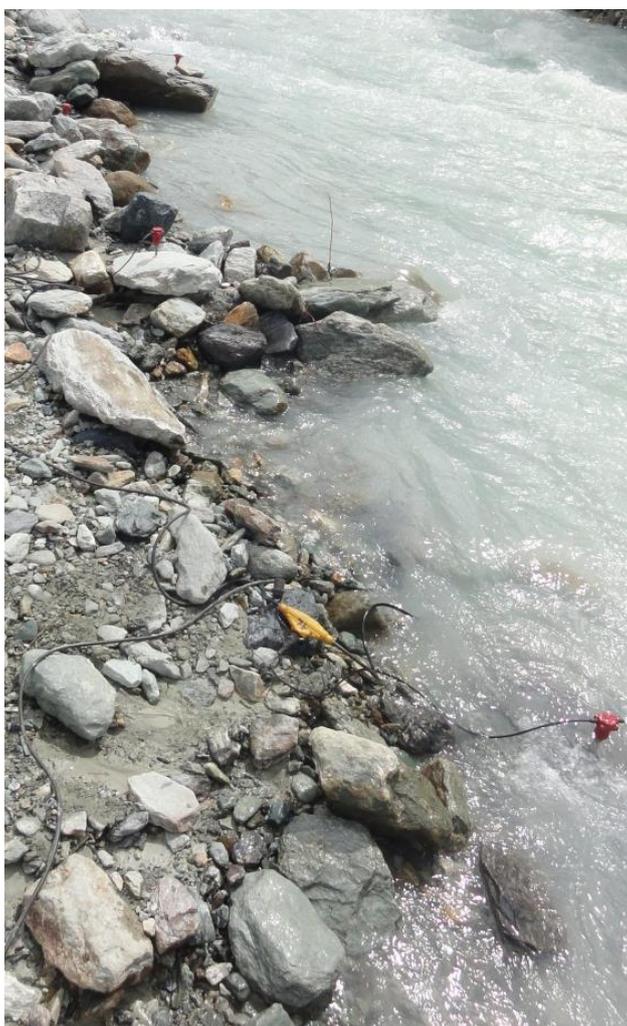


Projet SismoRiv Jalon 1

Étude de faisabilité concernant la mise en place d'une méthode de mesure en continu du charriage en rivière basée sur la propagation du signal sismique émis par les sédiments dans les berges



Requérant Principal :

ORNSTEIN Pascal
Directeur Adjoint
Pascal.ornstein@crealp.vs.ch
+41 27 607 11 87

Chef de projet :

TRAVAGLINI Eric
Spécialiste Hydrométrie & Hydrologie
Eric.travaglini@crealp.vs.ch
+41 27 607 11 85

Table des matières

1 Introduction	3
1.1 La problématique:	3
1.2 Organisation du projet.....	4
2 Caractérisation sismique du site de Zinal.....	4
2.1 Variations latérales de lithologies	5
2.2 Absorption des ondes sismiques	6
2.3 Conclusions	6
3 La solution de mesure	6
3.1 Les capteurs sismiques	7
3.2 Les « Modules Capteurs »	8
3.2.1 L'acquisition (<i>Hardware</i>)	8
3.2.2 Le prétraitement (<i>Software</i>)	9
3.3 Le « Module Station »	9
4. Premiers Tests	10
4.1 Les mesures ponctuelles	10
4.2 Décomposition des spectres.....	11
4.3 Le monitoring	12
5 Conclusion.....	13
6 Bibliographie.....	13

Table des illustrations

Figure 1 : A) Principe de mesure des « Swiss Plate Geophones » et B) Application à la station de Zinal	3
Figure 2 : Planning du projet SismoRiv	4
Figure 3: Cartographie du site test de Zinal.	5
Figure 4 : Profil de sismique réfraction obtenu grâce aux profils P1 et P2 (modifié de Geo2x 2015)	5
Figure 5 : Courbe d'absorption fréquentielle du signal en fonction de la distance (modifié de Geo2x 2015).....	6
Figure 6 : Schéma de la solution de mesure.....	7
Figure 7: Capteurs sismiques. A) GS-11D B) HS-1	7
Figure 8 : Module capteur.....	8
Figure 9 : Processus de prétraitement appliqué au signal acquis par le « Module Capteur ».....	9
Figure 10 : Module Station	10
Figure 11 : Exemple de spectres fréquentiels issu des mesures temporelles effectuées avec les deux types de capteurs HS et GS et découpage en 5 sections.....	11
Figure 12: Spectrogramme du signal sismique enregistré par le capteur 1 entre le 13 et le 17 Juillet. 12	

1 Introduction

1.1 La problématique:

Le transport solide, ou capacité d'un cours d'eau à transporter des sédiments est le facteur principal influençant la morpho-dynamique des cours d'eau de montagne. L'équilibre entre débits liquides et solides régit les phénomènes d'érosion ou de dépôt que l'on peut lier aux zones fluviales à surveiller (instabilité de berges, débordement, incision...). Depuis quelques années, il est admis que le caractère dévastateur des crues est fortement lié à la manne sédimentaire, et le dimensionnement des ouvrages de protection prend dorénavant en compte ce phénomène.

L'estimation du transport sédimentaire, ou charriage, est habituellement effectuée à l'aide des formules de la littérature (Meyer-Peter, 1948; Recking, 2006; Rickenmann and Recking, 2011; Schoklitsch, 2013) et suppose une relation constante entre les débits liquide et solide. Cette relation jugée satisfaisante à long terme permet d'effectuer des bilans annuels cohérents. Certains modèles numériques permettent à travers l'utilisation de ces formules d'introduire la notion de charriage dans la modélisation des flux et donc dans la conception des ouvrages hydrauliques (ponts, digues, plages de dépôt, prises d'eau, etc.). Or les études récentes montrent une forte variabilité du phénomène aux petits pas de temps ce qui empêche toute utilisation de ces relations par les gestionnaires de risque lors des événements de crue. Pour la gestion du risque, il importe de disposer d'outils de mesure permettant d'évaluer le flux de sédiments transitant dans les rivières en temps réel.

Dans cette optique le CREALP a construit à Zinal (VS), en collaboration avec le WSL¹, une station de mesure expérimentale basée sur la méthodologie des « Swiss Plate Geophones » que nous nommerons station de référence dans ce document. Le principe est d'estimer le charriage à partir d'une mesure des vibrations émises dans le lit de la rivière par les sédiments lorsqu'ils impactent le fond du lit (Figure 1A). Des géophones, installés sous des plaques métalliques elles-mêmes disposées au sein d'une section bétonnée dans le lit de la rivière (Figure 1B), enregistrent ces vibrations. Une campagne de calibration réalisée entre 2012 et 2013 nous a permis d'établir une relation entre le signal vibratoire et le volume sédimentaire en transit. Puis, à l'aide des formules de Wilcock nous estimons la manne sédimentaire en suspension (Figure 1A) afin de prendre en compte l'ensemble du transport sédimentaire. Les résultats obtenus sont de grande qualité (Travaglini and Bardou in prep.), toutefois le coût d'une telle installation, proportionnel à la largeur de la section est très élevé rendant cette solution difficilement transposable à d'autres sites.

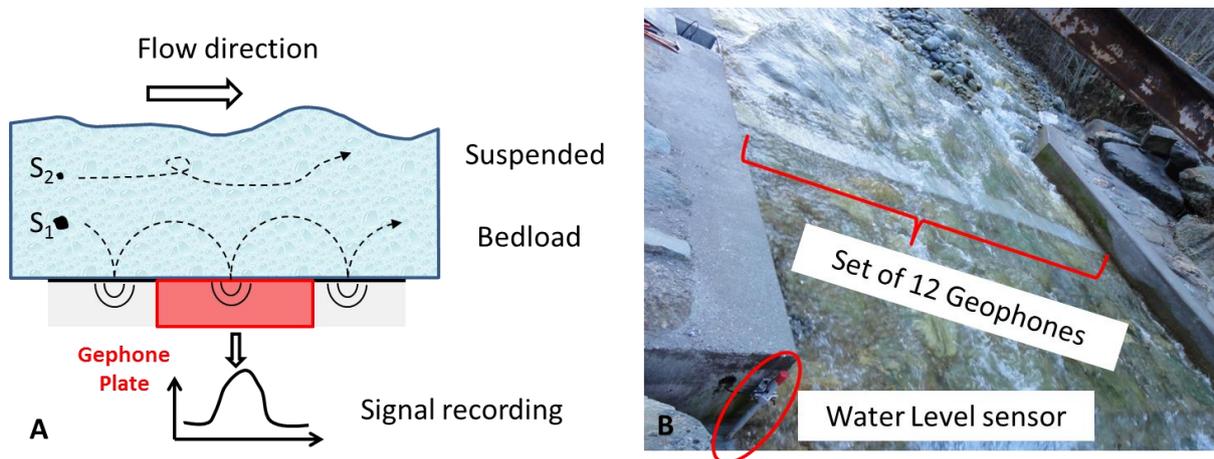


Figure 1 : A) Principe de mesure des « Swiss Plate Geophones » et B) Application à la station de Zinal

Basée également sur la mesure des vibrations émises par le transport des sédiments, l'approche proposée par le CREALP au sein de ce projet prévoit l'utilisation de capteurs sismiques à bas coûts installés à l'extérieur du lit de la rivière. S'appuyant sur les travaux de Burtin et al., 2009; Gimbert et al., 2014; ou Larose et al., 2015, la mesure repose sur l'analyse des signaux basse fréquence générés par le charriage qui se caractérisent par une énergie plus importante et donc par une meilleure propagation dans les milieux alluviaux.

¹ Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage

Projet SismoRiv (Jalon 1)

Afin de comparer les résultats issus de ces deux méthodologies, le projet SismoRiv a été initié sur le même site que la station de référence, c'est-à-dire à l'amont du village de Zinal dans le Val d'Anniviers (Alpes valaisannes).

1.2 Organisation du projet

Ce projet qui court sur près d'une année [Juin 2015 – Mai 2016] se décompose en plusieurs étapes (Figure 2) :

- Une caractérisation sismique du site dont le but est de mieux comprendre la transmission des ondes dans notre environnement de test.
- La conception et le développement d'une solution de mesure des ondes sismiques dans les berges.
- Le déploiement de la solution de test.
- Monitoring sur plusieurs semaines et analyse interprétative des données récoltées.
- Une mise en perspective des résultats avec les mesures obtenues par la station de référence équipée des « Swiss Plate Geophones ».

Nous détaillons dans le présent rapport les trois premiers points de cette étude (=> Jalon 1).

Poste de dépense	Acquisition matériel	2015					2016							
		J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	
Réalisation des prototype de mesure														
Paramétrage des prototypes														
Caractérisation sismique du site														
Installation sur site et mise en service														
Monitoring														
Traitement des données														
Validation														
Gestion de projet	Démarrage du projet													
	Adaptation des prototypes													
	Rapport technique													
	Cloture du projet													
Jalon 1														

Figure 2 : Planning du projet SismoRiv

2 Caractérisation sismique du site de Zinal

Les informations présentées ci-dessous sont un résumé des résultats obtenus lors de l'étude sismique réalisée par un bureau d'étude spécialisé dans le domaine : Geo2X. Le rapport complet est disponible en annexe.

Quatre profils sismiques ont été acquis le 14 juillet 2015 (Figure 3). Les profils principaux (P1 et P2), traités en sismique réfraction, ont pour but de caractériser la nature et la géométrie des terrains en présence. Les profils P3 et P4 visent à caractériser l'absorption des ondes sismiques dans le sous-sol.

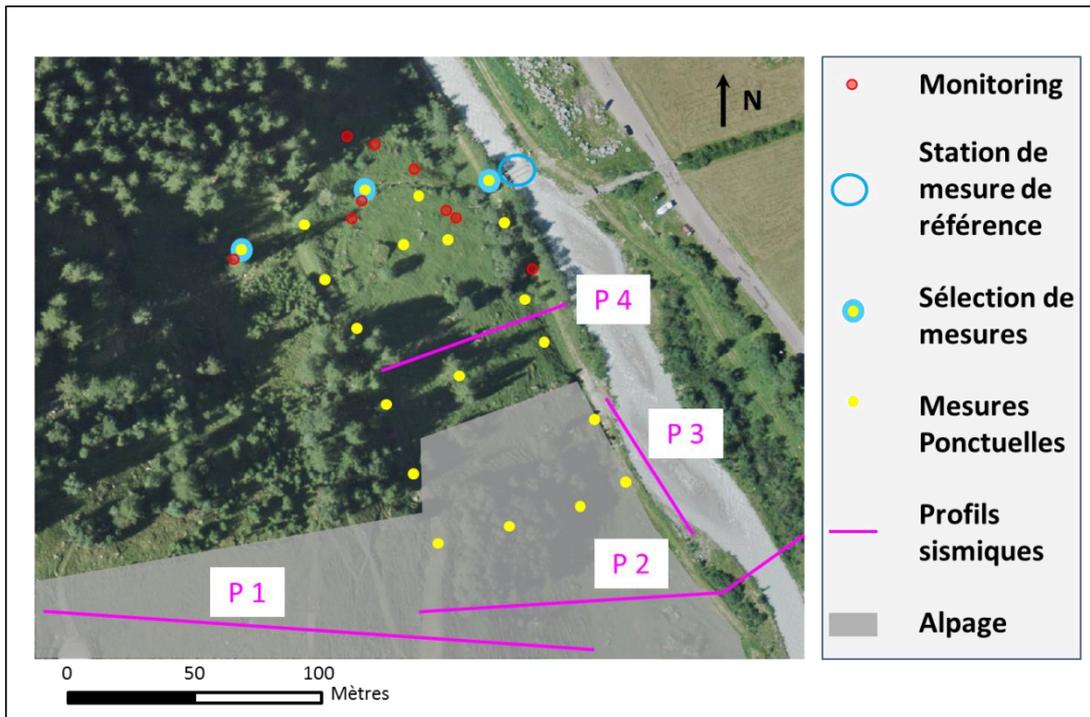


Figure 3: Configuration du site test de Zinal.

2.1 Caractérisation lithologique

En recoupant les informations obtenues par les profils P1 et P2 (Figure 3) avec les observations de terrain et la géologie régionale, les lithologies suivantes peuvent être définies (Figure 4) :

- Une unité possédant des Vitesses de Propagation (VP) supérieures à 2'500 m/s qui est vraisemblablement du gneiss relativement sain.
- Une couche d'environ 10m d'épaisseur de roche altérée et/ou fortement fracturée.
- Une épaisseur très variable de dépôts de pente, mélange de plaquage morainique et éboulis présentant un fort épaissement en pied de pente.
- Les alluvions déposés par la Navisence et ses affluents.

A noter que l'interprétation sismique ne met en évidence aucune faille ou discontinuité des dépôts.

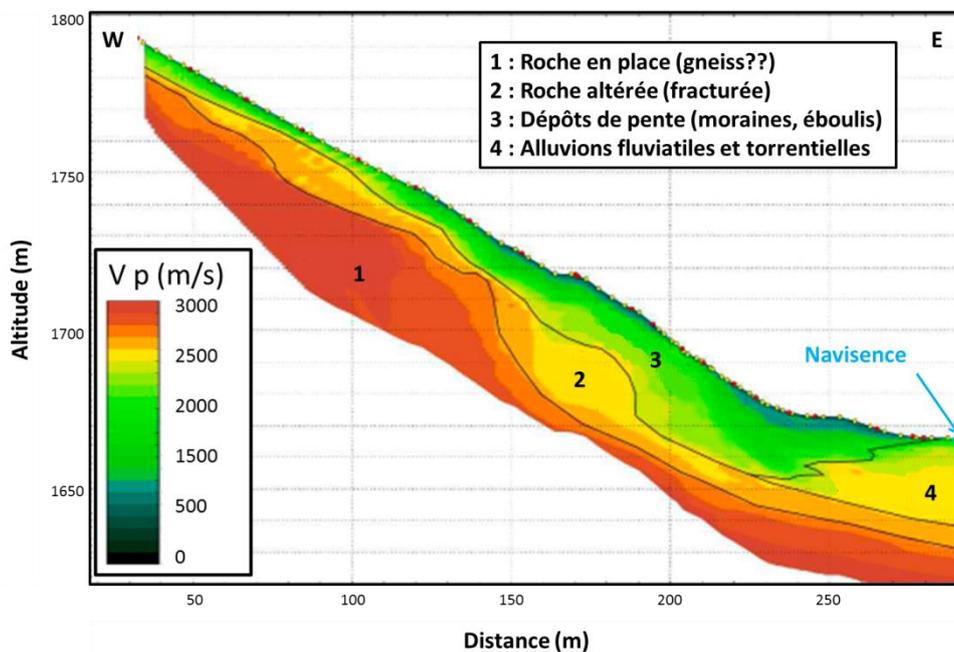


Figure 4 : Coupe interprétative issue des profils P1 et P2 (modifié de Geo2x 2015)

2.2 Propagation des ondes sismiques

Afin de caractériser la propagation du signal sismique dans le sous-sol, les profils P3 et P4 ont été réalisés respectivement dans des sédiments fluviaux et dans la berge en rive gauche de la Navisence.

La Figure 5, présente les courbes d'absorption des fréquences maximales du signal sismique, en fonction de la distance. Les principaux résultats sont :

- Une forte absorption des fréquences supérieures à 50Hz au-delà d'une distance de 30m au tir.
- L'implantation géographique des profils n'a que peu d'influence sur l'absorption fréquentielle du signal.
- Les fréquences observables sont supérieures à la limite de détection des géophones.

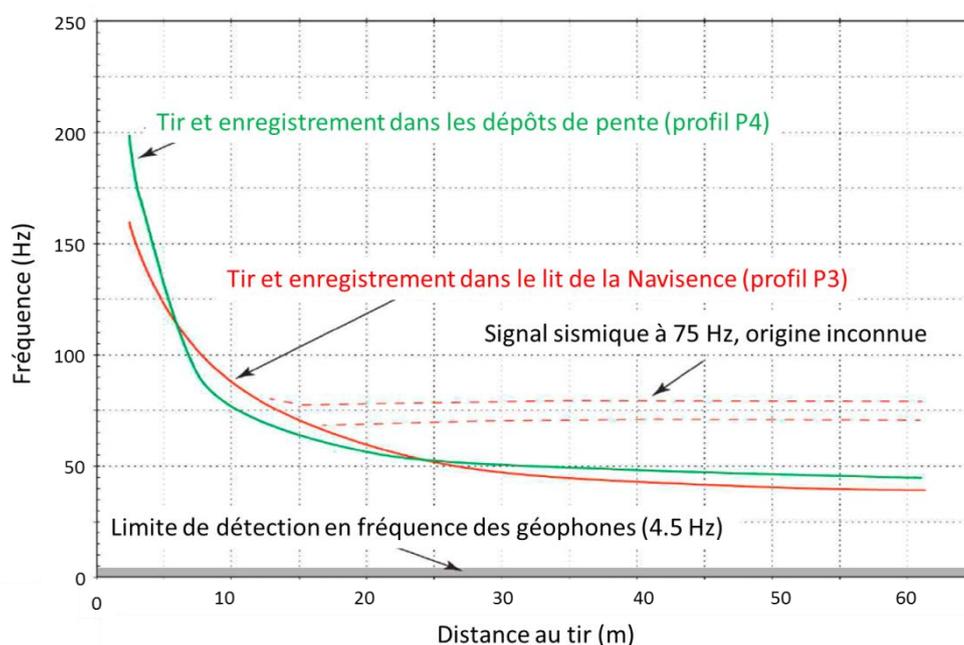


Figure 5 : Courbe d'absorption fréquentielle du signal en fonction de la distance (modifié de Geo2x 2015)

2.3 Conclusions

Une information importante à retirer de cette étude est l'absence de discontinuité dans la lithologie présente en rive gauche de la Navisence qui aurait pu impacter la transmission d'ondes générées par la rivière.

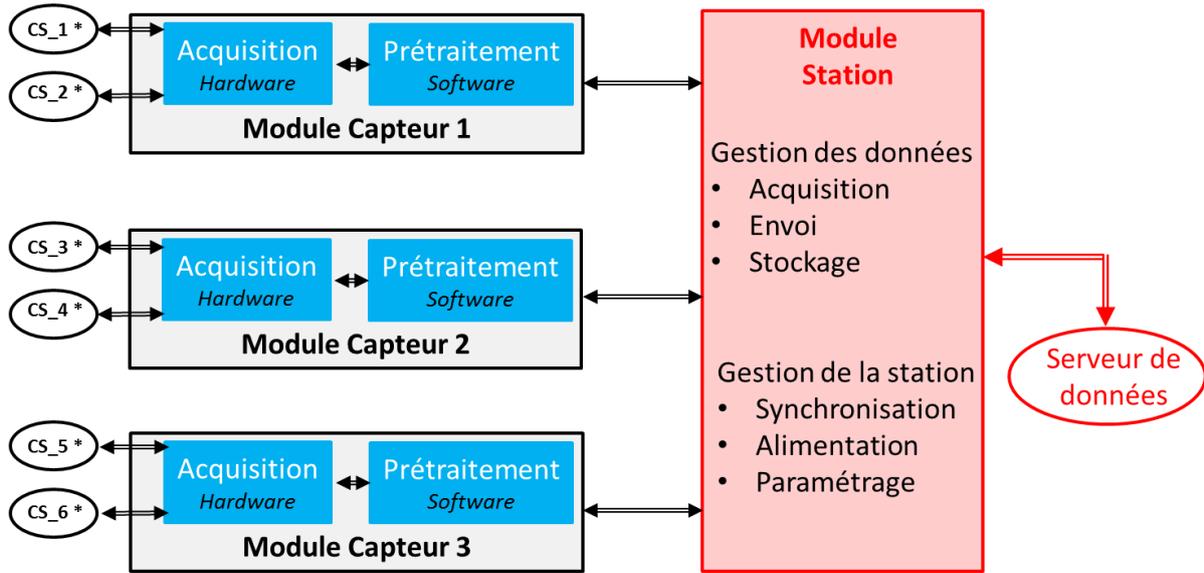
Les résultats obtenus confirment les concepts développés dans la littérature (Burtin et al., 2011; Gimbert et al., 2014; Larose et al., 2015) qui montrent qu'à une certaine distance de la rivière, les fréquences pouvant être assimilées aux débits liquides et solides sont comprises entre 0 et 50 Hz. Nous n'observons toutefois pas de très basses fréquences (<5 Hz).

A l'inverse, les observations effectuées au Népal par Burtin et al., 2009 semblent impossibles à reproduire à Zinal. Lors de son étude, des signaux sismiques ont pu en effet être enregistrés jusqu'à une distance de 600m de la rivière. Cette différence peut s'expliquer par une rivière de taille plus importante et donc une source sismique de plus forte amplitude, ainsi que par un milieu de propagation potentiellement différent (granulométrie, nature des sédiments, nappe phréatique, végétation, taille de la plaine alluviale...)

3 La solution de mesure

Comme indiqué sur la Figure 6, la solution de mesure est composée :

- de capteurs sismiques permettant l'acquisition d'un signal sismique passif.
- de trois « Modules Capteurs » qui gèrent l'acquisition et le prétraitement pour chacun des capteurs.
- d'un « Module Station » qui gère les multiples « Modules Capteurs » et leurs sorties ainsi que l'envoi des données vers un serveur de données.



* CS : Capteur Sismique

Figure 6 : Schéma de la solution de mesure

3.1 Les capteurs sismiques

Le rôle des capteurs sismiques est d'acquérir un signal sismique et de le transformer en un signal électrique analogique. La fréquence naturelle d'un capteur correspond à la fréquence du signal sismique à partir de laquelle le capteur émet une réponse électrique.

Nous avons instrumenté notre site d'études à l'aide de deux types de capteurs de la société GeoSpace :

- GS-11D : géophone standard utilisé traditionnellement dans la prospection sismique caractérisé par une fréquence naturelle de 4.5Hz. (Figure 7A)
- HS1 : sismomètre Basse Fréquence ayant une fréquence naturelle de 2Hz. (Figure 7B)

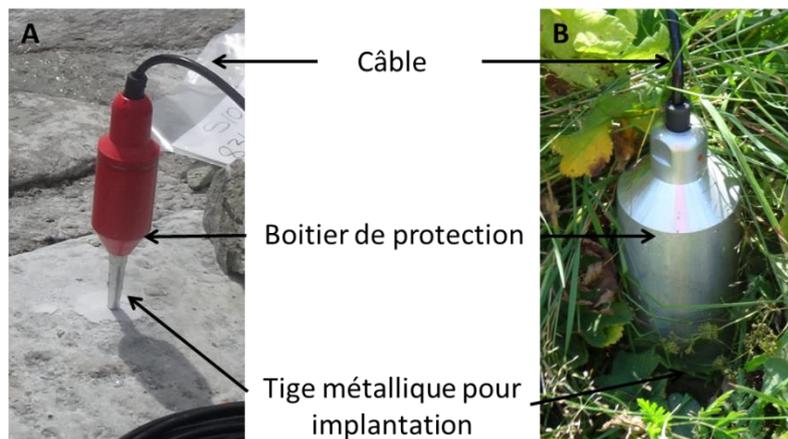


Figure 7: Capteurs sismiques. A) GS-11D B) HS-1

Le choix de ces capteurs a été motivé :

- par la volonté de comparer un capteur standard bon marché à un capteur haut de gamme avec une fréquence naturelle plus basse et une sensibilité plus forte.
- par la garantie délivrée par le constructeur de pouvoir déployer les capteurs à une grande distance (~100 m) des modules capteurs sans perte de qualité du signal.
- par le packaging du capteur. Cette opération effectuée par le constructeur nous garantit en plus de l'étanchéité, une bonne transmission des ondes sismiques du sol au capteur.

3.2 Les « Modules Capteurs »

La problématique principale de la mesure sismique environnementale est la quantité de données en sortie qui peut générer des problèmes de transmission, de stockage et de consommation d'énergie. La mesure sismique nécessitant des fréquences d'acquisition importantes, elle est par définition génératrice de grandes quantités de données. Il a donc été nécessaire d'inclure un processus visant à diminuer la quantité de données en synthétisant l'information. Consécutivement à l'acquisition physique des données, cette opération s'effectue au sein du « Module Capteur » via un processus logiciel.

3.2.1 L'acquisition (Hardware)

L'acquisition du signal analogique généré par les capteurs sismiques est effectuée par le module d'acquisition développé par TETRAEDRE couplé à une carte d'amplification et de protection développée par la HES-So (Figure 8).

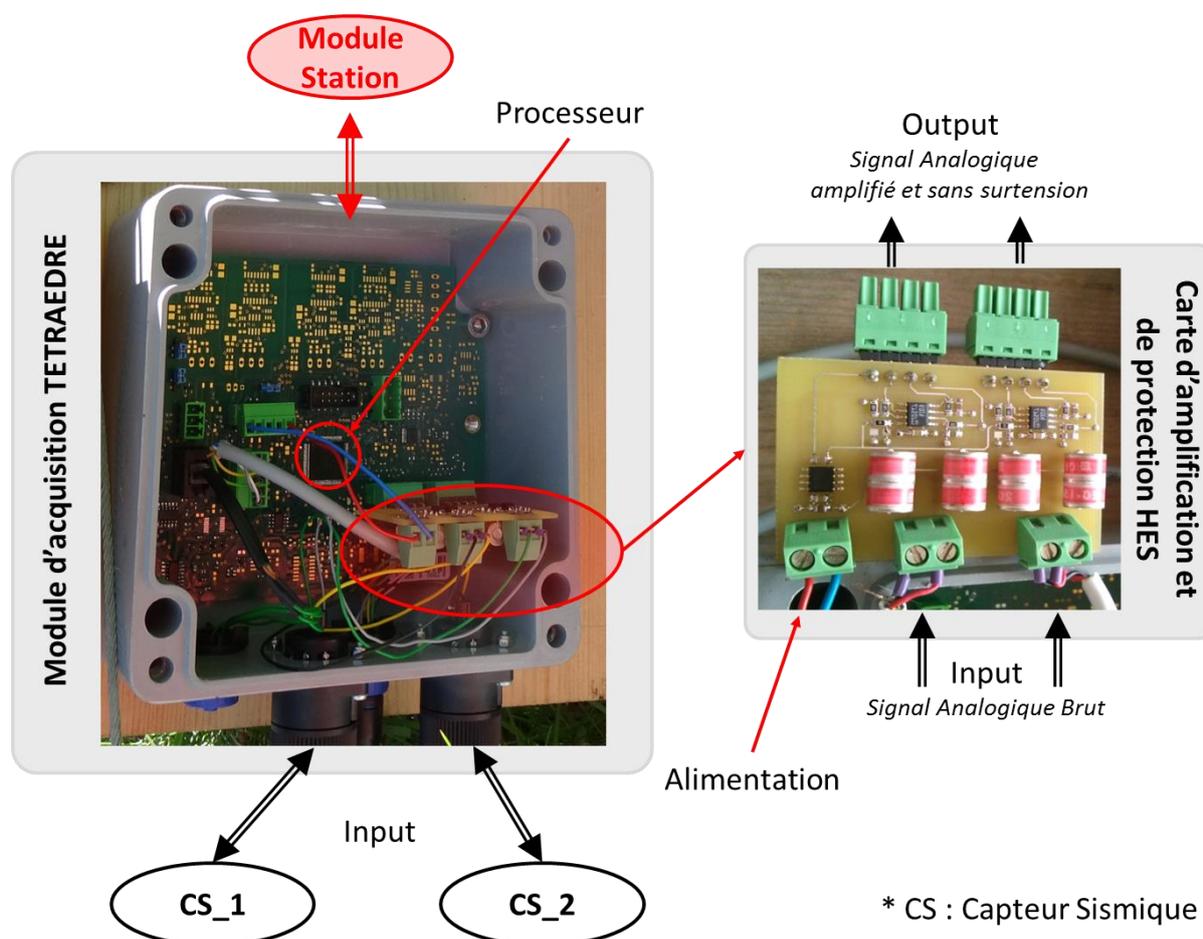


Figure 8 : Architecture interne du « Module Capteur »

À la réception d'un signal d'éveil initié par le « Module Station », le module d'acquisition TETRAEDRE lance un processus d'acquisition que se déroule en plusieurs étapes :

1. Échantillonnage du signal analogique brut émis par le capteur sismique à une fréquence d'acquisition paramétrable ($0.1 \text{ KHz} < F_{\text{acq}} < 1 \text{ KHz}$). La précision de cette opération est garantie par l'horloge du processeur présent sur chaque carte.
2. Ecrêtage du signal pour protéger le système contre des surtensions pouvant survenir suite à un choc direct sur les capteurs sismiques.
3. Amplification numérique de ce signal, car une mesure sismique passive suppose par définition un signal de faible amplitude.
4. Transformation du signal analogique en un signal numérique.

Les opérations de protection et d'amplification sont réalisées par la carte électronique développée par la HES-So.

3.2.2 Le prétraitement (Software)

Pour diminuer la quantité de données sans perdre en qualité, nous avons choisi de transformer le signal sismique en appliquant un protocole (Figure 9) basé sur le théorème de la transformée de Fourier permettant de transformer un signal vibratoire en un signal fréquentiel sans perte d'informations. Chaque « Module Capteur » effectue cette opération à l'aide du processeur présent sur la carte électronique et livre ainsi au « Module Station » un signal synthétique.

Préalablement à cette transformation fréquentielle il est nécessaire de nettoyer le signal des fréquences indésirables et des harmoniques liées à l'aide d'un filtre passe-bas. Après une opération de décimation visant à diminuer le nombre de données à analyser, nous utilisons un algorithme basé sur la transformée de Fourier et optimisé par la HES-So pour obtenir un signal fréquentiel. La moyenne de plusieurs signaux consécutifs permet de s'affranchir des valeurs erratiques.

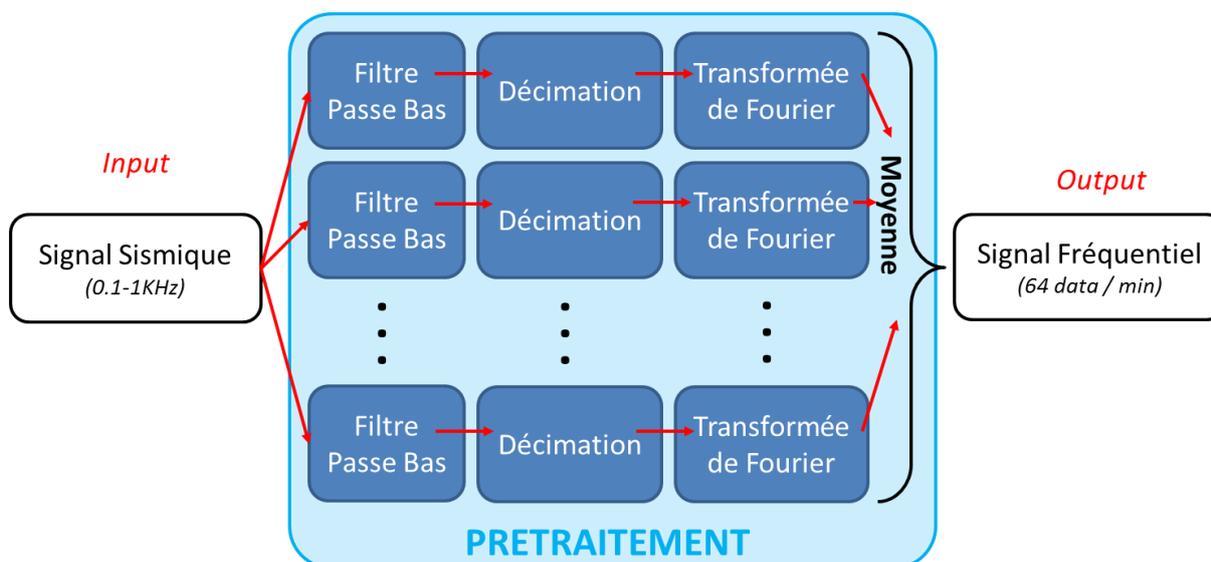


Figure 9 : Processus de prétraitement appliqué au signal acquis par le « Module Capteur »

3.3 Le « Module Station »

Élément central de la solution de mesure, le « Module Station » (Figure 10) développé par TETRAEDRE pilote l'acquisition des données, leur transmission au serveur ainsi que le paramétrage de la station.

La connexion GPRS permet la synchronisation temporelle avec un serveur de temps. Une fois cette opération effectuée, le « Module station » ordonne de façon séquentielle à chacun des « Modules capteurs » la réalisation de l'acquisition du signal sismique. Les données récupérées sont alors transmises à un serveur de données sur lequel elles seront mises à la disposition des utilisateurs. Dans le cas d'une interruption de la communication, une carte mémoire interne permet le stockage temporaire des données jusqu'au rétablissement de la liaison.

Le module de communication permet également de récupérer un fichier de paramétrage sur un serveur, qui sera utilisé par chacun des « Modules Capteurs » lors de la mesure et le prétraitement. L'utilisateur peut ainsi modifier à distance la fréquence d'acquisition, l'ordre ou la fréquence du filtre passe bas, ou encore le nombre de Transformées de Fourier à moyenner. Ce paramétrage peut également être modifié en se connectant sur site, directement sur le « Module Station » grâce à un ordinateur.

Le « Module Station » gère également l'alimentation de la solution de mesure via une solution batterie + panneau solaire

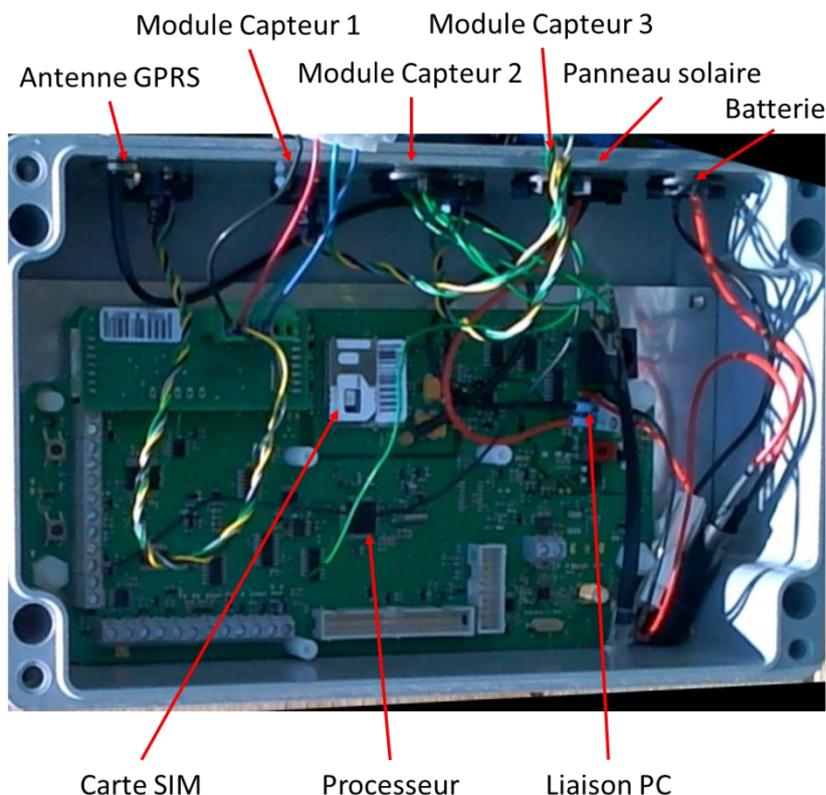


Figure 10 : Architecture du « Module Station »

4. Tests de mesure

Le développement d'un prototype opérationnel nous a permis d'effectuer des tests de mesures ponctuelles « in situ » et ainsi parfaire sa conception et son paramétrage. Après avoir validé la solution de mesure, nous avons déployé cette dernière sur le site de test et effectué les premières mesures en continu.

4.1 Mesures ponctuelles

À la mi-juin 2015, nous avons effectué une série de mesures ponctuelles (Figure 3) pour caractériser l'amplitude et la gamme fréquentielle du signal vibratoire lié au bruit sismique originaire de la rivière. Ces tests nous ont permis d'optimiser les caractéristiques et le paramétrage de la carte de protection de la HES-So (Figure 8). Ces mesures sont :

- Ponctuelles dans l'espace pour observer l'absorption du signal avec la distance à la rivière et la forme du spectre fréquentiel.
- Ponctuelles dans le temps pour observer la variabilité de la mesure.

Projet SismoRiv (Jalon 1)

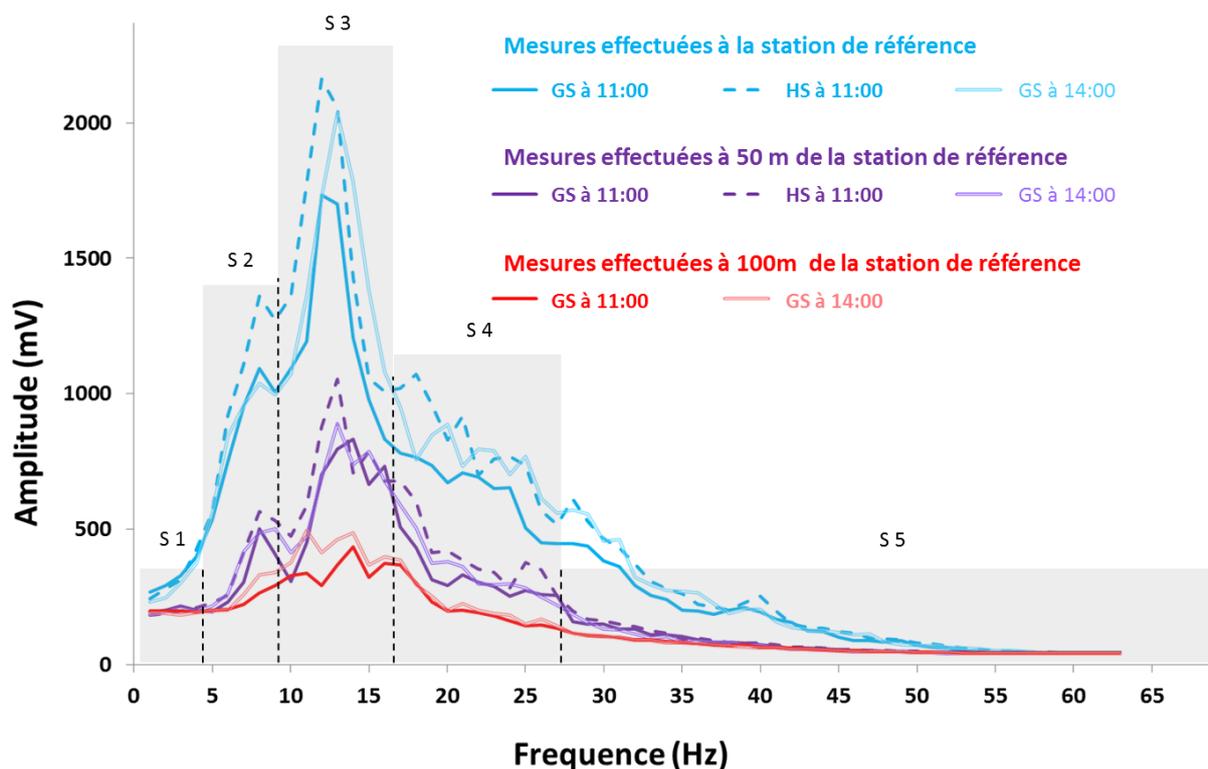


Figure 11 : Exemple de spectres fréquentiels obtenus par les mesures temporelles effectuées avec les deux types de capteurs HS et GS et découpage en 5 sections.

Sur la Figure 11, nous avons sélectionnés des points de mesures situés au niveau de la station de mesure, sur un axe perpendiculaire à l'écoulement (Figure 3) et avons affichés les spectres issus des mesures effectuées à 11 :00 et 14 :00 avec chacun des deux types de capteurs. Pour chacune des mesures nous avons appliqué le prétraitement défini précédemment.

4.2 Interprétation des spectres

Une première analyse comparative des spectres fréquentiels permet d'amener aux résultats suivants :

- La distance à la rivière influe directement sur l'amplitude des spectres ce qui confirme la rivière comme source principale du signal sismique.
- La différence de sensibilité du capteur ou de sa fréquence naturelle ne semble pas avoir d'influence sur le spectre obtenu.
- Entre 11 :00 et 14 :00 le débit de la Navisence peut être considéré comme stable. La variation observée entre les mesures effectuées à ces deux pas de temps tient de la variabilité interne à la méthode de mesure.

La seconde analyse tend à prendre en compte la forme et la tendance des spectres fréquentiels. On peut alors découper le spectre en 5 parties distinctes (Figure 11):

- Section S1 (0-5 Hz). Le signal est très faible et ce quelque soit la distance et le capteur observé.
- Section S2 (5-9 Hz). On observe un premier petit pic qui se termine plutôt vers 10 Hz à 50m.
- Section S3 (9-17 Hz). On observe un pic imposant et distinct avec une amplitude double de celle des plateaux intermédiaires. La fin du pic se décale vers 20 Hz à 50m.
- Section S4 (17-27 Hz) Un second plateau se dégage, avec une amplitude légèrement plus faible que le premier.
- Section S5 (27-60 Hz) On observe une décroissance du signal. Cette décroissance peut s'expliquer par la présence du filtre passe bas. Le paramétrage de ce filtre sera l'une des étapes clés de cette étude. Une fréquence de coupure trop basse supprimera des fréquences potentiellement intéressantes. Une fréquence de coupure trop haute permettra aux hautes fréquences parasites d'apparaître sous la forme d'harmoniques.

Chacune de ces observations est valable à une distance de 100m même si fortement lissée.

4.3 Monitoring

Durant la seconde moitié du mois de juillet, nous avons déployé la solution de mesure sur le site de Zinal (Figure 3) afin d'effectuer une phase de monitoring sismique de plusieurs semaines.

Le monitoring sismique défini par notre méthodologie consiste à enregistrer de manière continue l'information fréquentielle issue des « Modules Capteurs ». Les résultats obtenus se présentent sous la forme d'un spectrogramme (Figure 12) réalisé ici à l'aide de mesures effectuées durant la période du 13 au 17 Aout 2015.

Ce graphique représente :

- Le temps à travers l'axe des abscisses.
- La fréquence du signal à travers l'axe des ordonnées.
- L'amplitude du signal grâce à l'échelle de couleurs.

Il est possible d'extraire une série temporelle liée à fréquence spécifique. Nous avons ajouté à la Figure 12, une extraction pour les fréquences de 15 et 25 Hz. On observe des fluctuations du signal qui, avec des périodes journalières peuvent être assimilées aux variations diurnes du débit de la Navisence. Cela implique que la variation du signal liée au phénomène est plus importante que la variabilité de la mesure observée lors des mesures ponctuelles. On remarque également que la forme du signal dépend fortement de la fréquence choisie.

Parallèlement il est possible d'extraire un spectre fréquentiel pour une date donnée. Les spectres issus du 14/08/2015 à 20:00 et du 16/08/2015 à 10:00 sont affichés à gauche du spectrogramme (Figure 12). Même si la forme globale du spectre est semblable à celle mise en valeur précédemment lors des mesures ponctuelles, on observe une forte évolution du signal dans le temps.

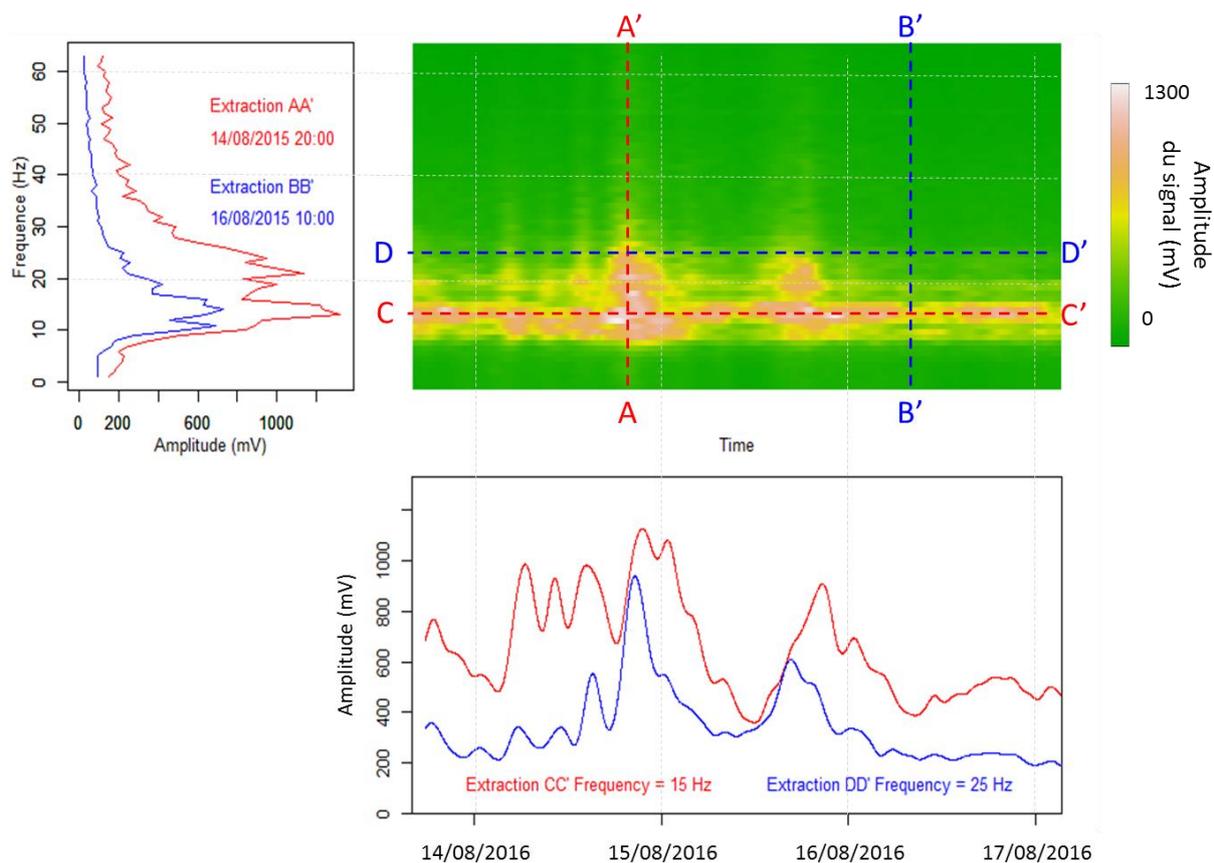


Figure 12: Spectrogramme du signal sismique enregistré par le capteur 1 entre le 13 et le 17 Août.

5 Conclusion

Le présent rapport valide les étapes du jalon 1 qui concernent la caractérisation sismique du site, le développement, les tests de la solution de mesure et son déploiement opérationnel.

L'étude sismique du site effectuée par le bureau d'étude Geo2x nous a tout d'abord permis d'obtenir des informations sur la variation latérale de lithologie et sur la propagation des ondes dans ce milieu. L'étape suivante nous a menés à la conceptualisation et à la réalisation d'une solution de mesure sismique adaptée au monitoring environnemental. Ce développement a été réalisé en collaboration avec la société TETRAEDRE et l'institut « Systèmes industriels » de la HES-So Valais. Des mesures ponctuelles, réalisées mi-juin 2015 ont permis de valider concepts de mesure et le développement d'un prototype a permis de réaliser les premiers mesures en continu mi-juillet.

Les premiers résultats attestent que la rivière est à l'origine du bruit sismique enregistré par notre système de mesure et que les variations de débits génèrent des variations de signaux facilement identifiables.

La suite du projet a consisté à continuer le monitoring sismique jusqu'au mois de septembre 2015, date à laquelle les débits liquides ne sont plus assez importants pour générer du charriage. Une phase d'analyse et d'interprétation des données a ensuite permis de mettre en perspective signal sismique et débits liquides et solides identifiés par la station de référence.

6 Bibliographie

Burtin, A., Bollinger, L., Cattin, R., Vergne, J. and Nábělek, J. L. (2009). *Spatiotemporal sequence of Himalayan debris flow from analysis of high-frequency seismic noise*. J. Geophys. Res., 114(F4). ISSN 0148-0227. doi: 10.1029/2008JF001198.

Burtin, A., Cattin, R., Bollinger, L., Vergne, J., Steer, P., Robert, A., Findling, N. and Tiberi, C. (2011). *Towards the hydrologic and bed load monitoring from high-frequency seismic noise in a braided river: The "torrent de St Pierre", French Alps*. J. Hydrol., 408(1–2). 43–53. ISSN 00221694. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.07.014.

Gimbert, F., Tsai, V. C. and Lamb, M. P. (2014). *A physical model for seismic noise generation by turbulent flow in rivers*. J. Geophys. Res. Earth Surf., 119(10). 2209–2238. ISSN 2169-9011. doi: 10.1002/2014JF003201.

Larose, E., Carrière, S., Voisin, C., Bottelin, P., Baillet, L., Guéguen, P., Walter, F., Jongmans, D., Guillier, B., Garambois, S., Gimbert, F. and Massey, C. (2015). *Environmental seismology: What can we learn on earth surface processes with ambient noise?* J. Appl. Geophys., 116. 62–74. ISSN 0926-9851. doi: 10.1016/j.jappgeo.2015.02.001.

Meyer-Peter, E. (1948). *Formulas for Bed-Load transport*, IAHSR 2nd meeting, Stockholm, appendix 2, IAHR, Stockholm.

Recking, A. (2006). *Etude expérimentale de l'influence du tri granulométrique sur le transport solide par charriage*, INSA de Lyon, Lyon.

Rickenmann, D. and Recking, A. (2011). *Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field data set*. Water Resour. Res., 47(7). ISSN 00431397. doi: 10.1029/2010WR009793.

Schoklitsch, A. (2013). *Handbuch des Wasserbaues: Zweiter Band*, Springer-Verlag, 603p, ISBN 978-3-7091-8088-4.

Sion, le 06 mai 2016

 Centre de recherche sur l'environnement alpin
Zentrum für alpine Umweltforschung
Research center on alpine environment

E. TRAVAGLINI

P. ORNSTEIN