Pôle Grenoblois d'études et de recherche pour la prévention des Risques Naturels

---

financement 2006-2007

L'ouvrage passif de protection pare-bloc: un enjeu et un capteur d'aléa

Instrumentation d'une galerie Pare-blocs Structurellement Dissipante

Pascal PERROTIN, LOCIE-Polytech'Savoie (Université de Savoie)
Philippe BERTHET-RAMBAUD, LRPC-CETE Lyon (désormais Bureau MND Engineering)

1. Introduction

a. Contexte général :

Le département de l'Isère comme tous les départements alpins est directement soumis aux aléas gravitaires et en particulier à l'aléa rocheux. Cet aléa peut être très varié dans ses formes, notamment vis-à-vis des volumes et des cinématiques en jeu. Il faut ainsi distinguer les mouvements lents et continus tels que les affaissements, les tassements et certains glissements de terrain comme sur le site des fameuses Ruines de Séchilienne des mouvements rapides et discontinus. Les écroulements ou éboulements et les chutes de blocs font partie de cette dernière catégorie : ils résultent de l'évolution des falaises allant, selon les volumes de matériaux mis en jeu, de la simple chute de pierre (inférieur à 0.1 m^3) à l'écroulement catastrophique (supérieur à plusieurs millions de m^3).



Chutes de blocs. Gravures sur bois du 16ème siècle *(Bibliothèque municipale de Grenoble)*.

Les enjeux potentiellement touchés par ce phénomène sont nombreux et on recense en France environ 4500 communes concernées par les risques liés aux mouvements de terrain dans leur ensemble. Concernant le département de l'Isère, les chutes de pierre de petit volume sont quasiment quotidiennes, essentiellement dans la Vallée de la Romanche et sur les routes du Vercors et de la Chartreuse. Pour les plus gros volumes, le seul secteur du "Y Grenoblois" a connu, au cours du siècle passé, une moyenne d'un éboulement de plus de 100 m^3 par an, un éboulement de l'ordre de 10 000 m^3 tous les 20 ans et un de l'ordre de 100 000 m^3 tous les 80 ans [Interreg II C 2001]. Parmi les événements encore dans les mémoires et qui nous rappellent l'existence bien réelle de ce risque pour tous, on peut notamment citer :

- en septembre 2001, éboulement d'environ 500 m3 sur la RD 526 dans le Trièves,
- en janvier 2002, maisons touchées dans le quartier des Grangettes à Lumbin,
- en janvier 2004, éboulement sur la RN91 à l'amont du Péage de Vizille et dans les gorges de la Bourne (2 morts – Cf. figure suivante),
- en février 2004, chutes de pierres et de blocs sur le hameau des Ponants à Livet et Gavet,
- en avril 2005, éboulement sur la RD 218 à Saint sur Isère.

Face à ce risque un certain nombre de parades, notamment passives (écrans de filets, merlons, galerie de protection) existent mais qui nécessitent des investissements souvent très lourds.



VERCORS : DANS LES GORGES DE LA BOURNE

TRAGIQUE ÉBOULEMENT

Un accident sans précédent dans les Gorges de la Bourne. Photo Henri PORCHIER

Il était 18 heures hier soir lorsque la montagne s'est soudain effondrée sur la route. Si un automobiliste a pu s'arrêter et faire marche arrière in extremis, il a cependant vu le véhicule qui le précédait disparaître sous quelque 200 tonnes de rocher. Suspendues cette nuit compte tenu de la dangerosité du terrain, les recherches reprendront ce matin.

» EN PAGE 2, L'ARTICLE DE DENIS MASLIAN

Éboulement sur la route des gorges de la Bourne ***(Dauphiné Libéré du 31/01/2004)***

Or, si cette réponse opérationnelle est nécessaire, l'état des connaissances dans le domaine des ouvrages (de protection) soumis à l'impact de blocs rocheux reste tout à fait partiel. En particulier, le dimensionnement de ces structures reste encore très empirique et basé sur des approches souvent inadaptées pour une telle sollicitation dynamique. Il en découle une situation assez paradoxale où "il faut bien faire quelque chose" mais sans savoir exactement au final quel est le niveau de protection effectif atteint. Surtout et comme évoqué précédemment, tout ceci a un coût non négligeable qui conditionne lui aussi bien souvent l'ambition des protections mises en place et/ou l'aire traitée.

Il y a donc un intérêt certain à mieux dimensionner ces ouvrages, à la fois pour garantir le niveau de protection à atteindre et le cas échéant, optimiser leur conception vis-à-vis de ce niveau. Mais si cela demande déjà des efforts importants qui sont notamment abordés dans les travaux menés par les différents partenaires du GIS VOR (Vulnérabilité des Ouvrages aux Risques) sur ce thème, cela n'est pas non plus suffisant et il ne faut surtout pas omettre les questions liées à l'évolution de l'ouvrage dans le temps, notamment suite à des impacts successifs mais aussi du simple fait de son vieillissement. Cette question est particulièrement cruciale pour certains ouvrages comme les galeries Pare-blocs Structurellement Dissipantes (PSD) qui ne comportent pas de matériaux dissipant en partie supérieure de dalle.

b. Les problématiques du suivi d'ouvrage

Le suivi d'ouvrages, s'il est en général correctement abordé pour les ouvrages ambitieux parmi les "classiques" du génie-civil (ponts, tunnels, bâtiments de grandes hauteurs) n'est en général pas ou mal prévu pour les ouvrages de protection passive, qui pourtant peuvent être soumis à des sollicitations sévères et dynamiques dans des conditions environnementales souvent très délicates. Seules quelques procédures d'entretien sont parfois mises en œuvre mais qui ne pourraient être totalement satisfaisantes lorsque l'ouvrage est prévu pour s'endommager, ce qui est régulièrement le cas dans le domaine des aléas naturels. Il y a donc là un vrai champ d'investigation avec des répercussions opérationnelles particulièrement importantes.

Aborder le suivi d'ouvrages du point de vue du chercheur pose un certain nombre de difficultés dont la première est logiquement celle de la disponibilité d'un ouvrage à suivre. Certes, de nombreux ouvrages existent... mais plus ou moins documentés. En pratique et pour

mener des développements théoriques sur une base solide, la meilleure solution est donc d'aborder le cas d'un ouvrage neuf et même d'avoir accès au chantier de construction pour rendre possible la mise en place de l'instrumentation nécessaire.

Ensuite, il faut se poser la question du type d'ouvrage et de l'intérêt offert par son suivi. De ce point de vue et notamment par les travaux scientifiques déjà menés [Perrotin & al 2002], [Berthet-Rambaud 2004], [Delhomme 2005], [Montani Stoeffel 1998], les galeries de protection routière et notamment les ouvrages Pare-Blocs Strturellement Dissipants (PSD [Tonello 2001]) offrent actuellement un sujet de choix. Par ailleurs, ce type d'ouvrage reste une des rares solutions envisageables dans certaines configurations où peuvent aussi éventuellement intervenir des avalanches : pour le département de l'Isère, on peut notamment citer les sites des Echarennes dans la région Matheysine ou de la "rampe des Commères" en Oisans.

A partir de là, l'ouvrage de protection passive peut être considéré de deux points de vue complémentaires : il constitue d'une part lui-même un enjeu dont il convient de vérifier la résistance résiduelle au cours des différents événements de sa vie mais également par sa situation privilégiée en première ligne des phénomènes rocheux un capteur d'événement capable d'apporter une information sur l'aléa local et son activité.

c. Galerie de protection routière = enjeu + détecteur du phénomène pour un double intérêt

Ainsi, l'étude en situation et le suivi d'une galerie de protection routière présente deux intérêts principaux :

- **l'évaluation de l'état de l'ouvrage et de son évolution au gré des événements :** chaque chute de blocs sur un ouvrage peut potentiellement l'endommager et entamer sa réserve de résistance pour assurer la fonction prévue. Être capable de détecter ces événements, d'en caractériser les effets à l'échelle de l'ouvrage doit ensuite permettre d'en évaluer les conséquences sur la structure pour in fine, pouvoir jauger de son état et éventuellement prévoir les mesures de maintenance ou même de réparation nécessaires. L'intérêt est de permettre au maître d'ouvrage une meilleure gestion de son parc d'ouvrages et de s'assurer de le maintenir à un niveau d'utilisation optimal à long terme.

- **l'évaluation de l'activité du phénomène :** la caractérisation de l'aléa grâce au détecteur que constitue finalement l'ouvrage va également apporter une information intéressante sur l'activité locale du phénomène et qui pourra compléter de manière opérationnelle les dispositifs de surveillance et d'alerte, par exemple pour un itinéraire à risque. A l'échelle de la zone concernée, cette caractérisation pourra également alimenter une base de données sur l'activité rocheuse locale, par exemple en fonction des paramètres climatologiques (gel/dégel, pluie…). L'intérêt est ici évident pour le gestionnaire opérationnel du risque.

2. Verrous scientifiques et techniques

Les verrous sont ici de plusieurs natures, tout d'abord scientifiques avec la problématique de l'analyse inverse sur un ouvrage surfacique : ces analyses sont correctement maîtrisées pour

des ouvrages simples [Yen 1995] et ont pu déjà être employées dans le domaine des aléas gravitaires et plus particulièrement des avalanches [Berthet-Rambaud 2004] notamment pour évaluer l'action effectivement subie par un ouvrage touché par un écoulement. Ici, l'innovation consiste au passage à un élément de géométrie complexe avec un matériau, le béton armé, au comportement non-linéaire et potentiellement anisotrope. Différents niveaux d'analyse sont nécessaires avec une complexité croissante alors que l'utilisation d'excitations récurrentes (trafic sur la route protégée) peut permettre de caractériser l'état et le niveau d'endommagement général de la structure. A terme, les objectifs de cette analyse inverse sont l'obtention de:

- l'intensité de l'impact et la position de celui-ci,
- la quantification de l'endommagement lors des impacts successifs,

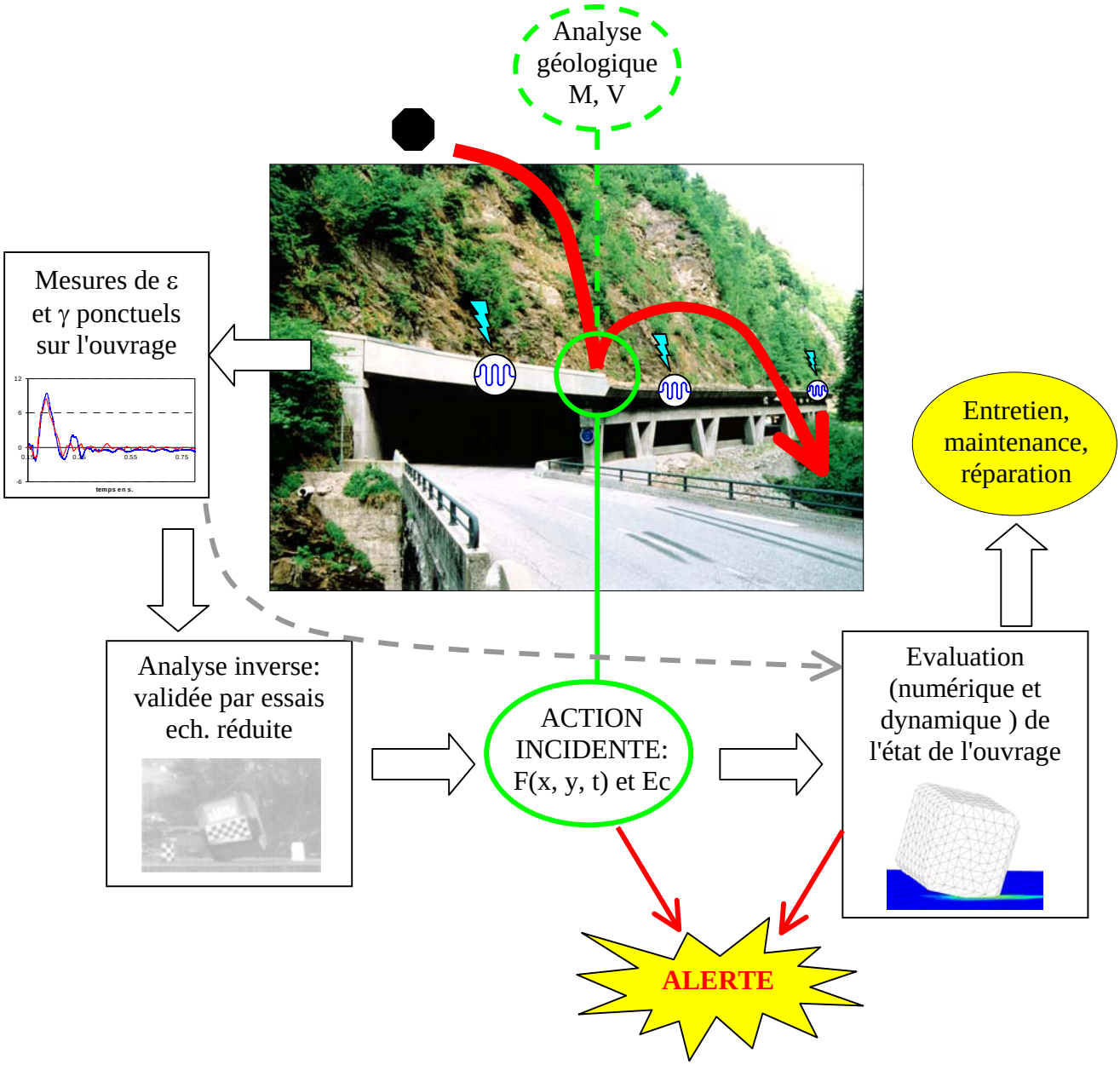
Il s'agit donc, à partir de mesures ponctuelles et délocalisées de déformations (jauges) et d'accélérations (accéléromètres) sur l'ouvrage, de remonter aux caractéristiques de l'action incidente (avec sa position et son intensité). Pour mettre au point les différentes étapes de cette analyse, il est nécessaire d'aborder ce problème via des impacts maîtrisés sur ouvrages, certes surfaciques, mais simplifiés via une campagne expérimentale spécifique.

En parallèle, il s'agit d'être capable de modéliser le comportement de l'ouvrage en intégrant son endommagement notamment pour réinjecter la donnée "aléa" obtenue par analyse inverse sous forme d'une action incidente et évaluer ses conséquences sur l'ouvrage et son état. Sur ce point et même s'il reste des lacunes à combler, notamment au niveau de la zone d'impact et des phénomènes qui s'y produisent, des éléments peuvent déjà être mis en avant à partir des travaux réalisés par exemple dans le cadre du projet PIR (Prévention des Instabilités Rocheuses) financé entre 2001 et 2004 par le Réseau Génie-Civil et Urbain. Ces travaux comprennent notamment le développement d'une expertise numérique intéressante quant à la modélisation des impacts sur dalles [Berthet-Rambaud 2004].

Ensuite et d'un point de vue plus technique, le principal verrou à franchir concerne l'instrumentation et l'acquisition de données sur un ouvrage en situation et sollicité de manière potentiellement extrême par des chutes de blocs rocheux. A partir d'une configuration initiale incluant jauges de déformations mises en place sur le ferraillage dès la construction et accéléromètres, il s'agit à terme d'optimiser un système abouti et efficace de suivi d'ouvrage qui puisse être adapté et équiper d'autres ouvrages avec un produit à destination directe des gestionnaires de ce patrimoine. Cette partie couvre également les aspects très pratiques liés au fonctionnement de systèmes électroniques pointus en pleine nature avec mesures en continu et pré-tri automatique des données et au développement de moyens de communication et d'interrogation à distance de ces systèmes.

Enfin et dans le domaine de la gestion opérationnelle du risque, il s'agit aussi d'aborder le champ concernant l'intégration des résultats fournis par cet ouvrage-capteur d'aléa, si possible en temps réel, dans des systèmes et procédures d'alerte et de surveillance des itinéraires. Cet aspect constitue un point majeur de cette démarche avec des intérêts indéniables du côté des gestionnaires d'infrastructures tels que les DDE ou les Conseils généraux. L'autre volet opérationnel concerne le développement de programmes d'entretien et le cas échéant de réparation adaptés à ce genre d'ouvrages à destination du gestionnaire.

La figure suivante illustre ces différents aspects et leurs imbrications:



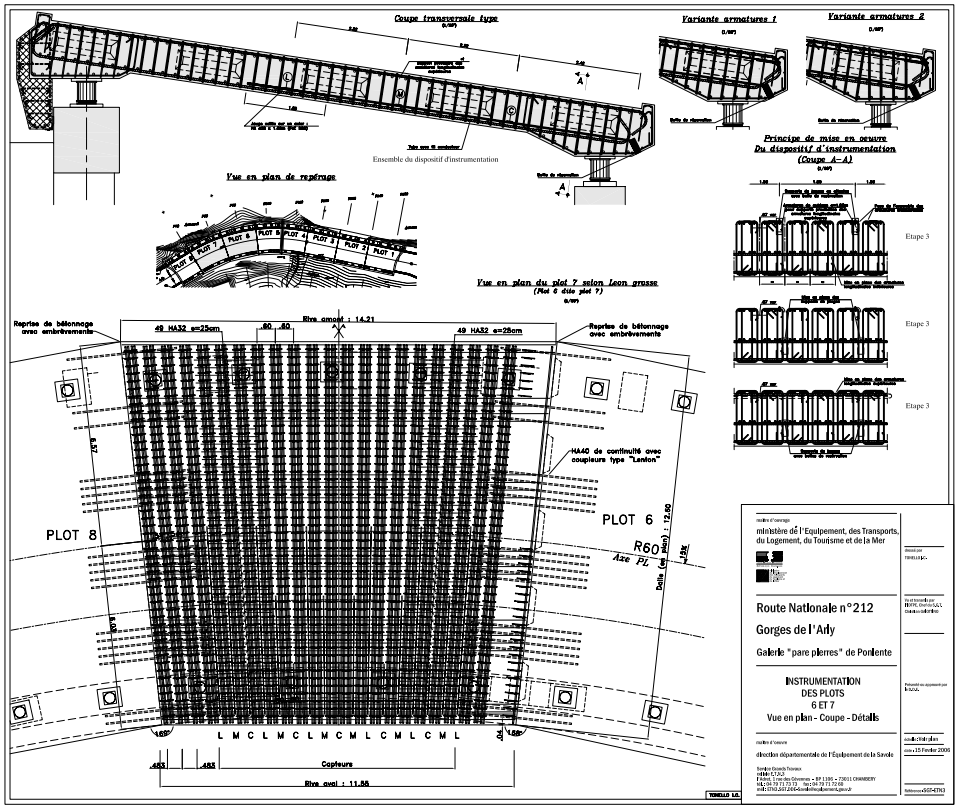
3. Instrumentation de l'ouvrage réel

Comme évoqué, ce projet global nécessite d'importants moyens matériels notamment pour traiter les deux gros volets expérimentaux de la démarche, à savoir:

- la réalisation d'une campagne d'essais spécifiques pour mettre au point la méthode d'analyse inverse. Cette campagne qui nécessitera la construction d'ouvrages modèles à échelle réduite avec une instrumentation ambitieuse est prévue pour se dérouler à terme sur le site du projet de Station d'essais de chutes de blocs du Ministère de l'Equipement.
- L'équipement et l'instrumentation d'un ouvrage réel neuf (notamment pour mettre en place des jauges de déformation à l'intérieur de la structure) : **c'est cette partie qui a fait l'objet précis de la demande de financement au PGRN en 2006.**

Faute de pouvoir décider ou même inciter directement la construction d'un tel ouvrage, il a fallu ici logiquement s'adapter au contexte pour exploiter au mieux les rares occasions de

chantiers d'ouvrages neufs accessibles. Après plusieurs années de veille, l'occasion s'est finalement présentée dans les Gorges de l'Arly à environ une heure de route de Grenoble avec la galerie de La Poniente dont le chantier s'est terminé en 2006.



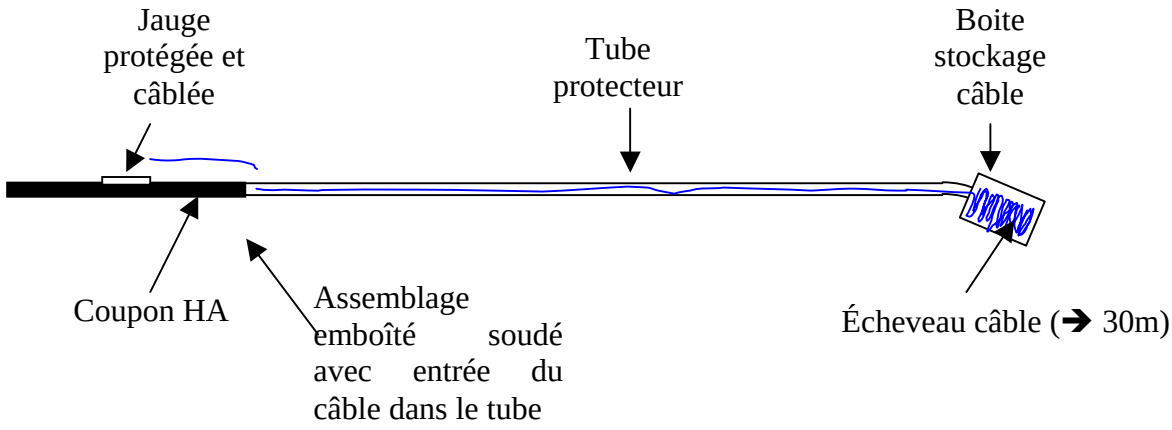
Dispositions pour la mise en place des jauges de déformations lors de la construction de l'ouvrage réel.

S'intégrer dans un planning de construction très serré pour ne pas laisser passer une opportunité relativement rare, a nécessité une réactivité certaine et une coordination fine. Pour cela, le financement du PGRN a permis de compléter l'investissement initial de la DIREN Rhône Alpes et de concrétiser la phase la plus délicate de l'instrumentation, à savoir la mise en place des jauges au sein même du ferraillage de la structure.

Plusieurs partenaires sont intervenus techniquement pour cette opération :

- La société BI2S pour la fabrication des supports et coupons et équipés ensuite par :
- Le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lyon pour le collage des jauges et le câblage
- Le constructeur Léon Grosse et ses sous-traitants pour le transport du matériel sur place et l'introduction des systèmes support de jauges
- La DDE et le Conseil Général de la Savoie pour la supervision générale du chantier

En fait et devant la difficulté à coller les jauges directement sur la cage d'armatures structurelles sur site (alors même qu'une certaine méticulosité est nécessaire), le choix s'est porté sur la fabrication de coupons HA prolongés d'un tube et d'une boite pour contenir l'ensemble du câblage avant son déploiement. Ces éléments ont donc pu être fabriqués, usinés et équipés au préalable avant d'être mis en place en ajout à la cage d'armatures structurelles.



Perche de mesure de déformations intégrée dans l'ouvrage

Ces systèmes ont plusieurs longueurs de manière à pouvoir mailler la dalle pour ensuite pouvoir ‘’trianguler’’ les mesures effectuées.

Pour la mise en place, seuls les plots 6 et 7 ont été équipés de ce réseau de jauges. En effet, ces deux plots sont ceux directement situés à l’aplomb du couloir le plus actif de Poniente :



Vue du Couloir de Poniente au dessus de la galerie construite

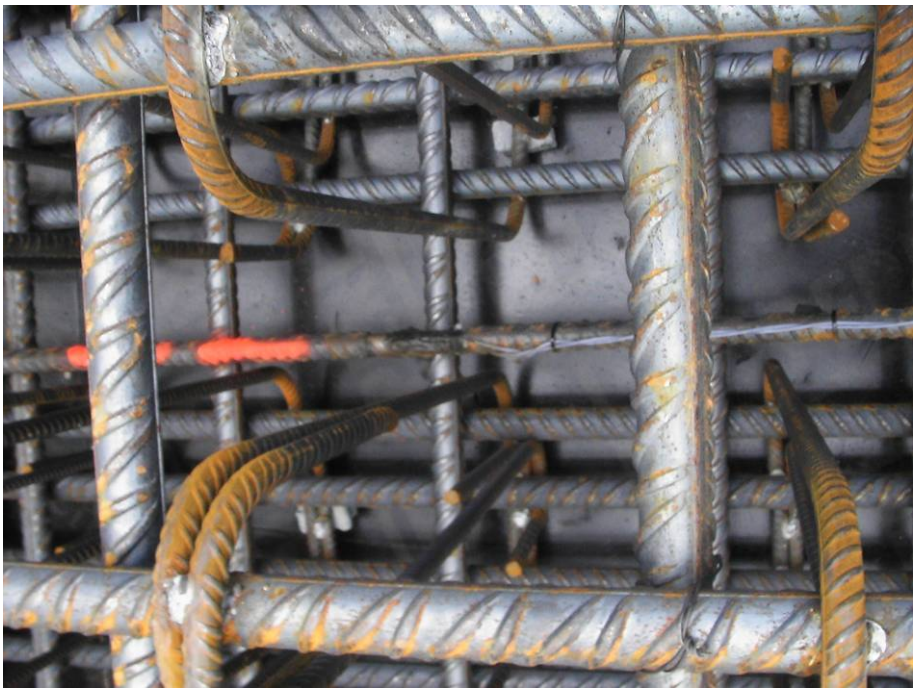
Les opérations nécessaires se sont donc étalées sur deux semaines consécutives selon un planning strict pour ne pas compromettre le coulage de chaque plot juste avant le week-end.



Vue du chantier de coulage de la dalle de la galerie de la Poniente – été 2006



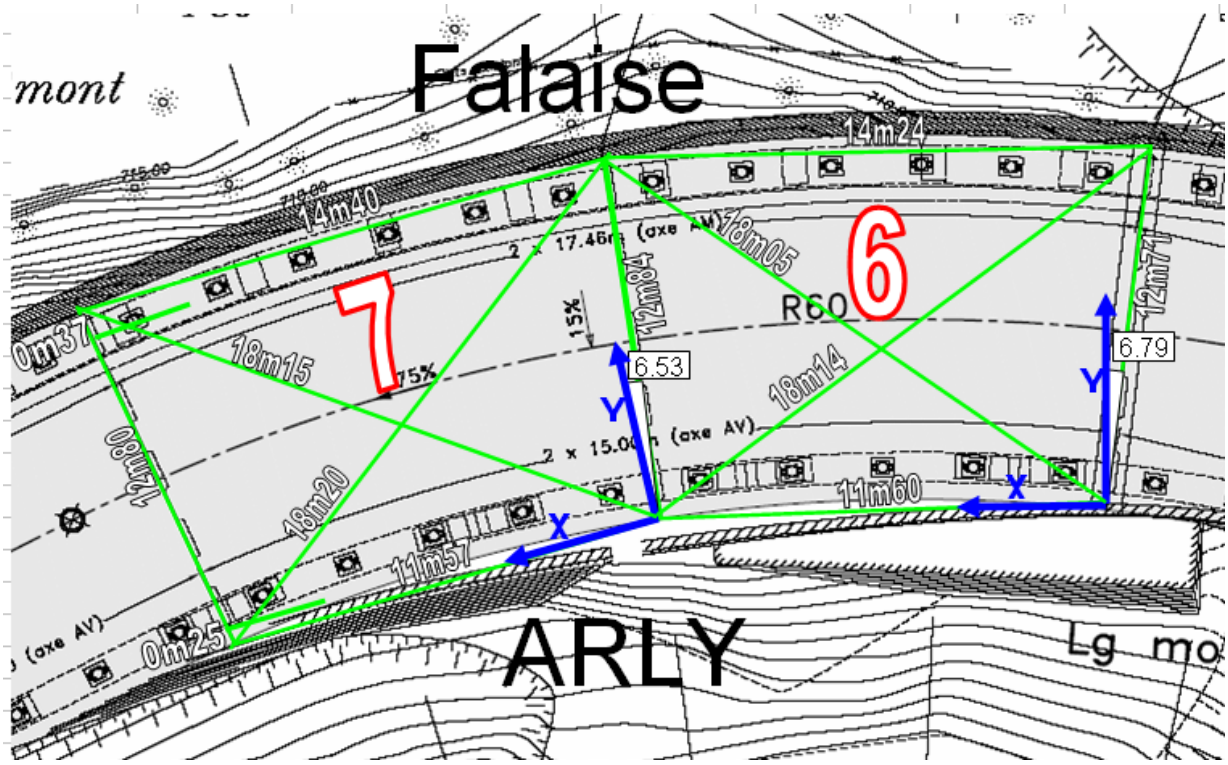
Système coupon + tube avant son introduction



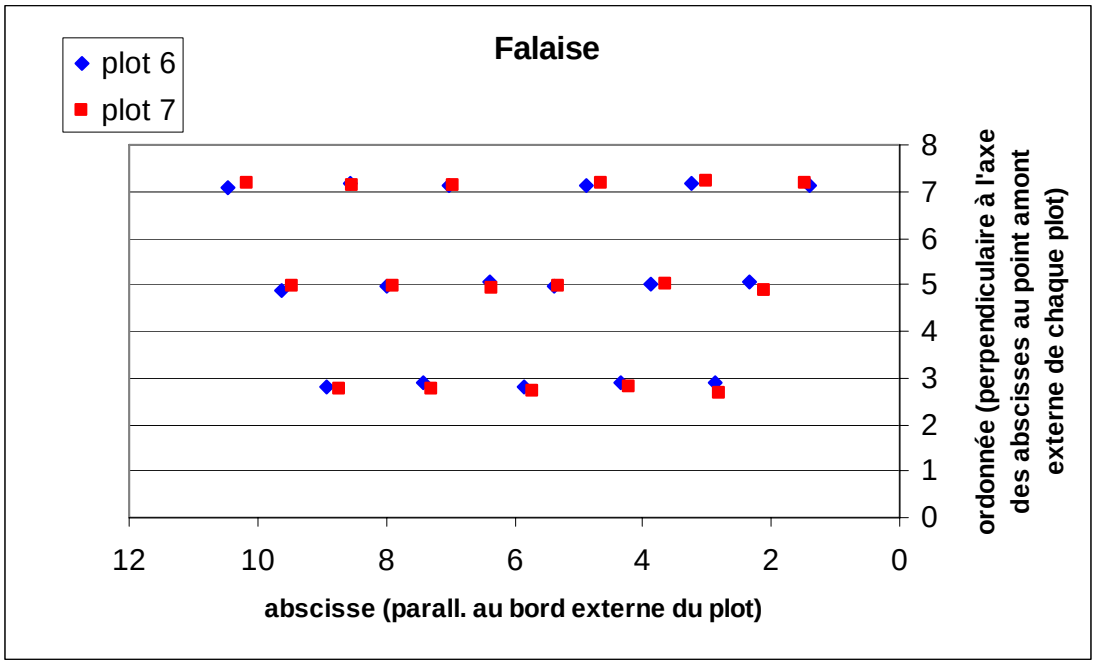
Coupon HA au sein du ferraillage

Au total, ce sont donc 34 jauges qui ont pu être mises en place au sein de la galerie sachant qu'après l'introduction des coupons, il s'agissait encore de terminer la cage d'armatures par la mise en place de la nappe supérieure de ferraillage longitudinal, puis couler et vibrer le béton …sans endommager les jauges ! Pour cela, les jauges dont certaines se trouvent à presque un mètre de la surface supérieure du béton étaient repérées et protégées jusqu'au dernier moment. A noter également que le ferraillage structurel a du être modifier près du bord de l'ouvrage pour prendre en compte le passage et le positionnement des boites de stockage du câble. Ce stockage du câble à ''l'intérieur'' du coffrage était en fait nécessaire de par le processus de fabrication utilisant un équipage mobile, plot par plot, empêchant de modifier spécifiquement le coffrage.

Avant coulage, chaque jauge a pu être repérée précisément et située sur l'ouvrage selon les résultats suivants :



Plan du Pare-blocs de Poniente



Positionnement des jauges de déformation sur les différents plots.

Par rapport à l'accélérométrie et faute de la mise en œuvre concrète, la partie suivante présente les analyses qui ont pu être réalisées en parallèle pour quand même progresser sur ce sujet à partir de données indirectes en vue de finaliser l'emplacement du réseau de capteurs.

4. Analyse accélérométrique et caractéristiques du réseau de capteurs

Les mesures d'accélération ou de déformation constituent le deuxième pilier des données d'entrée de l'analyse inverse mais aussi pour caractériser le comportement dynamique global de l'ouvrage à partir de mesures du bruit de fond [Cremona & al 2005]. Elles nécessitent un réseau complet et correctement réparti d'accéléromètres adaptés, placés selon les directions principales de l'ouvrage, réel ou modèle. Aujourd'hui, le système d'acquisition déjà financé pour l'ensemble du projet inclut les voies nécessaires au branchement de ces capteurs et le choix s'est finalement porté sur un réseau minimal de 16 accéléromètres uniaxiaux : ce nombre relativement important s'explique par la nécessité de ne pas traiter uniquement l'axe perpendiculaire à la dalle (certes le plus important) mais également dans le plan de la dalle (longitudinalement et transversalement) et surtout de disposer d'un maillage suffisant de points de mesures pour correctement alimenter l'analyse inverse. Dans ce cadre là, le nombre de capteurs reste suffisamment restreint car la surface à instrumenter est de 370 m².
Le réseau d'accéléromètres mais aussi de jauges de déformation doit nous permettre d'effectuer sur l'ouvrage :

1. La localisation de l'impacteur sur la surface de la dalle
2. La quantification de l'effort appliqué
3. L'estimation de l'endommagement subi par l'ouvrage.

Les deux premiers points sont assez bien traités dans la littérature scientifique et ne pose pratiquement plus de problème pour des éléments linéaires ou surfaciques avec un matériau à comportement linéaire élastique [Bennani 2001], [Yen 1995], [Jacquelin 2003]. Quelques analyses sur des structures plus complexe commencent à apparaître [Hu 2007], [Liu 2002], [Andreas 2001].
Dans un premier temps, nous allons présenter quelques résultats qui concernent une étude menée sur un modèle réduit de l'ouvrage de Poniente. Cette étude vise à rechercher la meilleure méthode pour permettre de localiser le point d'impact (point 1) à partir de mesures ponctuelles d'accélérométrie. Deux possibilités se présentent à nous, la première consiste à reprendre les méthodes de localisation en fonction des temps d'arrivée des ondes sur les capteurs (accéléromètres ou jauges de déformation), cette méthode est utilisée pour la localisation des épicentres des séismes ; la seconde consiste à traiter le problème comme un problème inverse mais dans ce cas là, il faut au préalable déterminer les fonctions de transfert de l'ouvrage ou de la structure à traiter (détermination expérimentale ou analytique).

a. Détermination de la position de l'impact par détermination des temps d'arrivée

Pour effectuer la localisation de l'impact, il s'agit d'appliquer la méthode des cercles. Connaissant la vitesse de propagation des ondes dans la structure et les déphasages temporels d'arrivée des signaux à chaque accéléromètre, il est possible de déterminer la distance Ri à laquelle se trouve chaque accéléromètre du point d'impact. Cette distance Ri permet de tracer des cercles centrés sur chaque capteur.
Posons le problème :

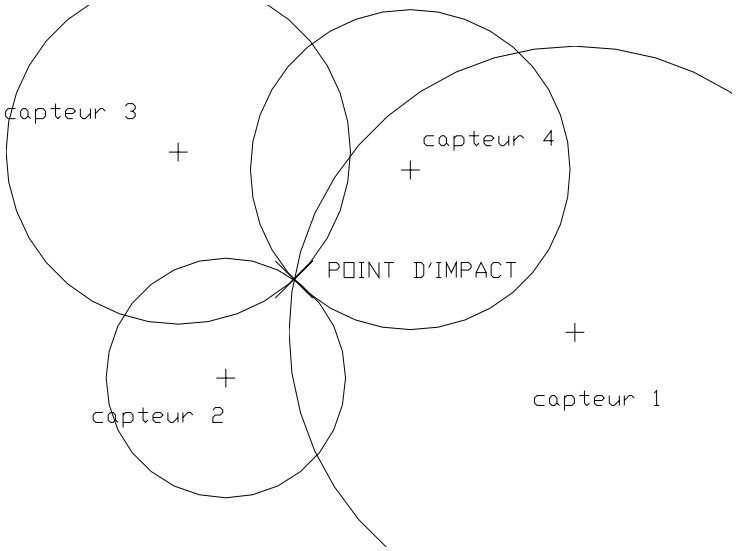
Données :	déphasage ti (i=1…n) pour chaque accéléromètre
	V : vitesse de propagation des ondes dans la structure
	Les coordonnées (Xi, Yi, Zi) de chaque capteur et la valeur Z de l'impact
Inconnues :	l'instant t0 de l'impact
	Les coordonnées (X, Y) du point d'impact
	Les rayons Ri des cercles

Système à résoudre :
Pour résoudre ce problème, il faut au minimum utiliser les résultats obtenus sur trois capteurs : on obtient donc le système à 6 équations et 6 inconnues suivants (pour les capteurs 1 à 3) :

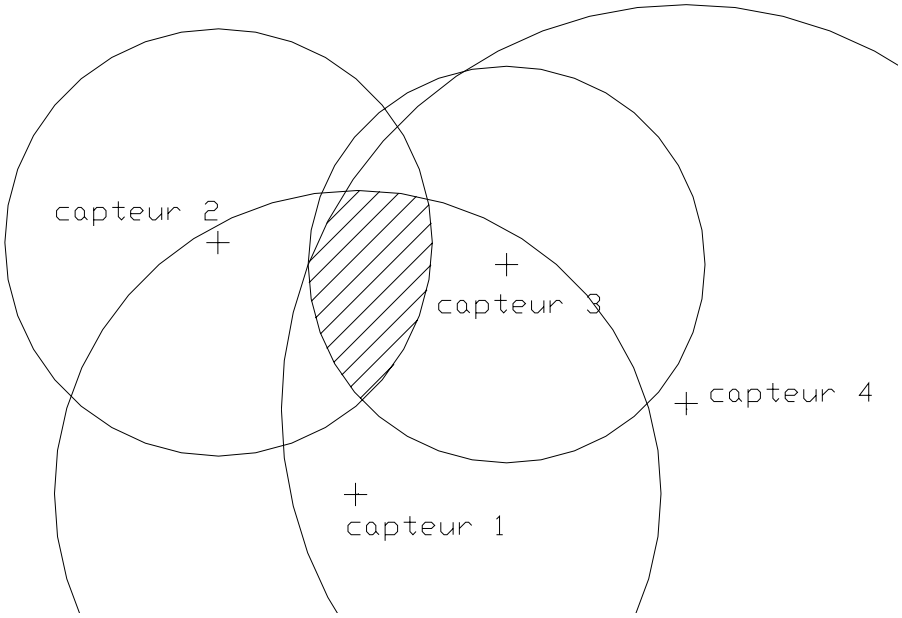
$$\begin{cases} R1 = V \times (t1-t0) \\ R2 = V \times (t2-t0) \\ R3 = V \times (t3-t0) \\ (X1-X)^2 + (Y1-Y)^2 + (Z1-Z)^2 = R1^2 \\ (X2-X)^2 + (Y2-Y)^2 + (Z2-Z)^2 = R2^2 \\ (X3-X)^2 + (Y3-Y)^2 + (Z3-Z)^2 = R3^2 \end{cases}$$

Voici deux schémas qui vont représenter le problème posé :

CAS IDEAL : une solution unique



CAS OBTENU : une infinité de solution



Pour obtenir la solution la plus proche possible de la réalité, il faudrait disposer d'un nombre très important de capteurs et d'un outil de calcul numérique très précis.

Application au modèle réduit de la dalle de Poniente :

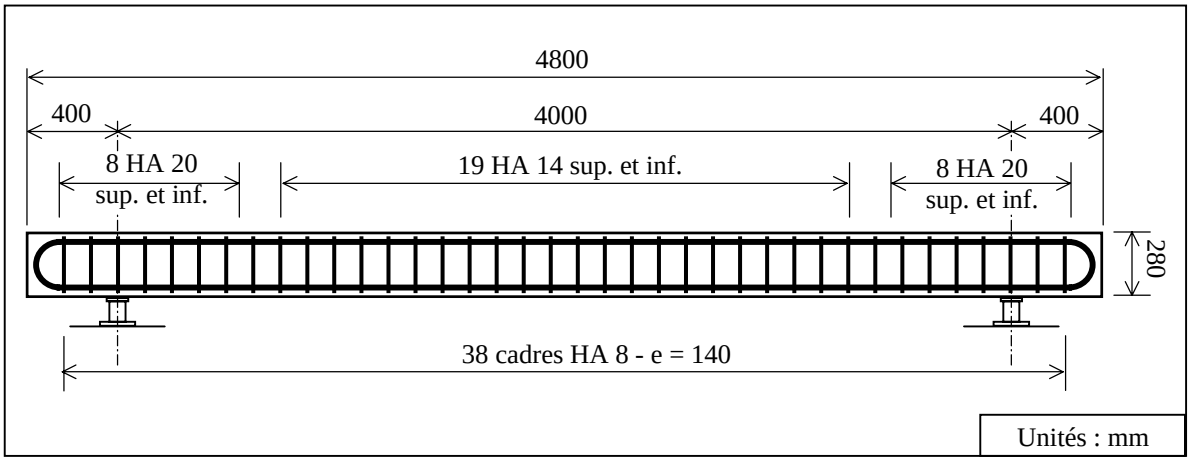
Dalle d'essai

La structure testée est une dalle en béton armé de 12 m par 4,80 m pour une épaisseur de 28 cm et pesant environ 40 t [Perrotin 2002]. Elle repose sur deux lignes d'appuis constituées de 11 appuis fusibles (appuis ponctuels) espacés de 1,14 m. Sa portée entre appuis est de 4 m.



vue générale de la dalle d'essai

Le ferraillage a été dimensionné par le bureau d'études Tonello IC afin que la dalle puisse reprendre un impact « exceptionnel » d'une énergie de 135 kJ. Les armatures sont des FeE 500 représentant une quantité de 270 kg d'acier par mètre cube de béton. Leurs dimensions et quantités sont récapitulées dans le tableau.



coupe dans le sens transversal de la dalle d'essai

Position	Direction	Armatures	Espacements (cm)	Taux d'armatures (%)	Taux d'armatures moyen (%)
Inférieure Partie centrale	Transversale	HA 16	10	0,71	0,53 *
	Longitudinale	HA 14	14	0,39	
Supérieure Partie centrale	Transversale	HA 16	10	0,71	0,53 *
	Longitudinale	HA 14	14	0,39	
Effort tranchant	Verticale	Cadres HA 8	Trans. = 14 Long. = 10	0,36	0,36

(*) $\rho = \sqrt{\rho_{long} \times \rho_{trans}}$

armatures de la dalle d'essai

Le béton a une résistance moyenne 30 MPa et il est confectionné avec un ciment portland CEM 32,5 R. Le rapport teneur en eau/teneur en ciment « w/c » est de l'ordre de 0,5 et le diamètre du plus gros granulat est d'environ 3 cm.

La dalle a été coulée à l'aide de deux camions toupie sur lesquels trois éprouvettes cylindriques de 16 cm de diamètre pour 32 cm de hauteur ont été prélevées. Les essais en laboratoire, ont donné une résistance moyenne à 28 jours de 30 MPa et un module d'Young de 30700 MPa (aucune différence significative entre les deux gâchées).

Blocs d'impact

Deux types d'impacteur sont utilisés suivant la quantité d'énergie souhaitée. Un bloc cubique en béton armé de 58 cm de coté, chanfreiné sur ses arrêtes et pesant environ 450 kg. Le second type d'impacteur est un bloc à facettes (14 faces) et pesant 810 kg. Le béton et les armatures ont les mêmes caractéristiques que celles de la dalle d'essai.

Le choix du matériau du bloc s'est porté sur du béton armé et non sur de l'acier, par exemple, car une masse volumique importante aurait entraîné un impacteur de trop faibles dimensions et donc non représentatif de la taille réelle d'un bloc. Un bloc rocheux aurait pu être directement utilisé mais l'inconvénient était la méconnaissance des caractéristiques exactes de l'impacteur et les risques de pertes d'énergie par fissuration. La forme du bloc est cubique ou à facettes et non sphérique pour des problèmes de bétonnage et de façonnage du ferraillage. De plus, un bloc rocheux comporte de nombreuses arrêtes et facettes et donc les blocs utilisés se rapprochent de la réalité.

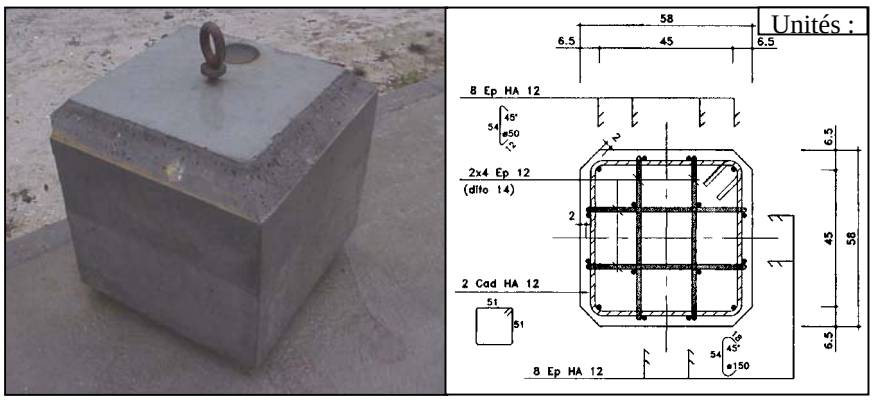
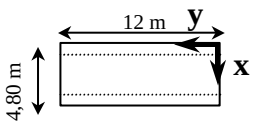


photo et coupe du bloc d'impact cubique de 450 kg

Recherche du point d'impact

Les analyses pour retrouver le point de chute de l'impacteur l'ont été sur la base de l'essai *T4* : un impact « exceptionnel » est effectué sur la zone réparée avec une énergie de 138 kJ (bloc de 470 kg lâché de 30 m) ;

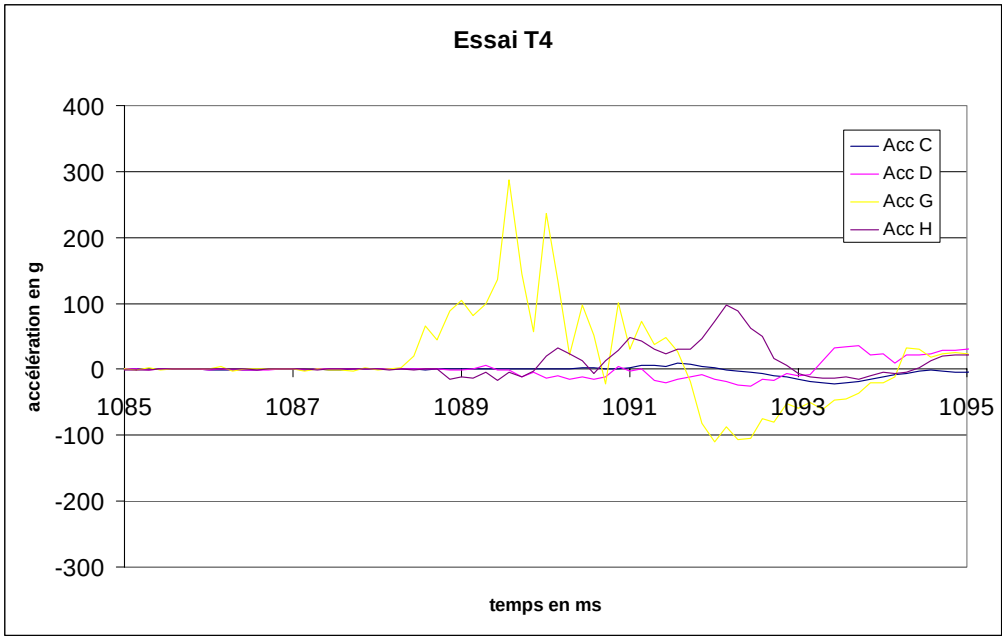
Essai	Énergie (kJ)	Bloc		Point d'impact	Surface d'impact	Essai statique	
		Masse (kg)	Hauteur (m)			Avant test	Après test
T4	138	470	30	En travée excentrée x = 2,16 m y = 3,00 m	Réparée après T2 (135 kJ)	S2	S4

Position de l'essai T4

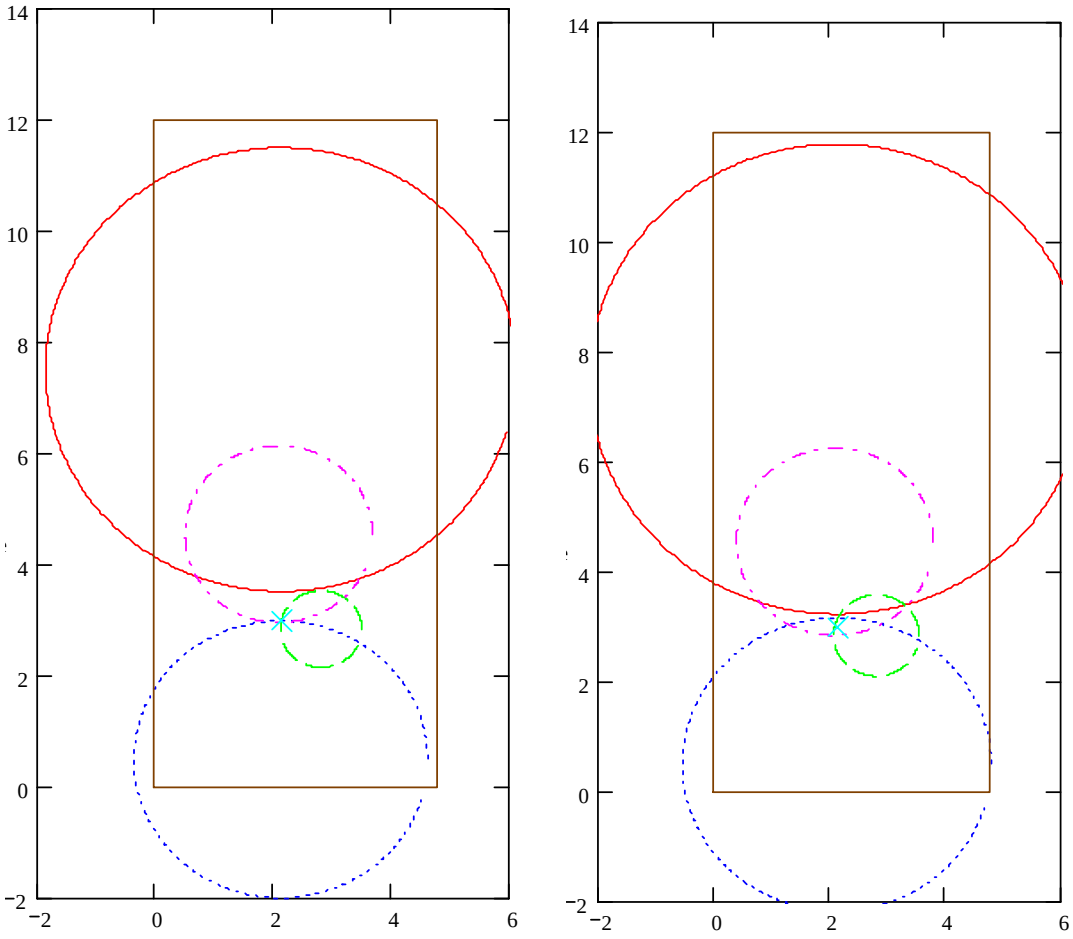
Pour retrouver le point d'impact et par rapport aux objectifs recherchés pour l'instrumentation de la dalle réelle, nous avons choisi de nous limiter à des capteurs de type accéléromètre ce qui permet de conserver une homogénéité des données en terme de précision et de niveau de dérivation. Le tableau suivant récapitule les capteurs utilisés pour l'analyse, l'erreur de chaque capteur et le temps d'arrivé des signaux. Le temps d'arrivé s'entend selon la même échelle de temps.

Capteur	Position en m	Bruit de fond	Début de signal en ms
Acc C	x = 2,147 y = 7,499	+ 0,65 - 0,52	1090,0000
Acc D	x = 2,146 y = 0,487	+ 0,47 - 0,55	1089,2857
Acc G	x = 2,831 y = 2,833	+ 4,13 - 7,37	1088,4286
Acc H	x = 2,113 y = 4,538	+ 0,59 - 0,94	1088,8571

Données provenant des capteurs



Tracé des signaux en fonction des accéléromètres



a- V = 2100 m/s

b- V = 2250 m/s

Recherche du point d'impact (X) avec calage sur la valeur de vitesse d'onde (t_0 = 1088,1 ms)

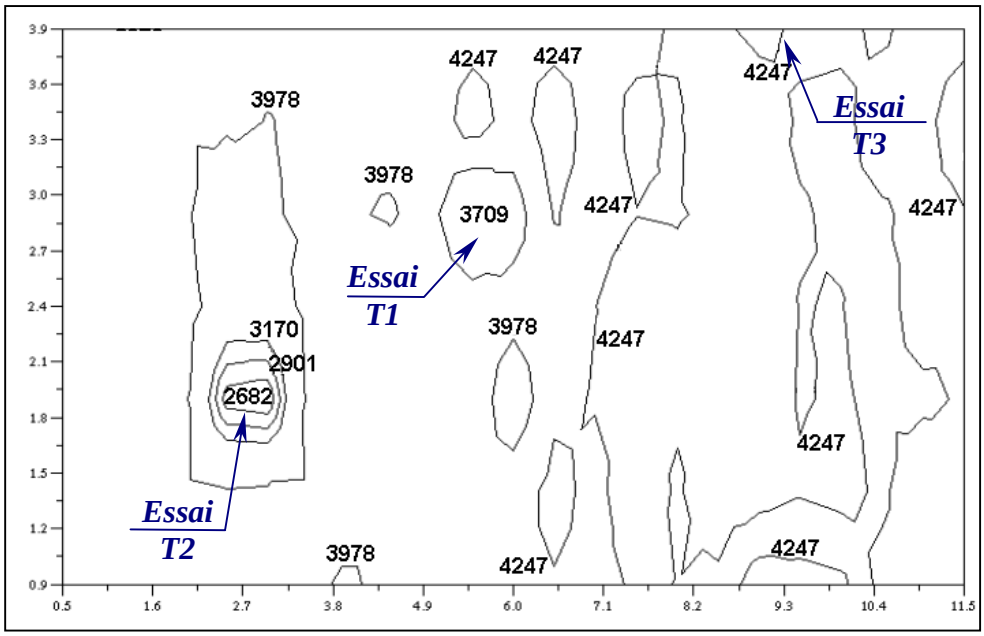
A partir de l'acquisition des signaux sur les accéléromètres, on dispose des temps d'arrivée aux capteurs. Si les mesures étaient parfaitement exactes et pour un matériau parfaitement homogène et élastique, il suffirait de choisir trois stations au hasard et on obtiendrait le bon résultat (position de l'impacteur unique). Mais nos mesures comportent forcément une part d'erreur dont l'origine provient par exemple d'une mauvaise identification de l'onde, ou bien d'une erreur de l'horloge, ou bien encore d'une erreur de lecture de l'opérateur et surtout le matériau est fortement hétérogène.

C'est un problème classique qui se résout numériquement. La solution consiste à minimiser les erreurs entre la solution trouvée et chacune des données. Cette méthode est de loin la plus employée et la plus précise d'autant que le nombre de stations est élevé [EOST 2007].

Résultats obtenus

Comme nous pouvons le voir sur les figures précédentes, il est difficile d'obtenir avec une bonne précision le positionnement de l'impacteur, les incertitudes qui entachent les mesures conduisent à un défaut de positionnement dans le sens x de 1,00m et dans le sens y de 0,60m. Ce qui n'est pas précis pour une dimension d'ouvrage de 12,00 x 4,80 m. De plus cette analyse ne nous permet pas de retrouver l'effort ou l'énergie d'impact. D'un autre coté cette "mauvaise" précision permet déjà d'identifier correctement le secteur de chute du bloc, ce qui en terme de gestion de risque est déjà intéressant.

La première difficulté de traitement provient de la disparité des vitesses au sein de la structure en fonction des zones traversées. Effectivement l'ouvrage peut avoir été endommagé lors de précédents chocs comme il est possible de le voir sur la figure suivante.



Résultats de l'analyse par ultrasons après la campagne d'essais I (vitesse en m.s^{-1})

L'analyse par ultrasons, effectuée après la première campagne d'essais, montre que la célérité dans une zone de béton saine est de 4250 m.s^{-1}. Pour la zone endommagée par le choc «exceptionnel », elle diminue jusqu'à 2680 m.s^{-1} contre 3710 m.s^{-1} dans la zone impactée par le choc « courant ». De plus la surface fissurée est plus étendue lors du choc « exceptionnel »

que lors du choc « courant ». Or comme nous avons pu le voir, il a fallu recaler la vitesse à une valeur de l'ordre de 2250 m/s. Sans revenir sur le fait que cette valeur peut également subir des différences selon les trajets entre le point d'impact et un accéléromètre donné, elle montre surtout un écart majeur avec les mesures par ultrasons : l'influence du ferraillage longitudinal et transversal et l'importance des zones fissurées sont sûrement une partie de l'explication.

Pour les prochains tests nous prévoyons une approche par analyse inverse qui présente l'avantage d'être plus précise mais également de pouvoir remonter au chargement sur la structure. Cette démarche a déjà pu être mise en place et maîtrisée dans le cas des avalanches pour des structures métallique [Berthet-Rambaud et al 2007]. Son adaptation au cas des ouvrages en béton a bien progressé et nous sommes confiant sur les avancées quelle nous permettra.

4. Conclusion

Ce financement du PGRN s'inscrit dans un contexte plus large et ambitieux de l'instrumentation d'une galerie pare-bloc en situation et de l'exploitation des mesures pour caractériser l'évolution de l'état de l'ouvrage mais aussi se servir de ce dernier comme capteur d'aléa utile pour la gestion du risque.

Ainsi dans ce cadre et à moyen terme, il s'agit de :

- Finaliser l'alimentation électrique
- Terminer la mise en place l'ensemble du matériel qui est d'ores et déjà approvisionné, dont les accéléromètres financés en partie par le PGRN
- Démarrer les mesures au moins sur des plages temporelles intéressantes et en procédant à un point "zéro" en utilisant des techniques de suivi dynamique [Cremona & al 2005] pour caractériser les propriétés intrinsèques de comportement de cet ouvrage.

A ce jour, la situation décrite est restée telle quelle pour plusieurs raisons :

- La fin du chantier a du se réaliser en limitant au maximum les perturbations et les interfaces pour rouvrir cet itinéraire fréquenté en temps et en heure.
- Le groupement de laboratoires qui s'était rassemblé sur le sujet a postulé pour la deuxième fois à l'appel d'offre ANR (projet "A_SCOOPS : Aléa rocheux, Suivi, Comportement et Optimisation d'Ouvrages Pare-blocs en Situation") et sur l'appel d'offre RDT mais sans succès malgré des évaluations globalement positives. Ces sources possibles de financement qui conditionnaient pour beaucoup la poursuite des travaux scientifiques ont forcément mis un frein à l'ensemble de la démarche, expliquant la grand partie du retard pris.
- Techniquement avec un financement plus incertain, la question de l'alimentation électrique est venue encore plus directement impacter ce projet original : en effet, l'acquisition en continu et à des fréquences relativement élevées sur de nombreuses voies nécessite un niveau d'énergie suffisant que l'utilisation de batteries ne permettait pas correctement .

Pour autant et malgré ces difficultés inhérentes à toute démarche innovante, le projet se veut toujours dynamique autour de quelques personnes pour voir aboutir à terme le fonctionnement de l'installation scientifique. Cet objectif est en particulier motivé par les investissements qui

ont déjà pu être réalisés en temps mais aussi financièrement et de manière très importante par la Diren, le Pôle Grenoblois et les autres partenaires (bourse de thèse du Cluster Environnement de la région Rhône-Alpes) et pour se tenir prêt en cas d'appel d'offre plus favorable, tant le sujet mérite à notre sens d'être approfondi. Pour autant le projet ne pourra aboutir sans la contribution des différents acteurs techniques, scientifiques, opérationnels et institutionnels.

5. Bibliographie

[Berthet-Rambaud 2004] BERTHET-RAMBAUD P, Structures rigides soumises aux avalanches et chutes de blocs: modélisation du comportement mécanique et caractérisation de l'interaction "phénomène-ouvrage", Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, France.

[Berthet-Rambaud et al 2007] BERTHET-RAMBAUD P, LIMAM A., BAROUDI D., THIBERT E., TAILLANDIER J-M Characterisation of avalanche loading on impacted structures : a new approach based on inverse analysis à paraître dans Journal of Glaciology

[Cremona & al 2005] CREMONA C, DIELEMAN L, FOGLI M, INCHAUSPE M-H, Evaluation dynamique expérimentale des ouvrages, sous la direction de, Revue Européenne de Génie-Civil, Vol. 9/1-2, 2005.

[Delhomme 2005] DELHOMME F, Étude du comportement sous impact d'une structure pare-blocs en béton armé. Thèse de doctorat. Université de Savoie. 2005.

[Interreg IIC 2001] Programme INTERREG II C "Falaises", Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises, 2001, 239 p.

[Montani Stoffel 1998] MONTANI STOFFEL S, Sollicitation dynamique de la couverture des galeries de protection lors des chutes de blocs, Thèse de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausane, 1998, Suisse.

[Perrotin & al 2002] PERROTIN P., MOMMESSIN M., MOUGIN J-P. & TONELLO J., Etude Expérimentale du Comportement d'une Dalle Pare-Bloc, Revue Française de Génie Civil, vol. 6, 2002.

[Tonello 2001] TONELLO J., Couverture pare-blocs structurellement dissipante, Label IVOR 01.1. Mission Génie Civil, Ministère de l'Equipement, France.

[Yen 1995] Yen C-S., Wu E., On the inverse problem of rectangular plates subjected to elastic impact, Part 1: Method development and numerical verification, Journal of applied Mechanics, september 1995, Vol. 62.

[Bennani 2001] Bennani A. Détermination par une analyse dynamique et une méthode inverse de la fonction de chargement d'une structure, Thèse de l'université Claude Bernard, Lyon, France

[Hu 2007] N. Hu, H. Fukunaga, S. Matsumoto, B. Yan and X.H. Peng. An efficient approach for identifying impact force using embedded piezoelectric sensors, *International Journal of Impact Engineering, Volume 34, Issue 7, July 2007, Pages 1258-1271*

[Jacquelin 2003] E. Jacquelin, A. Bennani and P. Hamelin. Force reconstruction: analysis and regularization of a deconvolution problem *Journal of Sound and Vibration, Volume 265, Issue 1, 31 July 2003, Pages 81-107*

[Liu 2002] G. R. Liu, W. B. Ma and X. Han. An inverse procedure for identification of loads on composite laminates, Composites Part B: Engineering, Volume 33, Issue 6, September 2002, Pages 425-432

[Andreas 2001] Andreas P. Christoforou, Abdallah A. Elsharkawy and Lotfi H. Guedouar, An inverse solution for low-velocity impact in composite plates, Computers & Structures, Volume 79, Issues 29-30, November 2001, Pages 2607-2619

[EOST 2007] Documents pédagogiques de l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de STRASBOURG, Septembre 2007 , http://eost.u-strasbg.fr/pedago/Accueil.html