. La logique floue. Cahier technique Schneider n°191.

Clément C., 2004. Technique d'écoute microsismique appliquée à l'auscultation du versant rocheux instable de Valbres (Alpes-Maritimes), Interprétation des mesures, caractérisation du milieu et de son instabilité. Mémoire de stage de fin d'études, École et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST), Université Louis Pasteur, Strasbourg I, France

Conseil Général de la Drôme (CG26), 2003. Dossier d'enquête, Aménagement de la RD 518 entre Sainte-Eulalie-en-Royans et les Baraques-en-Vercors.

Cruden, D.M., and Varnes, D.J., 1996. Landslide types and processes: in Turner, K.A. and Schuster, R.L., editors, *Landslide Investigation and Mitigation: National Research Council, Transportation Research Board Special Report 247*, p. 36-75.

Deparis J., 2007. Étude des éboulements rocheux par méthodes Géophysiques, *PhD thesis*, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 245p.

Duquenne F., Botton S., Peyret F., Bétaille D., Willis P., 2005. GPS localisation et navigation par satellites, 2^e édition revue et augmentée, Edition Hermes.

Duranthon J.-P., 2000. Application de la méthode GPS de localisation par satellite à la surveillance de sites naturels instables. B.L.P.C., n°228, p. 47-57.

Duranthon J.-P., Effendiantz L., 2004. Le versant instable des "Ruines" de Séchilienne, Point sur l'activité du phénomène et présentation du nouveau dispositif de gestion de la télésurveillance, B.L.P.C., n°252-253. septembre-décembre 2004, Art 4532, pp 29-48.

Durville J.L., 2004. Quelques remarques sur l'emploi des probabilités dans le domaine des risques naturels, Cas des mouvements de terrain, B.L.P.C., n°249. mars-avril 2004, réf. 4509, pp 3-17.

Dussauge-Peisser C., 2002. Evaluation de l'aléa éboulement rocheux. Développement méthodologiques et approches expérimentales. Application aux falaises calcaires du Y grenoblois. *PhD thesis*, Université Joseph Fourier, France.

Dussauge-Peisser C., Grasso J.R., Helmesletter A., 2003. Statistical analysis of rockfall volumes : implication for rock fall dynamics. J. Geophys. Res., 86, 2286.

Effendiantz L., Rochet L., 2000. Suivi d'une instabilité rocheuse jusqu'à l'éboulement. Commune de La Perrière (Savoie), Bull. Liaison Laboratoire des Ponts & Chaussées, n°226, pp 47-56.

Endo E.T., Murray T.L., 1991. Real-time seismic amplitude measurement (RSAM) : a volcano monitoring and prediction tool. Bull Volcanol 53: 533-545.

Evans, A.G., 1979. Acoustic emission sources in brittle solids, in Fundamentals of Acoustic Emission, edited by K. Ono, pp. 209 – 227, Univ. of Calif., Los Angeles.

Faure E., 2004. Développement d'un système de fichier pour une station d'acquisition numérique de mesures géophysiques, Rapport de stage, Département 3i, Polytech'Grenoble.

Favier R., 2002. Les pouvoirs publics face aux risques naturels dans l'histoire, Grenoble, CNRS-MSH-Alpes, ISBN : 2-914242-08-5, 444 p.

Finlayson B, Statham I., 1980. Hillslope analysis, Heineman, Londres, Grande-Bretagne.

Flageollet J.-C., 1989. Les mouvements de terrain et leur prévention, Paris, Ed. Masson, Collection Géographie, 224p.

Frayssines M., 2005. Contribution à l'évaluation de l'aléa éboulement rocheux (rupture), Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 218 p.

Gendron P., Ebel J., Manolakis D., 2000. Rapid Joint Detection and Classification with Wavelet Bases via Bayes Theorem, Bull. Seism. Soc. Am., V.90,N.3, p.764-774

Got J.-L., Grangeon J., Bard P.-Y., 1999. Mise au point d'une station de mesure en continu de l'amplitude RMS du signal accélérométrique, destinée à l'enregistrement de microruptures dans un massif rocheux en mouvement. Rapport interne, LGIT.

Guéguen, P. and P.-Y. Bard. 2005. Soil-structure and soil-structure-soil interaction: experimental evidence at the Volvi test site, J. Earthq. Engng., 9 (5), 657-693

Gunzburger Y., 2004. Rôle de la thermique dans la prédisposition, la préparation et le déclenchement des mouvements de versants complexes, Thèse de doctorat, INPL, Nancy, 157p.

Hack R., 2000. Geophysics for slope stability. *Surveys in Geophysics*, 21, 423-448.

Hantz D., Vengeon J.M., Dussauge-Peisser C., 2003. An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock fall hazard assessment. *Natural hazards and Earth System Sciences*, 3, 693-701.

Harris Fredric J., 1978. On the use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform, *Proceedings of the IEEE* 66:1 pp 51–83.

Hudson, J.A., 1992. *Rock Engineering Systems : Theory & Practice – High Plains Press (JAH)*, 185p.

Idelon Y., 2001. Développement d'une station d'acquisition numérique de mesures géophysiques, Rapport de stage, Département 3i, Polytech'Grenoble.

Interreg II C « Falaises », 2001. Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises, Groupe falaise, Confrontation des méthodes d'étude des éboulements rocheux dans l'arc alpin, Programme Interreg II C, Méditerranée occidentale et Alpes Latines, 239p.

Interreg III A « RiskYdrogéologie », 2006. Risques hydro-géologiques en montagne : parades et surveillance, Programme Interreg III A, DVD Rom.

Jaboyedoff M., Ornstein P., and Rouiller J.-D., 2004. Design of a geodetic database and associated tools for monitoring rock-slope movements: the example of the top of Randa rockfall scarp. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 204, 187-196.

Keefer D.K., 1984. Rock avalanches caused by earthquakes: Source characteristics, *Science*, 223, 1288-1290.

Keefer D.K., 1999. Earthquake-induced landslides and their effects on alluvial fans, *J. Sedimentary Research*, 69.1, 84-104.

Kert C., 1999. Rapport n°1540 sur les techniques de prévision et de prévention des risques naturels en France, Rapports de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.

LCPC, 1994. Surveillance des pentes instables, Guide technique, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées.

LCPC, 2001. Parades contre les instabilités rocheuses, Guide technique, Collection Environnement, Les Risques Naturels, 143p.

LCPC, 2004. Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux, Guide technique, Collection Environnement, Les Risques Naturels, 86p.

Ledoux B., 1995. Les catastrophes naturelles en France, Documents Payot, 456p.

Lee W.H.K., Stewart S.W., 1981. Principles and applications of microearthquake networks, Academic Press, New York, New York, 293.

Lemaitre F., Poussiere J.C., Duranthon J.P., Effendiatz L., 2004. Utilisation du radar sol pour la surveillance des mouvements de terrain, *Bull. L.P.C.*, 249, 19-34.

Leprettre B., 1996. Reconnaissance de signaux sismiques d'avalanches par fusion de données estimées dans les domaines temps, temps-fréquence et polarisation, Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble I, France.

Leprettre B., Navarre J.P., Taillefer A., 1996. First results of a pre-operational system for automatic detection and recognition of seismic signals associated with avalanches, *J. Glaciol.*, 42(141), 352-363.

Lunt M.J., 1975. Accuracy and Limitation of the Ultrasonic Doppler Blood Velocimeter and Zero Crossing Detector. *Ultrasound in Med and Biol*, 2: 1-10.

Malet J.-P., Maquaire O., Calais E., 2002. The use of Global Positioning System for the continuous monitoring of landslides. Application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Geomorphology*, 43, 33-54.

Manche Y., 2000. Analyse spatiale et mise en place de systèmes d'information pour l'évaluation de la vulnérabilité des territoires de montagne face aux risques naturels, Thèse de l'Université Joseph Fourier, 171 p.

Mendecki, A.J., 1997. Seismic Monitoring in Mines. Chapman & Hall, London, 262.

Michel, C., P. Guéguen and P.-Y. Bard. 2008. Dynamic parameters of structures extracted from ambient vibration measurements: An aid for the seismic vulnerability assessment of existing buildings in moderate seismic hazard regions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28 (8), 593-604

Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 1997. Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR), Guide général, Paris, La Documentation Française, 76p.

Ministère de l'Environnement et de la prévention des risques technologiques et naturels majeurs, 1990. Éléments d'information sur les risques technologiques et naturels majeurs, Paris, La Documentation Française, 72p.

Mougin P., 1931. La restauration des Alpes, Impr. nat., Paris, 530 p.

Mourot P., 2005. Dispositif de surveillance géologique du compartiment rocheux C2 : Description et procédures, Rapport pour le compte du Conseil Général de la Drôme, 16p.

Mourot P., 2006. Une nouvelle approche de surveillance et de prévention des risques naturels : la surveillance sismo-acoustique, Actes du Colloque Géologie et Risques Naturels : La gestion des risques au Pays du Mont-Blanc, Sallanches.

Myotis et coll., 2005. Conception et réalisation d'un système de surveillance et d'alerte des éboulements rocheux, Procédure de dialogue compétitif pour le compte du Conseil Général de la Drôme, 101p.

Myers S., Rock D., Mayeda K., 2000. Feasibility of Monitoring Rock Fall in Yosemite Valley Using Seismic Methods. Rapport technique, Open file technical report.

Nicot F., 2003. Modélisation multi-echelles des géomatériaux, Contribution au traitement des risques naturels, HDR, Institut National Polytechnique de Grenoble.

Norris R.D., 1994. Seismicity of rock-falls and avalanches at three cascade range volcanoes : Implications for seismic detection of hazardous mass movements. *Bull. Seismo. Soc. Am.*, 84, p. 1925-1939.

Nuttall, E.H., 1981. Some Windows with Very Good Sidelobe Behavior, IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing ASSP-29:1, pp 84–91.

Obert L., 1977. The microseismic method: discovery and early history, Proc. 1st conf. on acoustic emission / microseismic activity in geologic structures and materials, Trans Tech Publications, pp.11-12.

Ohrnberger M., 2001. Continuous Automatic Classification of Seismic Signals of Volcanic Origin at Mt. Merapi, Java, Indonesia, PhD Thesis, Université Postdam.

Orozco M., Garcia M., Duin R., Catellanos C., 2006. Dissimilarity-based classification of seismic signals at Nevado Del Ruiz volcano, *Earth Sci. Res. J.*, Vol. 10, No 2:57-65.

Pierson L.A., Davis S.A. and Van Vickle R., 1990. Hazard Rating System Implementation Manual, Federal Highway Administration (FHWA) Report FHWA-OR-EG-90-01,

PPR, Plans de Prévention des Risques naturels, Risques de mouvements de terrain, 1999. Guide méthodologique, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, La documentation française, 71p.

Revilla Rondon J.J., 1996. Développement et calibration d'une station sismologique trois composantes, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 238p.

Richter C.F., 1968. Elementary seismology, W.H. Freeman and Co, San Francisco, 758 pp.

Rochet L., 1992. Auscultation; diagnostic; surveillance, Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., 45, 43–57.

Rogers J.A., Stephens C.D., 1991. SSAM : a PC-based seismic spectral amplitude measurement system for volcano monitoring, *Seismol Res Lett* 62: 22.

Romana M.R., 1993. A geomechanical classification for slopes : Slope Mass Rating, in J.A. Hudson, Rock testing and site characterization, pp. 575-600, Pergamon Press, Oxford, UK.

Rouiller J.D., Jaboyedoff M., Marro C., Philipposian F. and Mamin M., 1998. Pentas instables dans le Pennique valaisan. MATTEROCK: une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeurs potentiels. Final Report PNR31, VDF, Zürich.

Rouiller J.D., Ornstein P., Délèze J.Y., 2004. GUARDAVAL : la télésurveillance appliquée à la gestion des risques naturels en milieu alpin. GeoQuebec 2004, 57^{ème} Congrès Canadien de Géotechnique, papier G33.996.

Rousseau N., 1999. Study of seismic signals associated with rockfalls at 2 sites on the Reunion Island (Mahavel Cascade and Soufrière cavity), PhD thesis, IPG Paris.

Roux P.F., 2008. Méthodes sismologiques pour l'étude de la fracturation dans les glaciers alpins : glaciers d'Argentière et du Gorner, *PhD thesis*, Université de Savoie, Le Bourget-du-Lac, 194p.

Saito M., 1965. Forecasting the time of occurrence of a slope failure, Proceedings of 6th ICSMFE, Montreal.

Scarpa R., Tilling R. I., et al, 1996. Monitoring and mitigation of volcano hazards, ISBN 3-540-60713-7 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.

Scarpetta S., Giudicepietro F., Ezin E. C., Petrosino S., Del Pezzo E., Martini M., and Marinaro M., 2005. Automatic Classification of Seismic Signals at Mt. Vesuvius Volcano, Italy, Using Neural Networks, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95(1): 185 - 196.

Senfaute G., 1995. La surveillance microsismique de l'exploitation souterraine du charbon aux houillères de Provence : Contribution à la détection des risques de coups de terrains par écoute microsismique, Thèse de doctorat, INPL, Nancy, 321p.

Senfaute G., Abdul Wahed M., Piguet J.-P., Josien J.-P., 2000. Technique d'écoute microsismique appliquée au risque d'effondrement dans les mines du bassin ferrifère lorrain. *Revue Française de Géotechnique*, 92, pp 57-62

Senfaute G., Merrien-Soukatchoff V., Morel J., and Gourry J.C., 2003. Microseismic monitoring applied to prediction of chalk cliffs and contribution of numerical modelling, in *Fast Slope Movement Prediction and Prevention for Risk Mitigation*, edited by L. Picarelli, pp. 463 – 468, Bologna, Naples.

Senfaute G., Amitrano D., Lenhard F., Morel J., 2005. Étude en laboratoire par méthodes acoustiques de l'endommagement des roches de craie et corrélation avec des résultats *in situ*. *Revue française de géotechnique*, N°110, 1er trimestre 2005.

S.E.T.E., juillet 2004. R.D. 518 Route des Grands Goulets, Inspection générale des falaises, Phase 1, Dossier ASX065019/38, Rapport pour le compte du Conseil Générale de la Drôme, 27p.

S.E.T.E., sept. 2004. R.D. 518 Route des Grands Goulets, Inspection générale des falaises, Phase 2, Dossier ASX065019/82, Rapport pour le compte du Conseil Générale de la Drôme, 17p.

S.E.T.E., 2005. R.D. 518 Route des Grands Goulets, Compte-rendu de l'inspection du compartiment C2 du 6 janvier 2005, Dossier ASX065021/101, Rapport pour le compte du Conseil Générale de la Drôme, 4p.

Shapiro N.M., Campillo M., Stehly L., and Ritzwoller M.H., 2005. High-Resolution Surface-Wave Tomography from Ambient Seismic Noise, *Science* 307 (5715), 1615. [DOI: 10.1126/science.1108339]

Smith R., Winkler P.L., Anderson J.C., Scholt Ch., 1974. Source mechanisms of microearthquakes associated with underground mines in Easter Utah, *Bull. Seism. Soc. Am.* 64, pp.1295-1317.

Spillmann T., 2007. Borehole radar experiments and microseismic monitoring on the unstable Randa rockslide (switzerland), *PhD thesis, ETH Zurich*, Diss. ETH no. 16866.

Spillmann, T., H. Maurer, A.G. Green, B. Heincke, H. Willenberg, and S. Husen, 2007. Microseismic investigation of an unstable mountain slope in the Swiss Alps, *J. Geophys. Res.*, 112, B07301, doi:10.1029/2006jb004723.

Stewart, S. W., Lee, W. H. K., and Eaton, J. P., 1971. Location and real-time detection of microearthquakes along the San Andreas fault system in central California. *Birll. -R. Sor. A. Z.* 9. 205-209.

Sun M., Sciabassi R.J., 1993. Discrete-Time instantaneous frequency and its computation, *IEEE Trans Signal Processing*, 41(5):1867-1880.

Surinach E., Sabot F., Furdada G., and Vilaplana J. M., 2000. Study of seismic signals of artificially released snow avalanches for monitoring purposes. *Physics and Chemistry of the Earth* 25(9), 721-727.

Thouvenot F., Fréchet J., Guyoton F., Guiguet R., Jenatton L., 1990. Sismalp : an automatic phone-interrogated seismic network for the western Alps, *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, 1, 1#10.

Varnes D.J., 1978. Slope movements : types and processes. In : Landslide analysis and control. Edited by Schuster R. L. & Krizek R. J., Transp. Research Board, Special Report 176, 11-33, Nat. Ac. Sci., Washington.

Vengeon J.M., Giraud A., Antoine P., and Rochet L., 1999. Contribution à l'analyse de la déformation et de la rupture des grands versants rocheux en terrain cristallophyllien, *Can. Geotech. J.*, 36, 1123-1136.

Vengeon J.M., Hantz D., and Dussauge C., 2001. Prédicabilité des éboulements rocheux: approche probabiliste par combinaison d'études historiques et géomécaniques, *Revue Française de Géotechnique*, 1, 95-96.

Verdier J.M., 1993. Etude de l'activité nano-sismique du versant de la Clapière, Rapport de stage 3ème année ISTG Géotechnique, Grenoble, 100p.

Voight B., 1988. Material science law applied to time forecast of slope failure, *Landslides news*, 3.

Voight B., 1989. A relation to describe rate-dependent material failure, *Science*, vol.243.

Weaver R.L., 2005. Information from Seismic Noise, *Science* 307 (5715), 1568. [DOI: 10.1126/science.1109834]

Weaver R.L., Lobkis O.I., 2001. Ultrasonics without a source: Thermal fluctuation correlations at MHz frequencies, *Phys. Rev. Lett.* 87, 134301-134304.

Weaver R.L., 2005. Perspectives Geophysics, *Information from Seismic Noise, Science* 307 1568.

Zadeh L.A., 1965. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, pp. 338-353.

Liens Internet

- Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du territoire

www.developpement-durable.fr

- Le portail de la prévention des Risques Majeurs.

www.prim.net

- Mémento du maire et des élus locaux. Prévention des risques d'origines naturelle et technologique

www.mementodumaire.net

- L'institut des Risques Majeurs (IRMa) dont les objectifs sont de promouvoir des actions d'information et de sensibilisation aux risques.

www.irma-grenoble.com

- ANENA : Association nationale pour l'étude de la neige et des avalanches

www.anena.org

- La géologie des Alpes, le site du Professeur GIDON sur la géologie des Alpes.

www.geol-alpes.com

- La société MYOTIS

www.myotis.fr

- Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versants (OMIV)

www-lqit.obs.ujf-grenoble.fr/observations/omiv/

Table des figures

Figure 1 : Facteurs intrinsèques d'une écaïlle rocheuse participant à l'évolution de sa stabilité.....	18
Figure 2 : Action du gel sur la fracturation de la roche (Grands Goulets, <i>photo P.Mourot</i>) ..	19
Figure 3 : Chaîne de mesure de la station SAFIR.....	35
Figure 4 : Mesure d'un capteur résistif dans un montage potentiométrique.....	36
Figure 5 : Organigramme de fonctionnement de la station SAFIR.....	40
Figure 6 : Chronogramme des tâches d'acquisition.....	41
Figure 7 : Évolution des temps d'acquisition en fonction de la fréquence d'horloge du CPU	42
Figure 8 : Dérive de l'horloge interne du module numérique.....	43
Figure 9 : Précision de la fréquence d'échantillonnage en fonction du temps, pour différentes valeurs de la fréquence d'horloge.....	44
Figure 10 : Consommation du module numérique en fonction de la fréquence d'horloge du microcontrôleur.....	45
Figure 11 : Fonction de transfert de la chaîne de mesure sismique.....	46
Figure 12 : Mode de mémorisation « ping-pong ».....	47
Figure 13 : Temps d'inactivité du microcontrôleur en fonction de la taille du buffer de données pour une acquisition de 15 secondes.....	48
Figure 14 : Structure du système de fichier pour unité de stockage de grande capacité.....	49
Figure 15 : Distribution des valeurs numériques obtenues sur les 8 voies de mesure de l'ADS8344 pour 1000 acquisitions.....	50
Figure 16 : Signal (en haut) et spectre associé (en bas) enregistrés sur les voies 1 & 2 de la station d'acquisition ; en vert, signal enregistré sur la voie (voie ₁) connectée au générateur de signaux (Signal de 100 mV d'amplitude et de fréquence 100 Hz) ; en bleu, signal enregistré sur la voie (voie ₂) non connectée au générateur.....	51
Figure 17 : Perturbation générée par l'enregistrement sur le disque dur.....	52
Figure 18 : Perturbation générée par le régulateur du dispositif d'alimentation solaire ; en haut, spectrogramme du bruit électronique de la station sur batterie seule ; en bas, spectrogramme du bruit électronique de la station avec batterie et panneau solaire.....	53
Figure 19 : Instrumentation GPS : Station de référence (gauche) et station mobile (droite)	58
Figure 20 : Diagramme simplifié de l'exécution d'un calcul avec GAMIT [Adeline, 2008]	59
Figure 21 : Mesure GPS pour une courte ligne de base Moyenne=1230,061 m ; écart type (1 σ)=1 mm.	60
Figure 22 : Qualité de la couverture satellite sur la mesure GPS [Adeline, 2008] (a) PDOP mesuré, (b) modèle PDOP, (c) mesure GPS.....	61

Figure 23 : Montage mécanique de l'antenne et mesure GPS d'un déplacement centimétrique.....	61
Figure 25 : Architecture du système de surveillance SAFIR-MYRSA.....	67
Figure 26 : Influence de la variation de la composante continue sur la détection STA/LTA. 71	
Figure 27 : Évolution des temps de traitement sismique en fonction de la fréquence d'horloge du CPU.....	72
Figure 28 : Séisme de Monétier-les-Bains du 05/10/2007-06h05 enregistré par la station SAFIR des Grands Goulets.....	73
Figure 29 : Influence des longueurs des fenêtres STA & LTA sur la détection d'un séisme (a) Nombre de détections, (b) durée du signal détecté en seconde.....	73
Figure 30 : Signal nanosismique de rupture rocheuse <i>Chamousset 21/10/2007-07:37:17</i> ..	74
Figure 31 : Influence des longueurs des fenêtres STA & LTA sur la détection d'un nanoséisme (a) Nombre de détections, (b) Durée du signal détecté en ms, (c) Nombre de détections (zoom), (b) Durée du signal détecté en ms (zoom).....	75
Figure 32 : Signal nanosismique de rupture rocheuse <i>Chamousset 21/10/2007-23:35:45</i> ..	76
Figure 33 : Influence des longueurs des fenêtres STA & LTA sur la détection d'une grappe de nanoséismes, (a) Nombre de détections, (b) durée du signal détecté en ms ou durée max si plusieurs détections.....	76
Figure 34 : Diagramme de gestion opérationnelle et fonctionnelle du système de surveillance.....	81
Figure 35 : Exemple de sous-ensemble flou de déplacement.....	83
Figure 36 : Structure des règles de connaissances.....	84
Figure 37 : Exemple de processus de résolution d'une règle d'alerte.....	86
Figure 38 : Représentation de l'architecture client-serveur développée.....	92
Figure 39 : Modèle conceptuel des données.....	94
Figure 40 : Interface de supervision : outil d'analyse graphique.....	94
Figure 41 : Écaille de Chamousset vue vers le Sud (Photo P. Mourot 01/08/2007).....	103
Figure 42 : Falaise de la Tête Chevalière vue du Pas de l'Essaure après l'éboulement de l'écaille (Photo P. Mourot, 26/11/2007).....	104
Figure 43 : Photographie de l'écaille avant l'éboulement (Photo LGIT).....	105
Figure 44 : Photographie de l'écaille après éboulement (Photo LGIT).....	105
Figure 45 : Localisation et instrumentation de l'écaille de Chamousset (haut) Panorama de l'écaille de Chamousset avec Mont Aiguille, (bas droite) Localisation des capteurs, (bas gauche) Station de mesure avec son panneau solaire et capteur extensométrique (ExtensomNd) situé dans la fracture arrière de l'écaille.....	107
Figure 46 : Séries temporelles des mesures effectuées sur l'écaille de Chamousset (haut) Mesures extensométriques caractérisant l'ouverture de la fracture arrière de l'écaille ; (milieu) Activité sismique cumulée (courbe) et par capteur (histogramme) ; (bas) Mesures météorologiques du Jardin du Roi (4km au sud de l'écaille) (courbe bleue : température ; courbe mauve : pluviométrie) ; (courbe pointillée) Mise en évidence de l'influence gel-dégel sur l'ouverture de la fracture.....	110
Figure 47 : Variation de la distance massif-écaille mesurée (bleu) et ajustement en t^2 (rouge).....	111
Figure 48 : Déplacement et vitesse du mouvement de l'écaille (a) mois d'octobre 2007 (b) mois de novembre 2007.....	112
Figure 49 : Représentation de l'inverse de la vitesse de déplacement sur l'extensomètre nord.....	113
Figure 50 : Histogrammes des vitesses du mouvement relatif écaille-massif, en fonction de l'heure de la journée : (a) moyenne des vitesses sur la période d'acquisition ; (b) vitesses pour le mois d'août ; (c) vitesses pour le mois d'octobre ; (d) vitesses pour le mois de novembre.....	114
Figure 51 : Mesures extensométriques échantillonnées à 1000 Hz sur une période de 60 s (a) Signal (b) Spectre avec zoom sur fréquences 0,2 Hz et 178 Hz.....	116
Figure 52 : Représentation schématique du modèle de l'écaille proposé : pendule de torsion à axe horizontal.....	117
Figure 53 : Activité sismique enregistrée pendant la période d'auscultation Nombre d'événements sismiques cumulés sur toutes les voies (courbe bleue) ; Nombre	

d'événements sismiques par voie (histogramme) ; Période sans données (grisé)	123
Figure 54 : Nombre d'événements sismiques détectés en fonction de leur amplitude : (a) géophone Sud, (b) géophone Sud échelle log, (c) géophone installé sur l'écaille, (d) composante Est-Ouest du géophone 3 composantes ; Nombre d'événements sismiques en fonction de leur durée : (e) géophone Sud, (f) géophone Sud échelle log,	124
Figure 55 : Nombre de nano-séismes en fonction de l'énergie	125
Figure 56 (a) : Signal temporel (en bas) et spectrogramme (en haut) représentant un nano-séisme impulsif, haute fréquence et de courte durée (<i>Capteur massif</i>)	126
Figure 56 (b) : Signal temporel (en bas) et spectrogramme (en haut) représentant un nano-séisme haute fréquence et de longue durée (<i>Capteur massif</i>).....	126
Figure 56 (c) : Signal temporel (en bas) et spectrogramme (en haut) représentant un nano-séisme basse fréquence (<i>Capteur massif, composante horizontale</i>)	126
Figure 56 (d) : Signal temporel (en bas) et spectrogramme (en haut) représentant un nano-séisme basse et haute fréquence (<i>Capteur écaille</i>)	126
Figure 57 : Assemblage en spectrogramme réalisé pour les événements sismiques enregistrés par le géophone situé sur le massif (GeoSud), en octobre et novembre.....	128
Figure 58 : Nombre d'événements nano-sismiques en fonction de l'heure de détection dans la journée	130
Figure 59 : Amplitude des événements sismiques détectés en fonction de leur instant d'occurrence pour les mois d'octobre et novembre. Evénements détectés par : le géophone Sud (gauche), la composante Est-Ouest du géophone 3 composantes (droite).....	131
Figure 60 : Durée des événements sismiques détectés en fonction de leur instant d'occurrence pour les mois d'octobre et novembre. Evénements détectés par : le géophone Sud (gauche), la composante Est-Ouest du géophone 3 composantes (droite).....	132
Figure 61 : Histogrammes des rapports durée/amplitude des événements sismiques détectés par le géophone Sud (massif) en fonction de leur instant d'occurrence pour les mois d'octobre et novembre. On note un resserrement de l'histogramme et un glissement vers les faibles rapports durée/amplitude	132
Figure 62 : (a) Distance massif – écaille en fonction du temps ; (b) Amplitude moyenne du signal sismique enregistré par le géophone sud, en fonction du temps, pendant la durée de l'expérience, pour différentes bandes spectrales (bleu : 3-10 Hz ; vert : 10-17 Hz ; jaune : 17-35 Hz ; magenta : 35-50 Hz ; cyan : 50-120 Hz ; rouge : 120-500 Hz); (c) Nombre d'événements par heure enregistrés par le géophone sud en fonction du temps ; (d) Amplitude moyenne du signal sismique par heure enregistré par le géophone situé sur l'écaille, en fonction du temps, pour différentes bandes de fréquence (même code de couleur qu'en (b)) ; (e) Nombre d'événements par heure, enregistrés par le géophone situé sur l'écaille, en fonction du temps	134
Figure 63 : Périodogramme lissé sur un échantillon de 16.384s de bruit.....	135
Figure 64 : Périodogramme lissé moyenné 366 fois (recouvrement de 60% des fenêtres) pour un échantillon de 16.384s de bruit (moyenne sur une heure d'enregistrement) Noter la diminution du niveau de bruit par rapport au périodogramme lissé (Figure 62)	136
Figure 65 (a) : Spectrogramme construit à partir de l'assemblage de 560 périodogrammes lissés moyennés sur une heure d'enregistrement. Les périodes sans enregistrement sont figurées en bleu très sombre. Enregistrement réalisé par le capteur situé sur le massif, (haut) ensemble du spectre (bas) spectre entre 0 et 120 Hz.....	137
Figure 65 (b) : Spectrogramme construit à partir de l'assemblage de 560 périodogrammes lissés moyennés sur une heure d'enregistrement. Les périodes sans enregistrement sont figurées en bleu très sombre. Enregistrement réalisé par le capteur situé sur l'écaille, (haut) ensemble du spectre (bas) spectre entre 0 et 120 Hz.....	137
Figure 66 : Périodogrammes lissés moyennés sur différentes périodes de temps (bleu : 1-50 h ; vert : 320-360 h ; magenta : 460-520 h ; rouge : 530-560 h) ; (haut) Enregistrement réalisé par le capteur situé sur le massif (bas) Enregistrement réalisé par le capteur situé sur l'écaille	140
Figure 67 : Localisation du compartiment C2 et du Tunnel dans les Gorges des Grands Goulets.....	144
Figure 68 : Étude structurale du compartiment C2 [SETE, 2004].....	145
Figure 69 : Instrumentation des Grands Goulets : vue générale du dispositif (haut), mise en	

place des extensomètres sous le surplomb de la masse C2 (bas à droite), extensomètres et capteur vibration (bas à gauche).....	147
Figure 70 : Schéma du système de surveillance des Grands Goulets	150
Figure 71 : Mesures brutes des déplacements, de la température (rocher & air) et de la pluviométrie sur l'année 2006 (lissage journalier)	152
Figure 72 : Correction des mesures de déplacement des effets thermiques : (a) en bleu, mesures lissées de température dans le rocher, en rouge, modèle estimé en $\cos(t)$, (b) Mesures de déplacements de l'extensomètre 1 : en gris mesures brutes lissées, en bleu mesures corrigées.....	153
Figure 73 : Correction des mesures de déplacement par le capteur étalon ; (a) mesures brutes lissées du capteur Extenso_1 ; (b) mesures brutes lissées du capteur étalon ; (c) en bleu, mesures corrigées lissées du capteur Extenso_1, (c) en jaune mesures brutes lissées sans correction.....	154
Figure 74 : Nombre d'événements sismiques de la classe « Séisme » en fonction de l'amplitude maximale et de la durée en ms du signal (a) et (c) Géophone compartiment (Geo3D_C4) (b) et (d) Sismomètre L4C-FAL.....	156
Figure 75 : Activité sismique de la classe « Séisme » pendant l'année 2006.....	157
Figure 76 : Diagramme amplitude en fonction de la durée pour les événements sismiques des classes « Séisme » et « Tir » pour les 3 capteurs GEO_C4, GEO_TOP et L4C-FAL (T) symbolise l'espace des événements de la classe « Tir » (S) symbolise l'espace des événements de la classe « Séisme ».....	157
Figure 77 : Signal sismique d'un tir à l'explosif pendant les travaux de creusement du tunnel	158
Figure 78 : Signal sismique temporel (gauche) et spectre (droite) de 2 signaux de la classe « Séisme »	158
Figure 79 : Signal sismique temporel d'un séisme de longue durée enregistré le 8 mai 2006 à 18h sur le compartiment C2 des Grands Goulets	159

Liste des tableaux

Tableau 1 : Décimation du cycle de calcul de détection sismique en fonction de la fréquence d'acquisition et du nombre de voie en détection	72
Tableau 2 : Liaisons de communication mises en œuvre et conditions d'utilisation	79
Tableau 3 : Liste des sites instrumentés et surveillés entre 2003 et mars 2008 utilisant le système SAFIR-MYRSA	100
Tableau 4 : Descriptif de l'instrumentation de l'écaille de Chamousset	106
Tableau 5 : Période de fonctionnement de l'instrumentation et chronogramme des interventions.....	108
Tableau 6 : Répartition de la quantité d'événements sismiques détectés en fonction du nombre de capteurs	123
Tableau 7 : Description de l'instrumentation installée sur le compartiment C2 des Grands Goulets.....	148
Tableau 8 : Répartition de la quantité d'événements sismiques détectés en 2006 sur le site des Grands Goulets	155

Glossaire

ADC : Analog to digital conversion

ADRGT : Association pour le Développement de Recherche sur les Glissements de Terrain

ASCII : American Standard Code for Information Interchange

Bande Passante : Plage de fréquence de variation du mesurande où les caractéristiques du capteur spécifiées par le constructeur sont respectées

BRGM : Bureau de Recherche Géologiques et Minière

Buffer : Mémoire temporaire volatile

C/A (Coarse/Acquisition) : Séquence de 1023 bits (0 ou 1) qui se répète toutes les millisecondes. Cette séquence, unique pour chaque satellite, permet aux récepteurs de distinguer la provenance du signal GPS. Le code C/A n'est disponible que sur la fréquence L1 (1575.42 MHz).

CETE : Centre d'Études Techniques de l'Équipement

CGPC : Conseil Général des Ponts et Chaussées

Compatibilité électromagnétique (CEM) : Aptitude d'un dispositif électronique à fonctionner correctement :

- d'une part sans perturber les dispositifs voisins, (émission),
- d'autre part sans être perturbé par ces dispositifs, (immunité).

CPU : Central Processing Unit

Datasheet : Fiche technique constructeur d'un composant électronique spécifiant les caractéristiques du produit

DOP (*Dilution of Precision*) : Mesure de la géométrie récepteur-satellite. Rapport

entre la précision de la mesure GPS et la précision de la solution. Le GDOP (*Geometric Dilution of Precision*) se compose du TDOP (*Time Dilution of Precision*) et du PDOP (*Position Dilution of Precision*), lequel est constitué du HDOP (*Horizontal Dilution of Precision*) et du VDOP (*Vertical Dilution of Precision*).

EPFL : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Etendue de mesure (E.M.) : Plage de valeurs du mesurande pour lesquelles le capteur répond aux spécifications du constructeur.

Fidélité : Aptitude d'un capteur à donner, pour une même valeur de la grandeur mesurée, des mesures concordant entre elles. La fidélité est souvent caractérisée par l'écart type.

Justesse : Aptitude d'un capteur à donner des mesures proches de la valeur vraie de la grandeur mesurée, les erreurs de fidélité n'étant pas prises en compte

LCPC : Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées

Maître d'œuvre : Celui à qui le maître d'ouvrage confie le soin d'établir le projet et d'en contrôler l'exécution. Il doit s'assurer que le projet est viable, en établir les pièces écrites et dessinées, introduire les demandes d'autorisation administrative, préparer le dossier de consultation des entreprises et assurer le contrôle d'exécution des marchés de travaux.

Maître d'ouvrage : Celui qui décide de réaliser une opération, en fixe le programme, dispose du terrain, réunit le financement et paie, fixe le calendrier, choisit les professionnels chargés de la réalisation, signe les marchés, les contrats d'études et de travaux.

Mesurande : Grandeur physique d'entrée soumise à un mesurage

NMEA : National Marine Electronics Association

Non-linéarité : Déviation maximale de la réponse d'un capteur sur son étendue de mesure, par rapport à sa fonction de transfert linéaire (unité en % de l'E.M.)

OEM : Original Equipment Manufacture

PIT : Periodic Interrupt Timer

Plan absorbant (ou **Chock Ring** en anglais) : Accessoire que l'on ajoute à une antenne GPS pour limiter les ondes parasites (multitrajets) dues à la réflexion des signaux GPS sur des objets près de l'antenne, comme par exemple une étendue d'eau, une façade d'immeuble, arbres denses... Il est constitué de 4 ou 5 anneaux dont l'espacement est calculé en fonction de la fréquence pour piéger les signaux indirects.

POS : Plan d'Occupation des Sols. Instrument de planification qui fixe les règles de l'utilisation des sols dans la commune. Il définit un zonage du territoire communal régissant toutes les opérations d'aménagement et de construction. Il comprend notamment un règlement et un plan de zonage. La loi SRU a remplacé les POS par les PLU (plans locaux d'urbanisme).

Précision : Aptitude d'un capteur à donner une mesure proche de la valeur vrai de la grandeur mesurée. L'erreur de précision = l'erreur de justesse + l'erreur de fidélité.

PLU : Plan Local d'Urbanisme. Nouveau document d'urbanisme communal créé par la

Loi SRU. Il remplace le plan d'occupation des sols. Comme le POS, il fixe les règles de l'utilisation des sols. Il peut de plus contenir les projets d'urbanisme opérationnel tels que l'aménagement de quartiers existants ou nouveaux, d'espaces publics ou d'entrées de villes, etc.

PPR : Plan de prévention des risques naturels prévisibles. Servitude d'utilité publique réglementant l'utilisation du sol en vue de préserver les biens et les personnes des effets des événements naturels tels que inondations, avalanches, glissements de terrain etc.

QSPI : Queue Serial Peripheral Interface

Résolution : Plus petite variation de la grandeur d'entrée mesurable dans l'étendue de mesure

RINEX : Receiver Independent Exchange (format)

RTCM : Radio Technical Commission for Maritime Services

SBAS : Satellite-Based Augmentation System

Sensibilité : Rapport entre la variation du signal électrique et la variation du signal physique. La sensibilité d'un capteur linéaire est constante

SGBD-R : Système de Gestion de Base de Données Relationnelle

Système temps réel : Système informatisé qui contrôle (ou pilote) un procédé physique à une vitesse adaptée à l'évolution du procédé contrôlé.

Annexes

A.	INSTABILITES ET SURVEILLANCE	185
A.1.	LA GESTION DES RISQUES NATURELS	186
	<i>Évolution des textes législatifs et réglementaires.....</i>	<i>187</i>
	<i>Responsabilité et sécurité civile.....</i>	<i>189</i>
A.2.	CARACTERISTIQUES DES INSTABILITES GRAVITAIRES ROCHEUSES	191
	<i>Mécanismes d'instabilités rocheuses</i>	<i>192</i>
	<i>Type de discontinuités</i>	<i>193</i>
	<i>Fiche de caractérisation des instabilités rocheuses (grille-LIRIGM)</i>	<i>194</i>
A.3.	TECHNIQUES INSTRUMENTALES.....	200
A.4.	LISTE DE SITES SOUS SURVEILLANCE.....	205
B.	CONCEPTION D'UNE INSTRUMENTATION MULTI-PARAMETRES	211
B.1.	CAPTEUR SISMIQUE	213
B.2.	INTERFACE DE CONDITIONNEMENT SISMIQUE.....	215
B.3.	CONVERTISSEUR ANALOGIQUE-NUMERIQUE (CAN).....	219
	<i>Rapport signal à bruit d'un convertisseur analogique-numérique</i>	<i>219</i>
	<i>Quelques remarques sur le choix du convertisseur analogique-numérique</i>	<i>220</i>
B.4.	SPECIFICATIONS DU MODULE CF2.....	221
B.5.	FICHER DE CONFIGURATION : SAFIR.CFG	223
B.6.	MESURE GPS	225
	<i>Principe de positionnement</i>	<i>226</i>
	<i>Méthodes de calcul.....</i>	<i>227</i>
	<i>Calcul de ligne de base sur quatre stations RGP.....</i>	<i>228</i>
C.	CONCEPTION D'UN SYSTEME DE SURVEILLANCE DES RISQUES.....	231
C.1.	SEISME DE MONETIER-LES-BAINS (RESEAU SISMALP).....	232

C.2.	LIAISONS DE COMMUNICATION	233
D.	APPLICATION A LA SURVEILLANCE DES INSTABILITES ROCHEUSES	235
D.1.	QUALIFICATION DE L'INSTABILITE DE L'ECAILLE DE CHAMOUSSET (METHODE LIRIGM).....	236
D.2.	QUALIFICATION DE L'INSTABILITE C2 DES GRANDS GOULETS (METHODE LIRIGM)	237
D.3.	ESTIMATION DU VOLUME DE L'ECAILLE EBOULEE A CHAMOUSSET.....	238

A. Instabilités et surveillance

A.1. La gestion des risques naturels

Cette annexe présente un bref historique de l'évolution du cadre réglementaire sur la gestion des risques naturels en France. Nous verrons que la réglementation a bien évolué et la question de la responsabilité devient une préoccupation de plus en plus importante.

Évolution des textes législatifs et réglementaires

Historiquement, la gestion des risques naturels portait avant tout sur la protection. Certaines digues de protection contre les inondations datent ainsi du XVI^{ème} siècle. Cependant, ces mesures d'action de protection de l'environnement restent limitées et souvent peu efficaces [Besson, 1996]. Au XIX^{ème} siècle, les politiques de protection ont disparu au profit de la production. La loi du 28 mai 1858 relative à l'exécution des travaux destinés à mettre les villes à l'abri des inondations marque le début d'une volonté de l'Etat de construire un cadre juridique pour prévenir des risques naturels. Le 28 juillet 1860, la loi sur le reboisement des montagnes est promulguée. Sous l'ancien régime, les premières politiques d'indemnisation apparaissent. Les habitants victimes de catastrophes naturelles pouvant ainsi obtenir une diminution de leur charge fiscale [Favier, 2002]. C'est dans cette volonté de protéger les populations qu'est créé en 1882 le service chargé de la restauration des terrains en montagne (R.T.M.) [Besson, 1996].

La première moitié du XX^{ème} siècle est largement influencée par les conflits internationaux. Quelques instruments juridiques redondants apparaissent faisant souvent suite à des catastrophes naturelles. Néanmoins la volonté de l'Etat demeure et le préambule de la constitution du 27 octobre 1946 en est l'illustration : " [...] La Nation proclame la solidarité et l'égalité de tous les français devant les charges qui résultent des calamités nationales".

La gestion de l'occupation des sols devient alors une préoccupation majeure dans la prévention des risques naturels, avec, en 1955, l'interdiction de construire dans les zones soumises à des risques particuliers, et la mise en œuvre des plans d'occupation des sols (P.O.S.) en 1967. La législation s'est ensuite renforcée par deux lois :

- la Loi n°82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles. En plus de ce régime appelé « catnat », cette loi a créé les plans d'exposition aux risques naturels prévisibles (PER), outils ayant pour objectif d'interdire la construction dans les zones les plus exposées et obligeant au respect de règles spécifiques de construction pour les zones moins exposées. L'indemnisation est prise en charge par les entreprises d'assurance et n'est attribuée que sur décision administrative (arrêté interministériel) constatant de l'état de catastrophe naturelle. La loi prévoit la garantie de réassurance des assureurs directs auprès de la Caisse Centrale de Réassurance (CCR), spécialement mandatée à cet effet (décret du 2 août 1985) et qui bénéficie de la garantie de l'État.
- la Loi n°87-565 du 22 juillet 1987 (devenue depuis l'article 125-2 du code de l'environnement) relative à l'organisation de la sécurité civile, la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques majeurs.

Les années 90 voient se concrétiser une prise de conscience internationale de la prévention des risques. Pour marquer cette prise de conscience, l'assemblée générale des Nations Unies, par les résolutions 42-169 (11 décembre 1987) et 44-236 (22 décembre 1989), proclame les années 90, « Décennie Internationale de la Prévention des Catastrophes Naturelles » (DIPCN). Les objectifs définis dans ce cadre concernent la réduction des pertes en vies humaines, la réduction des dégâts matériels et des perturbations sociales et économiques. Dans ce contexte, la France crée un comité national à la Décennie Internationale de Prévention des Catastrophes Naturelles. Ce comité, regroupant de nombreux experts de domaines variés (sciences, droit, social, protection civile), aura pour rôle d'apporter une vision claire et technique sur les risques majeurs afin d'éclairer la réflexion politique.

Le cadre juridique construit jusqu'à lors s'avère limité et les catastrophes qui se sont enchaînées entre 1988 et 1994 (avec notamment les inondations de Nîmes en 1988 et

de Vaison-la-Romaine en 1992) ont fait état de nombreux dysfonctionnement. Suite au retour d'expérience acquis et analysé par le comité, le gouvernement décide alors de donner un nouvel élan à la politique de prévention des risques naturels. Parmi ces nouvelles mesures il y a lieu de citer :

- La Loi n° 95-101 du 2 février 1995, dite « Loi Barnier », s'appliquant au renforcement de la protection de l'environnement et constituant le point de départ d'une nouvelle politique de prévention des risques.

Dans un souci de simplification et de clarification du cadre juridique, elle introduit deux grandes innovations :

- d'une part, est créée une procédure spéciale d'expropriation relative à certains risques naturels majeurs avec la création d'un Fonds ad hoc,
- et, d'autre part, cette loi donne naissance aux Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR).

Le Fonds de prévention des risques naturels majeurs chargé de financer les indemnités allouées aux expropriations est un système solidaire, alimenté par un prélèvement sur les primes d'assurances relatives à la garantie contre le risque de catastrophes naturelles. Ce Fonds est géré par la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) et son utilisation soumise à l'avis d'un conseil de gestion présidé par un magistrat de la cour des comptes. Une extension de ce Fonds est adoptée en 1999 pour subvenir au projet que s'est fixé le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, de réaliser 5000 PPR en 2005 (La réalisation d'un PPR dure en moyenne 3 ans et le coût pour l'État est de l'ordre de 35.000 € par plan).

Le Plan de Prévention des Risques naturels (PPR) doit permettre de prendre les décisions les plus adaptées à l'occupation future et actuelle des espaces exposés. C'est un outil puissant pouvant rendre des zones inconstructibles. La procédure d'élaboration et d'approbation des PPR est entièrement maîtrisée par l'État.

Parallèlement au cadre juridique et réglementaire, et de manière à guider l'élaboration des PPR, des règles ont été fixées au niveau national pour déterminer les différents types d'aléas de référence (événement naturel dont l'ampleur sert de référence pour définir les zones susceptibles d'être touchées et les risques encourus par les personnes et les biens [CGPC/IGE 2005]).

Le 5 février 2001 se concrétise la création du comité interministériel de prévention des risques naturels majeurs avec pour rôle l'amélioration de la connaissance, de la surveillance et de la prévention des risques, le développement des plans et des travaux de prévention, ainsi que des méthodes d'analyse et d'expertise des risques naturels.

L'accident d'AZF à Toulouse en 2003, pousse le gouvernement à renforcer les dispositions déjà prévues par la loi de 1995, à savoir l'obligation d'information au travers des lois suivantes :

- Loi n°2003-699 du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages). Cette loi, appelée « Loi Bachelot », crée le Plan de Prévention des Risques Technologiques (PPRT) ainsi qu'un régime d'indemnisation propre à ce type de catastrophe.
- Loi n°2004-811 du 13 août 2004 relative à la modernisation de la sécurité civile qui prévoit notamment la réalisation d'un Plan Communal de Secours (art. 13), obligatoire pour les communes dotées d'un PPR ou d'un Plan Particulier d'Intervention.

A ce jour, le régime « catnat » semble satisfaire à la fois les assurés, à qui il offre une couverture étendue, les assureurs, à qui il a procuré des ressources significatives mais aussi la CCR et l'Etat [CGPC/IGE 2005]. Néanmoins, comme l'annonçait le député Kert en 1999 [Kert, 1999], et suite au retour d'expérience de la sécheresse de l'été 2003, ce dispositif n'encourage pas à la prévention.

Des réformes sont donc nécessaires pour permettre de coordonner la politique d'indemnisation des catastrophes naturelles avec celle de prévention des risques. De nombreuses propositions ont été faites [CGPC/IGE 2005] avec pour objectifs de responsabiliser les acteurs, de développer les outils d'information et d'adapter l'indemnisation en fonction des mesures de prévention mises en œuvre.

Responsabilité et sécurité civile

Le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire est chargé de la prévention des risques naturels. Son rôle consiste à la fois à améliorer la connaissance des risques, à en informer la population, et à faire adopter les réglementations nécessaires pour réduire les risques. Les pouvoirs publics ont donc le devoir de protéger l'individu contre les risques qui pourraient le menacer. Les actions directes sur les phénomènes, bien qu'efficaces, restent limitées. C'est pourquoi, les actions gouvernementales portent, d'une part, sur le développement et l'aménagement du territoire tout en assurant la sécurité des personnes et la protection des biens face aux catastrophes naturelles, et d'autre part, sur l'information aux citoyens vis à vis des risques qu'ils encourent.

Au niveau régional, les Directions Régionales de l'Environnement (DIREN) ont vocation à animer et coordonner la politique de prévention des risques naturels, en s'appuyant notamment sur les Directions Départementales de l'Equipement (DDE).

Au niveau départemental, les DDE sont désignées par le Préfet comme service en charge de la prévention des risques naturels et se voient confier la responsabilité de l'élaboration et de la mise en œuvre du schéma départemental de prévention des risques naturels.

Au niveau de la commune, la prévention des risques naturels est assurée par le maire. Par l'article L. 2211-1 du code général des collectivités territoriales (C.G.C.T.), le maire a d'importantes responsabilités en matière de police administrative, qui se traduisent en matière de risques naturels par l'obligation générale de prévention des accidents naturels et des fléaux de toute nature, de mesures d'assistance et de secours ainsi que de provoquer l'intervention de l'autorité supérieure.

La prévention des risques naturels passe avant tout par l'information. La Loi n°87-565 du 22 juillet 1987 abrogée par la Loi n°2004-811 du 13 Août 2004, confère au maire la responsabilité de l'alerte avec les moyens locaux dont il dispose, ainsi que l'organisation de l'information préventive des populations.

Le décret n°90-918 du 11 octobre 1990 fixe le contenu et la forme des informations auxquelles doivent avoir accès les personnes exposées ainsi que les modalités de leur diffusion. Chaque élu local doit établir alors un document d'information communal sur les risques majeurs (D.I.C.R.I.M.) qui rappelle les risques locaux et les mesures de sauvegarde prises au sein de sa commune. Le maire est soutenu au niveau du département par une Cellule d'Analyse de l'Information Préventive (CARIP) qui consigne dans le dossier départemental sur les risques majeurs (D.D.R.M.), la description des risques et de leurs conséquences, ainsi que les mesures de prévention spécifiques. Le préfet réalise en plus, les dossiers communaux synthétiques (D.C.S.) destinés à informer les maires sur les risques éventuellement présents dans leurs municipalités.

Ces documents sont librement consultables par tous les administrés. L'affichage public des risques et des consignes de sécurité s'y rapportant est obligatoire.

La direction des opérations de secours repose dans le cas général le plus fréquent, sur le maire au titre de ses pouvoirs de police (articles L. 2211-1 et L. 2212-2 du C.G.C.T.). Dans ce cadre, le maire a donc l'obligation d'engager les mesures de sûreté exigées par les circonstances. Pour cela, le maire dispose d'un outil opérationnel : le plan communal de sauvegarde (PCS). Obligatoire dans les communes identifiées comme soumises à un risque majeur, il reste néanmoins vivement conseillé pour le autres de manière à structurer l'organisation communale des secours et de la rendre ainsi plus efficace surtout dans des situations déstabilisantes nécessitant des réactions rapides.

La sécurité civile s'organise tout d'abord au niveau de la commune. Dans le cas d'événement plus important, c'est le Centre Opérationnel Départemental (COD) de la préfecture qui gère les opérations de secours par le déploiement de moyens spécifiques ou complémentaires. Si les moyens sont insuffisants, le COD est renforcé par le Centre Opérationnel de Zone (COZ) qui, si besoin, peut être soutenu au niveau national par le Centre Opérationnel de Gestion Interministériel de Crise (COGIC).

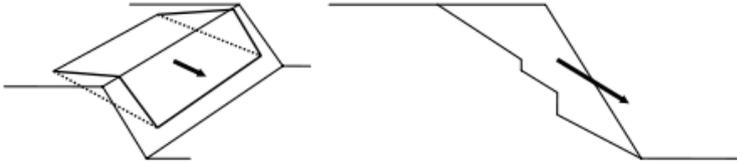
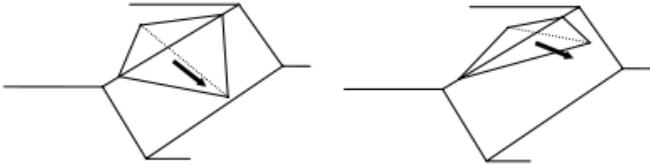
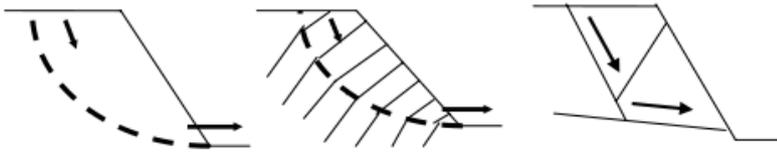
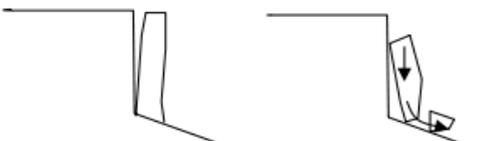
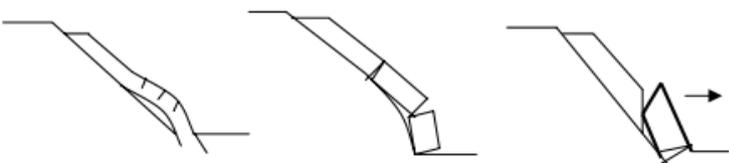
En période de crise, c'est-à-dire lorsque l'aléa est imminent, la surveillance est le seul moyen permettant l'évacuation avant que la catastrophe se produise. Malheureusement les modèles de prévision, fournissant un précieux indicateur pour la gestion de crise, ne peuvent être appliqués de manière opérationnelle et fiable. Le problème majeur provient du fait que les périodes d'alerte longues sont difficiles à justifier auprès des populations évacuées et peuvent placer les autorités locales dans une situation dramatique. Le cas du glissement de terrain de Val Pola en 1987 illustre cette problématique puisque les populations évacuées avaient rejoint leurs habitations avant le déclenchement de l'éboulement [Kert 1999].

A.2. Caractéristiques des instabilités gravitaires rocheuses

Nous présentons dans cette annexe quelques propriétés des roches et décrivons les différents mécanismes d'instabilités rocheuses. Nous terminerons par la présentation de la fiche de caractérisation (méthode LIRIGM) que nous utilisons pour caractériser les instabilités étudiées.

Mécanismes d'instabilités rocheuses

Les mécanismes d'instabilité sont différents suivant la configuration des versants rocheux qui vont présenter différents types de rupture possibles. On peut répertorier les principales configurations potentiellement instables selon trois familles : glissement, rupture et basculement [Hantz, 2001].

Configurations potentiellement instables	Mécanisme d'instabilité
	Glissement plan
	Glissement dièdre ou plan
	Glissements rotationnel (et fractionné)
	Rupture de surplomb
	Basculement de colonne ou de blocs
	Rupture de colonne en pied
	Rupture de banc (par flambage ou sur fracture)

Les différents mécanismes d'instabilités rocheuses (d'après Hantz, 2001)

Type de discontinuités

Les caractéristiques structurales et géomécaniques des discontinuités jouent un rôle primordial dans le déclenchement d'éboulement (Hoek and Bray, 1981, Goodman et Shi, 1985). Les caractéristiques des différents plans de discontinuités définissent le découpage en blocs du massif, et jouent un rôle majeur dans les circulations d'eau et les mécanismes de rupture.

Plan de schistosité (plan de clivage): plan des feuillets, plus ou moins serrés, présenté par certaines roches, acquis sous l'influence de contraintes tectoniques, distinct de la stratification, et selon lequel elles peuvent se débiter en lames plus ou moins épaisses et régulières. La schistosité peut s'accompagner de phénomène de dissolution d'où concentration de particule.

Plan de stratification: plan délimitant différentes formations géologiques.

Diaclase: cassure de roches ou de terrains sans déplacement relatif des parties séparées. S'emploie plus spécialement pour des cassures perpendiculaires aux couches sédimentaires.

Faille: cassure de terrain avec déplacement relatif des parties séparées. Ce terme désigne le plus souvent des accidents verticaux, ou à pendage fort et n'impliquant pas de recouvrement (cf chevauchement, charriage).

Fracture: terme général désignant toute cassure avec ou sans rejet, de terrains, de roches, voire de minéraux.

Joint (de retrait): toute surface de discontinuité au sein d'une roche ou d'un terrain, qui n'est pas un contact anormal avec déplacement (faille, ..). Un joint tectonique est une cassure sans rejet.

Lithoclase: toute cassure de roche avec ou sans déplacement relatif des parties.

Rejet (d'une faille ou d'un décrochement): amplitude du déplacement causé par une faille.

Fiche de caractérisation des instabilités rocheuses (grille-LIRIGM)

D'après [Dussauge-Peisser, 2002].

Nous présentons ci-après la grille LIRIGM de caractérisation d'une instabilité rocheuse utilisée dans le cadre de l'évaluation des aléas rocheux. L'intérêt de cette fiche réside dans sa structuration permettant de rendre la collecte de données la plus objective possible.

Le principe de cette grille est de lister de la manière la plus exhaustive, les différents paramètres à prendre en compte pour la caractérisation des aléas rocheux. Dans un souci d'objectivité, le résultat de cette grille ne présente pas une seule note finale mais une série de valeurs pour 4 rubriques :

- Statique (S) ;
- Activité (A), noté également Dynamique (D) ;
- Facteurs d'évolution Aléatoires / discontinus (FA) ;
- et Facteurs d'évolution Continus (FC).

		STATIQUE				S /10									
MECANISME	Découpage principal (/ 5)	Conditions géométriques aggravantes (/ 3)			Conditions géomécaniques aggravantes (/ 2)										
		Gp Glissement plan	CONDITION NECESSAIRE : <i>(pendage < pente du versant) ET</i> <i>(Δ azimuts plan / front de falaise < 20°)</i> Continuité de la surface de glissement : Probabilité faible 0 Probabilité moyenne 1 Probabilité forte 3 Continuité avérée 5	<ul style="list-style-type: none"> Découpage latéral : surfaces libres ou plans de décollement latéraux <table style="margin-left: 20px;"> <tr><td>Non</td><td>0</td></tr> <tr><td>D'un côté</td><td>1</td></tr> <tr><td>Des deux côtés</td><td>2</td></tr> </table> Plan de décollement arrière <table style="margin-left: 20px;"> <tr><td>0 (non)</td><td>1 (oui)</td></tr> </table> 	Non	0	D'un côté	1	Des deux côtés	2	0 (non)	1 (oui)	Pendage < $\phi_{\text{estimé}} - 10^\circ$ 0 Pendage = $\phi_{\text{estimé}} \pm 10^\circ$ 1 Pendage > $\phi_{\text{estimé}} + 10^\circ$ 2 Proposition d'estimation de ϕ : - Joint argileux : $\phi \approx 15^\circ$ (10-20°) - Plan lisse : $\phi \approx 30^\circ$ - Joint rugueux : $\phi \approx 45^\circ$ (40-50°)		
Non	0														
D'un côté	1														
Des deux côtés	2														
0 (non)	1 (oui)														
Gd Glissement d'un dièdre	CONDITION NECESSAIRE : 2 discontinuités dont l'intersection plonge vers l'aval avec un plongement inférieur à celui du versant (mesuré dans la direction de l'intersection). Continuité de la surface de glissement (ensemble des 2 plans, voir Jaboyedoff et al. 1996) : Probabilité faible 0 Probabilité moyenne 1 Probabilité forte 3 Continuité avérée 5	<ul style="list-style-type: none"> Plan de décollement arrière <table style="margin-left: 20px;"> <tr><td>0 (non)</td><td>1 (oui)</td></tr> </table> - Si glissement sur un plan : 2 - Si glissement sur deux plans : Ouverture du dièdre <table style="margin-left: 20px;"> <tr><td>$\alpha < 90^\circ$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$\alpha < 120^\circ$</td><td>1</td></tr> <tr><td>$\alpha > 120^\circ$</td><td>2</td></tr> </table> 	0 (non)	1 (oui)	$\alpha < 90^\circ$	0	$\alpha < 120^\circ$	1	$\alpha > 120^\circ$	2	Si glissement sur un seul plan, idem Gp. → 0 1 2 Si glissement sur deux plans : idem Gp en considérant l'inclinaison de l'intersection et l'angle de frottement du plan de pendage le plus faible. On peut être plus rigoureux en utilisant les abaques de Hoek et Bray (1981).				
0 (non)	1 (oui)														
$\alpha < 90^\circ$	0														
$\alpha < 120^\circ$	1														
$\alpha > 120^\circ$	2														
Glissement rotationnel	CONDITION NECESSAIRE : roche suffisamment fracturée pour que la taille des éléments soit négligeable devant la taille de la pente. APPROCHE GLOBALE : $S = 10-3F$ (arrondi au nombre entier et positif le plus proche) Facteur de sécurité F calculé avec c et ϕ - issus d'une évaluation type RMR ou Q - et la pente du versant (abaques en Annexe 1, d'après Hoek et Bray, 1981)														
S Rupture de surplomb	CONDITION NECESSAIRE : <i>Existence d'un toit</i> Découpage latéral et supérieur : Probabilité faible 0 Probabilité moyenne 1 Probabilité forte 3 Continuité avérée 5	<table border="1"> <tr> <td></td> <td>Rapport portée / épaisseur $e \leq 6$</td> <td>Rapport portée / épaisseur $6 \leq e \leq 12$</td> <td>Rapport portée / épaisseur $e \geq 12$</td> </tr> <tr> <td>Pas de fracture arrière</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Fracture arrière observée</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> </table>		Rapport portée / épaisseur $e \leq 6$	Rapport portée / épaisseur $6 \leq e \leq 12$	Rapport portée / épaisseur $e \geq 12$	Pas de fracture arrière	0	1	1	Fracture arrière observée	2	2	3	<ul style="list-style-type: none"> Cohésion du découpage : Forte cohésion (ex recristallisé) 0 Cohésion faible (remplissage...) 1 Pas de cohésion 2 Si pas de fracture arrière : résistance en traction de la matrice (et microfissures) : Roche massive et saine 0 Roche fissurée ou altérée 1
	Rapport portée / épaisseur $e \leq 6$	Rapport portée / épaisseur $6 \leq e \leq 12$	Rapport portée / épaisseur $e \geq 12$												
Pas de fracture arrière	0	1	1												
Fracture arrière observée	2	2	3												

		STATIQUE (suite)			S/10	
MECANISME	Découpage principal (/5)				Conditions géométriques aggravantes (/3)	Conditions géomécaniques aggravantes (/2)
		Elancement $E < 2$	Elancement $2 < E < 5$	Elancement $E > 5$		
Cb Basculement de colonne	Découpage arrière douteux	0	1	2	Projection du centre de gravité : Rapport Plus grande largeur / largeur de la base e $e < 1.5$ (tars central) 0 $1.5 < e < 2.5$ (hors 1/3 central) 1-2 $e > 2.5$ (hors base) 3	Résistance en traction du pied (matrice + joints) :
	Fracture arrière fermée	1	2	3		- Roche massive et saine 0
	Fract. arrière ouverte	3	4	5		- Roche fissurée ou altérée, ou présence d'un joint 2
Cp Rupture en pied de colonne	H = hauteur	$H \leq 15$ m	$15 \leq H \leq 50$ m	$H \geq 50$ m	Présence d'un plan de glissement basal Probabilité faible 0 Probabilité moyenne 1 Probabilité forte 2 Continuité avérée 3	Résistance en compression simple du pied et du socle
	Découpage arrière couteux	0	1	2		- Roche saine 0
	Fracture Arrière Fermée	1	2	3		- Roche fracturée 1
	Décollé à l'arrière	3	4	5		- Roche tendre ou très altérée 2
Bf Rupture de banc	CONDITION NECESSAIRE : Discontinuité plus ou moins parallèle au versant, non émergente (Δ azimuts plan / front de falaise $< 20^\circ$) Continuité de la surface de glissement : Probabilité faible 0 Probabilité moyenne 1 Probabilité forte 3 Continuité avérée 5				<ul style="list-style-type: none"> Rapport longueur / épaisseur du banc (voir équation III.12, p96) : $l < l_c : 0$ $l > l_c : 1$ Fractures transverses : 0 1 (non) (oui) Emergence latérale du plan basal ou plans de décollement latéraux 0 1 	Fendage $< \phi$ estimé - 10° 0 Fendage = ϕ estimé $\pm 10^\circ$ 1 Fendage $> \phi$ estimé + 10° 2 Proposition : - Joint argileux : $\phi = 15^\circ$ (10-20°) - Plan lisse : $\phi = 30^\circ$ - Joint rugueux : $\phi = 45^\circ$ (40-50°)

MECANISME	ACTIVITE			A / 10
	ACTIVITE ACTUELLE AVEREE (/ 8)		SIGNES D'ACTIVITE PASSEE (/ 2)	
	Mouvements mesurés ou prouvés, éboulement voisin dans configuration analogue, chutes de blocs au front	Ouverture ou rejet sur fractures en crête (s'ajoute à l'existence, constitutive ou non, d'une fracture en crête)	Fractures ouvertes ou rejet en paroi	
Gp	<ul style="list-style-type: none"> Si des mesures existent et montrent un mouvement : <ul style="list-style-type: none"> - Mouvements mesurés : 0 à 5 - Eboulements voisins dans une configuration analogue : 0 à 2 Si absence de mesures significatives : 	0	1	0 1 Sur le plan de glissement
Gd		0	1	0 1 Sur les plans de glissement
Gr		0	1	0 1 sur la surface de rupture (front souvent très fracturé, ouverture difficilement observable)
S		0 ou 1 si configuration verticale Sans objet si configuration horizontale		0 1 si configuration horizontale Sans objet si configuration verticale
Cb		0	1 (souvent constitutif)	0 1 à la base Constitutif pour le plan de décollement
Cp		0	1 (souvent constitutif)	0 1 sur plan basal éventuel Constitutif pour le plan de décollement
Bf		0	1	0 1

MECANISME	FACTEURS D'EVOLUTION ALEATOIRES / DISCONTINUS				FD / 10		
	Pressions interstitielles (/ 5)	Sismicité de base (période de retour 1 an) (/ 1)	Sismicité exceptionnelle récurrente (période de retour 475 ans) (/ 2)	Lien avec autres aléas (glissement de versant, érosion par torrent / crues torrentielles en pied ou latéralement ...) (/ 2)			
Gp	<p>La note attribuée doit tenir compte de la complexité des circulations d'eau qui peuvent aboutir à des mises en pression, en se basant entre autres sur les points suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les entrées d'eau dans le massif : <ul style="list-style-type: none"> - La pluviosité de la région concernée ; - L'étendue du bassin versant ; influence la quantité d'eau qui peut arriver sur le massif ; - L'ouverture des fractures en tête ; favorise les infiltrations ; - L'orientation du versant : en cas d'enneigement, en versant sud les pics de fonte seront plus forts et plus répétitifs qu'en versant Nord (+ cycles gel / dégel plus fréquents); • Les sorties d'eau dans le massif : <ul style="list-style-type: none"> - Les observations de sortie d'eau : écoulement, suintement, signes (mousses, tufs...); - Le niveau de ces sorties d'eau dans le massif : plutôt plus défavorable en partie basse qu'en partie haute (indice sur la continuité des discontinuités) ; - Le temps passé depuis les dernières précipitations : des arrivées d'eau persistant plusieurs jours après les dernières pluies sont indicateurs d'écoulements lents (mises en pressions possibles en cas de précipitations prolongées ou intenses) ; - Les exutoires : des exutoires masqués ou bouchés, de façon permanente (plaquage de calcite...) ou temporaire (bouchons de gel...) favorisent les mises en pression. <p>La qualité de la note est directement influencée par l'ensemble de ces critères : une visite de site un lendemain de pluie n'apportera pas les mêmes renseignements qu'après une période sèche.</p>	(*)	(*) L'influence d'un séisme sur un aléa est quantifié par l'accélération horizontale produite, qui dépend de la magnitude et de la distance de l'événement	0	1	2	
Gd		a < 0.001 g		0	Poussée active en tête, diminution de butée...		
Gr		a ≥ 0.001 g	1				
S			a < 0.1 g	0	0	1	(peu d'influence)
			a < 0.3 g	1			
			a ≥ 0.3 g	2			
Cb			Plus d'influence (effet de site, résonnance). Non quantifié en l'état.		0	1	2
Cp		a < 0.001 g	0	Surtout influent à la base			
		a ≥ 0.001 g	1				
Bf			a < 0.1 g	0			
			a < 0.3 g	1			
			a ≥ 0.3 g	2	0	1	

FACTEURS D'EVOLUTION CONTINUS

FC / 10

MECANISME	FACTEURS D'EVOLUTION CONTINUS				
	Altération / Dissolution Si matériau altérable ou soluble et écoulement lent (/ 2)	Gel – dégel (/ 2)	Modifications de géométrie (-3 / +3)	Permafrost (-5 / +5)	Facteurs anthropiques (-3 / +5)
Gp	Effet chimique de l'eau, à différencier de l'effet des pressions interstitielles 0 – 2 Affecte la résistance des plans de discontinuité, évacue ou dépose du remplissage	Effet de surface (quelques 10cm) → distinguer l'influence sur des aléas de petit volume (facteur déclenchant) ou de volume plus important (rôle d'érosion) Prendre en compte le nombre de cycles gel - dégel par an, N, fonction de l'altitude, de l'orientation du site	- Perte de masse en pied (érosion) : 0 à +2 - Accumulation en pied (dépôts, déplacements) : -2 à 0	Pour les zones de haute altitude, le gel permanent (qui peut être profond) ajoute un terme de cohésion à la résistance des discontinuités.	Vibrations – explosions (mines, carrières, chantiers), déprise agricole (élimination du drainage) ... 0 à +5
Gd					
Gr					
S	0 – 2 Active la mise en surplomb par érosion du niveau inférieur	N ≤ 80 0 80 ≤ N ≤ 120 1	- Dépôts / accumulations en tête : 0 à +1	- Fonte du permafrost : 0 à +5	Drainage du bassin Versant, mesures de stabilisation (ancrages, filets) ... -3 à 0
Cb	0 – 2 Si affecte le pied	N ≥ 120 2	- Perte de masse en tête : -1 à 0	- Permafrost : -5 à 0	
Cp					
Bf	0 – 2 Perte de résistance sous le banc	On considère ici uniquement la fatigue du massif liés aux cycles ; l'aspect des exutoires bouchés par le gel rentre dans le cadre des pressions interstitielles.			

A.3. Techniques instrumentales

Le tableau de synthèse présenté ci-après regroupe les différentes techniques instrumentales utilisées dans le cadre de la surveillance des instabilités gravitaires.

Ce tableau décrit différents paramètres permettant de différencier les techniques en fonction des phénomènes observés. Les paramètres étudiés sont les suivants :

- le mesurande, correspondant à la grandeur physique mesurée.
- le principe de mesure, spécifiant la technique de mesure mise en œuvre.
- la grandeur de sortie, permettant de justifier du type de station de mesure et traitement nécessaire.
- le domaine d'application et le type d'aléa, informant des phénomènes que l'on peut surveiller avec ce type de technique.
- la résolution, informant sur la plus petite quantité mesurable que l'on peut obtenir avec la technique.
- la mise à disposition des données, correspondant au temps de réponse de l'instrument auquel s'ajoute le temps de traitement nécessaire jusqu'à obtention de la valeur interprétable.

L'échelle du temps de mise à disposition des données est exprimée selon l'intensité suivante :

- instantané (ms),
- très rapide ($\ll 1$ sec.),
- rapide (~sec.),
- moyen (qq sec.),
- long (~min.),
- très long (~heure).

Les avantages, inconvénients et limites d'utilisation fournissent des informations complémentaires spécifiques à chaque technique.

	MESURANDE	PRINCIPE DE MESURE	GRANDEUR DE SORTIE	DOMAINE D'APPLICATION	TYPE D'ALEA A SURVEILLER	RESOLUTION	MISE A DISPOSITION DES DONNEES	AVANTAGES	LIMITE D'UTILISATION / INCONVENIENTS
DETECTEUR LOGIQUE	Contact	Contact électrique / lumineux	Analogique	Détection ponctuelle	Eboulement (<i>Rupture</i>)	Dépend de la nature du contact	Instantané	Simple, pas de traitement	Non réarmable automatiquement, pas d'information sur l'évolution
EXTENSOMETRE / FISSUOMETRE	Déplacement	Résistif / Inductif / Corde vibrante	Analogique / Codeur	Déformation superficielle ponctuelle	Eboulement (<i>Rupture</i>)	0,01%EM	Rapide	Appareil classique et bon marché	
EXTENSOMETRE DE FORAGE	Déplacement	Résistif / Inductif / Corde vibrante	Analogique / Codeur	Déformation profonde ponctuelle	Glissement de terrain	0,01%EM	Rapide		Nécessite génie civil pour forage
EXTENSOMETRE A FIBRE OPTIQUE	Déformation	Mesure optique	Analogique	Déformation superficielle ou profonde linéaire	Glissement de terrain	-	Rapide	Pas de perturbation e.m. sur la mesure	Technique plutôt adaptée à la surveillance d'ouvrage, requiert personnel spécialisé, nécessite génie civil pour forage
TDR	Déformation	Mesure d'une impulsion e.m.	Analogique	Déformation superficielle ou profonde linéaire	Glissement de terrain	2mm	Rapide	EM [0 2000m]	Nécessite génie civil pour forage, pas d'info sur direction de la déformation
INCLINOMETRE	Inclinaison (angle)	Magnéto-résistif, servo-accéléromètre	Analogique	Déformation superficielle et profonde ponctuelle	Glissement de terrain	0,02%EM	rapide		Nécessite génie civil pour forage
GPS	Coordonnées géoréférencées	Calcul pseudo-range et phase d'une onde e.m.	Numérique	Déformation superficielle ponctuelle ou linéaire	Glissement de terrain	3 à 5 mm (<i>post-traitement</i> ou en mode <i>RTK</i>)	Très long (<i>post-traitement</i>), rapide (<i>RTK</i>)	Mise en œuvre facile, mesure 3D, grande ligne de base	Mauvaise résolution en Z, nécessite espace ouvert, coût élevé

	MESURANDE	PRINCIPE DE MESURE	GRANDEUR DE SORTIE	DOMAINE D'APPLICATION	TYPE D'ALEA A SURVEILLER	RESOLUTION	MISE A DISPOSITION DES DONNEES	AVANTAGES	LIMITE D'UTILISATION / INCONVENIENTS
TACHEOMETRE / STATION TOTALE	Distance, Angle	Mesure de phase sur laser de 780nm	Numérique	Déformation superficielle ponctuelle	Glissement de terrain	2 mm + 2 ppm	Moyen	Mesure à distance	Difficulté de mesure par pluie ou brouillard épais ou atm trop diffusant (par ex. ensoleillé avec forts courants de chaleur), nécessite référence stable à vue des points de mesure
LASER PULSE	Distance	Mesure de phase sur laser	Numérique	Déformation superficielle linéaire (profil)	Glissement de terrain	Qq cm	Moyen	Mesure à distance, sans cible	Difficulté de mesure par pluie, brouillard épais ou atm trop diffusant, technique non validée pour la surveillance car non automatisée
SCANNER LASER	Distance	Mesure de phase sur laser	Numérique	Déformation superficielle surfacique	Glissement de terrain	2 cm à 600m	Long	Mesure 3D à distance, sans cible	Difficulté de mesure par pluie, brouillard épais ou atm trop diffusant Technique non validée pour la surveillance car non automatisée
RADAR DOPPLER	Vitesse	Rayonnement e.m. Doppler	Contact électrique	Détection de mouvements ponctuelle	Éboulement, avalanche (<i>propagation</i>)	Dépend de la portée et de la fréquence	Rapide	Mesure à distance	Difficulté de mesure par grand vent, brouillard givrant, masque de la végétation, animaux, vent dans les arbres, bourrasque de neige. Portée 50-300m selon type
RADAR DOPPLER PULSE	Vitesse	Fonctionnement sur le principe de l'effet Doppler avec la particularité de parcourir une zone angulaire fixée	Onde e.m. (Spectre de vitesse)	Détection de mouvements surfacique	Éboulement, avalanche (<i>propagation</i>)	Dépend de la portée et de la fréquence	Moyen	Mesure à distance fonctionnel par conditions	Difficulté de mesure par grand vent (dû à vibration antenne) mais corrigéable Technique non utilisée actuellement pour la surveillance
RADAR INTERFEROMETRIQUE	Flux de rayonnement optique	Interférométrie sur image satellite	Numérique	Déformation superficielle surfacique	Glissement de terrain	Qq cm	Très long	Mesure à distance	Nécessite image satellite Traitement complexe, ambiguïté des mesures, coût élevé, nécessite personnel spécialisé, traitement complexe
RADAR SOL (GROUND BASED SAR)	Distance	Rayonnement e.m. (GHz)	Numérique	Déformation superficielle surfacique	Glissement de terrain	0,2 mm post-traitement	Très long	Mesure à distance et par tout temps	Végétation, givrage sur les marqueurs, correction des effets atmosphériques, nécessite personnel spécialisé technique non opérationnelle, traitement complexe

	MESURANDE	PRINCIPE DE MESURE	GRANDEUR DE SORTIE	DOMAINE D'APPLICATION	TYPE D'ALEA A SURVEILLER	RESOLUTION	MISE A DISPOSITION DES DONNEES	AVANTAGES	LIMITE D'UTILISATION / INCONVENIENTS
RADAR SOL ULB (ULTRA-LARGE-BANDE)	Distance, Vitesse	Rayonnement e.m. (18-26GHz) Doppler	Numérique	Déformation superficielle surfacique	Glissement de terrain, éboulement (<i>propagation</i>)	0,2mm, 250kg à 1200m	Long (1pt/heure)	Mesure à distance et par tout temps	Nécessite personnel spécialisé, méthode développée spécifiquement pour le site de Séchillienne, traitement complexe qui nécessite un ordinateur
VIDEOMETRIE	Flux de rayonnement optique	Analyse d'images	Numérique	Déformation superficielle surfacique (<i>détection blocs en mouvements par comparaison d'image</i>)	Glissement de terrain, éboulement (<i>propagation</i>), avalanche	1cm à 300m et qqcm à 1000m	Moyen (dépend de la puissance du PC)	Mesure à distance, sans cible	Conditions de visibilité favorables, Pas de mesure la nuit, difficulté de mesure par brouillard, pluie (agitation thermique des couches d'air), appareil très sensible aux vibrations, animaux, vent dans les arbres,, traitement complexe qui nécessite un ordinateur Technique non validée pour la surveillance
SISMIQUE	Vibration	Résistif / Inductif	Analogique / Charge	Déformation interne volumétrique	Séisme, éboulement (<i>propagation</i>), avalanche	20s <fréq< 100Hz	Très rapide	Non perturbé par météo, localisation spatiale des sources	Environnement bruyant, perturbation e.m
MICRO-SISMIQUE	Vibration	Résistif / Inductif	Analogique / Charge	Déformation interne volumétrique	Eboulement (<i>rupture</i>)	1Hz <fréq< 1kHz	Très rapide	Non perturbé par météo, localisation spatiale des sources	Environnement bruyant, perturbation e.m
ACOUSTIQUE	Onde sonore	Résistif / Inductif	Analogique	Déformation externe volumétrique	Eboulement (<i>propagation</i>), avalanche	Fréq>100Hz	Très rapide	Non perturbé par météo, localisation spatiale des sources	Environnement bruyant, perturbation e.m
VITESSE ET DIRECTION DU VENT	Vitesse, Azimuth	Résistif / Inductif / Optique	Analogique / Codeur	Météorologie	Avalanches	0,3m/s 3°	Rapide		Montage sur mât

	MESURANDE	PRINCIPE DE MESURE	GRANDEUR DE SORTIE	DOMAINE D'APPLICATION	TYPE D'ALEA A SURVEILLER	RESOLUTION	MISE A DISPOSITION DES DONNEES	AVANTAGES	LIMITE D'UTILISATION / INCONVENIENTS
TEMPERATURE	Température	Thermorésistif	Analogique	Météorologie	Tout type d'aléa	0,5°C	Rapide		Nécessite un abri météorologique pour la mesure de la température de l'air (équilibre thermique entre détecteur et milieu)
PLUVIOMETRIE	Volume / Hauteur d'eau	Contact électrique	Contact sec	Météorologie	Glissement de terrain, éboulement	0,2mm de pluie	Moyen		Masque par végétation, nécessite endroit dégagé sans obstacle
NIVOMETRE	Hauteur	Mesure Temps de propagation d'une onde acoustique (ultrason)	Analogique / Numérique	Nivologie	Avalanches	cm	Moyen		Montage sur mât
PIEZOMETRE	Pression / Hauteur d'eau	Mesure de pression	Analogique	Piézométrie	Glissement de terrain,	0,2% EM	Rapide		Nécessite un forage

Légende : EM = Etendue de mesure / e.m. = électromagnétique

A.4. Liste de sites sous surveillance

Liste réalisée en mars 2008.

Nous présentons ci-après une liste de sites, non exhaustive, qui ont fait ou font l'objet d'une surveillance avec gestion d'alerte, en France et dans les pays de l'arc alpin.

L'aspect de la sécurité constitue l'objectif majeur de ces sites, ce qui signifie qu'en plus de la mesure, ces systèmes de surveillance transmettent l'information (par télémétrie) vers un centre de traitement, capable de générer des alertes opérationnelles.

Les sites sont triés par ordre chronologique de la date de mise en service du système de surveillance.

Légende :

- P=Pluviomètre
- Ta=Température de l'air
- Ts=Température du sol
- B=Baromètre
- N=Nivomètre
- H=Hygromètre
- G=Gonionemomètre
- S=Ensoleillement, Rayonnement solaire
- C=Conductivité électrique du sol
- Pe=Permittivité (Humidité du sol)
- V=Vitesse et direction du vent

SITE	VOLUME MISE EN JEU	ALEA	ENJEUX	TECHNIQUES INSTRUMENTALES (DATE MISE EN SERVICE)	NB POINTS DE MESURE	SYSTEME DE SURVEILLANCE	DERNIERS EVENEMENTS MAJEURS / DEFINITIFS DUREE SURVEILLANCE
Val Pola - Mont Zandila (Valtelline, Italie)	40 Mm ³	Écroulement, laves torrentielles et inondations	Plusieurs villages, cours d'eau (Adda)	Extensométrie, Écoute sismique (Après écroulement de 1987)		ISMES	Écroulement majeur le 29/07/1987
Ruines de Séchilienne (38, France)	25 Mm ³ , zone très active de 3 Mm ³	Écroulement, Inondations	RN85, agglomération le long de la Romanche, captage AEP de Grenoble, zones industrielles de Pont-de-Claix (Usines Sévés)	Extensométrie (1988), Tachéométrie (1996), Radar ULB (2000), Météo (1993)	33 47 14 + 3ref P-N-Ta	CETE Lyon (GessRI)	Juillet 2006 Surveillance en cours
La Clapière (06, France)	60 Mm ³	Écroulement, Inondations	Route, cours d'eau (Tinée)	Distancemètre (1982, automatique depuis 1991) Extensométrie à fil (1990) Inclinométrie, Écoute sismique, Météo (1991)	24 (1982) 33 (1991) 16 2 2 P-Ta-N	CETE Med.	Évolution instabilités depuis 1978, accélération de 1984 à 1988 Phénomène actuellement dans une phase stabilisée
Randa (Suisse)	30 Mm ³ en 3 phases	Écroulement	Habitations, Routes, Chemin de fer	Extensométrie, Distance-mètre, Météo, (1991), Sismique (pdt crise)	7 18 P-Tas-E-C-H	CREALP	Éboulements du 18/04 au 9/05 1991
Grande Platte, Champagny en Vanoise (73, France)	8000 m ³	Éboulement	RD91b, village Villard du Planay	Grillage avertisseur, Extensométrie, (1995)	1 2	ANTEA	Éboulements 20t en mai et nov. 1994, ³ Éboulements 4000 m ³ en mars et avril 2001 Réalisation galerie pare-blocs (2004)
Becca di Nona (Aoste, Italie)	1 à 2 Mm ³	Écroulement, Inondations	Villages le long du torrent Comboe	Extensométrie (1996), GPS (1997), Météo	4 2 P-Ta	ISMES (Eydenet)	

SITE	VOLUME MISE EN JEU	ALEA	ENJEUX	TECHNIQUES INSTRUMENTALES (DATE MISE EN SERVICE)	NB POINTS DE MESURE	SYSTEME DE SURVEILLANCE	DERNIERS EVENEMENTS MAJEURS / DEFINITIFS DUREE SURVEILLANCE
Chaos de Coumély, Cirque de Gavarnie (Haute Pyrénées, France)		Éboulement	RD 921 (accès station de ski)	Sismique (1996)		Cessys, CeSigma (Stone scan)	Surveillance en cours
Gripp, Campan (Haute Pyrénées, France)		Éboulement	RD 908 (accès station de ski)	Sismique (2000)		CeSigma (Stone scan)	Surveillance en cours
Citrin (Aoste, Italie)	1,5 Mm3	Écroulement, Inondations, Laves torrentielles	Routes, Habitations plaine du torrent Artanavaz	Extensométrie (2000), Ground SAR (2001), Météo	3 1 P-Ta-B-N- H-G	ISMES (Eydenet)	
Épines Blanches (73, France)	100000 m ³	Glissement de terrain, Éboulement	RD90, RD915 et le camping	Inclinométrie, Piézométrie, Extensométrie, Météo, (2000)	4 5 3 P	SAGE	Glissement 8000 m ³ le 25 février 1995, Plusieurs éboulements entre 1998 et 2001 Réalisation confortements et terrassement (2003)
Vollein (Aoste, Italie)	3 Mm3	Eboulements partielles ou en masse, Laves torrentielles	Route, Habitations	Tachéométrie (2001), Météo	16 P-Ta-B-H	ISMES (Eydenet)	
Col de Larche (04, France)	25000 m ³	Éboulements	RD900 (1000 véhicules/jour)	Acousto-sismique (2001)	12	GEOLITHE LEAS	Eboulement 2001, Surveillance en cours
Bosmatto (Aoste, Italie)	3 Mm3	Eboulement en masse, Inondations, Laves torrentielles	Habitations Vallée du Lys	Extensométrie (2006), GPS (2001), Météo	4 3 P-Ta-B-N-H	ISMES (Eydenet)	
Meidji, Saint-Nicolas (Valais, Suisse)	120000m3	Éboulements partielles et en masse	Habitations, Routes, Chemin de fer	Extensométrie, Tachéométrie, Météo (08/2002)	~10 ~10 P-Ta	Bureau géologique Rovina	Eboulements le 30/09/2002 (suite au séisme Zermatt ML=2.3) et le 21/11/2002

SITE	VOLUME MISE EN JEU	ALEA	ENJEUX	TECHNIQUES INSTRUMENTALES (DATE MISE EN SERVICE)	NB POINTS DE MESURE	SYSTEME DE SURVEILLANCE	DERNIERS EVENEMENTS MAJEURS / DEFINITIFS DUREE SURVEILLANCE
Pointe du Char d'Osset, St Julien Montdenis (73, France)	100000 m ³	Éboulement	RD 79A	Extensométrie à fil, Radar Doppler, (04/2003)	4 2	LEAS ALPUG	Éboulement 30000 m ³ le 05/03/2003
Saint André-la-Roche (06, France)	plusieurs Mm ³	Écroulement	Personnel d'exploitation de la carrière	Extensométrie en forage, Tachéométrie, (2003)	13 44	MYOTIS LEAS (SafeCarriere)	Surveillance en cours
La Barmasse (Valais, Suisse)	1000 m ³	Éboulement	Route, Habitations	Extensométrie à fil, Extensométrie, Météo (2003)	1 4 P-Ta-Pe	CREALP (Guardaval)	
Deibfels (Valais, Suisse)	700 m ³	Éboulement	Route	Extensométrie, Météo (2003)	2 P-Ta	CREALP (Guardaval)	
Les Trappistes (Valais, Suisse)	12000 m ³	Éboulement	Route	Extensométrie, Météo (2003)	17 P-Ta	CREALP (Guardaval)	
Villefranche-sur-mer (06, France)	-	Glissement de terrain	Personnel chantier Route basse corniche	Extensométrie, Météo (fev 2004)	3 Ta-Tr	MYOTIS (SAFIR- MYRSA)	Durée surveillance 2 mois Réalisation confortement
La Garde (Valais, Suisse)	400 m ³	Éboulement	Habitations	Extensométrie (2004)	4	CREALP (Guardaval)	
Bourne, Vercors (38, France)		Écroulement	Personnel chantier RD531	Extensométrie en forage, Météo (mai 2004)	4 Ta-Tr	MYOTIS (SAFIR- MYRSA)	Eboulement mortel de 80000 m ³ le 31/01/2004 Durée surveillance 6 mois Réalisation confortement falaise
Grands Goulets, Vercors (26, France)	3600 m ³	Éboulement	Personnel chantier RD518	Extensométrie, Météo, Écoute sismique (2005)	4 P-Ta-Tr 4	MYOTIS (SAFIR- MYRSA)	Réalisation d'un tunnel (2006-2008) Surveillance en cours

SITE	VOLUME MISE EN JEU	ALEA	ENJEUX	TECHNIQUES INSTRUMENTALES (DATE MISE EN SERVICE)	NB POINTS DE MESURE	SYSTEME DE SURVEILLANCE	DERNIERS EVENEMENTS MAJEURS / DEFINITIFS DUREE SURVEILLANCE
Les Rousses, Jura (39, France)	150m ³	Éboulement	RD436	Extensométrie, Météo (juil 2005)	3 Ta-Tr		Durée surveillance 9 mois Réalisation confortement et minage masse rocheuse
Felsmutz (Valais, Suisse)	0,5 Mm ³	Éboulement	Route	Extensométrie, Météo (2005)	4 P-Ta	CREALP (Guardaval)	
Garde de Bordon (Valais, Suisse)	2500 m ³	Éboulement	Zone touristique	Extensométrie, Météo (2005)	5 P-Ta	CREALP (Guardaval)	
Morzine (74, France)	-	Avalanche	Route, Habitations	Écoute sismique, Accélérométrie, Météo, Nivologie (2005)	9 8 Ta-V Haut. neige	MYOTIS (SAFIR- MYRSA)	Surveillance en cours
Ile de la Réunion	2000m ³	Éboulement	RN1	Extensométrie (2006)	4	MYOTIS (SAFIR- MYRSA)	Surveillance en cours
Moutiers (73, France)	Plusieurs Mm ³	Écroulement	Voie ferrée RN90	Acousto-sismique (2006)	38	MYOTIS (SAFIR- MYRSA)	Surveillance en cours
Morzine (74, France)	Plusieurs Mm ³	Écroulement	RD338 Rivière La Dranse Habitations	Extensométrie, Convergence, Écoute sismique, Météo (2008)	14 8 7 Ta-Tr	MYOTIS (SAFIR- MYRSA)	Surveillance en cours
Réseau Ferré Français		Éboulement, Glissement de versants, Coulée de boue, Lave torrentielle, Crue	112 km de lignes les plus exposées	Filets détecteurs		SNCF	

B. Conception d'une instrumentation multi-paramètres

Le cahier des charges que nous nous sommes fixé est le suivant :

- ⇒ disposer d'un équipement capable d'acquérir à la fois des signaux à haute fréquence (sismique) et des données lentes (déformation, météorologie) en continu sur de longues périodes de temps ;*
- ⇒ disposer d'une solution télémétrée simple à mettre en œuvre ;*
- ⇒ disposer d'une solution d'acquisition modulaire et totalement maîtrisée afin d'optimiser les coûts de maintenance;*
- ⇒ réduire le plus possible la consommation pour des applications à long terme sur des sites isolés ;*
- ⇒ disposer de capacités de stockage le plus élevées possibles de façon à pouvoir réaliser des enregistrements en continu à très haute fréquence ;*
- ⇒ réduire le plus possible le niveau de bruit de la chaîne de mesure pour pouvoir effectuer des études de bruit sismique, notamment la détection de fréquences pures de faible intensité, y compris à hautes fréquences ;*
- ⇒ implémenter nos propres algorithmes d'acquisition, de traitement et de transmission de l'information.*

*De ce besoin et motivation de concevoir une nouvelle station de mesure est né le projet **SAFIR**, acronyme de **Station d'Acquisition multi-Fonction pour les Instabilités et les Risques**.*

B.1. Capteur sismique

Le capteur sismique va permettre de convertir un mouvement du sol en une grandeur mesurable (électrique).



Figure B.1.1 : Déphasage entre déplacement du sol et déplacement de la masse (d'après NMSOP)

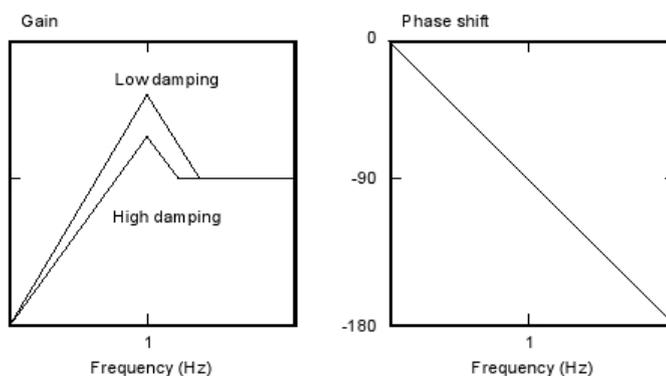


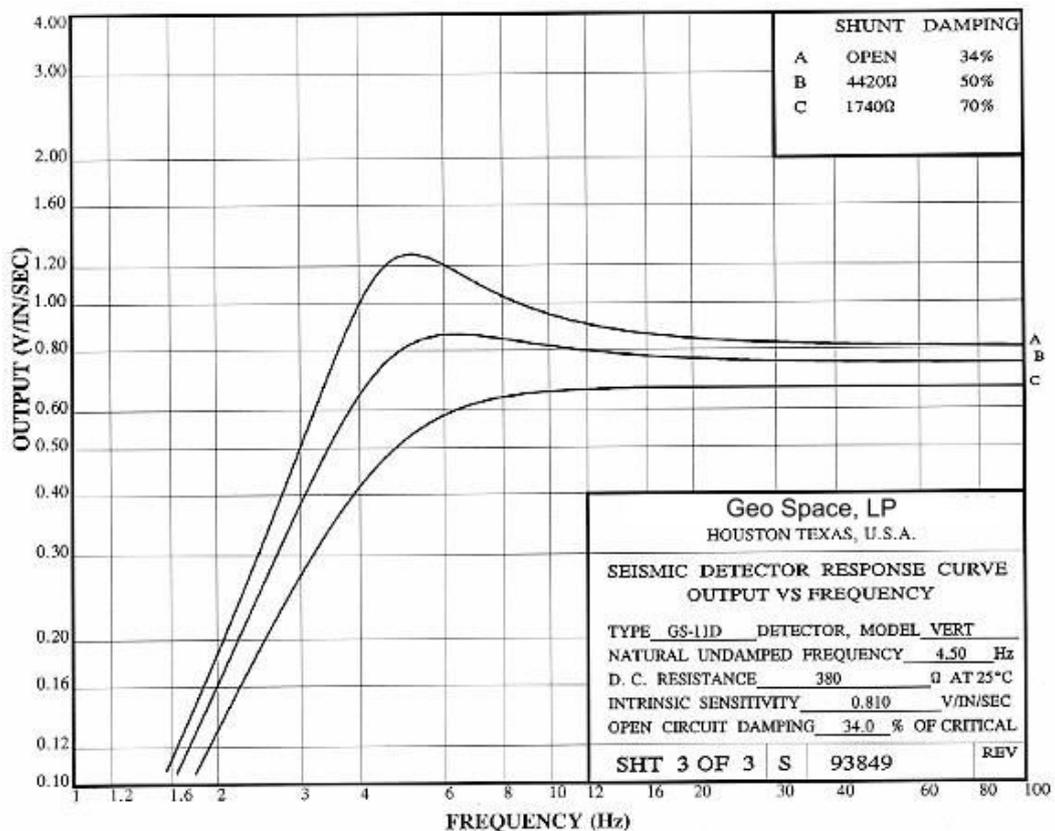
Figure B.1.1 : Réponse d'un capteur sismique (d'après NMSOP)

Dans le cadre de l'écoute micro-sismique au sein de massifs rocheux, nous nous intéressons a priori aux très faibles signaux (nano-séismes) dont la bande de fréquence s'étale de 1Hz à 1000Hz. Nous nous sommes donc orientés sur des capteurs sismiques courte période, actifs (*le capteur assure la transformation de l'énergie propre du mesurande en énergie électrique*), et qui présentent une réponse linéaire au-delà de sa fréquence propre.

Nous présentons ci-après le capteur sismique que nous avons largement utilisé lors de nos expérimentations sur les massifs rocheux. Il s'agit du géophone d'exploration GS-11D de fréquence propre 4,5Hz (que l'on pourrait élargir à 1 Hz). Ils présentent l'avantage d'être facile à installer, robustes (prévus pour la prospection géophysique) et d'un faible coût. Par contre, leur faible sensibilité nécessite d'amplifier le signal.

Fiche technique du géophone : GS-11D (Rotating Coil Geophone)

GS-11D Specifications (from GeoSpace)	
Natural Frequency	4.5 ± .75 Hz
Coil Resistance @ 25°C ± 5%	380 Ohms
Intrinsic Voltage Sensitivity with 380 Ohm Coil ± 10%	.32 V/cm/sec (.81 V/in/sec)
Normalized Transduction Constant (V/in/sec)	042 (sq.root of Rc)
Open Circuit Damping	.34 ± 20%
Damping Constant with 380 Ohm Coil	762
Optional Coil Resistances ± 5%	56,160 Ohms
Moving Mass ± 5%	23.6 g
Typical Case to Coil Motion P-P	.18 cm
Harmonic Distortion with Driving Velocity of 0.7 in/sec (1.8 cm/sec) P-P	N/S
Dimensions	
Height (less terminals*)	3.35 cm
Diameter	3.18 cm
Weight	111 g

GS-11D @ 4.5 Hz @ 380 Ohms

B.2. Interface de conditionnement sismique

Le capteur sismique délivre une tension proportionnelle au mouvement du sol. Cette tension est fournie par une bobine se déplaçant autour d'un noyau aimanté. Suivant la sensibilité du capteur et la dynamique du convertisseur, les déplacements du sol que l'on cherche à mesurer nécessitent souvent d'amplifier la mesure avant de la numériser. Par ailleurs, il est nécessaire de filtrer (filtre anti-repliement) avant d'échantillonner.

Outre le choix judicieux des composants pour réduire la consommation de la carte, la solution a été de concevoir l'interface avec une unique alimentation en 5 V. **L'alimentation en mono-tension** est une réelle contrainte et a fortement compliqué la conception de la carte. Les circuits de la carte analogique sont alimentés par une tension unique de 5 V. Il est donc nécessaire de créer une masse flottante à 2.5 V afin de pouvoir alimenter les amplificateurs et le filtre par un circuit symétrique. De ce fait, toute la carte est indépendante des masses externes.

Ayant pour objectif de mesurer de très faibles mouvements du sol, un circuit d'amplification a été intégré. **L'amplification du signal** présente plusieurs avantages :

- elle assure une protection du signal vis-à-vis des parasites et du bruit de fond en augmentant le niveau du signal ;
- elle permet un transfert optimal du signal grâce à une impédance d'entrée élevée et une faible impédance interne ;
- elle améliore la précision de mesure en portant le signal au niveau requis par l'échelle d'entrée du convertisseur analogique-numérique.

L'étage d'amplification est primordial car même quand il n'augmente pas directement le niveau du signal (gain), il permet l'adaptation d'impédance entre le capteur et le convertisseur (CAN). En effet, les caractéristiques du CAN que nous avons utilisé (*ADS8344 de Burr-Brown*) nous indiquent que le courant d'entrée est de 100 nA (*input current*). Le courant d'entrée désigne le courant nécessaire au convertisseur pour effectuer la mesure. Si l'intensité est insuffisante, la tension chute et la mesure est faussée. Ainsi, dans le cas d'un capteur sismique de résistance interne 380 Ω (*Coil resistance*), la tension nécessaire pour fournir un courant de 100 nA doit être de 38 μ V. Pour mesurer des tensions plus faibles, il est donc nécessaire d'intégrer en premier lieu un étage d'amplification.

L'amplificateur d'instrumentation utilisé, INA128 de Burr-Brown, est idéal pour les circuits fonctionnant sur batterie car il a une faible consommation (700 μ A à $V_{in}=0$ V) et possède une large bande passante (200 kHz pour $G=100$). De plus, son utilisation est prévue dans une plage de température extrême (-40°C +85°C) et son amplification est réglable par une unique résistance externe. On remarque en outre son faible courant d'entrée, 5 nA max (*low input bias current*), qui lui permet de pouvoir s'adapter à ce type de capteur sismique.

On remarquera d'autre part dans la documentation de l'INA128 que deux autres caractéristiques vont influencer la mesure :

- une dérive de 0,5 μ V/°C, qui peut s'étendre à 20 μ V pour une variation de température de 40°C;
- et un bruit électronique qui diminue en fonction de la fréquence (max 10 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$). Dans notre gamme d'étude (10-500 Hz), le bruit d'entrée vaut environ 0.2 μ V pour $G=1$ et diminue à 0.01 μ V pour $G>100$.

Le bruit généré par cet amplificateur est bien inférieur à la résolution du numériseur. L'amplificateur INA128 est donc bien adapté à l'amplification de très faibles signaux.

La conception d'une électronique analogique paramétrable par logiciel a contribué pour une

bonne part à la sophistication de la carte. Dans de nombreux cas d'instrumentation de sites isolés, cette fonctionnalité s'avère très utile, permettant, par une liaison télémetrée, d'agir sur la configuration de la station afin de pouvoir adapter la mesure (*niveau du signal*) à l'évolution du phénomène surveillé.

Pour rendre le gain réglable, le circuit intègre des potentiomètres à impulsions (*Digitally Controlled Potentiometer*) qui vont permettre de modifier les paramètres de l'étage d'amplification (cf. **Figure B.2.1**).

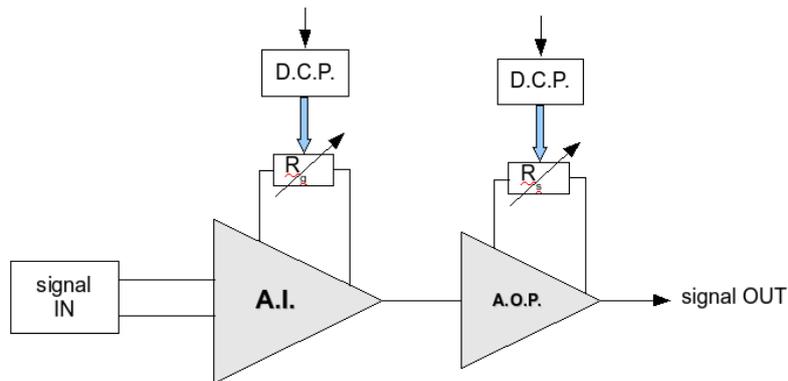


Figure B.2.1 : Schéma du double étage d'amplification de l'interface analogique

Le circuit d'entrée permet grâce à un potentiomètre digital de type DCP X9C104, accompagné d'un comparateur et d'un double interrupteur de définir trois valeurs de R_g permettant de différencier trois gammes de gain ($G=1, 10, \text{ et } 100$). Le circuit de sortie, qui se compose d'un deuxième DCP X9C104 monté en diviseur de tension, permet d'ajuster la valeur de la résistance R_s par pas de $1 \text{ k}\Omega$. Ce deuxième étage permet d'affiner le réglage du gain dans la gamme définie par le premier étage.

La définition du gain de l'amplification se synthétise par la formule suivante :

$$G = \left(1 + \frac{50 \cdot 10^3}{R_g}\right) \times \left(\frac{110 \cdot 10^3 - R_s}{110 \cdot 10^3}\right) \quad (\text{B.2.1})$$

avec R_g permettant de définir 3 gammes (1, 10, 100) et R_s variant de 0 à $100 \text{ k}\Omega$ par pas de $1 \text{ k}\Omega$.

Le circuit d'amplification permet ainsi d'amplifier le signal d'entrée dans une plage programmable allant de 1 à 1000 parmi un choix de 300 gains possibles.

En sortie de l'amplification, le signal électrique va être échantillonné par le CAN. Pour éviter le repliement de spectre, il est nécessaire de filtrer passe-bas en dessous de la fréquence de Shannon. Le filtrage permet d'éliminer les signaux non désirés dans la bande de fréquence utile. Mais ils peuvent aussi créer des phénomènes parasites.

Il existe plusieurs familles de filtres qui se différencient par leur polynôme d'atténuation. Les deux familles les plus répandues sont :

- Les filtres de Butterworth, caractérisés par une réponse uniforme dans la bande passante. La fonction d'atténuation d'un filtre passe bas de Butterworth est définie par :

$$|A(F)| = \sqrt{1 + \left(\frac{F}{F_0}\right)^{2k}} \quad (\text{B.2.2})$$

avec F_0 la fréquence de coupure et k l'ordre du filtre

- Les filtres de Chebychev, qui ont un coupure plus nette entre la bande passante et la bande atténuée. Ils présentent cependant une réponse qui oscille en fonction de l'ordre du filtre. La fonction d'atténuation d'un filtre passe bas de Chebychev est définie par :

$$|A(F)| = \sqrt{1 + a^2 \cdot C_k^2\left(\frac{F}{F_0}\right)} \quad (\text{B.2.3})$$

avec F_0 la fréquence de coupure, k l'ordre du filtre, a l'amplitude d'oscillation dans la bande passante, et $C_k(F/F_0)$ le polynôme de Chebychev

Nous nous sommes orientés vers un filtre de Butterworth, dont nous avons pu déterminer l'ordre du filtre ainsi que la fréquence de coupure à partir de deux conditions :

- condition relative à la bande passante : l'atténuation du signal dans la bande passante ne doit pas varier de plus de ε_1 pour les différentes fréquences le constituant ;
- condition relative à la bande atténuée : les perturbations situées au delà du spectre utile doivent être atténuées d'un facteur ε_2 afin de ne pas perturber le signal utile par repliement de spectre.

Pour satisfaire ces deux conditions, dans le cas du filtre de Butterworth, on détermine l'ordre minimal du filtre par la relation :

$$k \geq \frac{-\log(2\varepsilon_1\varepsilon_2)}{2 \cdot \log\left(\frac{F_p}{F_h}\right)} \quad (\text{B.2.4})$$

La fréquence de coupure F_c doit alors respecter la relation suivante :

$$\frac{F_h}{\sqrt[2k]{2\varepsilon_1}} \leq F_c \leq F_p \cdot \sqrt[2k]{\varepsilon_2} \quad (\text{B.2.5})$$

avec F_p la fréquence de la perturbation au delà du spectre utile, et F_h la fréquence la plus haute du spectre utile.

A titre d'exemple, on considère un signal de fréquence haute utile de 500 Hz et une perturbation à 1500Hz.

On pose $\varepsilon_1 = 10^{-2}$ et $\varepsilon_2 = 10^{-3}$

Par les relations précédentes (B.2.4 et B.2.5), on obtient :

$k \geq 4,92$ et $F_c \geq 740$ Hz

En pratique, nous avons choisi un filtre d'ordre 5 et la fréquence de coupure sera paramétrée telle que $F_c \approx 1,5x F_h$

Pour l'interface de conditionnement sismique, le filtrage est réalisé par un filtre passe-bas de type LTC1063 de Linear Technology. C'est un filtre du 5ème ordre de Butterworth dont la fréquence de coupure est réglable par une horloge externe selon le ration 100:1. L'horloge est réalisée au moyen d'un circuit RC qui a été rendu modifiable par l'utilisation d'un potentiomètre à impulsions (DCP). Dans la première version de la carte analogique sismique, le circuit permettait de sélectionner 3 gammes de fréquences. Le problème est que cette méthode fournissait, d'une part, un trop large choix de fréquences de coupure qui n'était pas forcément nécessaire, et d'autre part, la définition de la fréquence de coupure

n'était pas du tout linéaire donc non résolvable analytiquement. Il fallait donc établir une fiche d'étalonnage pour chaque carte et rentrer les valeurs correspondantes en mémoire dans la station. Pour éviter ce problème, le circuit de filtrage a donc été optimisé (*adaptation des valeurs des composants liés au filtre*) afin de ne fournir plus qu'une seule gamme linéaire permettant de régler la fréquence de coupure par pas de 50 Hz.

Le fait de pouvoir régler les paramètres de la carte analogique par logiciel est un atout considérable en termes de suivi du site et de logistique. Une des difficultés rencontrées dans la conception de cette interface de conditionnement réside dans le fait que l'on n'a pas de retour sur le paramétrage effectué, autant sur le gain que sur la fréquence de coupure. Les potentiomètres digitaux permettent de déplacer le curseur du potentiomètre en envoyant un train d'impulsion sur son entrée. Mais le potentiomètre ne retourne aucune information, il est totalement passif. Le paramétrage se fait en quelque sorte en aveugle, c'est-à-dire sans signal de retour. On n'est pas certain que le réglage ait abouti. C'est une limitation du matériel dans la version actuelle de cette interface.

B.3. Convertisseur Analogique-Numérique (CAN)

Le signal analogique provenant du capteur sismique va être converti en un signal numérique afin d'être traité par le module numérique. L'opération est réalisée par un CAN, Convertisseur Analogique Numérique (*ADC en anglais*).

La conversion analogique numérique se décompose en deux étapes :

- le signal est échantillonné à intervalles de temps réguliers ;
- chaque échantillon est converti en un mot binaire.

Rapport signal à bruit d'un convertisseur analogique-numérique

La résolution du convertisseur correspond à la plus petite grandeur électrique mesurable. Un CAN dont le mot de sortie est de 16 bits pourra fournir 2^{16} valeurs distinctes pour numériser la plage de tension d'entrée. On définit ainsi le quantum par le rapport entre la tension maximale d'entrée et la valeur du mot de sortie du convertisseur analogique-numérique :

$$q = \frac{V_{pe}}{2^N} \quad (\text{B.3.1})$$

Pour des numériseurs sismiques à haute dynamique, le quantum vaut entre 0,1 à 1 μV .

Ainsi chaque valeur analogique en entrée du CAN va être convertie en une valeur unique N . L'incertitude sur la valeur numérique est donc de $\pm q/2$, soit $\pm 1/2$ LSB (*Less Significant Bit*). Elle représente l'erreur maximale de quantification liée au processus de conversion.

Le rapport signal sur bruit du convertisseur correspond au rapport des puissances entre la plus grande amplitude mesurable et le plus petit bruit d'entrée. Il s'exprime en dB et est défini par :

$$(S/B)_{dB} = 10 \times \log\left(\frac{P_s}{P_b}\right) = 10 \times \log\left(\frac{\left(\frac{V_{pe}}{2\sqrt{2}}\right)^2}{\left(\frac{q}{\sqrt{12}}\right)^2}\right) \quad (\text{B.3.2})$$

avec P_s correspondant à la valeur RMS d'un signal sinusoïdal d'amplitude maximale $V_{pe}/2$

et P_b correspondant au bruit de quantification (RMS) défini par Tietze et Schenk

$$(1990) \text{ par : } V_b = \frac{q}{\sqrt{12}} \quad (\text{B.3.3})$$

Après simplification, on peut définir le rapport signal sur bruit en fonction du nombre de bits du convertisseur.

$$(S/B)_{dB} \approx 6,02N + 1,76 \quad (\text{B.3.4})$$

Quelques remarques sur le choix du convertisseur analogique-numérique

Pendant ce travail de thèse, nous avons expérimenté deux convertisseurs différents :

- l'ADS8344 de Burr-Brown (16bits) ;
- le CS5534 de Cirrus Logic (24 bits).

Outre la résolution, ces deux convertisseurs se différencient par leur méthode de conversion.

Le convertisseur ADS8344 de Burr-Brown est un convertisseur 16 bits par approximations successives (CAN-SAR). Le principe repose sur l'approximation d'un registre (mot binaire) par une comparaison itérative de la tension d'entrée avec la valeur analogique du registre obtenu par conversion numérique-analogique (CNA).

Avantage :

Le convertisseur par approximations successives permet de cumuler 8 voies de mesure sur un seul composant, réduisant ainsi la consommation et le coût.

Inconvénient :

L'architecture du CAN-SAR est très sensible au changement soudain sur la tension d'alimentation, la tension de référence et la connexion de masse (*Ground*).

Le CS5534 de Cirrus Logic est un convertisseur de type sigma-delta. C'est un convertisseur 24 bits qui est optimisé pour la mesure de faibles signaux analogiques. La méthode de conversion est basée sur le sur-échantillonnage et le filtrage numérique haute fréquence du signal

Avantage :

Le sur-échantillonnage permet de simplifier fortement le filtre anti-repliement en entrée du CAN. Un premier ordre suffit.

Inconvénient :

Le temps nécessaire au filtre numérique pour acquérir une suite de signaux ne favorise pas le multiplexage de plusieurs voies vers un seul CAN. On préférera donc utiliser un seul CAN sigma-delta par voie.

B.4. Spécifications du module CF2

Le module CF2 fonctionne exclusivement à 3,3 V (E/S et Bus de données) et dans une gamme de température extrême allant de -40 °C à +85 °C.

L'architecture du module CF2 repose sur un microcontrôleur 32-bits **Motorola MC68LK332**, utilisant la technologie de fabrication HCMOS (High-density Complementary Metal-Oxide Semiconductor) qui lui permet un fonctionnement optimal avec très peu d'énergie. La fréquence d'horloge maximum est de 16 MHz qui permet de travailler à haute fréquence mais peut être réglable pour l'adapter à des applications moins gourmandes en calcul. Le MC68LK332 est cadencé par une horloge interne (*Phase-Locked Loop clock system*) qui est un circuit interne générant un pulse cadencé par un quartz (typique de 32768 kHz). Une autre caractéristique importante du MC68LK332 est le timer d'interruption périodique (PIT). Le PIT permet de déclencher une interruption selon une période déterminée. Cela va nous permettre d'interroger à période fixe le convertisseur analogique-numérique afin d'échantillonner le signal issu du capteur. Le PIT et la gestion des interruptions sont des fonctions fondamentales du module numérique qui vont permettre d'une part de cadencer l'échantillonnage et d'autre part d'effectuer des calculs en attendant que la donnée soit disponible. En effet, lorsque le microprocesseur interroge le convertisseur, il y a un délai avant que les données ne puissent être obtenues ou transmises. La solution la plus simple est d'attendre les données en bouclant sur un test (attente active, ou *polling*). Malheureusement, cela bloque tout programme en cours, ce qui est gênant sur un système multitâche. On préfère donc le fonctionnement par interruption : le périphérique signale par une interruption qu'il est prêt à émettre, ou que les données ont été transmises ou reçues et une routine fait le traitement nécessaire. Dans l'attente des données, le microprocesseur peut être utilisé pour d'autres calculs ou arrêté pour réduire l'échauffement et faire des économies d'énergie. Le MC68LK332 contient, en natif, un set d'instructions qui permet au microprocesseur de passer dans un mode « standby » quand il n'y a pas de calculs à effectuer (*LPSTOP instructions*). Le module CF2 intègre une mémoire flash non volatile de 1 Mo dont 768 Ko sont disponibles pour stocker une application et/ou des données.

Le PIT du MC68LK332 peut être ajusté dans une gamme variant de 13 s à 100 µs, ce qui permet un échantillonnage jusqu'à 64 kHz.

Le MC68LK332 est secondé par un deuxième microcontrôleur, le MSP430 de Texas Instrument, qui est utilisé pour la gestion d'énergie et l'horloge système. Le MSP430 a un rôle de supervision de l'horloge quand le MC68LK332 est éteint. Il peut ainsi être programmé pour réveiller le MC68LK332 à une heure pré-définie.

La communication avec les périphériques tels que le CAN ou l'interface de conditionnement sismique, s'effectue par l'intermédiaire d'un bus QSPI (*Queue Serial Peripheral Interface*).

Le QSPI est une interface de communication série synchrone et full-duplex entre le microcontrôleur et les autres périphériques. La différence entre une liaison QSPI et une liaison série type UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) est que le bus comprend, en plus des lignes TX et RX (*appelé MISO, Master In Slave Out, et MOSI, Master Out Slave In, pour la liaison QSPI*), une ligne PCS (*Peripheral Chip-Selects*) qui permet de sélectionner le périphérique avec qui le microcontrôleur va communiquer, et une ligne SCK (*QSPI Serial Clock*) qui permet de définir l'horloge de synchronisation des signaux sur cette liaison. Grâce à ce signal de synchronisation, il est possible de transmettre de longues trames de données (jusqu'à 10³ caractères) sans séparation et avec une vitesse de transfert élevée (500 kbps). L'interface QSPI contient, comme son nom l'indique, une queue pouvant contenir 16 instructions de transfert lui permettant de

réduire considérablement les échanges CPU/QSPI. Cette queue est, de plus, agrémentée d'un pointeur qui permet au CPU d'aiguiller l'ordre des tâches devant s'effectuer sur le bus QSPI. Mais la caractéristique essentielle de ce bus QSPI est le « *Wraparound Transfert Mode* » qui permet de ré-exécuter automatiquement et en continue la dernière entrée en mémoire du QSPI. Cette fonction va nous permettre une gestion simplifiée du convertisseur analogique-numérique dont les dernières données issues de la conversion seront fournies automatiquement au CPU par la RAM du QSPI.

Autour du module numérique, nous avons implémenté différents modules périphériques :

- Interface disque dur ;
- Interface USB ;
- Interface GPS pour synchronisation horaire et positionnement ;
- Interface DCF pour synchronisation horaire ;
- Interface de communication radio (UHF longue portée, UHF moyenne portée, ZigBee courte portée) ;
- Interface de communication GSM / GPRS ;
- Interface automate pour la gestion d'alerte.

Sur le même concept que le format PC104, ces modules périphériques s'empilent sous la forme d'un sandwich afin de multiplier les fonctionnalités du système. Par exemple, l'interface disque dur comprend un adaptateur IDE qui s'interpose entre le module CF2 et l'interface mère. Elle fournit au module CF2 la possibilité de connecter un disque dur au format 2.5", ou bien un disque dur au format PCMCIA Type II ou III. L'interface ne consomme que 15µA hors accès disque. C'est pourquoi, Les données sont stockées dans un buffer temporaire en mémoire flash afin de mettre en route le disque dur qu'au moment de la copie du buffer.

Enfin, le module CF2 intègre une interface numérique qui permet de dialoguer avec certains périphériques au format RS232/422/485 (le GPS par exemple). Cette interface numérique peut être réalisée par l'intermédiaire d'une connexion UART standard via l'interface SCI (*Serial Controller Interface*) du microcontrôleur, ou en utilisant les TPU (*Time Processor Unit*), entrées/sorties logiques que l'on peut associer par 3 canaux pour former une liaison série asynchrone type UART (RxD, TxD and GND).

B.5. Fichier de configuration : SAFIR.CFG

```
#####
# Fichier de configuration SAFIR #
#####

#-----#
[Parametres generaux]
#-----#
site_name=MYOTIS
station_name=SAFIR
serial_number=ST4
station_adress=4
#password et login client
login_user=myotis
password_user=myotis
#configuration de l'analogique (0=non, 1=oui)
init_analogique=0
#Temps d'ecoute du bruit de fond sismique en sec.
noise_time_listening=15
#Support de stockage (Aucun=0, CF=1, HD=2)
record_support_type=1
#Type d'enregistrement (Event=1, Continu=2)
save_type=1
#Type de detection (Aucun=0, STALTA=1, Trigger=2)
detection_type=1
# Mode LTA (Free=0, Lock=1)
mode_LTA=1
#tps post et pre evenement en ms (pour enregistrement Event)
duree_avt=2000
duree_apres=8000
#Activation LED controle (0=non, 1=oui)
LED_controle=1
#synchro horaire (no=0, log=1, sync=2, update=3)
check_time=1
#periode en min
period_check_time=60
time_zone=local
#Numero de telephone
mobile_phone_support=06xxxxxxx06
mobile_phone_alert=06xxxxxxx06
server_phone=0476xxxxxx
SMS_acknowledg=1
#Period de telechargement en minute
period_download=720

#####
# DEVICE #
#####

#-----[GSM] -----#
dev_num=1
dev_name=gsm
dev_actif=0
dev_port=1
dev_speed=9600
dev_data_bits=8
dev_parity=N
dev_stop_bits=1

#-----[GPS] -----#
dev_num=2
dev_name=gps
dev_actif=1
dev_port=2
```

```
dev_speed=4800
dev_data_bits=8
dev_parity=N
dev_stop_bits=1

#####
# CHANNELS #
#####

#-----[GEOPHONE 01 ON CH0 OF ADC]-----#
ch_num=0
ch_dev_num=0
ch_num_in_dev=0
ch_name=GEO_01
ch_actif=1
ch_detect=1
ch_Fe=500
ch_gain_analogique=100
ch_sensibility=28.8E-3
ch_unit=mm/s
ch_duree_STA=1000
ch_duree_LTA=60000
ch_seuil_STALTA=3
ch_seuil_fin_STALTA=1.5
ch_seuil_Trigger=0.1

#-----[EXTENSOMETRE 01]-----#
ch_num=1
ch_dev_num=0
ch_num_in_dev=1
ch_name=EXTENSO_1
ch_actif=1
ch_Fe=1
ch_save_period=1
ch_nb_data_check=10
ch_coef_linear=0
ch_coef_linear=1.52588E-3
ch_unit=mm
ch_Vini=29.23
ch_alarm_hysteresis=0.2
ch_type_process_default=01100100

#-----[TEMPERATURE]-----#
ch_num=2
ch_dev_num=0
ch_num_in_dev=2
ch_name=PT_100
ch_actif=1
ch_Fe=0.5
ch_save_period=1
ch_nb_data_check=10
ch_coef_linear=-65
ch_coef_linear=1.923E-3
ch_unit=degC

#-----[PLUVIOMETRE]-----#
ch_num=7
ch_dev_num=0
ch_num_in_dev=3
ch_name=PLUVIOMETRE
ch_actif=1
#1 donnee par heure
ch_Fe=2.77E-4
ch_save_period=1
ch_nb_data_check=1
ch_coef_linear=0
ch_coef_linear=0.2
ch_unit=mm
```

B.6. Mesure GPS

L'utilisation du GPS est variée et ne nécessite pas toute la même précision (d'après [Duquenne et al., 2005]).

Le mode naturel (absolu) est le principal et le plus largement répandu. Les récepteurs sont monofréquence, code C/A, et sont capables de fournir une position absolue en temps réel avec une précision d'environ 10 mètres.

Le mode différentiel (DGPS) consiste à mesurer des pseudo-distances sur plusieurs récepteurs simultanément. Cela permet de s'affranchir de la dégradation SA et des effets atmosphériques. Les récepteurs sont monofréquences, code C/A, et fournissent une précision sur le positionnement relatif de 1-10 mètres.

Le mode statique est utilisé pour la réalisation de réseaux de mesure de ligne de base. Les récepteurs sont stationnés sur des points et sont fixes. Le temps d'observation doit être suffisant pour résoudre les ambiguïtés entières. Par expérience, la durée d'observation est d'au moins une heure pour des lignes de bases courtes (< 15 km) et de plusieurs heures pour des lignes de bases longues. Avec des récepteurs monofréquence et une durée d'observation d'une heure (pour une ligne de base courte), la précision sur le positionnement relatif est centimétrique.

Le mode statique rapide est une variante du mode statique. Grâce à un algorithme de résolution rapide et l'observation d'au moins 4 satellites (5 seraient souhaitables) avec une bonne géométrie, les ambiguïtés entières peuvent être résolues en quelques minutes pour des lignes de bases inférieures à 15 km. La plupart des logiciels utilisent des données bifréquences pour ce traitement et fournissent une précision centimétrique sur le positionnement relatif.

Le mode cinématique utilise une méthode différentielle sur la mesure de phase d'au moins quatre satellites. Deux récepteurs sont nécessaires : un fixe, l'autre mobile. Une période d'initialisation permet de résoudre les ambiguïtés entières, puis les points sont observés à chaque époque tout en conservant le signal des satellites, afin de conserver les mêmes ambiguïtés. L'inconvénient est que tout obstacle interrompant le signal oblige à réinitialiser.

Pour obtenir une précision centimétrique sur le positionnement relatif en temps réel (*RTK, Real Time Kinematic*), les deux récepteurs doivent communiquer (au standard RTCM) par radio, ou téléphone, afin de transférer les corrections satellites. La transmission temps réel n'est pas une obligation. Les récepteurs enregistrent les données et les calculs des positions sont effectués a posteriori (*PPK, Post Processed Kinematic*). Enfin, il est intéressant de noter que des réseaux de référence avec des stations permanentes se développent de plus en plus (OmniSTAR, TERIA, Orphéon, **Erreur ! Référence de lien hypertexte non valide.**). Le récepteur mobile pourra ainsi exploiter les données de plusieurs stations de référence simultanément (distances entre stations de référence de 70 à 100 km) ce qui permettra de conserver une précision centimétrique en temps réel.

Principe de positionnement

Le principe du positionnement relatif consiste à recueillir simultanément des observations sur les mêmes satellites à un récepteur localisé (P_1) et à une station de référence (P_2) dont les coordonnées sont connues. Ainsi en faisant la différence, on obtiendra la ligne de base entre nos 2 récepteurs (ΔR_{12}).

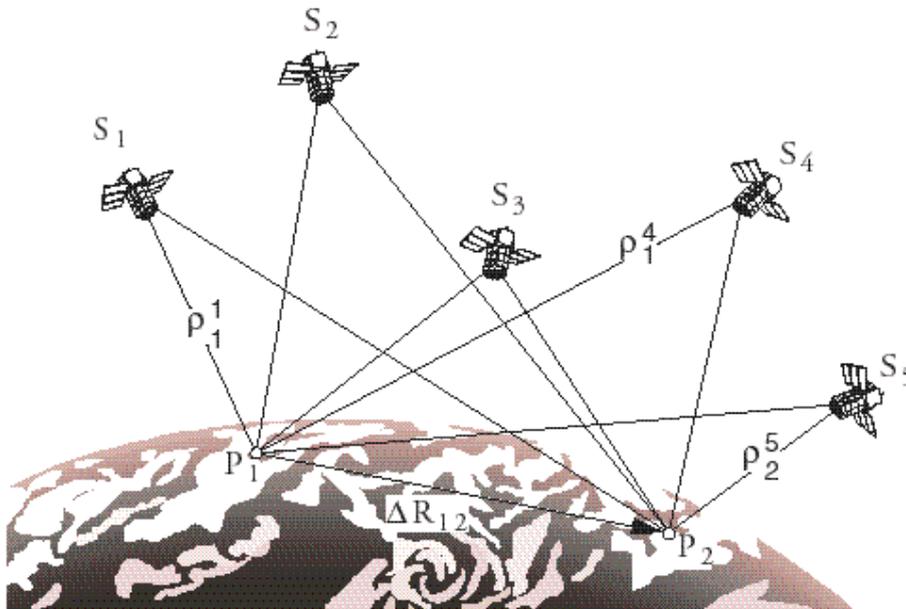


Figure B.6.1 : Principe de mesure GPS pour le positionnement relatif

Pour de courtes lignes de base (<15 km), on considère que le signal GPS émis par un satellite suit quasiment le même trajet pour 2 points proches qui reçoivent les données simultanément de ce même satellite. Par conséquent en soustrayant les mesures réalisées par ces 2 récepteurs sur un même satellite au même moment, on réduit fortement les erreurs de mesure.

Méthodes de calcul

La plus simple est la *simple différence* qui supprime les erreurs dues au décalage d'horloge satellite, à la ionosphère et troposphère.

$$\Phi_i^j = f (dt_i^j - dt_i) + f \rho_{i/c}^j - N_i^j$$

$$\Phi_{ik}^j = f (dt_i^j - dt_k^j) + f/c (\rho_{i/c}^j - \rho_{k/c}^j) - (N_{i/c}^j - N_{k/c}^j)$$

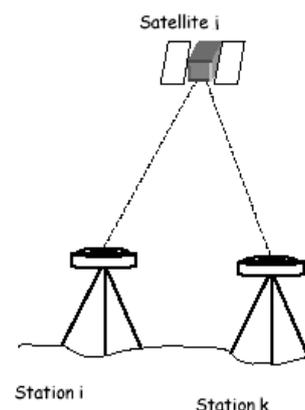
avec f = fréquence de L1 (dans notre cas)

dt = décalage d'horloge

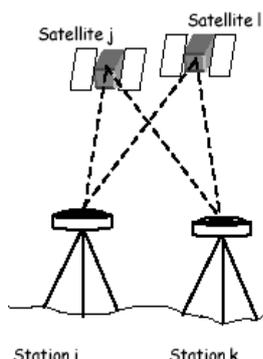
$\rho_{i/c}^j$ = distance entre le satellite j et le récepteur i

N_i^j = ambiguïté entière du signal émis par le récepteur i

(après avoir reçu celui du satellite j)



La simple différence



La double différence

Afin d'éliminer également le décalage horloge récepteur il suffit de procéder à *une double différence*. Le principe est le même que pour la simple sauf que cette fois-ci on réalise une différence de simple différence. Il est donc nécessaire d'avoir 2 satellites observés en même temps par les 2 récepteurs.

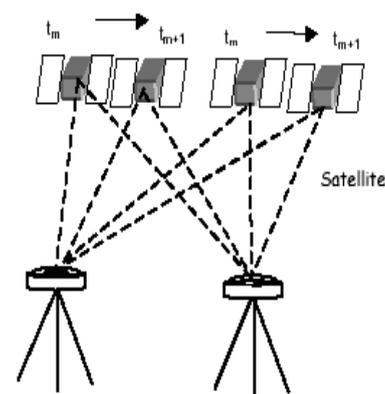
On a donc:

$$\Phi_{ik}^{jl} = f/c (\rho_{i/c}^j - \rho_{k/c}^j + \rho_{i/c}^l - \rho_{k/c}^l) - (N_{i/c}^j - N_{k/c}^j + N_{i/c}^l - N_{k/c}^l)$$

La seule difficulté est la résolution des ambiguïtés entières.

Pour cela, il est possible d'utiliser *la triple différence*. La triple différence permet de détecter les sauts de cycles et permet ainsi de ne plus avoir besoin de résoudre les ambiguïtés entières. C'est une différence de 2 doubles différences à 2 époques consécutives.

Il sera toujours préférable de procéder à une triple différence car la précision pour la ligne de base qui en résulte est meilleure par rapport à celle obtenue si on avait dû résoudre les ambiguïtés entières. Toutefois peu de logiciels le font : les équations qui en résultent forment un système dont les équations sont trop corrélées.



La triple différence

Calcul de ligne de base sur quatre stations RGP

D'après [Adeline, 2008].

Pour vérifier notre méthodologie de calcul de lignes de base, nous l'avons appliquée sur deux lignes de base définies à partir de quatre stations permanentes du réseau RGP. La ligne de base de Paris a une longueur supérieure à notre expérimentation, mais par contre le dénivelé est identique au notre. Pour la ligne de base de Marseille, c'est l'inverse. Le tableau suivant résume les caractéristiques des lignes de base.

VILLE :	PARIS		MARSEILLE		GRENOBLE	
Sites :	SMNE	PANA	MARS	PRIE	MYO1	MYO3
Réseau :	RGP	RGP	RGP	RGP	/	/
Récepteur :	Bi-fréquence		Bi-fréquence		Mono-fréquence	
Correction PCV :	Oui		Oui		Non	Non
Ligne de base :	2,5 km		1,5 km		1,2 km	
Dénivelée :	5 m		125 m		6 m	
Jours :			170 à 178			
Année :			2008			
Durée session :			6 heures			
Echantillonnage :			30 secondes			

On observe sur la figure suivante, que les trois séries temporelles présentent une fluctuation périodique journalière. Les quatre stations du réseau RGP étant bi-fréquences, on en déduit que ces fluctuations ne sont pas liées aux effets ionosphériques. De plus, du fait de l'éloignement des différentes stations, on élimine ainsi l'hypothèse que ces fluctuations soient dues aux multitrajets. Enfin, au vu des résultats obtenus sur ces trois lignes de bases, à savoir une amplitude crête-crête d'approximativement 7 mm et un écart type moyen de 2 mm, on peut négliger l'influence du centre de phase (PCV) sur le calcul de courtes lignes de base à condition d'utiliser des antennes identiques.

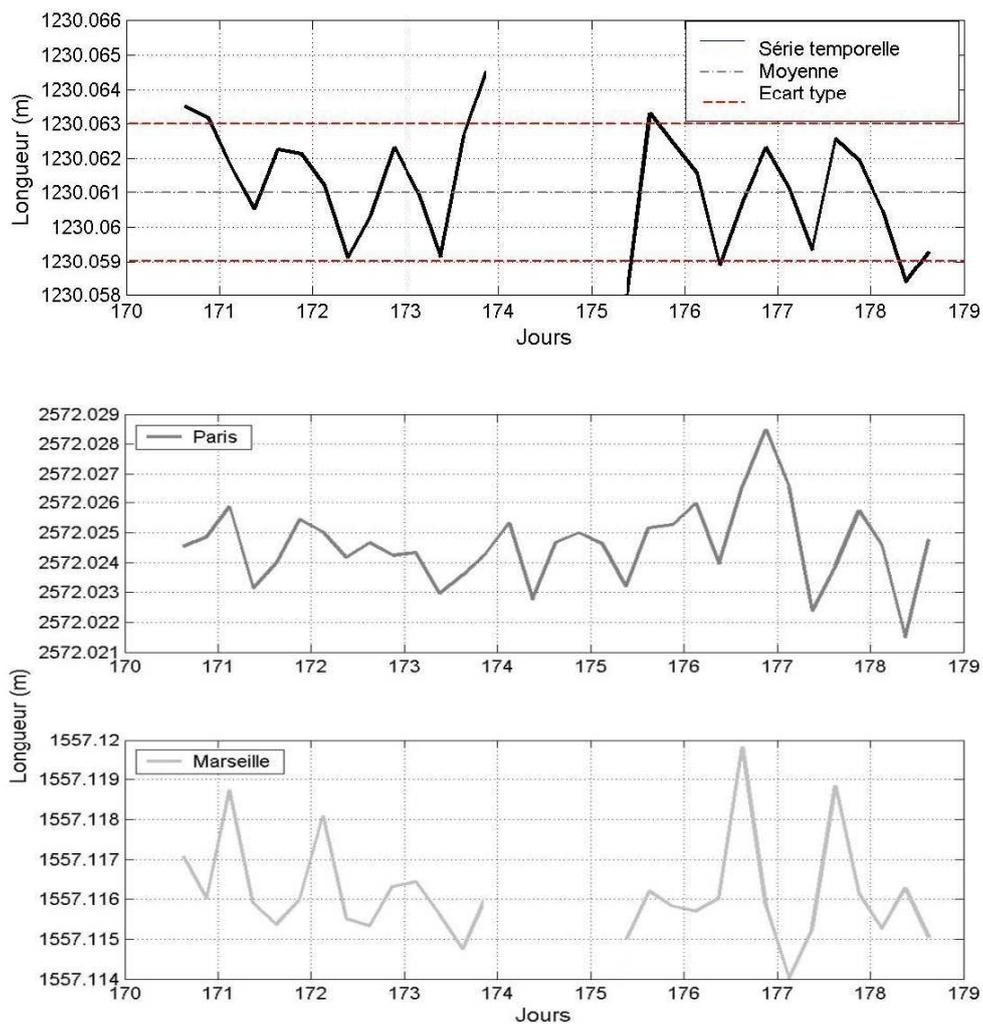
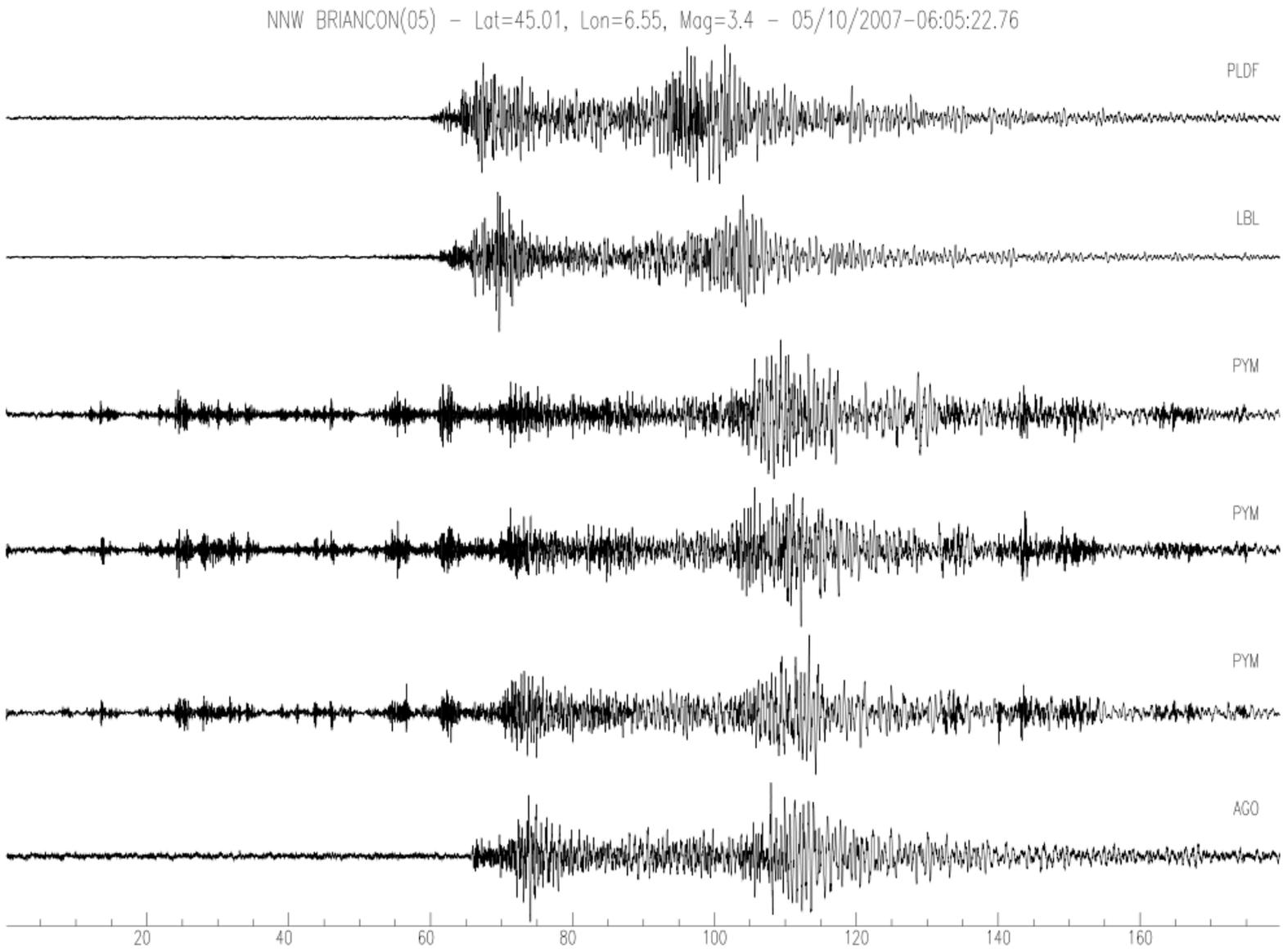


Figure B.6.2 : Mesure des trois lignes de base pour les stations MYOTIS, RGP Paris, RGP Marseille

C. Conception d'un système de surveillance des risques

C.1. Séisme de Monétier-les-Bains (réseau SISMALP)



C.2. Liaisons de communication

Nous présentons ci-après quelques unes des technologies de communication les plus répandues dans l'instrumentation de site naturel.

La transmission filaire cuivre est la plus répandue car, en terme d'investissement matériel, elle est la plus économique et elle est la plus rapide à mettre en œuvre (hors génie civil). Cette technologie peut être efficacement utilisée pour les liaisons courtes. Néanmoins, par grandes longueurs, le risque d'endommagement, lié à l'environnement hostile (site naturel), devient important. Enfin, elle est particulièrement sensible aux perturbations et nécessite des protections adéquates.

La liaison filaire fibre optique présente, outre son coût abordable, des avantages intéressants. En effet, elle est insensible aux perturbations extérieures et le débit est très élevé. Son usage de transmission de données la fige dans un usage spécifique, néanmoins elle peut être avantageusement utilisée comme capteur optique. Au même titre que la liaison filaire cuivre, le risque d'endommagement devient important sur de grandes longueurs. Par contre, à la différence de la liaison filaire cuivre, son entretien exige un matériel et personnel qualifié, ce qui en alourdit les coûts et la maintenance.

La transmission radio (bandes UHF et VHF) est efficace et éprouvée. Elle est cependant limitée aux faibles débits, en effet 9600 bauds semblent un maximum pour des liaisons grandes distances. Comme toutes transmissions hertziennes, il est impératif que les points radio soient à vue, ce qui peut vite devenir compliqué en montagne, où les points sont souvent masqués par des obstacles naturels. Le coût d'un point radio est appréciable mais nécessite pour les puissances supérieures à 500 mW une autorisation d'usage délivrée par l'A.R.T., son coût n'est pas négligeable et dépend du nombre de postes en place et de la surface radio utilisée. Ce type de transmission est bien adaptée pour des liaisons point à point. Dans le cas d'un réseau multipoints, la transmission radio souffre de son faible débit et de la lourdeur des protocoles de communication nécessaires à la gestion du réseau (*hand shaking*).

La transmission GSM présente un coût très intéressant à l'investissement. Par contre, le coût d'exploitation n'est pas du tout économique. En plus des difficultés radio par mauvais temps, la transmission GSM dépend de la couverture du réseau sur le lieu d'utilisation et surtout de la qualité de service des opérateurs. Ces paramètres n'étant pas contrôlables, ce type de communication ne constitue pas une technologie fiable de transmission de l'information (A titre d'exemple, on peut observer l'encombrement des lignes le soir de la Saint Sylvestre). A la différence de la liaison radio, le nombre de points de collecte peut être multiplié sans aucune perte du débit. De plus, la distance entre les points peut être très grande.

La transmission Wi-Fi (Wireless Fidelity), dont on parle abondamment aujourd'hui, représente une alternative dans nombre de situations où le débit constitue un critère important. Le Wi-Fi, qui est le nom commercial correspondant à la norme IEEE 802.11, utilise les ondes radio-électriques dans les deux bandes de fréquences : 2,4 GHz et 5,2 GHz. Elle souffre donc des contraintes relatives aux très hautes fréquences à savoir la perturbation des transmissions par mauvaises conditions météorologiques. De plus, les couples émetteur-récepteur doivent obligatoirement être à vue. Le Wi-Fi a été développé dans des objectifs dédiés aux réseaux de communication informatique. Le cahier des charges est tenu de manière à améliorer continuellement la vitesse et le débit de transmission entre des appareils utilisés dans des environnements conditionnés. De ce fait, ce type de transmission nécessite une intelligence appropriée à chaque point de communication et demande des ressources énergétiques importantes.

D. Application à la surveillance des instabilités rocheuses

D.1. Qualification de l'instabilité de l'écaille de Chamouset (méthode LIRIGM)

INDICE STATIQUE	
Découpage latéral et supérieur	5/5 (Probabilité forte)
Rapport portées / épaisseur	2/3 (moyen)
Cohésion	1/1 (faible)
Fracturation	1/1
Total :	9/10
Qualité de l'observation :	<input checked="" type="checkbox"/> a <input type="checkbox"/> b <input type="checkbox"/> c
INDICE DYNAMIQUE	
Activité actuelle avec mesures significatives	
Mouvements mesurés (observation)	5/6
Eboulements voisins analogues	2/2
Fracturation arrière ouverte	2/2
Total :	9/10
Qualité de l'observation :	<input checked="" type="checkbox"/> a <input type="checkbox"/> b <input type="checkbox"/> c
FACTEURS D'EVOLUTION ALEATOIRES / DISCONTINUS	
Synthèse pression interstitielle (ouverture fracture en tête, système karstique)	2/5
Sismicité de base	0/1
Sismicité exceptionnelle	1/2
Lien avec autres aléas	0/2
Total :	3/10
Qualité de l'observation :	<input type="checkbox"/> a <input checked="" type="checkbox"/> b <input type="checkbox"/> c
FACTEURS D'EVOLUTION CONTINUS	
Altération / dissolution	2/2
Gel-dégel	2/2
Modification de géométrie	0/2
Permafrost	0/2
Facteurs anthropiques	0/2
Total :	4/10
Qualité de l'observation :	<input type="checkbox"/> a <input checked="" type="checkbox"/> b <input type="checkbox"/> c

La caractérisation de l'instabilité s'exprime sous la forme :

S9/a, D9/a, FD3/b, FC4/b

D.2. Qualification de l'instabilité C2 des Grands Goulets (méthode LIRIGM)

INDICE STATIQUE	
Découpage latéral et supérieur	3/5 (Probabilité forte)
Rapport portées / épaisseur	2/3 (moyen)
Cohésion	1/1 (faible)
Fracturation	1/1
Total :	7/10
Qualité de l'observation :	<input checked="" type="checkbox"/> a <input type="checkbox"/> b <input type="checkbox"/> c
INDICE DYNAMIQUE	
Activité actuelle sans mesures significatives	
Chute de blocs au front	1/4
Eboulements voisins analogues	2/2
Fracture en crête	0/1
Fracture en paroi	1/1
Total :	4/10
Qualité de l'observation :	<input type="checkbox"/> a <input checked="" type="checkbox"/> b <input type="checkbox"/> c
FACTEURS D'EVOLUTION ALEATOIRES / DISCONTINUS	
Synthèse pression interstitielle	2/5
Sismicité de base	0/1
Sismicité exceptionnelle	1/2
Lien avec autres aléas	0/2
Total :	3/10
Qualité de l'observation :	<input type="checkbox"/> a <input checked="" type="checkbox"/> b <input type="checkbox"/> c
FACTEURS D'EVOLUTION CONTINUS	
Altération / dissolution	2/2
Gel-dégel	2/2
Modification de géométrie	0/2
Permafrost	0/2
Facteurs anthropiques	2/2
Total :	6/10
Qualité de l'observation :	<input type="checkbox"/> a <input checked="" type="checkbox"/> b <input type="checkbox"/> c

La caractérisation de l'instabilité s'exprime sous la forme :

S7/a, D4/b, FD3/b, FC6/b

D.3. Estimation du volume de l'écaille éboulée à Chamouset

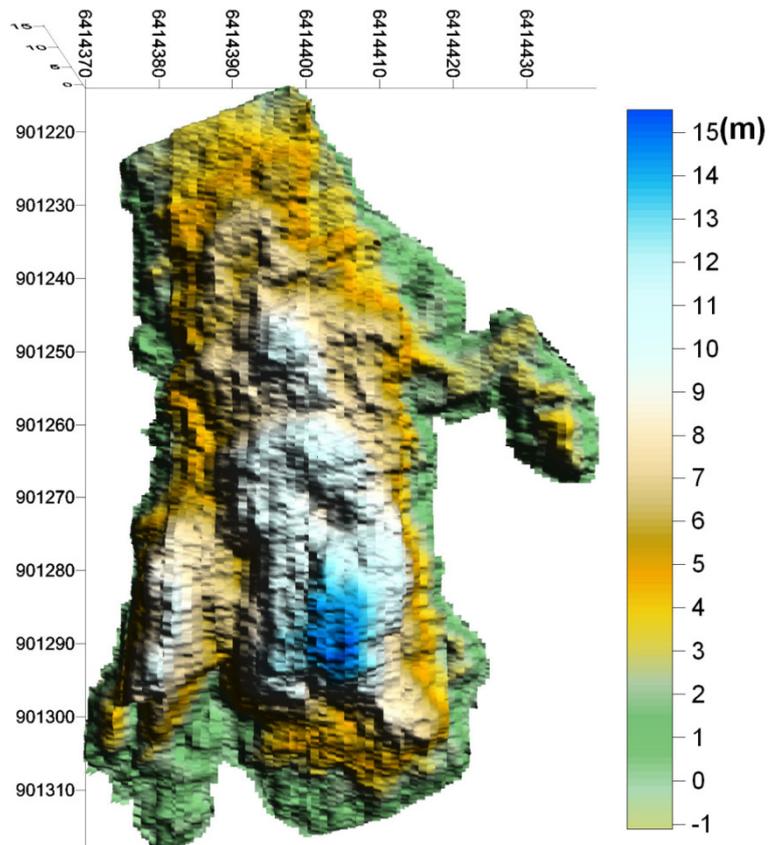
Une étude LIDAR de la falaise avant et après l'éboulement a permis de réaliser une coupe 3d et d'estimer un volume éboulé d'environ 21 000m³ (Levy C., 2008, Rapport interne LGIT).

Total Volumes by:

Trapezoidal Rule: 21181.093524023
Simpson's Rule: 21181.336716488
Simpson's 3/8 Rule: 21180.319130932

Cut & Fill Volumes

Positive Volume [Cut]: 21190.179930757
Negative Volume [Fill]: 9.0864067337534
Net Volume [Cut-Fill]: 21181.093524023



Soustraction de la surface inférieure à la surface supérieure